

El Sistema de Grabación y Reproducción Sonora
Ambiofónico

Realizado por Pablo García Cepeda
Septiembre 2013





PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

E.U.I.T. TELECOMUNICACIÓN

TEMA: El Sistema de Grabación y Reproducción Sonora Ambiofónico

TÍTULO: El Sistema de Grabación y Reproducción Sonora Ambiofónico

AUTOR: Pablo García Cepeda

TUTOR: Antonio Pedrero **Vº Bº.**

DEPARTAMENTO: DIAC

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Magdalena Gonzalez Martín

VOCAL: Francisco Javier Tabernero Gil

VOCAL SECRETARIO:

DIRECTOR:

Fecha de lectura: 30/09/2013

Calificación: **El Secretario,**

RESUMEN DEL PROYECTO:

Este proyecto pretende ahondar en las imperfecciones del sistema de registro y reproducción sonora más extendido en la actualidad, el sistema estereofónico. A su vez se hace un breve análisis de otros sistemas actuales de recreación de campos sonoros (Método de Reconstrucción de Frente de Onda, Ambisonics...) cuyo fin es buscar la mayor precisión, esto es, sensación de realidad en el oyente, centrado el trabajo en el sistema Ambiofónico. Como parte práctica se pretende incluir en el proyecto una serie de grabaciones musicales mediante el empleo de diferentes técnicas de grabación y reproducción con el fin de realizar comparaciones prácticas.

Resumen del PFC: El Sistema de Grabación y Reproducción Ambiofónico

Este proyecto fin de carrera trata del sistema de grabación y reproducción sonora ambiofónico, destacar que este sistema y la tecnología que emplea es de dominio público. La ambiofonía se basa en un amalgama de investigaciones recientes y de los ya bien sabidos principios psicoacústicos y binaurales. Estos avances han expandido nuevas fronteras en lo concerniente a la grabación y reproducción de audio, así como de presentar al oyente un campo sonoro a la entrada de sus oídos lo más parecido posible al campo sonoro al que se expondría al oyente en el momento y lugar de la toma de sonido, es decir, reconstruye un campo sonora binaural.

Este sistema ha podido desarrollarse, de una manera bastante satisfactoria, gracias a todos los estudios y textos anteriores en materia de psicoacústica y del mecanismo de escucha humano. Otro factor gracias al cual es posible y asequible, tanto el desarrollo como el disfrute de esta tecnología, es el hecho que en nuestros días es muy económico disponer de ordenadores lo suficientemente potentes y rápidos para realizar el procesado de señales que se requiere de una manera bastante rápida.

Los desarrolladores de dicha tecnología han publicado diversos documentos y archivos descargables de la red con aplicaciones para la implementación de sistemas ambiofónicos de manera gratuita para uso privado. El sistema ambiofónico se basa en la combinación de factores psicoacústicos ignorados o subestimados y lo ya sabido sobre las propiedades acústicas de salas, tanto de salas en las que tienen lugar las ejecuciones musicales (auditorios, teatros, salas de conciertos...), como de salas de escucha (salones de domicilios, controles de estudios...).



En la parte práctica del proyecto se van a realizar una serie de grabaciones musicales empleando tanto técnicas estereofónicas tradicionales como ambiofónicas de grabación con el fin de describir y comparar ambas técnicas microfónicas. También servirá para estudiar hasta que punto es favorable subjetivamente para el oyente el hecho de realizar la toma de sonido teniendo en cuenta las propiedades del sistema de reproducción ambiofónico. Esta comparación nos dará una idea de hasta donde se puede llegar, en cuanto a sensación de realidad para el oyente, al tener en cuenta durante el proceso de grabación efectos como la respuesta del pabellón auditivo del oyente, la cual es única, y que posteriormente la diafonía interaural va a ser cancelada mediante un procesado digital de señal.



Abstract: The Ambiofonic Recording and Playback System

This final project is about the ambiofonic recording and playback system, note that this system and the technology it uses is of public domain. Ambiofonic is based on an amalgam of recent research and to the well known and binaural psychoacoustic principles. These advances have expanded new frontiers with regard to the audio recording and playback, as well as to present the listener a sound field at the entrance of their ears as close as possible to the sound field that would the listener be exposed to at the time and place of the musical interpretation, so we can say that ambiofonic reconstructs a binaural sound field .

This system has been developed, in a fairly satisfactory way, thanks to all the studies and previous texts on psychoacoustics and human listening mechanism. Another factor by which it is possible and affordable, both the development and the enjoyment of this technology, is the fact that in our days is inexpensive to use our own computers that are powerful and fast enough to perform the signal processing that is required in a short time.

The developers of this technology have published several documents and downloadable files on the network with applications for ambiofonic system implementation for free. Ambiofonic is based on a combination of factors ignored or underestimated psychoacoustically and what is already known about the acoustic properties of rooms, including rooms where musical performances take place (auditoriums, theaters, concert halls...), and listening rooms (concert halls, studios controls...).

In the practical part of the project will be making a series of musical recordings using both traditional stereo recording techniques and



recording techniques compatible with ambiophonics in order to describe and compare both recording techniques. It will also examine to what extent is subjectively favorable for the listener the fact of considering the playback system properties of ambiophonics during the recording stage. This comparison will give us an idea of how far can we get, in terms of sense of reality to the listener, keeping in mind during the recording process the effects introduced by the response of the ear of the listener, which is unique, and that the subsequently interaural crosstalk will be canceled by a digital signal processing.



ÍNDICE

- **Capítulo 0: Introducción**.....pag. 7

- **Capítulo 1: Historia e Imperfecciones del Sistema Estereofónico**.....pag. 8
 - 1.1-** Breve Historia del Sistema Estereofónico.....pag. 8

 - 1.2-** Anécdota histórica: ¿es posible engañar al público?.....pag. 15

- **Capítulo 2: Sistemas de Reproducción Sonora Binaural**.....pag. 17
 - 2.1-** Proceso de Escucha Binaural.....pag. 17

 - 2.2-** Ambisonics.....pag. 20

 - 2.3-** Método de Reconstrucción de Frente de Onda.....pag. 23

- **Capítulo 3: El Concepto de Realismo en la Reproducción Sonora**.....pag. 28
 - 3.1-** Qué Entendemos por Realismo en la Reproducción de Sonido.....pag. 28

 - 3.2-** El Oído Externo.....pag. 30

 - 3.3-** Respuesta del Pabellón Auditivo.....pag. 37



En la parte práctica del proyecto se van a realizar una serie de grabaciones musicales empleando tanto técnicas estereofónicas tradicionales como ambiofónicas de grabación con el fin de describir y comparar ambas técnicas microfónicas. También servirá para estudiar hasta que punto es favorable subjetivamente para el oyente el hecho de realizar la toma de sonido teniendo en cuenta las propiedades del sistema de reproducción ambiofónico. Esta comparación nos dará una idea de hasta donde se puede llegar, en cuanto a sensación de realidad para el oyente, al tener en cuenta durante el proceso de grabación efectos como la respuesta del pabellón auditivo del oyente, la cual es única, y que posteriormente la diafonía interaural va a ser cancelada mediante un procesado digital de señal.



- **Capítulo 4: El Problema de la Diafonía Interaural**.....pag. 47
 - 4.1- La Diafonía Interaural.....pag. 48
 - 4.2- La Ilusión Sonora del Estéreo.....pag. 54

- **Capítulo 5: Características Acústicas de una Sala de Conciertos**.....pag. 60
 - 5.1- Características de la Sala de Conciertos.....pag. 60

- **Capítulo 6: Características Acústicas de una Sala de Escucha**.....pag. 69
 - 6.1- Características de la Sala de Escucha.....pag. 69

- **Capítulo 7: El Sistema de Grabación Ambiofónico**.....pag. 81
 - 7.1- El Ambiófono.....pag. 85

- **Capítulo 8: El Sistema de Reproducción Ambiofónico**.....pag. 90
 - 8.1- Altavoces para Sistemas Ambiofónicos.....pag. 91
 - 8.1.1- Altavoces Frontales.....pag. 93
 - 8.1.2- Altavoces Frontales Radiando Primeras Reflexiones.....pag. 95



8.1.3- Altavoces Laterales y Traseros para Radiar Campo Reverberante.....	pag. 96
8.2- Convolución del Ambiente.....	pag. 97
8.3- Características del Ambiente de una Sala.....	pag. 99
8.3.1- Descripción de Parámetros que Rigen la Respuesta de una Sala.....	pag. 100
8.3.2- Ajustando los Parámetros del Ambiente para la Escucha Ambiofónica.....	pag. 103
8.3.3- Reconstrucción del Ambiente.....	pag. 111
· Capítulo 9: Parte Práctica.....	pag. 113
9.1- Objetivos de la Parte Práctica.....	pag. 113
9.2- Implementación del Ambiófono.....	pag. 114
9.3- Descripción del Material y Métodos Empleado para las Tomas de Sonido.....	pag. 116
9.3.1- Microfonía Empleada.....	pag.117
9.3.2- Previos de Micrófono.....	pag. 119
9.3.3- Flujo de Señal en la <i>DAW</i>	pag. 119
9.4- Cancelación de Diafonía en la Reproducción.....	pag. 119



9.5- Comparación entre Sistemas.....pag. 121

· Apéndice: Conclusiones.....pag. 123

· Referencias y Bibliografía.....pag. 125



CAPITULO 0: INTRODUCCION

Este proyecto fin de carrera trata del sistema de grabación y reproducción sonora ambiofónico, destacar que este sistema y la tecnología que emplea es de dominio público. La ambiofonía se basa en un amalgama de investigaciones recientes y de los ya bien sabidos principios psicoacústicos y binaurales. Estos avances han expandido nuevas fronteras en lo concerniente a la grabación y reproducción de audio, así como de presentar al oyente un campo sonoro a la entrada de sus oídos lo más parecido posible al campo sonoro al que se expondría al oyente en el momento y lugar de la toma de sonido.

Este sistema ha podido desarrollarse, de una manera bastante satisfactoria, gracias a todos los estudios y textos anteriores en materia de psicoacústica y del mecanismo de escucha humano. Otro factor gracias al cual es posible y asequible, tanto el desarrollo como el disfrute de esta tecnología, es el hecho que en nuestros días es muy económico disponer de ordenadores lo suficientemente potentes y rápidos para realizar el procesado de señales que se requiere de una manera bastante rápida.

Los desarrolladores de dicha tecnología han publicado diversos documentos y archivos descargables de la red con aplicaciones para la implementación de sistemas ambiofónicos de manera gratuita para uso privado. El sistema ambiofónico se basa en la combinación de factores psicoacústicos ignorados o subestimados y lo ya sabido sobre las propiedades acústicas de salas, tanto de salas en las que tienen lugar las ejecuciones musicales (auditorios, teatros, salas de conciertos...), como de salas de escucha (salones de domicilios, controles de estudios...).



CAPITULO 1: HISTORIA E IMPERFECCIONES DEL SISTEMA ESTEREFÓNICO

1.1- Breve Historia del Sistema Estereofónico.

El 14 de diciembre de 1931, un ingeniero de sonido de E.M.I. llamado Alan Dower Blumlein rellenó una patente (British Patent Specification 394325 [1]) llamada "Mejoras en y en lo Relativo a la Transmisión del Sonido, Registro Sonoro y Sistemas de Reproducción Sonora" (Improvements in and Relating to Sound-Transmission, Sound-Recording and Sound-Reproducing Systems). Su patente consistía en un sistema de transmisión de sonido en el cual el sonido se captaba mediante varios micrófonos y se reproducía mediante varios altavoces; lo que conllevaba usar dos o más micrófonos directivos y/o una disposición de circuitos o dispositivos por medio de los cuales la sonoridad relativa del altavoz se hace dependiente de la dirección de llegada del sonido al micrófono.



Figura1.1. Alan Blumlein.



En su patente, Blumlein, no empleó el termino "estereofónico", pero si que utilizaba el termino "binaural". Se sabía ya 50 años antes de Blumlein que dos micrófonos separados una distancia semejante a la anchura de una cabeza humana, alimentando un par de auriculares en una posición remota, producían una imagen sonora realista con una localización sólida y estable. El problema era que todas las fuentes sonoras parecían proceder del interior de la cabeza del sujeto de prueba, lo que en psicoacústica se denomina "efecto de internalización" [2]. Lo que Blumlein buscaba era externalizar este efecto binaural empleando altavoces. Externalizar el efecto binaural sobre una esfera completa de 360 grados es todavía el Santo Grial de la Ingeniería de Sonido.

El 14 de junio de 1933 se le otorgó a Blumlein la patente de lo que hoy conocemos como sistema de reproducción estereofónico. Con lo que la disposición triangular de altavoces-oyente para la reproducción sonora tiene ya 80 años de antigüedad. En una sociedad en la que los avances tecnológicos se suceden a gran escala y que en menos 10 años dispositivos de telecomunicaciones se quedan ya obsoletos por el desarrollo de nuevas tecnologías, parece que va siendo hora de llevar las investigaciones de Blumlein un paso más allá.

Blumlein sabía que su sistema de reproducción sonora empleando dos altavoces ampliamente separados presentaba carencias, y era consciente de que cosas estaban bien y que cosas daban problemas. Por contra, su sistema de captación sonora tenía muy pocos fallos, propuso el sistema de microfonía estéreo coincidente. Pero el impresionante avance sobre el sistema de reproducción monoaural era tal que no había por que señalar detalladamente las imperfecciones teóricas de las que sufría; además, quería que se le otorgara la patente y que su invento se usase. En un párrafo que discute las diferencias entre las diferencias de fase en bajas frecuencias y las diferencias de intensidad en altas frecuencias en



proporcionar información sobre la localización escribió: "Se puede demostrar, como quiera que sea, que las diferencias de fase necesarias a la entrada de los oídos para percibir la localización a bajas frecuencias no solo se producen por diferencias de fase en los altavoces (los cuales se comunican con ambos oídos), sino que se requiere diferencias de intensidad en los altavoces para dar el efecto de que existe diferencia de fase" [3].

Lo que Blumlein quería decir es que un defecto inevitable del sistema podía convertirse en una ventaja en un caso. No podía evitar que las señales radiadas por ambos altavoces llegasen a ambos oídos (el altavoz izquierdo llega al oído izquierdo y al derecho, y el altavoz derecho llega al oído derecho y al izquierdo) en bajas frecuencias. Así que ideó una disposición microfónica que tenía en cuenta esta diafonía entre altavoces en baja frecuencia para proporcionar la información sobre localización de un suceso sonoro en una banda de frecuencia relativamente estrecha, donde el oído solo puede interpretar la información de localización de la fuente sonora mediante diferencias de fase interaurales. Con lo que la diafonía entre canales se convirtió en un mal necesario para el caso de micrófonos coincidentes. A lo que se refería Blumlein es que, si se hace una toma de sonido con micrófonos coincidentes, estos micrófonos producirán señales que no tendrán ningún tipo de diferencias de fase entre ellas, en bajas frecuencias; luego la diafonía inevitable del sistema de reproducción estereofónico salvaría la situación pero creará problemas en las diferencias de intensidad, que son la base de la localización en altas frecuencias; cosa de la que Blumlein era consciente pero no podía apreciar en toda su magnitud debido a la limitada respuesta en frecuencia de los equipos de la época con los que trabajaba.

La disposición microfónica ideada por Blumlein consistía en colocar dos micrófonos con patrón polar bidireccional, de forma coincidente pero con las cápsulas de los micrófonos formando 90° . De tal forma que la



parte positiva de la polaridad de cada micrófono forma 45° con el eje de 0° del resultado de la suma del array.

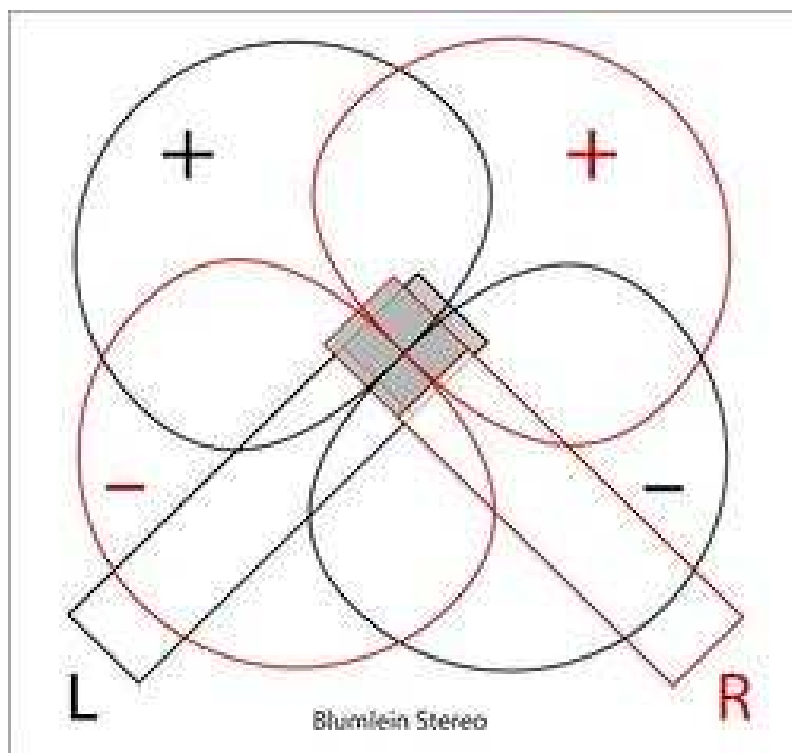


Figura 1.2. Diagrama de directividad del par Blumlein.

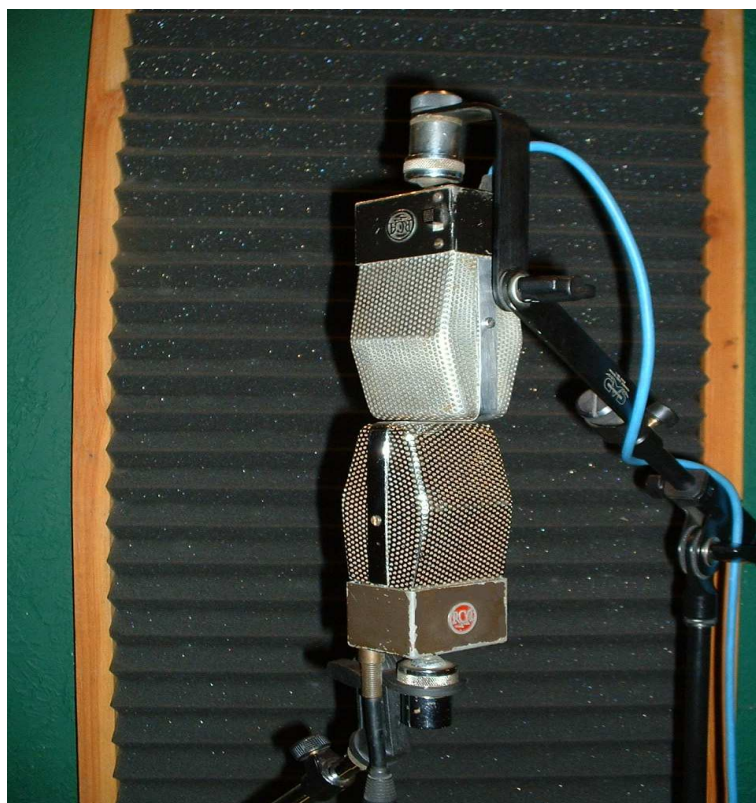


Figura 1.3. Foto de disposición microfónica de Blumlein.

Vamos a analizar como la diafonía entre altavoces ayuda en baja frecuencia; en bajas frecuencias podemos asumir que cualquier sonido radiado por un altavoz produce la misma presión sonora en los dos oídos ya que la cabeza no resulta muy efectiva atenuando el sonido con longitudes de onda grandes. Resulta fácil entender que la señal que llega al oído que está más alejado del altavoz tenga un ligero retraso en tiempo respecto a la que llega al oído más cercano al altavoz. Ahora imaginemos que hay un segundo altavoz radiando la misma señal en baja frecuencia, con lo que este nuevo par de señales que llegan a los oídos se combinarán con el par de señales anteriores para formar una nueva onda de presión sonora. Cuando dos señales, con la misma forma pero amplitudes diferentes y con un retardo fijo entre ellas, se suman, el resultado es una nueva onda trasladada en fase. En un oído la señal más sonora se suma con otra de igual forma pero menos sonora y desfasada respecto a esta; mientras que en el otro oído se suman la señal menos sonora con la otra más sonora y desfasada. El resultado de todo esto son señales con la misma amplitud pero con desfases diferentes en cada oído, creándose así una diferencia de fase interaural entre los oídos, la cual es proporcional a las diferencias de intensidad originales existentes en los micrófonos.



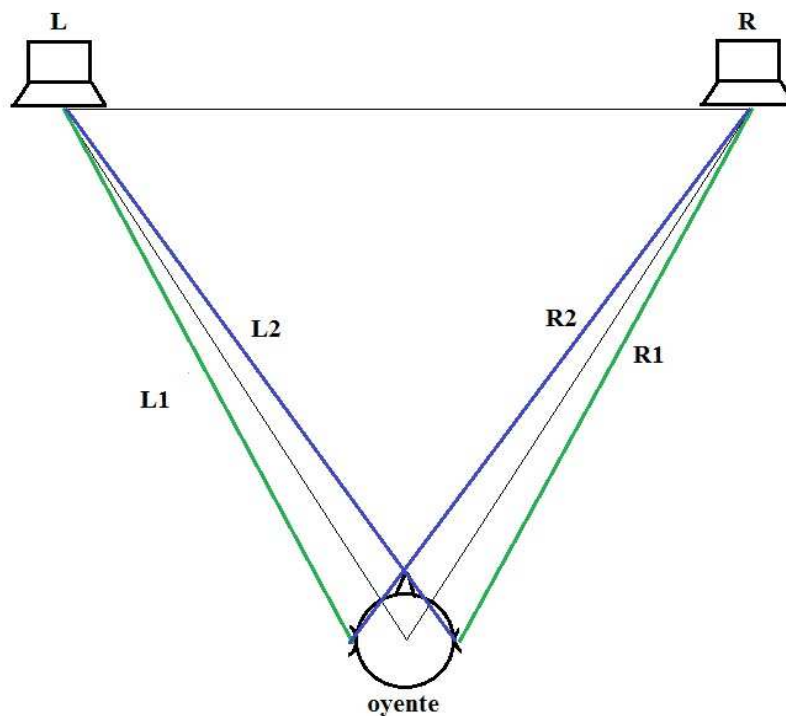


Figura 1.4. Disposición estereofónica estándar. Cuatro señales alcanzan al oyente. En una situación de escucha de fuentes sonoras reales las señales "L2" y "R2" no existirían.

Al usar una técnica de microfonía no coincidente, como por ejemplo micrófonos espaciados una distancia parecida a la anchura de la cabeza humana, la diafonía puede causar un emborronamiento de la localización de las fuentes sonoras. Blumlein sabía y entendía que esta diafonía inevitable e inherente a su sistema causaba problemas en la localización de las altas frecuencias. Hoy en día se sabe que este problema, de que ambos altavoces alcancen a ambos oídos, es el responsable de que sea imposible para un sistema estereofónico estándar, o sus hermanos mayores de sonido envolvente (5.1, 7.1...) de crear un campo sonoro en el oyente que sea realista y tener enfrente la ilusión sonora de un escenario real.

Pero todavía hay más, Blumlein comprendió que la anchura del escenario de la imagen sonora que se podía crear con su sistema de altavoces estaba limitada al espacio existente entre los altavoces debido a

la diafonía, un defecto al cual no dió demasiado importancia ya que estaba interesado en instalar su sistema de altavoces muy separados en grandes salas con escenarios pequeños o cines con pantallas estrechas en comparación con la profundidad de la sala.

Parece fácil entender por que la máxima anchura del escenario creado por el sistema estereofónico esta limitado por el ángulo formado por el oyente y los dos altavoces en la disposición estereofónica estándar (60° en frente del oyente). Pongamos un ejemplo para ilustrar esta carencia del sistema estereofónico: supongamos que una fuente sonora, por ejemplo un saxofón, esta situado en el escenario en la parte de la derecha, a 80° de una disposición microfónica estéreo, que hace las veces de oyente. Supongamos también que la señal que alcanza al micrófono de la izquierda es despreciable en comparación con la que alcanza al micrófono derecho, con lo que el altavoz izquierdo no debería radiar ninguna señal audible durante la reproducción. Si los altavoces están colocados en la disposición estereofónica estándar (formando un triangulo equilátero con el oyente) el sonido del saxofón parecerá que esta localizado en la posición del altavoz derecho, es decir a 30° a la derecha del oyente y no en su posición original, a 80° .

No obstante muchas personas hemos escuchado grabaciones estereofónicas que a veces producen imágenes sonoras que parecen venir de más allá del espacio comprendido entre los altavoces y algunos audiófilos creen que si pudieran conseguir las mejores grabaciones, altavoces, cables y componentes electrónicos, la imagen estereofónica se abriría. Pero Blumlein era consciente de este hecho y llevo a escribir: "si se desea dar la impresión de que la fuente sonora se ha movido a una posición más allá del espacio entre los altavoces las redes de modificación pueden estar dispuestas para invertir la fase de ese altavoz remoto del cual se desea que aparezca la fuente, y esto será suficiente para dar la impresión deseada para ese sonido de baja frecuencia" [4]. Lo anterior



tiene sentido en el caso escenas de películas en las que se podría invertir la fase de un altavoz brevemente para mover el diálogo o un efecto de sonido fuera de la pantalla, pero, como se sabe, dejar un altavoz fuera de fase en el caso de reproducir música mediante el triángulo estereofónico no funciona bien.

Con lo que Blumlein explicó por encima el por que a veces las imágenes sonoras aparecen más allá de la posición de los altavoces. Cualquier inversión de fase inadvertida en un micrófono en una mezcla (suma de señales), o un altavoz fuera de fase, o un gran desfase en la red de filtros de un filtro de cruce de un altavoz de tres o de cuatro vías o una reflexión del muro detrás de un altavoz en dipolo demuestran que escenarios sonoros más anchos pueden existir, de alguna manera, al reproducirse mediante el sistema estereofónico estándar.

Con lo queda claro que mediante la disposición estereofónica, codificación envolvente o grabaciones multicanal (5.1, 7.1...) nunca se conseguirá externalizar el efecto binaural.

1.2- Anécdota histórica: ¿es posible engañar al público?

En los años 50 Gilbert Briggs (Wharferdale Loudspeakers) y Ed Vilchur (fundador de Acoustic Research) realizaron un a serie de experimentos en el Carnegie Hall y Carnegie Recital Hall. Para el experimento se dispone de unos altavoces en el escenario y músicos interpretando música en directo; consiste en ver si el oyente es capaz de diferenciar cuando los músicos están tocando y cuando lo que escuchan es una grabación. Ningún oyente percibió la diferencia.

Esto deja patente que para nuestro cerebro es muchísimo más importante la coherencia psicoacústica de las señales de ambiente



El Sistema de Grabación y Reproducción Sonora Ambiofónico (reverberación y primeras reflexiones) que la calidad de nuestro equipo de reproducción, bastante insignificante comparado con lo anterior, ya que en esa época el experimento se realizaría con un par de amplificadores de baja potencia a válvulas, una grabación que seguramente era mono y unos altavoces alejados de los estándares de calidad de hoy día.



Figura 1.4. Carnegie Hall.



CAPITULO 2: SISTEMAS DE REPRODUCCIÓN SONORA **BIANURAL**

En esta capítulo vamos a hacer una breve descripción de los sistemas de grabación y reproducción sonora capaces de externalizar el efecto binaural en el oyente, esto es, entregar a la entrada del oído un campo sonoro réplica del campo sonoro al que el oyente estaría sometido si se encontrase en el lugar donde se realizó la toma de sonido durante la ejecución musical. Existen tres sistemas bastante avanzados en este campo: la Ambiofonía (del cual trata el resto del proyecto y por tanto no se hablará de él en este capítulo), la tecnología de Ambisonics y el Método de Reconstrucción de Frente de Onda (Wavefront Reconstruction Method). Estas tecnologías son las candidatas a desbancar a los sistemas de reproducción sonora envolventes actuales.

2.1- Proceso de Escucha Binaural.

Se sabe que, en el objetivo de satisfacer al oyente presentándole un campo sonoro que se acerque lo más posible a la realidad, el obstáculo a superar en el campo de la reproducción sonora, son las enormes diferencias en la forma física de los oídos entre diferentes oyentes y las diferentes respuestas que conllevan.

Vamos a analizar muy brevemente lo que se sabe de momento acerca del mecanismo de escucha binaural:

- El cerebro del oyente percibe la dirección de incidencia de la onda sonora, así como la distancia relativa la que se encuentra dicha fuente, analizando las señales a la entrada de ambos tímpanos.



- El efecto que producen (sobre la respuesta en frecuencia de las señales que llegan al tímpano) la sombra acústica de la cabeza, el torso y las convoluciones que tienen lugar en el oído externo son dependientes de la dirección de incidencia de la onda de presión acústica radiada por la fuente a localizar.

- La respuesta de los pabellones auditivos son radicalmente diferentes entre individuos y entre los oídos de un mismo individuo. Estas respuestas son tan únicas en las personas como las huellas dactilares.

- La localización en el plano horizontal se determina mediante diferencias de presión entre los oídos, tanto en amplitud como en fase.

- Las diferencias en las repuestas del oído de cada oyente son máximas para fuentes centrales.

Las figuras 2.1, 2.2 y 2.3 muestran la respuesta de ambos oídos de tres oyentes diferentes para fuentes centrales.

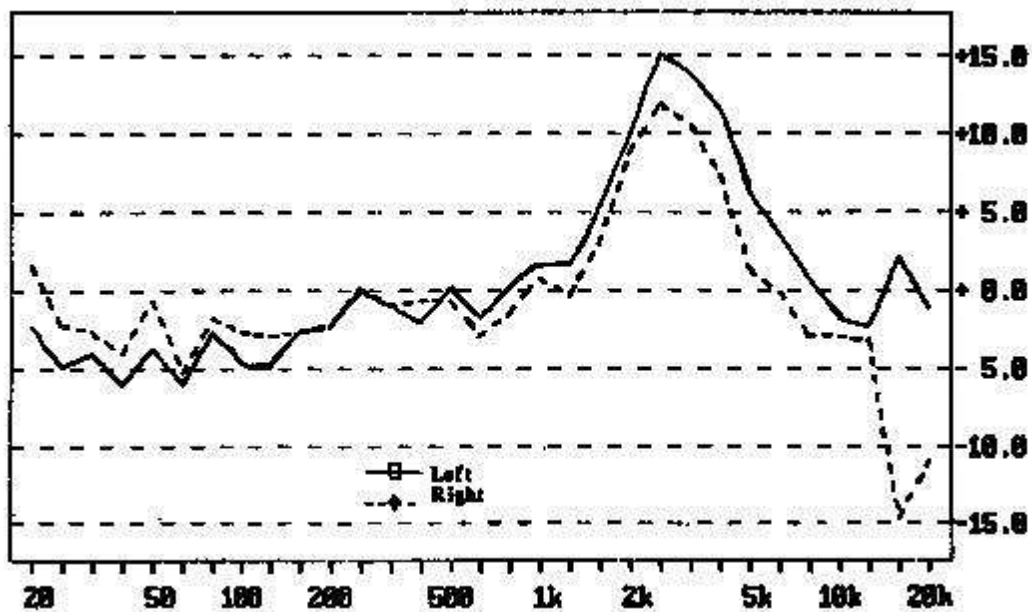


Figura 2.1. Respuesta de ambos oídos para una fuente central, sujeto 1.



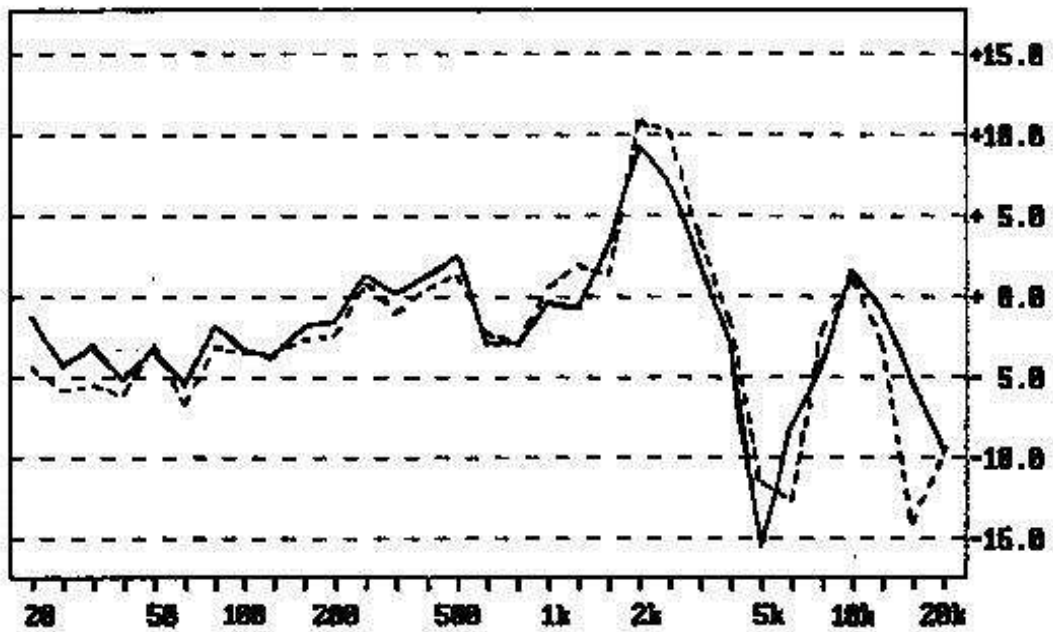


Figura 2.2. Respuesta de ambos oídos para una fuente central, sujeto 2.

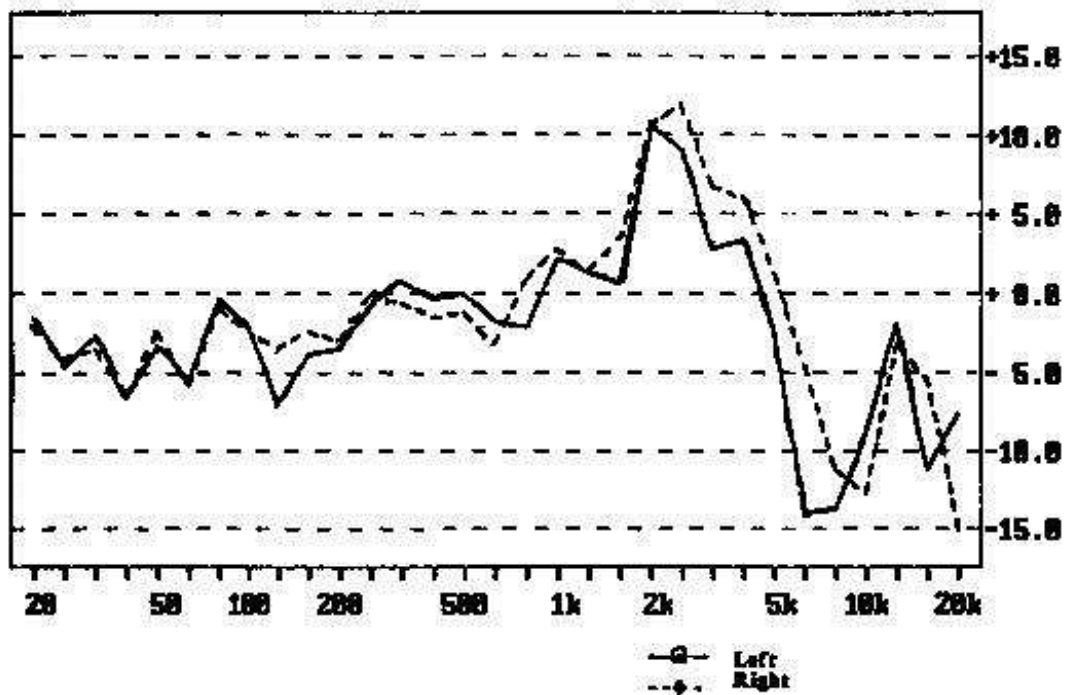


Figura 2.3. Respuesta de ambos oídos para una fuente central, sujeto 3.

Mirando las curvas se demuestra claramente la existencia de diferencias entre las respuestas de cada oído de un oyente, así como las diferencias entre oyentes.



2.2- Ambisonics.

La tecnología empleada por el sistema de grabación y reproducción llamado Ambisonics parte del concepto de reproducción sonora cuadrafónico y pretende solucionar sus carencias y limitaciones. El sistema cuadrafónico de reproducción se fundamenta en dos conceptos totalmente erróneos desde el punto de vista psicoacústico:

- La idea de que con solo cuatro altavoces formando un cuadrado, con el oyente situado en el punto medio, se puede recrear o sintetizar un campo sonoro, empleando únicamente diferencias de nivel entre altavoces para crear fuentes fantasma. El resultado es una pésima localización, con fuentes sonoras ancladas a la posición de los altavoces, además de limitarse mucho espacialmente el punto de escucha ideal.

- Se pueden codificar los cuatro canales necesarios en dos para posteriormente reconstruir los cuatro canales en reproducción.

Con lo que podemos describir el sistema Ambisonics como un conjunto de técnicas de grabación y reproducción sonora multicanal. Mediante codificación y decodificación de señales captadas por micrófonos podemos recrear un campo sonoro bidimensional (en el plano horizontal) o tridimensional (esfera entra). Fué inventado por Michael Gerzon del Mathematical Institute de Oxford, quién, desarrolló las bases teóricas y prácticas al principio de los años setenta.

El sistema Ambisonics mide la intensidad y la dirección de movimiento de las compresiones y enrarecimientos de todas las ondas sonoras incidentes en el mejor punto de escucha del auditorio para después reproducir correctamente la presión sonora y su característica direccional en una zona que por lo menos abarca la cabeza de un oyente.



En este método se realiza una disposición microfónica coincidente compuesta por tres micrófonos ocupando la misma posición espacial; registrando una representación completa del nivel de presión sonora así como de la característica direccional de la onda sonora. En la reproducción, los altavoces se disponen rodeando al oyente, y producen ondas sonoras que convergen en un punto (en el centro de la cabeza del oyente) para reproducir las mismas compresiones y enrarecimientos, incluyendo sus características direccionales, que existirían en el punto donde se colocó la disposición microfónica en el auditorio.



Figura 2.4. Disposición microfónica (dos micrófonos bidireccionales y uno omnidireccional) y sala de escucha compatibles con Ambisonics.

Vamos a enumerar una serie de ventajas o mejoras que ofrece este sistema frente a otros sistemas multicanal mucho más extendidos:

- Todos los altavoces pueden radiar sonido directo y no solo

ambiente; por lo que todos los altavoces contribuyen a recrear el campo sonoro, lo que conlleva mejor localización para fuentes sonoras laterales y traseras.

- La estabilidad de la imagen sonora varía mucho menos con la posición relativa del oyente que con la mayoría de sistemas de sonido envolvente.

- Solo hace falta registrar tres señales en la toma de sonido para recrear un campo sonoro localizado en todo el plano horizontal (serían necesario cuatro canales para captar la información necesaria para reproducir un campo sonoro tridimensional).

Pero también tiene una serie de puntos que hacen bastante improbable que acabe siendo una tecnología de consumo de masas:

- No tiene ningún respaldo por sellos o compañías discográficas, por lo que es un sistema bastante desconocido para el usuario común.

- Se requiere de un decodificador para Ambisonics en la reproducción y existen muy pocos modelos comerciales.

Con todo esto entendido, la ventaja de este método es que se pueden producir señales directas que provengan de cualquier dirección, no dependiendo de las fuentes fantasmas del sistema de Blumlein, lo que le hace muy adecuado para eventos no musicales o sonido en cine. Pero como este método requiere de micrófonos especiales, un mínimo de tres (o mejor aún, cuatro) canales a grabar, un gran número de altavoces con el fin de poder generar ondas sonoras desde multitud de direcciones para reconstruir el frente de onda de forma precisa, así como un decodificador muy complejo no parece una tecnología extensible al consumo de las



masas; además este sistema no ofrece ninguna mejora al amplio repertorio de grabaciones existentes (CDs, LPs...).

2.3.- Método de Reconstrucción de Frente de Onda.

El Método de Reconstrucción de Frente de Onda (Wavefield Reconstruction Method) fué desarrollado en 1988 por el profesor A.J. Berkhout en la Delft University of Technology en Holanda.

Se basa en el Principio de Huygens que dicta que cualquier frente de onda puede ser descompuesto en una superposición de fuentes esféricas puntuales; con lo que podemos reconstruir y sintetizar cualquier campo sonoro a partir de la suma de los campos producidos por fuentes sonoras puntuales. También emplea como base matemática la integral de Kirchoff-Helmholtz que describe como el campo de presión sonora se puede determinar en un volumen en el que no existen fuentes sonoras, siempre que si se conocen la presión sonora y la velocidad de las moléculas en todos los puntos de su superficie. En la práctica un PC controla un gran array de altavoces excitados individualmente (cada uno con una señal diferente) en el instante de tiempo en el que la onda recreada lo atravesaría.



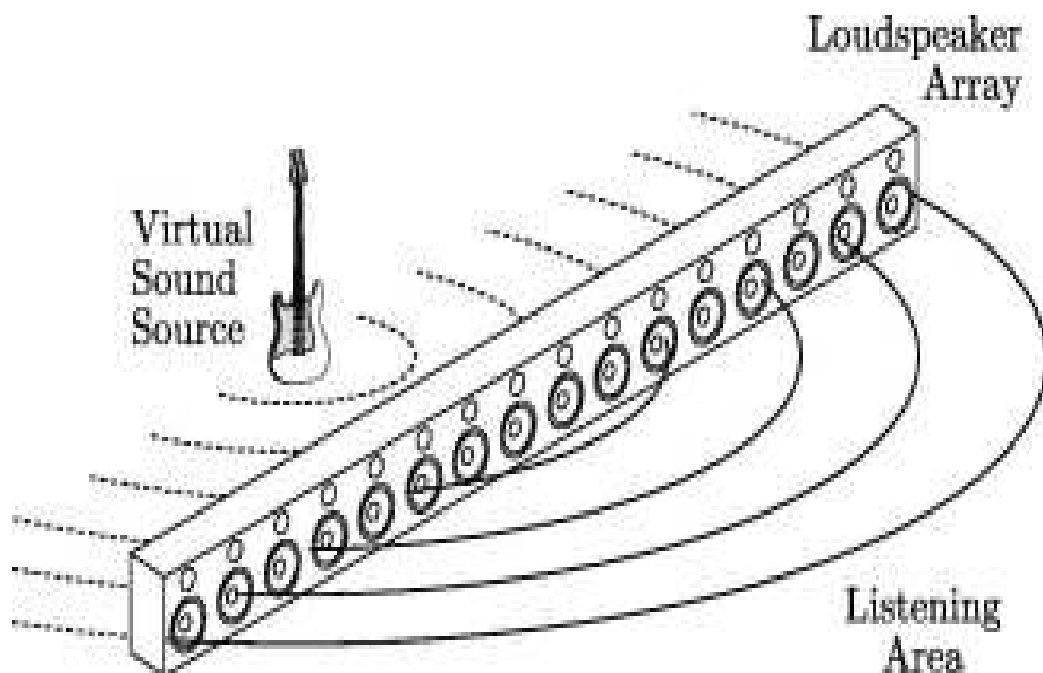


Figura 2.5. Ilustración de como un frente de onda de una fuente sonora se reconstruye a partir de la superposición de fuentes puntuales.

En el momento de la reproducción sonora, toda la superficie del volumen (nuestra sala de escucha) estaría cubierta de altavoces muy próximos entre sí, cada uno de los cuales es excitado individualmente. Además, la sala debería ser lo más anecóica como fuese posible para mantener el concepto de que en dicho espacio no existen fuentes sonoras, lo que en la práctica es casi imposible.



Figura 2.6. Sala de escucha compatible con el Método de Reconstrucción de Frente de Onda

El supuesto origen del frente de onda sintetizado puede ser cualquier punto en el plano horizontal de los altavoces. Representa la fuente sonora virtual, la cual difiere muy poco de la sensación subjetiva que obtendríamos al escuchar la fuente sonora real en su posición original. Al contrario que ocurre en el sistema estereofónico, las fuentes virtuales no se mueven de sitio al moverse el oyente por la sala de escucha. Para fuentes que han de provenir de una posición más alejada al oyente que los altavoces del array, se radiarán frentes de ondas convexas. Fuentes sonoras que han de provenir de más cerca que el array, se radiarán frentes de onda cóncavos focalizados en la fuente virtual y que vuelven a diverger.

Se distinguen tres tipos de fuentes sonoras elementales en este sistema:

- Fuentes sonoras puntuales virtuales situadas detrás del array de altavoces: este tipo de fuente sonora puede ser percibida por cualquier oyente que se encuentre dentro de la zona de escucha. Se percibe como

una fuente sonora fija en una posición aunque el oyente se mueva por la zona de escucha

- Ondas Planas: se producen cuando se posiciona una fuente sonora en una posición aparentemente infinitamente lejos del oyente y siempre detrás del array de altavoces. Estas fuentes sonoras no se corresponden con ningún tipo de fuente sonora que pudiésemos encontrar en la naturaleza. Para poner un ejemplo visual, consideremos el caso de ir viajando en tren o en coche, si miramos al Sol durante un rato, da la sensación de que nos sigue sin cambiar de posición, es decir mantiene la misma posición angular relativa con dicho viajero. Por lo que podríamos movernos por nuestra sala de escucha y nos daría la sensación de que la fuente sonora siempre incide desde el mismo ángulo.

- Fuentes sonoras puntuales situadas delante del array de altavoces: los principios por los que se rige el Método de Reconstrucción de Fuente de Onda permiten crear imágenes sonoras dentro de la zona de escucha, donde no existen fuentes físicas. Estos hologramas sonoros se crean cuando un frente onda radiado por el array de altavoces convergen en una posición fija dentro de la zona de escucha. Por lo que en el espacio comprendido entre el array de altavoces y la nueva fuente sonora, el campo sonoro es impreciso y confuso.



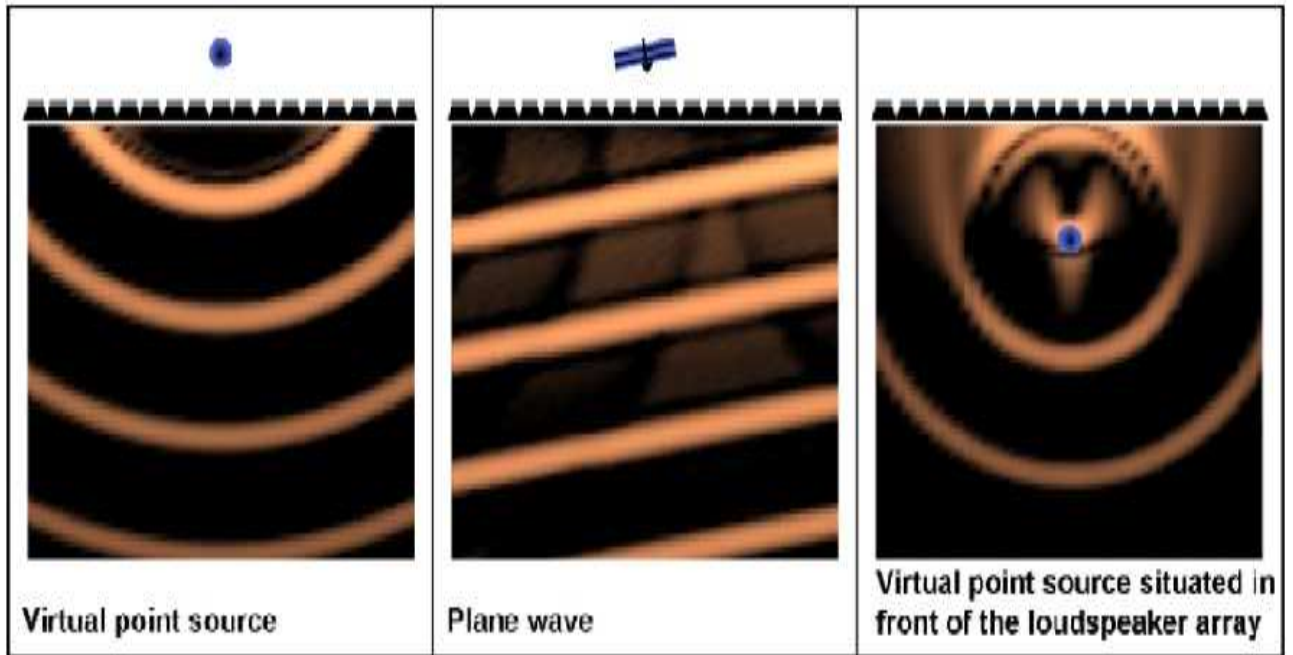


Figura 2.6. Ilustración de los tipos de fuentes elementales del Método de Reconstrucción de Frente de Onda.

Ambos métodos (WRM y Ambisonics) son binaurales, es decir, duplican a la entrada del oído lo que ese oído escucharía en una situación real. Ambos intentan entregar a la entrada de los oídos una réplica exacta del campo sonoro original.

La Ambiofonía tiene la ventaja de que solo necesita registrar dos canales, se necesitan solo dos altavoces y un número escalable de altavoces de ambiente opcionales. Aunque usar un maniquí sin oído externo produce los mejores resultados, esta tecnología no deja obsoletos el repertorio existente en la actualidad destinado a ser reproducido en un sistema estereofónico, es más, mejora o realza la experiencia de escuchar música. Este sistema es bastante independiente de la geometría de la sala en la que se instala el sistema, ya que los altavoces frontales se colocan muy cerca el uno del otro.

CAPITULO 3: EL CONCEPTO DE REALISMO EN LA REPRODUCCIÓN SONORA

3.1- Qué Entendemos por Realismo en la Reproducción de Sonido.

Lo que se entiende por realismo en la reproducción sonora es la generación de un campo sonoro suficientemente realista como para satisfacer cualquier sistema oído-cerebro normal que se encuentra en el mismo espacio que los intérpretes, esto es, un espacio que podría existir físicamente y que las fuentes sonoras en este espacio son tan fáciles de localizar como en la vida real y tienen todo su cuerpo o carácter sonoro. Un matiz que conviene aclarar es que realista no significa necesariamente preciso; mientras que la localización de la fuente sonora en la reproducción se produzca de manera precisa y sin esfuerzo alguno, como en la vida real, la fuente sonora reproducida no tiene por que ser radiada desde la misma posición en la que se encontraba en el escenario al realizar la grabación. Por ejemplo si se ha realizado una grabación con un escenario de 120º de ancho pero se reproduce en un sistema dispuesto en 90º, lo que realmente significa realismo en este contexto es que el oyente se ha movido hacia atrás en el auditorio reproducido unas veinte filas desde la primera fila, pero cualquier perspectiva del escenario puede ser legítimamente real. También, la localización de la fuente sonora a solas no garantiza que esa fuente suene real. Por ejemplo una grabación de un piano empleando un sistema monofónico o estereofónico es fácil de localizar pero casi nunca suena real. Destacar que una persona puede experimentar realismo monofónico como cuando se escucha a una orquesta en directo desde la última fila de una balconada, pero es imposible adivinar (sin mirar) en que lado se encuentran los metales, por ejemplo. Con lo que podemos afirmar que se puede experimentar la



sensación de realismo, aunque no se tenga una localización detallada de las fuentes del escenario, mientras el ambiente sonoro que rodea al oyente sea correcto.

Si comparamos directamente las dos situaciones siguientes: (a) música interpretada en directo en un auditorio, y (b) reproducción del mismo evento en un sistema estereofónico; enseguida nos damos cuenta de que algo falta en nuestro sistema estereofónico. Lo que falta es consistencia psicoacústica, y percibimos el campo sonoro como incompleto. Solo tendremos la sensación de que el campo sonoro que se nos presenta es real cuando todos los mecanismos fisiológicos y psicoacústicos son satisfechos simultáneamente y no existe ninguna contradicción. Lo que nos lleva a pensar en que si supiésemos como funcionan todos los mecanismos que intervienen en el proceso de escucha, podríamos desarrollar un sistema de grabación reproducción sonora que sería muy realista. Ahora partamos de que no conocemos todas las características del oído o como varía en función de una persona a otra, o más aún que relevancia dentro de la cadena tienen las diferentes partes del sistema auditivo, solo podemos hacer una cosa hasta que logremos entenderlo todo; lo que Manfred Schroeder sugirió hace ya más de cuarto de siglo, y entregarle a los oídos una réplica exacta de lo que esos mismos oídos habrían escuchado si el oyente estuviese presente donde y cuando el sonido se generó originalmente. Con lo que el concepto parece claro, para conseguir que las grabaciones musicales suenen reales, debemos entregar a los oídos la misma presión sonora en la entrada de sus canales auditivos, como si ese oyente remoto se encontrara en mitad de la sesión de grabación. Por suerte para nosotros, solo se necesitan registrar dos canales, ya que más canales sería contraproducente, como veremos más adelante.

La filosofía es que todas las señales ya sean señales directas o de



ambiente provengan lo más cerca posible a donde se localizarían en la realidad. Según esto, la reverberación del auditorio en el que se ha realizado la grabación, debería llegar a los oídos desde muchas direcciones, tanto lateralmente como desde detrás del oyente. Las primeras reflexiones deberán también alcanzar el oyente desde una combinación apropiada de adelante, a los lados y detrás del oyente. Esta es la razón de porque solo con los altavoces traseros de un sistema 5.1 nunca se podrá entregar ambientes que nos satisfagan psicoacústicamente. Del mismo modo, fuentes sonoras que se encuentren en el centro del escenario deberían radiarse desde el frente y no desde dos altavoces separados 60° del oyente, y la inclusión en nuestro sistema un altavoz central no es muy buena idea ya que aumentaría la diafonía entre altavoces situados delante del oyente.

3.2- El Oído Externo.

Un hecho importantísimo a tener en cuenta, y que ha sido ignorado o subestimado es, que tanto la forma física como la respuesta que produce el oído externo es tan única como la huella dactilar de cada individuo. Para destacar su importancia vamos a analizar un caso concreto: la grabación sonora empleando micrófonos con maniqués (dummy-heads) los cuales incorporan un oído externo. Se ve claramente que, si se reproduce esta grabación mediante altavoces, todas las señales pasan a través de dos oídos externos, uno de los cuales no es ni siquiera el del oyente. Si en vez de altavoces se utilizan auriculares que comprimen el oído externo o del tipo que se incrusta en canal auditivo externo, el efecto es como si escucharas con el oído externo de otra persona con lo que hay componentes direccionales erróneas para altas frecuencias. El resultado de todas estas anomalías en la reproducción sonora es que el sonido parece provenir del interior de la cabeza del



individuo (efecto de internalización). Si el maniquí no tiene el oído externo moldeado, y la escucha se realiza mediante auriculares, no existe ningún oído externo en toda la cadena de mecanismos que intervienen en el proceso de escucha y el resultado otra vez es la internalización del suceso sonoro, como si se produjese dentro de nuestras cabezas, cosa que dista mucho de la realidad de una interpretación musical en directo.

Cualquier sistema de reproducción que se base en las fuentes fantasma, lo que incluye no solo al estéreo sino la mayoría de versiones de sonido surround, nunca podrán alcanzar el realismo necesario para satisfacer a nuestro cerebro aunque consigan una sólida localización de las fuentes sonoras. No podemos obtener el realismo simplemente por añadir ambiente a un sistema de reproducción basado en fuentes fantasma frontales. Tecnologías como Ambisonics, binaural (empleando auriculares) y el sistema ambiofónico no hacen uso de las fuentes fantasma para localizar fuentes sonoras enfrente del oyente y por lo tanto, en teoría, deberían sonar mucho más realistas que el sistema estereofónico, y de hecho la mayoría de las veces lo hacen.

Como nuestro objetivo es entregarle al sistema oído-cerebro todo lo que necesita para percibir el campo sonoro como real, no es necesario demostrar que la respuesta del oído externo es mucho más importante que otros mecanismos empleados en el proceso de escucha, aunque los hechos apuntan en esta dirección. El ser humano, al tratarse de un animal cazador-recolector, parece de vital importancia detectar la dirección del seseo de una serpiente, llamadas de pájaros o tambores de guerra; si además tenemos en cuenta que el tamaño de nuestra cabeza provoca un aumento de la sensibilidad a partir de 700 Hz, esto parece justificarse por si solo. La compleja falta de linealidad de las estructuras del oído externo y sus pequeñas dimensiones hace casi imposible definir la respuesta matemáticamente y se ve rápido que la función exacta es demasiado



compleja e individual para comprenderla y mucho menos engañar al cerebro. Las convoluciones que tienen lugar en las cavidades y pliegues del oído externo son tantas y tan variadas que es muy difícil crear una respuesta dependiente de la dirección de incidencia. La idea es que da igual las componentes de alta frecuencia de un sonido concreto o de que dirección proviene un sonido transitorio, que los oídos externos en combinación con la cabeza, o incluso un oído externo a solas, producirá un patrón que el cerebro aprende a reconocer e interpretar con el fin de decidir la localización de una fuente sonora.

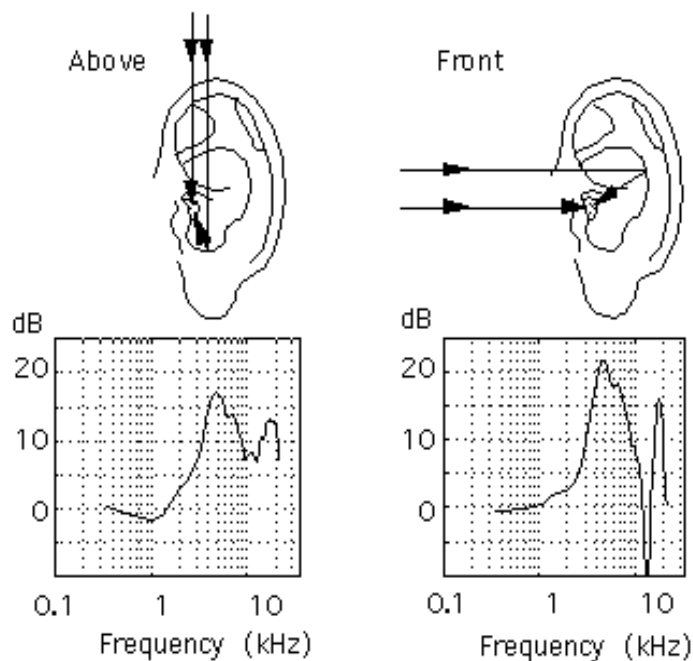


Figura 3.1. Ejemplo de respuestas del oído externo para dos direcciones de incidencia, desde arriba y desde el frente del oyente.

Podemos describir el oído externo como un sistema mecánico que produce patrones de respuestas en frecuencia en función de la dirección de incidencia de la onda sonora. Cabe preguntarse si merece la pena poder escuchar frecuencias por encima de 10 kHz si no somos capaces de localizarlas. El oído externo produce respuestas incluso en la octava más alta. Las curvas desarrolladas por Moller de las funciones del oído externo

y la cabeza en función de la frecuencia y la dirección de incidencia son tan complejas que los patrones son prácticamente irresolubles y muy difíciles de medir con personas reales. Con lo que queda claro que aunque no sepamos la respuesta del oído de ninguna persona, mientras no caigamos en errores psicoacústicos, y mantengamos buenas respuestas en frecuencia de dispositivos, margen dinámico, nivel de sonoridad, baja distorsión y especialmente el carácter directivo de fuentes sonoras y ambientes durante la reproducción, podremos entregar al oyente una réplica exacta del campo sonoro al que estaría sometido si se encontrase en el lugar y momento de la ejecución musical.

Para poder reproducir un campo sonoro como el de una sala de conciertos en casa, primero necesitamos saber las exigencias mínimas del oído para aceptar el campo sonoro presentado como real. Aunque no se sabe todo lo relativo a como el oído percibe la distancia, posiciones angulares horizontales y verticales, tamaño y tipo de sala, etc., se sabe suficiente como para permitir al sistema ambiofónico recrear una variedad de campos sonoros.

Las únicas partes del mecanismo auditivo en las que nos vamos a centrar son el oído externo y la existencia de dos oídos separados por una cabeza. Parece evidente que nuestro oído externo modifica la respuesta en frecuencia de las ondas sonoras en función del ángulo de incidencia, también parece evidente que la forma del oído externo es única en cada individuo. Para dar una idea aproximada del comportamiento del oído externo en el plano horizontal, se han realizado medidas con micrófonos miniaturizados insertados en los canales auditivos de un sujeto, dando una respuesta plana hasta 1 kHz. Para la mayoría de las personas la función crece a partir de 1 kHz, a la vez que la parte trasera del oído externo interactúa y refleja el sonido hacia el canal auditivo. A 3 kHz aproximadamente se alcanza un pico nada estrecho de unos 11 dB,



después del cual la respuesta cae hasta -10 dB en aproximadamente 10 kHz para luego volver a subir. Por lo que se ve claramente como el oído externo provoca respuestas nada despreciables (diferencias de 21 dB) las cuales son únicas de cada individuo y las diferencias entre individuos son imposibles de corregir mediante ecualizadores.

Pongamos otro ejemplo, para un sonido que proviene lateralmente, en el oído más cercano a la fuente sonora, la función de la respuesta del oído externo crece lentamente a partir de 200 Hz aproximadamente, hasta alcanzar unos 15 dB a $2,5$ kHz, vuelve a caer 1 dB a 5 kHz y vuelve a subir hasta 12 dB a 7 kHz para luego caer a 4 dB a 10 kHz. Esta respuesta lateral es muy diferente de la respuesta obtenida con la fuente sonora situada delante del oyente, por lo que se ve claramente lo sensibles que somos a la dirección de la que proceden los sonidos, aunque solo se escuche con un oído. Para sonidos que provienen de atrás, el oído externo provoca un valle de 23 dB entre $2,5$ kHz y 10 kHz. Para sonidos que provienen de arriba o de abajo el oído externo también genera diferentes patrones que ayudan al cerebro a descifrar la información sonora. Con lo que parece claro que para lograr un sistema de reproducción sonora que sea realista el sonido generado debe llegar al punto de escucha desde una posición correcta.



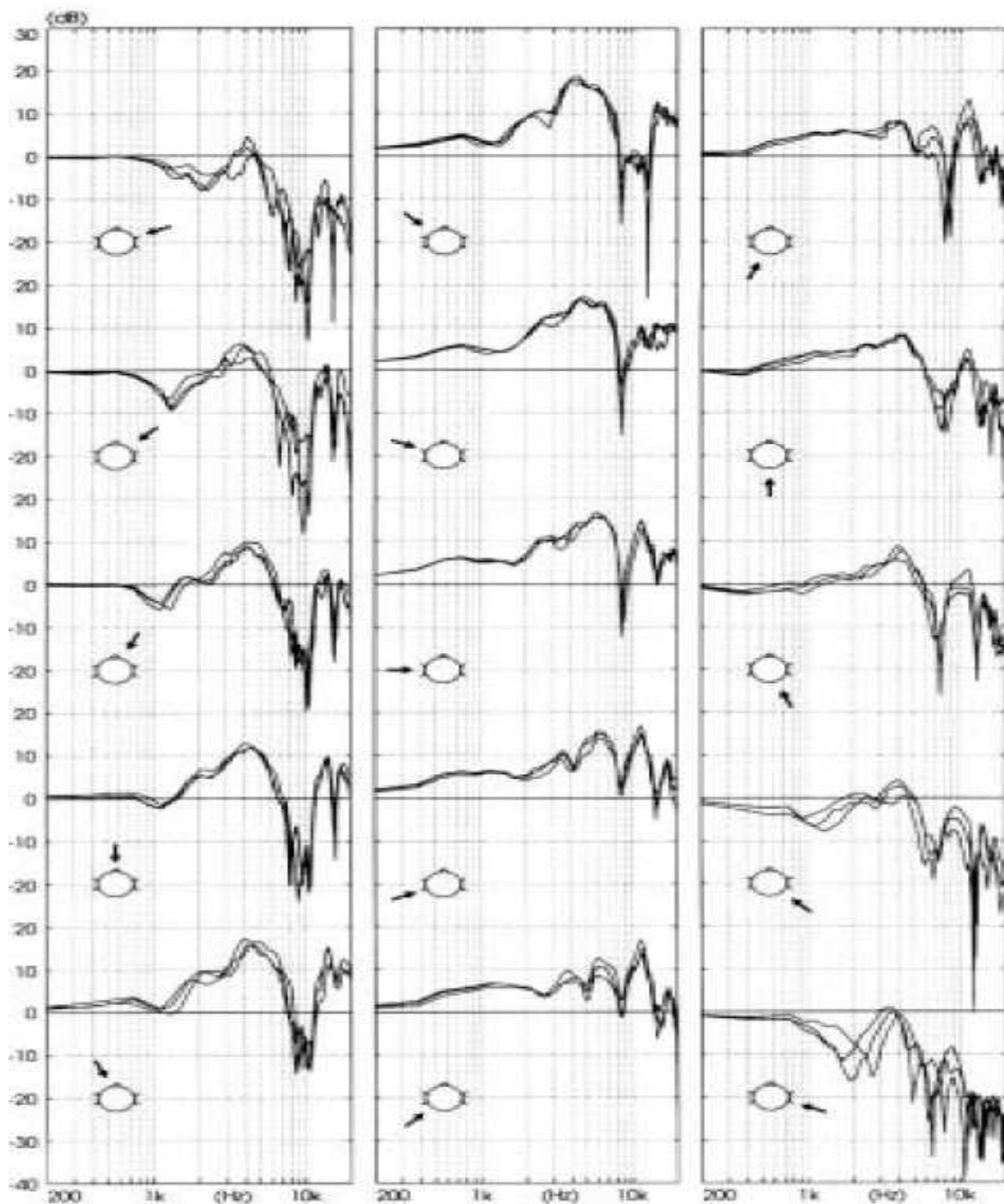


Figura 3.2 Respuesta del oído externo para diferentes ángulos de incidencia.

La escucha con dos oídos mejora la experiencia auditiva si existen diferencias entre las señales que llegan a cada oído; estas diferencias pueden ser en el tiempo de llegada al oído, patrones creados por el oído externo totalmente diferentes y polaridad absoluta. En un auditorio real, o cualquier otro sitio en el que se interpreta música en directo, es imposible



que se invierta totalmente la polaridad en un oído para todas las frecuencias del espectro; con lo que debemos considerar y analizar que diferencias (o falta de diferencias) se dan entre los oídos en términos de tiempos de llegada e intensidad para un oyente en una situación real.

El hecho de que, para bajas frecuencias, la cabeza es relativamente pequeña (y por consiguiente la distancia entre los oídos despreciable frente a la longitud de onda), hace que no existan diferencias de intensidad significativas entre los oídos independientemente de donde se origine el sonido. En el otro extremo del espectro, para frecuencias muy altas la cabeza hace de barrera de forma muy eficaz para sonidos que provienen de los laterales, con lo que estas diferencias de intensidad interaurales son un mecanismo de localización que no depende del oído externo. Para las altas frecuencias de la región de baja frecuencia, el cerebro comienza a utilizar diferencias en los tiempos de llegada de las señales a los oídos. En las zonas comprendidas entre 500 y 1500Hz ambos mecanismos de diferencias interaurales toman relevancia y se solapan aportando ambos información útil al cerebro del oyente, mientras que si seguimos subiendo la frecuencia solo los mecanismos de respuesta del oído externo son de relevancia. La sensibilidad del oído a la llegada de transitorios abruptos se suele citar como parámetro de la audición pero es otra forma de analizar los mecanismos citados anteriormente.

Todavía queda por comentar un hecho psicoacústico del mecanismo de escucha binaural en lo que concierne a diferencias en intensidad y tiempos de llegada; nos referimos a la habilidad del cerebro de concentrarse en una fuente sonora entre muchas otras. Esta habilidad de focalizar nuestra atención en una fuente se hace fuerte en situaciones en las que escuchamos música interpretada en directo en un auditorio, pero nos es muy difícil o incluso imposible distinguir una voz en concreto en una grabación monofónica de canto gregoriano. Con el sistema



ambiofónico esta cualidad de centrar nuestra atención parece tan fácil como en una situación en un concierto en directo.

3.3. Respuesta del Pabellón Auditivo.

Como las huellas dactilares, los pabellones de las orejas son elementos únicos de cada individuo. Se pensó que eran cartílagos vestigiales hasta mediados del siglo XX, aunque la complejidad de su estructura sugiere que su función en el proceso de escucha es de relativa importancia así como que su manera de interactuar con el sonido incidente en esta estructura, es muy compleja y dependerá de cada individuo. Para la gente que busca que su sistema de reproducción sea más realista, el conocer como interactúa el pabellón de la oreja y la cabeza con los sistemas de reproducción es muy importante, ya que en los sistemas de reproducción más extendidos en la actualidad, existen discrepancias psicoacústicas. Solucionar esta discrepancia entre lo que entregan los diferentes métodos de grabación y reproducción, y lo que el oído espera que se le entregue, es la última barrera psicoacústica a ser superada, tanto en la reproducción de música como en el mundo de los videojuegos.

Recordemos que nuestro fin es recrear remotamente la experiencia de escucha binaural que un oyente experimentaría si se situase en un espacio acústico concreto. Se trata de un problema de auralización envolvente, nos referimos a la externalización del efecto binaural mediante altavoces o auriculares; esto significa recrear enteramente la experiencia de escucha binaural, mediante auriculares consiguiendo que el campo sonoro creado no parezca estar localizado dentro de la cabeza del oyente, o mediante altavoces sin perder detalle de la claridad con que se localizan las fuentes sonoras en la vida real, ni la capacidad de centrarse



en una sola fuente sonora de entre muchas. Lo que se puede lograr mediante el sistema ambiofónico en la mitad frontal del plano horizontal de un oyente; o mediante el sistema panambiofónico [5] para la totalidad del plano horizontal, mediante el empleo de un mayor número de altavoces.

Como se ha dicho, recrear la experiencia binaural en casa implica entregar a la entrada de los oídos una réplica exacta del campo sonoro que se crearía en una situación real de música siendo interpretada en directo en un espacio acústico determinado. Pero para que una señal acústica entre en el canal auditivo de un oyente, primero, cualquier señal por encima de 1 kHz debe interactuar con la respuesta del pabellón de la oreja; lo que convierte a los pabellones de las orejas en detectores personales de dirección para altas frecuencias. Las señales que entran en el canal auditivo, en la región de los kilo-hercios, están sujetas a fuertes atenuaciones o amplificaciones dependiendo del ángulo con el que inciden en el pabellón de la oreja además de su frecuencia. Si esto fuera poco, los sonidos que provienen lateralmente del lado opuesto a un oído, deben además sufrir retardo adicional, filtrado y atenuación debido a la presencia de la cabeza (característica única también de cada oyente). La suma de la respuesta del pabellón auditivo y de la función de transferencia de la cabeza es lo que se conoce como Función de Transferencia Relativa a la Cabeza (head related transform function o HRTF).

Los efectos que introducen la cabeza y el torso (efectos de sombra acústica, reflexiones y difracciones) se pueden medir eficientemente a partir de los 500 Hz aproximadamente, con el pabellón de la oreja actuando plenamente a partir de los 1,5 kHz. Debido a que los máximos y mínimos que produce la función HRFT están muy próximos entre sí y son muy estrechos, es prácticamente imposible realizar medidas usando personas.



Las siguiente figura (figura 2.3) muestra una serie de medidas realizadas por Ronald Aarts [6] usando micrófonos miniaturizados en la entrada del canal auditivo. A medida que el sonido se mueve alrededor de la cabeza la complejidad y variedad de las respuestas se hace evidente.

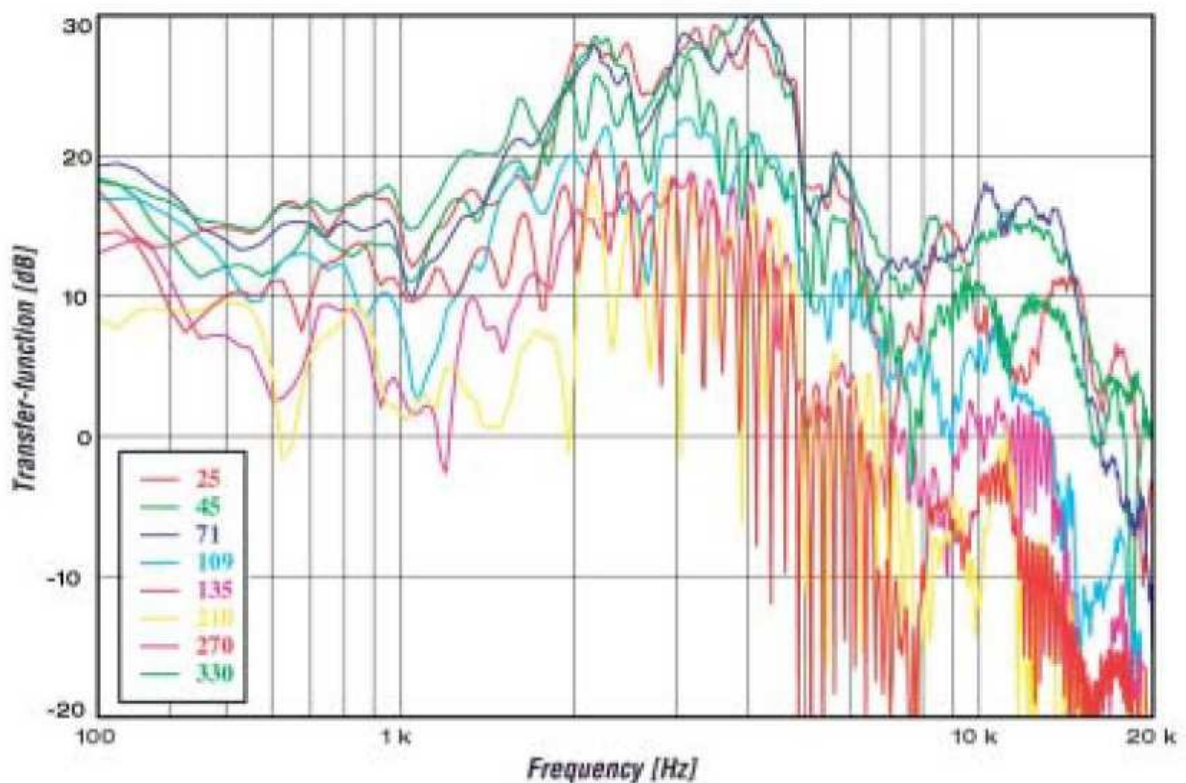


Figura 3.3. Respuesta HRTF en función del ángulo de incidencia.

Se ve claramente como cuando una señal incide lateralmente (270°) las curvas muestran los efectos de sombreado de la cabeza en la respuesta en frecuencia. Debido a lo estrechos que son los máximos y mínimos y, también debido a que un mínimo en un oído será cualquier otra cosa en el otro oído, no percibimos estos picos como cambios en el timbre, ni como una atenuación o incremento de energía en altas frecuencias, sino que el cerebro utiliza estos picos en la respuesta para determinar la posición angular de una fuente sonora con gran exactitud.



De momento no se ha desarrollado ningún dispositivo de simulación de funciones de transferencia del pabellón de la oreja ni de la HRTF capaz de satisfacer nada más que a una minoría de individuos (los cuales se aproximen al modelo medio), pero todo ello sin llegar a estándares audiófilos. Recordemos que cada oyente posee sus propias funciones de transferencia para el caso de sonido propagándose alrededor, por encima y por debajo de la cabeza, y por supuesto diferente fisionomía del pabellón auricular.

Pongámonos en el supuesto de una fuente sonora localizada en el centro de un escenario, al grabar esa fuente y reproducir la grabación en un sistema de reproducción, si se pretende conseguir que el campo sonoro creado suene lo más real posible, sería mejor que el sonido fuese radiado por altavoces que se encuentren lo más centrados posible, no desde los laterales o altavoces envolventes. El sistema estereofónico es bastante deficiente en este sentido, la razón es la siguiente: se produce una confusión en el procesado de las imágenes sonoras que realiza el mecanismo oído-cerebro para fuentes sonoras centrales. Esto se debe a que, aunque ambos oídos reciben la misma señal diciéndole al cerebro que la fuente esta enfrente del oyente, la función de transferencia del pabellón auditivo está indicando al cerebro existen fuentes sonoras de altas frecuencias situadas a 30° a cada lado del oyente. Cualquier oyente escuchará una imagen sonora central, razón por la cual el sistema estereofónico dura hasta nuestros días, pero casi ninguna persona lo confundiría con la realidad. Como se sabe, la respuesta de un pabellón auditivo predomina sobre las diferencias interaurales de intensidad, para localizar en el plano horizontal sonidos como chasquidos, es decir sonidos transitorios con alto contenido en altas frecuencias; cosa que explica por qué individuos con un solo oído todavía pueden localizar fuentes sonoras.

Por lo que la respuesta del pabellón auditivo es un elemento esencial del mecanismo oído-cerebro, el cual a sido enormemente ignorado y al



cual hay que satisfacer para lograr una experiencia de escucha que nuestro cerebro considere real. Si eliminásemos esta estructura, todos los sonidos parecerán provenir del interior de nuestras cabezas (efecto de internalización). Este efecto ilustra que en ausencia del pabellón auditivo, el cerebro llega a la única conclusión lógica basada en hechos psicoacústicos, es decir, que el sonido debe ser originado en un punto del lado del cerebro del tímpano, es decir dentro de nuestra cabeza, ya que de otra manera es imposible que se propague el sonido hasta el tímpano sin ser modificado por la respuesta del pabellón auditivo.

Esto nos lleva a concebir la localización de fuentes sonoras no como un mecanismo monoaural o binaural por sí solos; sino que el cerebro crea una estimación para cada oído de la dirección de una fuente sonora para después combinar las dos informaciones obtenidas en cada oído en un procesado binaural. La localización binaural no es superior a la monoaural, deben coincidir para todo el rango del espectro audible con el fin de lograr una reproducción que al cerebro le parezca realista.

Pongámonos por un momento en la piel de un ingeniero de mezcla trabajando con un sistema de reproducción envolvente como puede ser el 5.1 o 7.1. Como sabemos ya, podemos crear fuentes fantasma centrales si excitamos con señales idénticas a una pareja de altavoces en fase situados a la derecha y la izquierda del frente del oyente. Pero cabe preguntarse ¿que pasa con fuentes laterales o traseras? Los ingenieros de mezcla serían muy felices si pudieran panoramizar de la misma forma una fuente fantasma lateral, es decir, excitando al altavoz derecho delantero y al derecho trasero con la misma señal en fase; desafortunadamente las fuentes fantasma no pueden ser panoramizadas de esta manera, ya que estamos tratando con la respuesta de un oído a solas más que con relaciones interaurales. Si por ejemplo pretendemos excitar los altavoces frontal y trasero derechos con el fin de crear una fuente fantasma en el



lado derecho del oyente, y suponemos despreciable el sonido que alcanza al oído izquierdo; como ya hemos comentado, los mecanismos de localización que un solo oído tiene para detectar la dirección de incidencia de altas frecuencias es la respuesta convolutiva del pabellón auditivo. Por lo que si un sonido proviene de un altavoz situado a 45° a la derecha pero enfrente del oyente, el pabellón auditivo lo localizará en esa posición, y si al mismo tiempo un altavoz está radiando una señal similar a 45° pero detrás del oyente, el oyente percibe dos fuentes puntuales, o un altavoz más predominante que otro y la imagen sonora salta de un altavoz a otro. Aunque en una situación real el sonido se propagará hasta llegar al oído contrario, y dependiendo de las reflexiones de la sala, afectara a cada individuo de manera diferente e impredecible.

Todo esto viene a decirnos que todas las señales en nuestra sala de escucha deben originarse desde una dirección que no le cree confusión al mecanismo oído-cerebro. Por lo que si un auditorio tiene fuertes reflexiones que provienen de 55° , entonces nuestro sistema de reproducción debe radiar estas reflexiones desde aproximadamente esa dirección. De la misma manera, la mayoría del sonido radiado tiene su origen en la parte central del escenario, aproximadamente a unos 20° , por lo que colocando los altavoces en esta posición, en lugar de la disposición estereofónica estándar a 60° , eliminaríamos gran parte de la distorsión angular del pabellón auditivo. Esto nos podría llevar a pensar que para sonidos que provienen de los extremos aumentaría la distorsión angular del pabellón auditivo, y que lo único que se ha hecho es sustituir la distorsión angular de las fuentes centrales creada por el sistema estereofónico por la distorsión angular de fuentes laterales del sistema ambiofónico. Pero si nos fijamos en las curvas de respuesta en frecuencia dependientes del ángulo de incidencia del sonido en el pabellón auditivo, observamos que para ángulos por encima de, por ejemplo, 60° , un sonido que proviene de esa dirección tiene visión directa, es decir no tiene casi



obstrucciones para alcanzar la entrada del canal auditivo y por ello la curva es relativamente plana para estos ángulos de incidencia y su efecto mínimo. En la práctica, el sistema de reproducción ambiofónico produce imágenes sonoras estables y fáciles de percibir hasta unos 85° aproximadamente a cada lado de la cabeza.

A la hora de realizar grabaciones debemos tener en cuenta la respuesta del pabellón auricular, especialmente si la grabación se realiza empleando micrófonos de maniquí (dummy-heads). Si se realiza una grabación empleando un micrófono de este tipo con un pabellón auditivo moldeados como el de la figura 2.4, está solo sonara realista si se emplea en la reproducción auriculares incrustados en el canal auditivo.



Figura 3.4. Micrófono de maniquí Neuman KU100. Para grabaciones estereofónicas.

Aún así, y debido a que cada individuo posee un pabellón auricular único y diferente al del resto de los individuos, y sobre todo al del micrófono, la mayoría de los oyentes no experimentarán un efecto

binaural capaz de satisfacer al cerebro. En el caso de que el micrófono no posea pabellón auditivo, deberíamos reproducir la grabación ambiofónicamente empleando altavoces, o mediante auriculares que están separados una distancia suficiente como para excitar al pabellón auditivo de la forma más parecida a un caso real. Pero también se debe tener en cuenta la función de transferencia de la cabeza (HRTF). Por lo que si en la grabación utilizamos un maniquí sin pabellón auditivo y reproducimos esa grabación mediante el sistema estereofónico tradicional, se producirá distorsión en las imágenes sonoras laterales debido a que la doble sombra acústica creada por la cabeza del maniquí y la del propio oyente, creará errores en las diferencias interaurales de intensidad y tiempo.

La regla parece sencilla: en cualquier cadena de grabación/reproducción debe haber solo un par de pabellones auriculares (los cuales deben ser los del oyente) y solo una sombra acústica creada por una cabeza, que no necesariamente debe ser la del oyente.



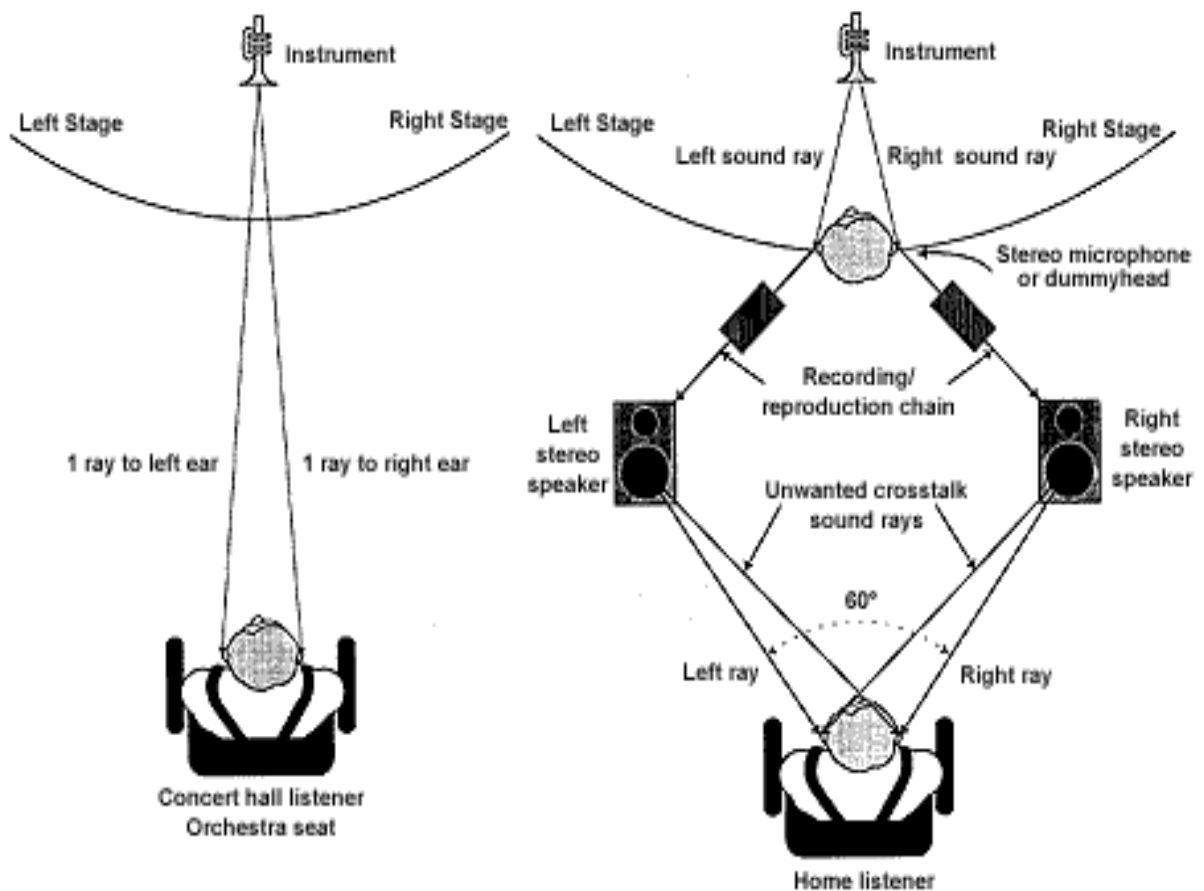


Figura 3.5. Comparación del proceso de escucha en una situación real con una reproducción estereofónica para una fuente central.

Ahora vamos a considerar la contribución de ambos pabellones auriculares y cabeza en conjunto con las respuestas interaurales, lo que nos proporciona la habilidad de localización de fuentes sonoras en el plano horizontal. Un estudio realizado por William B. Snow y James Moir en 1953 [7], concluye que para sonidos impulsivos así como para la palabra (y por extensión para la música) diferencias en la posición angular horizontal de hasta un grado podían ser detectadas. Para fuentes a un grado fuera del centro y enfrente del oyente, se obtiene una diferencia de tiempos de llegada de 10 microsegundos y una diferencia de intensidad interaural mínima. Los resultados del experimento van más allá cuando se realiza el mismo estudio con fuentes sonoras en interiores y con señales con contenido a partir de 3 kHz (incluso a una distancia superior a 15

metros), la localización angular horizontal mejora hasta llegar al medio grado; lo que nos lleva a pensar que para fuentes musicales los oídos son solo un poco más torpes que los ojos en plano horizontal.

Se entiende claramente que para frecuencias altas el oído es más sensible detectando posiciones angulares ya que, como se ha visto, tanto la suma de las repuestas como las respuesta individuales del pabellón auditivo y del conjunto formado por la cabeza y el torso, se hace más notable cuanto más alta sea la frecuencia. Es esta región de frecuencias donde se creía que tan solo la diferencia de niveles interaurales era la que gobernaba en la percepción binaural. Pero como ya se ha demostrado, no es la diferencia de nivel que incide en el pabellón auricular de cada oído lo que cuenta sino la diferencia interaural de las señales que entran a los canales auditivos tras convolucionarse con la respuesta de los pabellones auriculares. Para frecuencias por encima de 2 kHz no es la diferencia de intensidades interaurales lo que nos permite localizar fuentes sonoras sino la diferencia en los patrones de máximos y mínimos entre los oídos del oyente. Esta concatenación de patrones imposibles de representar gráficamente y que parece que se forman al azar se complican debido a señales similares que llegan instantes más tarde procedentes de reflexiones en techos y paredes delante, detrás, debajo y a los lados del oyente. El patrón de máximos y mínimos que se crea en un oído es muy diferente al que se crea en el oído contrario por lo que la diferencia interaural es función del ángulo de incidencia de la fuente así como del contenido espectral de la señal. Por lo que se puede decir que una pareja de pabellones auriculares son un mecanismo de detección angular muy sensible que convierte pequeñas variaciones angulares en grandes variaciones de patrones de máximos y mínimos en la respuesta, que el cerebro de cada individuo a aprendido a interpretar como direcciones concretas de incidencia de señales acústicas.



CAPITULO 4: EL PROBLEMA DE LA DIAFONIA INTERAURAL

El ideal audiófilo de que grabaciones de solo dos canales son suficiente para vivir una sensación sonora cercana a la experimentada en un auditorio en donde se ejecuta música en directo no esta tan desencaminado. Tener grabaciones de dos canales no significa necesariamente estar limitada a solo dos altavoces en la reproducción. Las grabaciones en formato multicanal, especialmente las que incorporan un canal central frontal, no solo no son necesarias sino que son, desde el punto de vista psicoacústico, contraproducentes.

En sistemas como el estereofónico, Ambisonics, 5.1, 7.1, etc, el punto de escucha esta muy limitado espacialmente, y esto es algo inherente a los sistemas. En el caso del estéreo si el oyente se aproxima a los altavoces aparece un hueco en el medio ademas de otros efectos como el de elevación; el escenario sonoro se percibe como dividido en parte izquierda y parte derecha. Si el sujeto se desplaza hacia atrás de la disposición estereofónica estándar el escenario se va estrechando hasta el punto de que puede parecer que hay un solo altavoz. Si nos movemos lateralmente solo escucharemos un altavoz predominantemente. El sistema 5.1 tiene las mismas desventajas, con la peculiaridad de que como en el canal central suele tener el dialogo, este permanece en él aunque nos movamos.

En el sistema Ambiofónico si uno se mueve hacia los altavoces oíría estéreo normal; si nos movemos hacia atrás el escenario se mantiene ancho y muy poco cambia de la sensación sonora. Así, si nos movemos a los lados seguimos escuchando ambos altavoces, razón por la que no se necesita un altavoz central. Esto es así por que a cada altavoz se le excita con su señal directa y una versión ligeramente retrasada del otro canal



más el canal central (si este se encuentra presente como en 5.1).

4.1- La Diafonía Interaural.

La principal razón de por que el sistema estereofónico es incapaz de sonar realista sin hacer algunas mejoras es que cuando una grabación de dos canales se reproduce a través de dos altavoces que forman 60° o 90° con el oyente, cada altavoz radia señal a ambos oídos, produciendo diafonía interaural. Los efectos que conlleva esta diafonía en baja y alta frecuencia han sido menospreciados a lo largo del tiempo. Para muchos, la diafonía interaural que se produce en el sistema estereofónico es casi siempre la principal causa de que no pueda parecer que una fuente sonora proviene de más allá del espacio limitado entre los altavoces. Si tenemos una fuente localizada en el extremo derecho, es decir, podemos despreciar la contribución del altavoz izquierdo, la señal radiada por el altavoz derecho llega a ambos oídos, y da igual cuanto movamos la cabeza que la imagen sonora se mantendrá fija en ese altavoz. Se sabe que, si de alguna manera, se impide que el oído izquierdo reciba la señal radiada por ese altavoz derecho, el cerebro interpreta que ese sonido debe provenir de un ángulo mayor hacia la derecha, más allá, de los 30° de la disposición estereofónica estándar. Así que podemos decir que el sistema estereofónico, debido a la diafonía inherente al sistema, comprime la anchura del escenario sonoro (figura 4.1).

Pero existen defectos en el sistema debido a la diafonía, quizás aún más importante. Para fuentes sonoras localizadas en el centro, dos señales acústicas de sonoridad muy parecida alcanzan a cada oído en vez de una sola como ocurriría en la vida real. Parece evidente que una de estas dos señales que llegan a cada oído viaja una distancia extra comparada con la otra señal de aproximadamente la mitad de la anchura de la cabeza humana (300us aproximadamente). Esta diferencia de



camino produce una serie de máximos y mínimos en la respuesta en frecuencia de cada oído similar a un filtro peine a partir de aproximadamente 1500 Hz. Como los mínimos son muy estrechos y en el otro oído se está produciendo un patrón de máximos y mínimos parecido, el oído rara vez interpreta este filtro peine como un cambio en el timbre de la fuente sonora; pero en cambio, el cerebro interpreta este filtrado como una segunda función de transferencia del oído externo, lo que provoca confusión el mecanismo del cerebro que localiza los transitorios musicales. Al parecer, en auditorios reales, el oído puede detectar variaciones angulares de hasta un grado pero no si existen algún tipo de filtrado tipo peine entre 2-10 kHz, es decir en la región donde el oído es más sensible a los efectos de convolución del oído externo. Mientras que esta diafonía interaural se mantenga será imposible hacer que el escenario sonoro que se le presenta a un oyente sea tan natural y real como una interpretación en vivo y no suene enlatado y sin vida. La ilusión sonora creada con el sistema estereofónico se basa en las fuentes fantasmas, las cuales aparecen por diferencias interaurales en bajas frecuencias, no obstante proporcionan muchas contradicciones psicoacústicas en altas frecuencias debido a las respuestas erróneas que produce el oído externo.



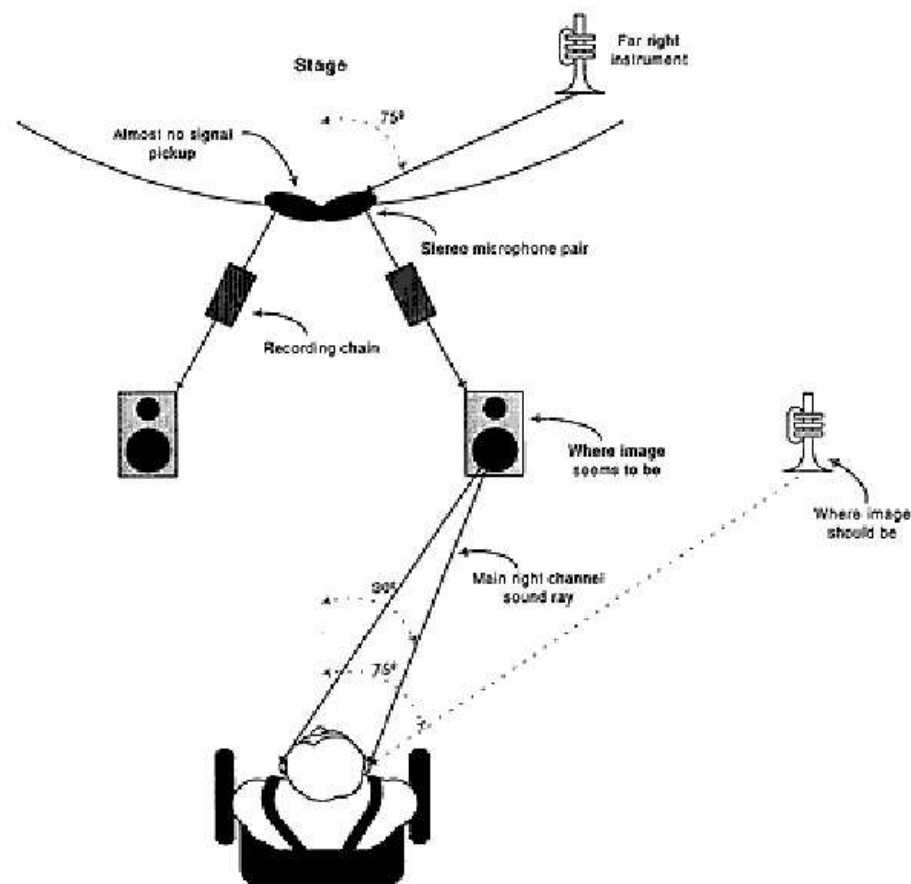


Figura 4.1. Compresión de la anchura del escenario sonoro en un sistema de reproducción estereofónico.

Si partimos del ideal de radiar las señales al oyente desde donde se han producido originalmente, y si tenemos en cuenta que la mayoría de los solistas, agrupaciones pequeñas y en general la mayoría de las fuentes sonoras sobre un escenario se localizan entorno al centro de este, no parece nada descabellado mover los altavoces frontales hasta la posición en que forman unos diez grados con el oyente. Esto eliminaría muchas contradicciones psicoacústicas en lo relativo a la respuesta del oído externo para fuentes sonoras que provienen del centro o cerca de este. Con los altavoces dispuestos en esta nueva posición (juntos y enfrente del oyente) cabe preguntarse que pasa con la anchura del escenario sonoro; la respuesta no parece obvia, pero al eliminar la diafonía, la separación (o anchura del escenario sonoro) no depende de la posición angular de los

altavoces.

La idea de eliminar la diafonía no es un concepto asociado solo a la tecnología empleada en la Ambiofonía; fabricantes como Lexicon, Carver y Polk, por nombrar algunos, diseñaron dispositivos electrónicos destinados a eliminar la diafonía [10], pero seguían incurriendo en el error de partir del triángulo estereofónico por lo que mantenían la incoherencia psicoacústica del error de la respuesta del oído externo, ya que las señales en la entrada del oído provienen de posiciones incorrectas. Los mejores canceladores de diafonía requieren de una compensación compleja del hecho de que la diafonía cancelada ha tenido que viajar através de la cabeza del oyente, atravesar el oído externo (quien aporta su propia respuesta) para llegar al oído más alejado de la fuente sonora. Como los fabricantes antes mencionados no tienen ni idea de como son la cabeza ni el oído externo del oyente final, asumen un modelo promedio de cabeza y oído externo. Esta aproximación hace que este método no trabaje bien a altas frecuencias, y la mayoría de los oyentes experimentan errores de fase y la escucha se hace molesta. No obstante cuando los altavoces se encuentran directamente enfrente del oyente, la cabeza apenas hace de barrera para llegar a los oídos y su función de transferencia se puede simplificar resultando en un error menor.

Estos canceladores de diafonía primitivos no alcanzaban resultados satisfactorios debido a que no eran recursivos; esto es, la señal indeseada radiada por el altavoz izquierdo al oído derecho se cancelaba por medio de invertir la señal del altavoz derecho y esto era todo, pero esta cancelación del altavoz derecho también alcanza al oído izquierdo con lo que aparece otra nueva diafonía. En el sistema Ambiofónico esta diafonía se cancela sucesivamente hasta hacerla inaudible, este proceso recursivo de cancelación de diafonía se llama R.A.C.E. (Recursive Ambiohonic Crosstalk Elimination).



Como ya se ha mencionado, la diafonía es el mayor problema que presenta el sistema estereofónico. También se ha dicho que esta diafonía es solo inherente al sistema de reproducción estereofónico, no a las grabaciones. En el sistema ambiofónico, al eliminar la diafonía, el escenario sonoro se ensancha, llegando más allá de la posición de los altavoces y permite juntar los altavoces, lo que elimina la ilusión de las fuentes fantasmas o canales centrales.

En una situación de escucha real, para una fuente localizada en el centro del escenario, los rayos sonoros radiados directamente por la fuente, alcanzan a cada oído simultáneamente, pero con el detalle de que sólo un rayo por oído. Si ahora comparamos esta situación con la reproducción en el sistema estereofónico de una grabación en la que hay una única fuente sonora localizada en el centro, los mismos rayos sonoros que aparecían antes inciden en los oídos del oyente; pero además de estos existe otro par de rayos sonoros indeseados que se cruzan enfrente de la nariz del oyente, los cuales están atenuados por recorrer un mayor camino hasta alcanzar al oído (como mucho unos 17 cm). Para una distancia de por ejemplo unos 9 cm, el sonido tarda aproximadamente 0,25 ms recorrer esta distancia, lo que coincide con la mitad del periodo y la mitad de la longitud de onda de 2 kHz. Como sabemos, cuando dos ondas de la misma frecuencia y amplitudes parecidas desfasadas media longitud de onda se encuentran en el mismo punto (en este caso en el oído) se producirá cancelación, es decir una interferencia destructiva. Pero para 4 kHz, este retardo que hemos introducido coincide con una longitud de onda entera, por lo que producirá una suma aditiva ya que estamos en la situación de interferencia constructiva. Por lo que para frecuencias por encima de Do medio (unos 261,626 Hz para una escala de 12 tonos de igual temperamento), todas las ondas sonoras se sumarán o se cancelarán a la entrada de los oídos. Parece claro que, si el instrumento se mueve durante la grabación o el oyente mueve su cabeza durante la



reproducción, aparece un nuevo patrón de máximos y mínimos a diferentes frecuencias. Este efecto, llamado filtro peine, explica el por qué algunos oyentes son muy sensibles a pequeñas variaciones en la escucha estereofónica, como por ejemplo mover los altavoces de sitio o a diminutos retardos eléctricos o acústicos.

Con todo esto se puede entender como la respuesta en frecuencia de un sistema estereofónico depende de la posición angular del instrumento original. Sabemos que estas anomalías en la respuesta en frecuencia no son percibidas como cambios en el timbre del sonido, si no más bien como imprecisiones en la imagen sonora y se percibe la música como enlatada, falta de vida. Aunque existen formas de escuchar los cambios en el timbre que produce un filtrado tipo peine, como por ejemplo mediante un CD de prueba que contenga ruido rosa grabado, se reproduce el CD en un sistema estereofónico y se juega con el control de balance haciendo que el sonido vaya de un altavoz a otro, en el punto en el que ruido esta a medio camino de ambos altavoces se puede percibir una atenuación en las altas frecuencias de este sonido y, en general, como el sonido cambia de carácter.

Decir que la existencia de una diferencia de fase entre canales de tan solo unos pocos grados puede trasladar en frecuencia el patrón de un filtro peine cientos de hercios. Por lo que el patrón del filtro peine está en función de cualquier asimetría en las impedancias de salida del amplificador, retardos introducidos por los cables (y más si son de diferente longitudes y propiedades), retardos introducido por la incorrecta posición relativa de los altavoces en el punto de escucha. Cualquier cambio en el patrón de la correlación cruzada interaural es interpretado por el cerebro como alteraciones en la impresión espacial, como mayor o menor profundidad, aire, etc. Estas características del sistema estereofónico, la respuesta direccional tan irregular y la impredecible



respuesta en frecuencia del sistema, son parámetros inadmisibles para cualquier amplificador de potencia, cable, altavoz, o cualquier elemento de la cadena de reproducción. Cabe preguntarse por qué estos defectos se siguen tolerando universalmente o peor aún ignorándose.

Los mecanismos de localización dependen de la sonoridad relativa y el tiempo de llegada relativo de la onda sonora a los oídos. La predominancia de un mecanismo frente a otro depende de la frecuencia; pero como los efectos del sistema estereofónico (filtrado tipo peine) se hacen notar desde unos 800 Hz en adelante, tiene bastante impacto en ambos mecanismos y no hace posible que un oyente detecte la dirección de llegada del sonido como en una situación real. También, debido a la existencia de rayos acústicos adicionales, el sistema estereofónico está limitado a presentar imágenes sonoras solo en la línea existente entre los altavoces. Para lograr recrear un campo sonoro real debemos eliminar estos rayos acústicos adicionales que solo perjudican a nuestra imagen sonora.

4.2- La Ilusión Sonora del Estéreo.

Pero aún hay más, los audiófilos creen que el concepto de sonido binaural se refiere a grabaciones realizadas mediante micrófonos con forma de maniquí (dummy heads), las cuales serán reproducidas mediante auriculares; no obstante sabemos que binaural realmente significa el proceso de escucha mediante dos oídos y esto no es ningún invento si no una habilidad desarrollada durante millones de años de evolución. Pero el sonido basado en un sistema estereofónico no es más que una ilusión sonora y simplemente un método no binaural de los creados por el hombre para recrear un campo sonoro en un lugar diferente y en instantes de tiempo diferentes a los que fue creado



originalmente. Los campos sonoros estereofónicos son escuchados por oyentes binaurales quienes suplen la falta de un campo sonoro binaural mediante uno estereofónico, y como es el caso de todas las ilusiones, no siempre son estables y casi nunca logran engañar a nuestro cerebro y no nos parecen realistas. Las grabaciones denominadas estereofónicas consistentes en dos canales izquierdo y derecho sin codificar y que comprenden todo el ancho de banda del espectro audible (normalmente), no son de manera inherente estereofónicas (por ello no se las denominará grabaciones estereofónicas si no de dos canales) y por consiguiente no es necesario que sufran de los males de la reproducción a través del sistema estereofónico. Lo que se quiere decir con esto es que los micrófonos que captan el campo sonoro no saben que ese campo sonoro captado va a ser reproducido mediante una disposición de dos altavoces separados ampliamente, por lo que ninguna de las imperfecciones del sistema estereofónico discutidas aquí se pueden aplicar a la grabación antes de ser reproducida; por lo que podemos ver que aunque existen grabaciones optimizadas ambiofónicamente, casi cualquier grabación consistente en dos canales suenan bastante bien al ser reproducidas en un sistema ambiofónico.

Lo que se quiere decir es que las grabaciones de dos canales existentes hasta la fecha tienen la información necesaria para permitir la recreación precisa de una experiencia de escucha binaural de sala de conciertos. Lo que hace al sistema ambiofónico totalmente compatible con la extensa colección de grabaciones en dos canales existentes, es más, mejora de forma palpable la experiencia de escucha de todas estas grabaciones existentes en el mercado y pone de manifiesto que las técnicas microfónicas, de grabación y de reproducción multicanal (5.1, 7.1...) son en realidad contraproducentes desde el punto de vista binaural.

Antes de que se desarrollaran las técnicas de grabación



estereofónicas lo que había eran grabaciones monocal o grabaciones monofónicas. La mayoría de las grabaciones se realizaban con un solo micrófono, o con varios y mezclando las señales que entregaban antes de cortar el disco. Se podría decir que un caso especial de la reproducción estereofónica es la reproducción de grabaciones monoaurales mediante dos altavoces; en este caso, a ambos oídos les llega las mismas señales procedentes de los altavoces, por lo que la correlación cruzada interaural tomará el valor numérico de 1. Esta situación se puede comparar a una situación en la vida real cuando el oyente se encuentra situado en las últimas filas del auditorio; para este oyente el ángulo aparente que abarca el escenario es muy pequeño, ambos oídos reciben en esencia la misma señal, el sonido directo que incide en los oídos del oyente tiene muy poca energía debido a la distancia con la que podemos afirmar que el oyente se encuentra en situación de campo reverberante casi puro. Así que el oyente en estas condiciones se encuentra inmerso en un campo sonoro reverberante monofónico pero real, por lo que apenas se da cuenta que su habilidad de localizar fuentes sonoras en el plano medio se ha reducido hasta el punto de no poder distinguir la posición de una determinada fuente sonora. Esto nos lleva a pensar que grabaciones monoaurales pueden sonar bastante realistas en nuestro sistema de reproducción si admitimos el hecho de que la impresión subjetiva del oyente será la de estar sentado en las últimas filas del auditorio. Por lo que se confirma el hecho de que no es necesaria la separación de fuentes sonoras para conseguir el suficiente realismo como para que nuestro cerebro detecte el campo sonoro recreado como real.

Pero volvamos a nuestro sistema estereofónico, en el cual el escenario sonoro que se nos presenta está comprendido en la línea existente entre ambos altavoces (con excepciones de efectos producidos por desfases entre los canales que dan la sensación de producir sonidos más allá de esta línea). Analicemos el caso de que por ejemplo una fuente



sonora se mueve de un extremo del escenario al otro durante la grabación. La mayoría de personas son capaces de percibir durante la reproducción, una fuente sonora fantasma moviéndose de un altavoz a otro. Comparando esta situación con la vida real, esta fuente fantasma no se mueve de manera lineal y existe una tendencia de que el sonido salte de un altavoz a otro a medida que la fuente se mueve. Pero como pasa con todo tipo de ilusiones, aunque las percibamos, como por ejemplo las ilusiones ópticas, ninguna persona las confundiría con la realidad, es decir un objeto tridimensional palpable, o para nuestro caso, con un campo sonoro binaural. Con lo que en sistemas de reproducción no ambiofónicos, para conseguir un escenario lo suficientemente ancho y con una localización izquierda-derecha estable, es necesario colocar los altavoces con un ángulo suficientemente ancho como para albergar las proporciones angulares de un escenario real, pero tan ancho que las fuentes sonoras fantasmas centrales dejen de producirse.

Uno de los problemas principales del sistema estereofónico es que limita la anchura de la imagen sonora que se puede crear a la línea que une ambos altavoces. En la vida real, un sonido que provenga de unos 90° , produce una diferencia de tiempos de llegada interaural de 700 microsegundos aproximadamente. Si una grabación con esa información directiva se reproduce en un sistema estereofónico (mediante la disposición estereofónica estándar de 60°), la máxima diferencia de tiempos de llegada es de 220 microsegundos aproximadamente, debido a que un altavoz situado a 30° del oyente no tiene que atravesar la cabeza entera para llegar al oído contrario, por lo que la diferencia no llega a ser de 700 microsegundos; lo que es interpretado por el cerebro como que el sonido proviene de un ángulo menor al que realmente debería.

Del mismo modo si la disposición microfónica captase una diferencia entre canales de por ejemplo 10 dB, al ser reproducida mediante un



sistema estereofónico, esta diferencia será mucho menor ya que el altavoz que radia más energía también alcanza al oído más alejado de él, por lo que se reduce la diferencia de niveles interaural hasta tal punto que aquella señal captada por los micrófonos desde un lateral, ahora no podrá venir de más allá de 30° hacia un lateral.

En sistemas estereofónicos es necesario que ambos altavoces estén en fase, es decir, que para una excitación de un tono puro, ambos altavoces produzcan compresión o enrarecimiento en la misma dirección. Cuando se reproduce una grabación monofónica en un sistema estereofónico con los altavoces fuera de fase, el sonido pierde respuesta en graves, las fuentes fantasmas centrales desaparecen, y un campo sonoro bastante difuso e impreciso parece provenir de posiciones angulares laterales superiores a los altavoces. Parece evidente que señales iguales pero con la fase invertida y de baja frecuencia, es decir, con longitudes de onda más grandes que la anchura de una cabeza humana, llegarán desfasadas 180° a ambos oídos por lo que se cancelarán. Para frecuencias más altas esta cancelación es solamente parcial. La situación es la siguiente: en el oído izquierdo incide el sonido radiado por el altavoz izquierdo, que solamente lleva información del canal puramente izquierdo (con la información central muy atenuada), la cual es, dependiendo de la frecuencia, atenuada o amplificada muy poco al interferir con una versión ligeramente retrasada (como una diafonía parcialmente fuera de fase) proveniente del altavoz derecho. En ese mismo instante el oído derecho está recibiendo una señal con información del canal derecho puro similar en amplitud pero no idéntica a la señal incidente en el oído izquierdo ya que las señales resultantes incidentes en los oídos están desfasadas.

Se sabe que si un sonido con información en frecuencias medias, solo incide en un oído, el cerebro interpreta que ese sonido proviene del



extremo de ese lateral. Esta propiedad del sistema auditivo se mantiene incluso excitando a ambos oídos con señales que son idénticas en amplitud y timbre. Esto es debido a que como las señales al estar fuera de fase, ni son idénticas temporalmente ni están altamente correladas y por ello se perciben como fuentes sonoras diferentes. Por lo que esta cancelación de diafonía accidental en frecuencias medias causada por los altavoces con fases invertidas, hace que el campo sonoro se ensanche. A medida que la frecuencia sube, el efecto del filtrado peine predomina sobre las cancelaciones, y la posición de las imágenes sonoras se hace dependiente de la frecuencia y por consiguiente del programa.

En el caso de tener los altavoces fuera de fase en un sistema ambiofónico, el escenario sonoro se mantiene ancho, lo que tiene sentido ya que en definitiva seguimos escuchando un altavoz con cada oído, y debido a la proximidad entre sí de los altavoces, no se crea la sensación de que halla un agujero en medio del escenario sonoro. En el caso anterior del sistema estereofónico con altavoces con la polaridad invertida, cada oído está escuchando una señal diferente (para un ancho de banda bastante grande del espectro audible) por que las señales son de polaridades contrarias, por lo que el cerebro interpreta que el sonido proviene de una posición angular superior a la de los altavoces; las fuentes fantasma centrales no se crean y el efecto del "agujero en medio" aparece. Esto demuestra que el sistema estereofónico es mucho más sensible a problemas de polaridad entre canales que el sistema ambiofónico.



CAPITULO 5: CARACTERISTICAS ACÚSTICAS DE UNA SALA DE CONCIERTOS

5.1- Características de la Sala de Conciertos.

Para recrear la experiencia de escucha de una sala de conciertos en nuestra casa, es necesario entender por qué un buen auditorio suena como suena. En la actualidad el diseño de auditorios se basa fuertemente en simulaciones mediante programas de ordenador basados en leyes acústicas aunque existe también un factor subjetivo y casi artístico en el tema.

Un oyente que esté sentado no muy atrás en un auditorio es capaz de distinguir la posición de los músicos en el escenario, percibe la profundidad, o la distancia a la que se encuentran los músicos, percibe la altura (si el coro está elevado en tarimas, por ejemplo), puede percibir el tamaño de la sala en la que se encuentra e incluso percibe el carácter de la sala (brillante, apagada...). Cuando se trata de recrear un campo sonoro en nuestro sistema de reproducción queremos que esas características sean recreadas de forma satisfactoria para nuestro sistema oído-cerebro, para que las percibamos como reales. El oyente situado en la posición anterior del auditorio tiene visión directa con el escenario por lo que existe un camino sin obstrucciones para que el sonido directo viaje desde los instrumentos hasta los oídos del oyente. Seguidamente al sonido directo radiado por los instrumentos inciden en el oyente las primeras reflexiones procedentes del muro de detrás de los músicos, el techo, los laterales del escenario. Estas reflexiones, así como el sonido directo, inciden en el oyente con un ángulo de unos 150° aproximadamente en su plano horizontal; dependiendo de la geometría de la sala, los materiales de las paredes, y del diseño en general de la sala, estas primeras reflexiones suelen alcanzar al oyente entre 10 y 300



milisegundos después del sonido directo y suelen tener mucha energía.

Una partitura de una pieza musical tiene un valor de autocorrelación (correlación cruzada de la señal consigo misma) que indica lo que se asemeja el sonido presente al que ha sonado previamente. Esta autocorrelación, depende de la duración de la pieza y de la pieza en sí misma, es decir, de las diferentes notas y figuras rítmicas que la componen. Pero esta pieza musical, la cual sobre papel tiene un valor de autocorrelación, al ser ejecutada en cualquier espacio existente, será modificada por el entorno acústico que le rodea debido a los ángulos de incidencia del sonido en el oyente, número y carácter de las reflexiones, y en definitiva por la interacción de la sala en la que se ejecuta dicha obra con las ondas sonoras que se radian del escenario. El valor numérico de la correlación está comprendido 0 y 1, donde un valor de 1 significa que el próximo sonido será totalmente predecible y 0 significaría que no existe ninguna relación entre las sucesivas notas musicales o transitorios, o incluso que no existe ninguna relación entre el comienzo de una nota y su final.

Existe también la correlación entre las señales que alcanzan a los oídos izquierdo y derecho, este parámetro se llama correlación cruzada interaural. El hecho de que la correlación cruzada interaural sea menor que uno hace posible la percepción estereofónica y binaural. Por lo que tenemos factores de correlación de las señales que inciden en un oído solamente y factores de correlación que describen la diferencia entre las señales que alcanzan ambos oídos.

Estilos de música diferentes conllevan diferentes valores de autocorrelación, si empleamos, por ejemplo, ventanas de análisis de tres segundos o más. Por ejemplo, un órgano en una catedral tendrá un valor mucho mayor que un solo de guitarra sin nada de reverberación. Esto nos



hace ver un hecho muy importante y es que el valor de la autocorrelación de una pieza musical determina el entorno acústico en el que sonará mejor. Por lo que se entiende que un gran auditorio puede sonar increíblemente bien para un orquesta sinfónica pero horrible para un cuarteto de cuerda. La ventaja que podemos tener en nuestro sistema de reproducción, la cual no existe en los auditorios o salas reales, es que podemos acomodar el tipo de sala a recrear dependiendo del tipo de música que vayamos a reproducir.

Factores clave para lidiar con problemas de autocorrelación son las características de la reverberación de la sala. Concretamente la correlación cruzada interaural de las primeras reflexiones que inciden en el oyente es un factor determinante en la calidad de una sala; esta correlación nos indica que es lo que sucede en los instantes después de que llegue el sonido directo. Investigaciones en el campo del diseño de auditorios muestran que este valor de correlación cruzada interaural ha de mantenerse lo más bajo posible (diferencias entre las señales que alcanzan a los oídos durante el mayor tiempo posible) para experimentar una escucha lo más agradable posible. Lo que para los audiófilos supone mantener la mayor separación entre canales posible.

Según Yoichi Ando [8], "La correlación cruzada interaural depende mayormente de la dirección con la que inciden en el oyente las primeras reflexiones así como en su amplitud. La función de correlación cruzada interaural muestra un mínimo para un ángulo de incidencia de 55° desde el plano medio". Podría decirse que para un oyente medio, su cabeza y sus oídos están formados de tal manera que para un sonido proveniente de 55° a la derecha de su nariz, incidiendo en su oído derecho, no se producirá una buena réplica de sí mismo en el oído izquierdo debido al retardo existente, filtrado en frecuencia y atenuación causado por la obstrucción de la cabeza y la interacción del oído externo. El valor de la



correlación cruzada interaural en esta situación suele rondar 0,36 lo que indica buena separación. Pero si el sonido proviene directamente de enfrente del oyente, el valor de la correlación cruzada interaural será 1 ya que ambos oídos reciben la misma señal en el mismo instante de tiempo (aproximadamente), lo que es deseable para el sonido directo de fuentes sonoras situadas enfrente del oyente. Con lo que el sonido directo que le llega al oyente debe estar mucho más correlado que las reflexiones que lo siguen; ya que a medida que las reflexiones rebotan en el auditorio, la correlación cruzada interaural del campo reverberante aumenta de valor. La velocidad mediante la cual el valor de la correlación cruzada interaural crece en condiciones de campo reverberante determina lo adecuada que es una sala para interpretar una pieza musical con un valor de autocorrelación determinada. Razón por la que un órgano de tubos suena mejor en una iglesia que en una discoteca.



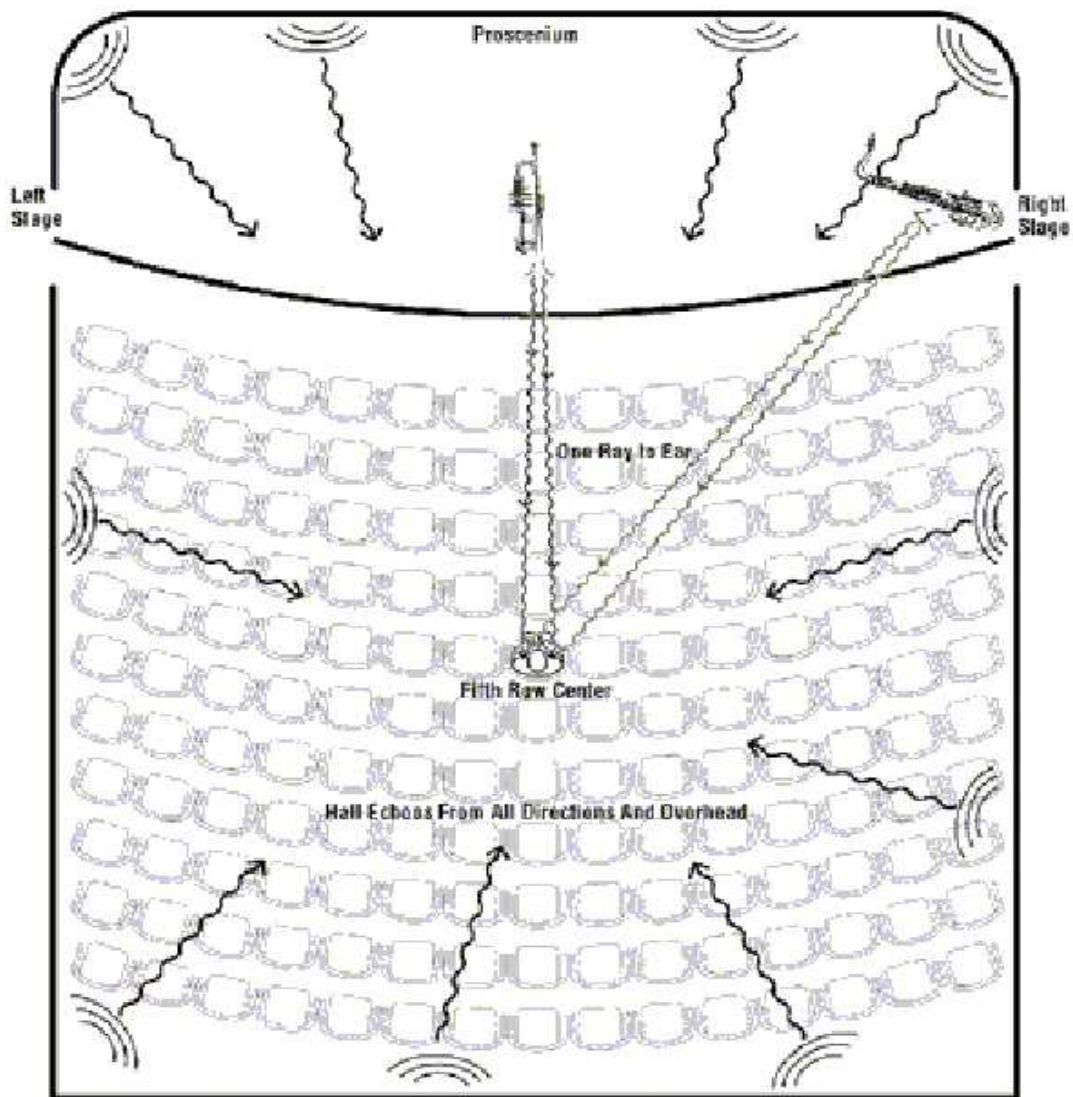


Figura 5.1. Ilustración de las diferentes señales que alcanzan a un oyente en un auditorio.

La moraleja de todo esto es que en nuestro campo sonoro, recreado en casa, las primeras reflexiones deben tener la mayor separación izquierda- derecha como nos sea posible al realizar la grabación o al procesar el ambiente, y que muchas de esas reflexiones deberán provenir de una región de más o menos 55° de ancho.

Muchas reflexiones que tienen lugar en el proscenio del auditorio

proviene desde arriba, sin embargo estas reflexiones, más o menos centrales, inciden en ambos oídos prácticamente a la vez, desde el mismo ángulo y con la misma amplitud. Con lo que estas reflexiones están muy correladas entre sí en los oídos y contribuyen poco al carácter espacial de la sala. Así que en nuestra reconstrucción de auditorios en casa, ignoraremos estas reflexiones, de hecho existen estudios con fuentes elevadas radiando reflexiones frontales, que demuestran que no son necesarias para lograr la sensación de realidad que buscamos.

Citando de nuevo a Yoichi Ando [9], "El retardo en tiempo entre la primera reflexión y la segunda debe ser de 0,8 veces el retardo existente entre el instante de llegada del sonido directo y la primera reflexión". Lo que quiere decir que las reflexiones cada vez deben de estar más cerca en el tiempo unas de otras. "Si la primera reflexión tiene la misma amplitud y respuesta en frecuencia que el sonido directo, entonces, el retardo deseado es idéntico al tiempo necesario para el cual la envolvente de la función de autocorrelación (coherencia del sonido directo) cae a un valor de 0,1 veces su valor inicial". Ando comprobó que retardos de 30 a 130 milisegundos para la primera reflexión eran preferidos, siendo la preferencia del oyente, en el tiempo de retardo de la reflexión, proporcional a la duración de la función de autocorrelación o el tiempo medio durante el cual la música está autocorrelada más fuertemente. Intuitivamente nos damos cuenta que para, por ejemplo, en el caso de música para órgano, si la primera reflexión llega muy pronto sería inefectiva, ya que el sonido directo de la nota estaría todavía sonando.

Seguidamente de estas primeras reflexiones, las cuales cada vez están más próximas entre sí en el tiempo, llega un punto en que el oído (incluso los instrumentos de medida) no llega a distinguirlos individualmente, a partir de ahí se las nombra de forma colectiva reverberación, y forman un campo reverberante. El campo reverberante



posee muchos parámetros que lo describen, como el nivel de presión sonora del campo reverberante, su densidad, su respuesta en frecuencia y como varía a lo largo del tiempo, su carácter difuso, su correlación cruzada interaural, su decaimiento, etc. Estos parámetros, junto con las primeras reflexiones, indican a nuestro cerebro la viveza de la sala e incluso el volumen del recinto en el que nos encontramos.

De nuevo las preferencias de las características de la reverberación dependen del tipo de música en cuestión. Música de cámara, combos de jazz suelen sonar mejor con tiempos de reverberación más cortos que agrupaciones corales o música para órganos de iglesia. En términos numéricos los tiempos de reverberación típicos varían de hasta más de 3 segundos en catedrales pasando por de 1 a 2 segundos en óperas para llegar a los 0,4 a 1 segundos de salas de conciertos como bares y pubs con música en directo.

Dicho todo lo anterior se entiende el por qué un tipo de música suena mejor en determinados lugares que en otros; orquestas sinfónicas suenan mejor en auditorios grandes mientras que cuartetos suenan mejor en salas más pequeñas. Aunque podríamos construir en casa una sala de escucha que imite de forma precisa al Carnegie Hall, esta habitación no sería apropiada para reproducir discos de jazz, óperas o composiciones para solamente un piano. Debido a que el usuario del sistema tendrá una colección amplia en cuanto a estilos musicales, lo ideal sería poder adaptar nuestra sala o sistema de reproducción a la música que se va a reproducir de manera sencilla y rápida. Tarea que llevará a cabo dispositivos encargados de convolucionar señales con respuestas al impulso reales.

En cuanto a la percepción de profundidad, es sabido que los oídos no son tan buenos sensores como los ojos. La percepción sonora de



profundidad depende de valores altos de la diferencia de niveles interaural para fuentes cercanas al oyente, mientras que para fuentes más alejadas nos centramos en la sonoridad de la fuente, diferencias de timbre con la distancia (pérdidas en alta frecuencia) y en diferencias en tiempos de llegada entre el sonido directo y las reflexiones. Todas estas características son capturadas bastante fielmente por los micrófonos o pueden ser manipuladas por ingenieros de grabación usando compensaciones de retardo para micrófonos puntuales. Debido a que el sistema de reproducción ambiofónico recupera muchas más diferencias de nivel interaurales que el sistema estereofónico, la percepción de profundidad mejora. La inclusión de altavoces de ambiente radiando solo el ambiente de la sala de conciertos también contribuye a lograr mayor sensación de profundidad.

La relación entre el sonido directo y el reflejado suele ser difícil de capturar en las grabaciones. Si la toma se ha realizado en exteriores o con una disposición microfónica tal que los micrófonos no captan muchas reflexiones o reverberación natural de la sala, entonces, cualquier ambiente que se añada posteriormente en la mezcla o en la reproducción afectara a todas las posiciones de las fuentes de manera idéntica. Esto hace que al aumentar el nivel del campo reverberante, el oyente perciba que se encuentra más atrás en el auditorio en vez de aumentar la distancia percibida entre el instrumento más cercano y el más alejado del oyente en el escenario. Aunque en una sala de conciertos normal, el escenario y los muros a su alrededor son tan reflectantes que el sonido de los instrumentos que incide en el oyente, independientemente de donde estén colocados en el escenario (adelante o en la parte más lejana a los oyentes), tiene casi la misma proporción de sonido directo a sonido reflejado. La percepción de esta profundidad del escenario, en contraste con la distancia relativa a la que se percibe el escenario del oyente, no es fácil de percibir en una sala típica. Teniendo en cuenta que en algunas



grabaciones se realiza una toma de sonido en la proximidad de las fuentes sonoras mediante micrófonos puntuales, de manera que no existen diferencias en las grabaciones en lo relativo a la relación sonido directo de las fuentes a sonido reflejado por la sala, hecho que se compensa colocando micrófonos en la sala con la misión de recoger el ambiente de la sala, con lo que al mezclar ambas señales todos los instrumentos retroceden en la misma proporción. Este hecho, aunque cierto, no es significativo para lograr una sensación de realidad en la reproducción, es decir el sentirse como si se estuviera en la sala de conciertos en lugar de en casa sentado frente a los altavoces.



CAPITULO 6: CARACTERISTICAS ACUSTICAS DE UNA SALA DE ESCUCHA

6.1- Características de la Sala de Escucha.

Sería lógico pensar que para el sistema ambiofónico, como es el caso del sistema esterofónico, la existencia de reflexiones en la sala de escucha son problemas muy a tener en cuenta. Pero el caso es que para el sistema ambiofónico no son tan perjudiciales, por lo que en principio no necesitaríamos corregir la respuesta de la sala salvo en baja frecuencia, donde los modos propios de la sala interactúan con el campo sonoro alojado entre sus paredes. En el caso del sistema estereofónico, donde los altavoces están ámpliamente separados, las reflexiones que tienen lugar en las superficies de la sala tienen un retardo de llegada comparable al tiempo de llegada de la señal radiada directamente por los altavoces, razón por la que interfieren en el proceso de localización de fuentes y con la respuesta de los pabellones auditivos. Sin embargo, en el sistema ambiofónico, los altavoces están muy próximos entre sí y el oyente suele colocarse más cerca de los altavoces que en la disposición estereofónica, por lo que las reflexiones de la sala tienen un mayor retardo que el sonido directo con lo que su efecto se minimiza. Es más, si en nuestro sistema ambiofónico empleamos altavoces extra para radiar señales de ambiente derivadas de respuestas al impulso, estas señales retrasadas en tiempo respecto al sonido directo radiado por los altavoces frontales, enmascararán a las reflexiones producidas por la sala. Lo anterior no se aplica para las frecuencias más bajas donde los modos propios de la sala afectan al campo sonoro tanto como en el sistema estereofónico, pero con la ventaja de que teniendo los altavoces juntos será más fácil controlar estos efectos mediante softwares correctores de sala. Por lo que en la mayoría de las situaciones en las que se instala un sistema ambiofónico, la



respuesta de la sala es mucho menos crítica que en el caso del sistema estereofónico o el 5.1.

La mayoría de las habitaciones de los hogares medios sufren de falta de absorción, lo que debemos eliminar para conseguir una experiencia auditiva próxima la experimentaríamos en un auditorio real. Para optimizar una sala para la reproducción ambiofónica nos basta con bajar el tiempo de reverberación de la sala hasta 0,2 segundos, lo que está lejos de los 0,01 segundos de una cámara anecóica. Recordemos que en un auditorio real existen reflexiones cortas en tiempo procedentes de asientos cercanos o de cabezas de otros oyentes por lo que no se necesita "matar" totalmente a la sala de escucha. Para reducir el tiempo de reverberación en todo el rango de frecuencias audibles tenemos que emplear varias técnicas de control para bajas y altas frecuencias. La reducción de las reflexiones en alta frecuencia se puede realizar empleando materiales no muy caros en las paredes de la sala mientras que reflexiones de baja frecuencia así como los modos propios de la sala se tratan mejor con dispositivos electrónicos de corrección de la respuesta del conjunto formado por altavoces y sala.

Como sabemos, las ondas reflejadas en las superficies de la sala deben recorrer un camino más largo, con lo que llegan a los oídos del oyente instantes después que el sonido directo radiado por la fuente, así como con un contenido espectral y niveles de presión sonora diferentes a la onda directa. El cerebro interpreta estas reflexiones de manera diferente en función de su dirección de incidencia en el oído, nivel de presión sonora, el retardo con que llegan y su contenido espectral. Una reflexión con un retardo de menos de 20ms se percibe como si estuviese fundido con la onda directa, con lo que el cerebro no distingue dos sucesos sonoros separados, si no uno. Para sistemas de reproducción estereofónicos, las reflexiones potentes y muy tempranas pueden alterar



el carácter tonal de la fuente así como causar estragos en la imagen estéreo. Las reflexiones que llegan a continuación de esos 20 ms son percibidos como ambiente de la sala; y si seguimos aumentando el tiempo de llegada (es decir el retardo con que llegan las reflexiones), las reflexiones serán percibidas como ecos aislados o un conjunto de ecos en los que no podemos distinguir sucesos sonoros individuales, lo que llamamos reverberación. Los ecos percibidos individualmente pueden ser muy perjudiciales para el disfrute de la música y distraer al oyente, sobre todo si debido a superficies cóncavas se logra concentrar la energía acústica de varias reflexiones en un punto que coincida con el oyente.

Si queremos que nuestra sala tenga una acústica óptima para la reproducción de música tendremos que lidiar con los tres fenómenos físicos que ocurren cuando incide una onda de presión sonora en las superficies que la limitan, esto es la absorción, reflexión y difusión. Estos fenómenos dependen tanto de la frecuencia de la onda sonora incidente como de las propiedades físicas (forma y disposición geométrica, coeficiente de absorción...) del material con el que están hechas las superficies.

– **Absorción:**

Una superficie absorbente, es una superficie que, gracias a consumir energía sonora dentro de ella, la energía que refleja es menor que la energía que incide sobre ella. Formalmente, un absorbente se describe por el denominado coeficiente de absorción que es el resultado del cociente entre la energía absorbida y la energía incidente sobre la superficie bajo prueba.



– **Difusión:**

La difusión es el efecto de redistribuir espacialmente la energía acústica que incide sobre una superficie denominada difusor. En el 1er Congreso Latinoamericano de AES se presentó una nueva y más completa definición del fenómeno Difusión: “es el efecto de diseminar la energía acústica incidente sobre una superficie en tanto el espacio y en el tiempo”.

Existen dos formas de evaluar una superficie difusora. Una es mediante el patrón polar de la reflexión sobre la misma desde varios ángulos de incidencia. Aquella superficie que produzca una figura semejante a una semicircunferencia será la que supuestamente posee mejores características de diseminación de la energía en el espacio. Otra forma es evaluando el coeficiente de difusión, el cual es aquella porción de energía que no es absorbida ni reflejada en forma especular desde la superficie bajo prueba para varios ángulos de incidencia. Ambos parámetros no tienen todavía el consenso generalizado de la comunidad científica, porque presentan diferentes tipos de errores en su concepción o medición.



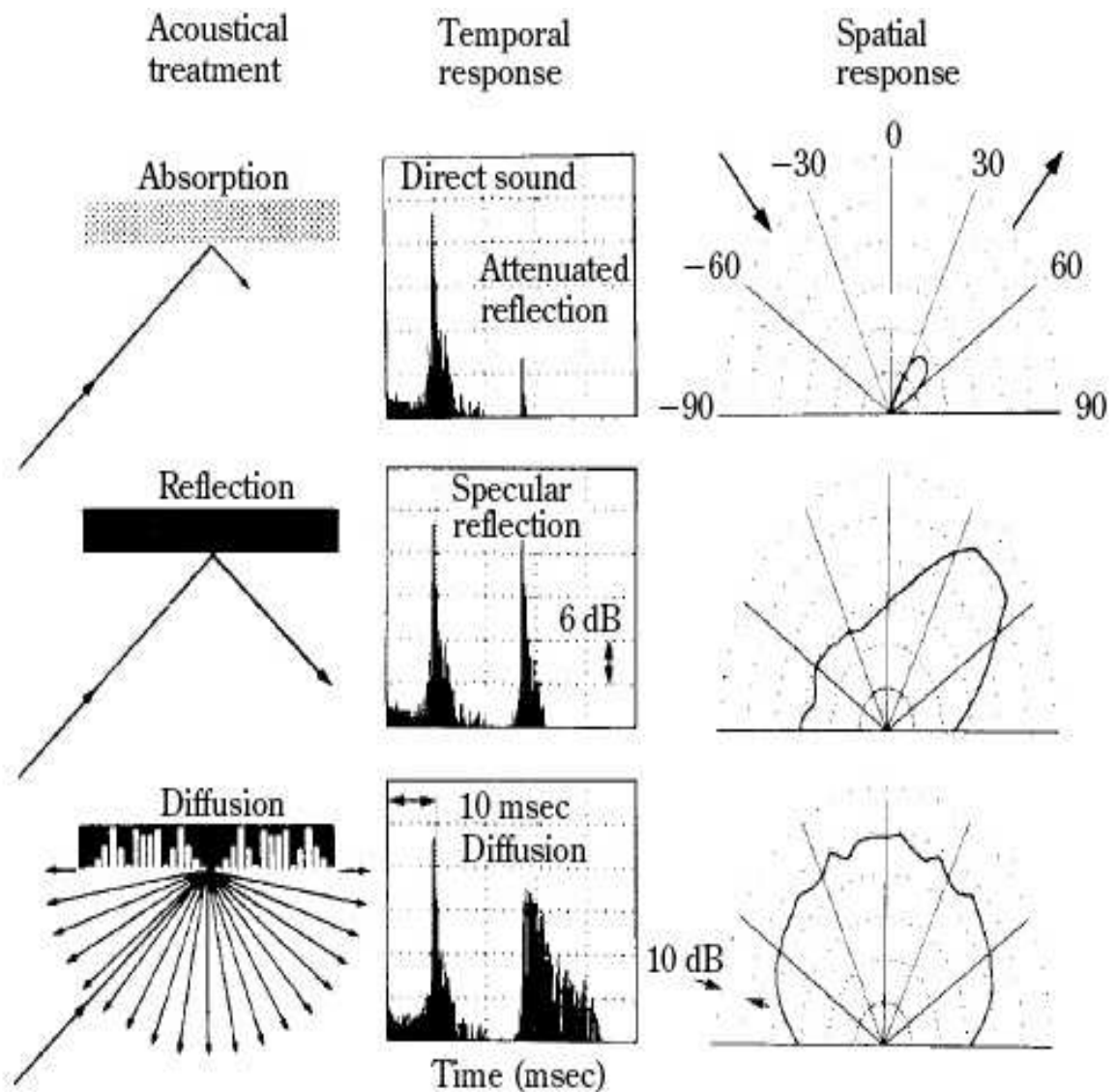


Figura 6.1. Comparación de los tres fenómenos físicos: absorción, reflexión y difusión.

Podemos dividir la gran familia de difusores existentes en no optimizados y optimizados. Los primeros se basan en formas irregulares aleatorias, de la colocación de materiales con diferentes coeficientes de absorción uno al lado de otro y de aquellas formas geométricas que diseminan la energía mayoritariamente en el espacio y minoritariamente en el tiempo; estos últimos son los difusores conocidos como cilíndricos y/o policilíndricos. Los segundos son aquellos generados por secuencias numéricas (basadas todas en números primos) que logran maximizar simultáneamente la diseminación espacial y la temporal dentro de un

ancho de banda específico (las diferentes reflexiones “salen” del difusor a diferentes tiempos) .



Figura 6.2. Difusor Auralex.

Por ejemplo, enmoquetando paredes de hormigón, conseguiremos absorber energía de alta frecuencia pero se reflejará toda la energía de baja frecuencia de vuelta a la sala.

Un ejemplo cotidiano donde aparecen los varios fenómenos a la vez sería por ejemplo en el caso de que en nuestra sala objeto de estudio tuviéramos una estantería; aquí las altas frecuencias serían absorbidas por la estantería, las medias sufrirían de difusión y las bajas frecuencias

ignorarían por completo la estantería. Con lo que no es fácil, pero tampoco imposible, controlar el comportamiento acústico de nuestra sala en un gran ancho de banda.

Si tenemos en cuenta que un altavoz dirigido hacia el oyente radiará energía también en direcciones laterales e incluso hacia su parte trasera, en una sala sin tratar acústicamente esta energía dispersada por el altavoz incidirá en superficies de la sala y será devuelta al oyente unos pocos milisegundos después de que incida en él el sonido directo radiado por el altavoz, lo que degrada notoriamente la fidelidad de la reproducción musical. Por ejemplo, un salón de una vivienda promedio, sin tratar, tiene un tiempo de reverberación aproximado de 0,6 segundos. Puede darse el caso que una sala para música de cámara tenga un tiempo de reverberación de tan solo 0,8 segundos, e incluso algún auditorio puede tener un tiempo de reverberación de 1,5 segundos; con lo que resulta evidente que no se puede despreciar los efectos introducidos por el campo reverberante de nuestra sala al reproducir música interpretada en espacios acústicos como los anteriormente descritos. Pongamos que estamos escuchando un arreglo coral, en la grabación hay una relación de sonido directo a reverberante normal, es decir que podemos apreciar ambas propiedades del sonido. Al reproducir en este salón promedio mediante un sistema estereofónico el sonido directo excita la sala produciendo un campo reverberante que indica al cerebro que la ejecución musical tiene lugar en un sitio pequeño y brillante; pero al instante el campo reverberante de la grabación reproducido por los altavoces alcanza al oyente indicándole que los ejecutantes se encuentran en un ambiente acústico grande y cálido. Si a esto le añadimos los efectos de filtrado tipo peine y la confusión causada al cerebro por la llegada de primeras reflexiones provocadas por la sala, las cuales son "falsas" ya que no están en la grabación; parece fácil entender por qué al reproducir música en sistemas estereofónicos nunca van a sonar de forma realista por mucho



que invirtamos en nuestro equipo.

Una sala de escucha para un sistema de reproducción ambiofónico no debería exceder los 0,3 segundos de tiempo de reverberación T60. Pero hay que intentar que los tiempos de reverberación en bandas de tercio de octava desde unos 250 Hz a 4 kHz no se desvíen del tiempo de reverberación T60 más de un 25% del valor de este ya que eso conllevaría anomalías en la respuesta en frecuencia, lo que se traduce en que unas frecuencias se extinguirían rápidamente mientras que otras permanecerían más tiempo que el resto coloreando la señal que recibe el oyente. Siguiendo esta premisa aseguramos que la energía reverberante que entrega la sala es más o menos plana en la zona más sensible del oído humano por lo que producirá la mínima coloración posible. Pero hay un problema añadido y es el control de la energía de baja frecuencia, donde el tiempo de reverberación en esas bandas puede triplicar el tiempo de reverberación T60. Aparentemente muchos fabricantes venden resonadores y trampas de graves, los cuales suelen ser bastante deficientes en su cometido, aunque se nos anuncie como la solución definitiva en control acústico. La solución al control de las bajas frecuencias pasa por sistemas electrónicos de corrección de salas, esto va a ser mucho más efectivo y barato que tratar de meter cuñas de material absorbente de aproximadamente un metro o más para intenta absorber la energía de estas bandas de frecuencia.

Hay que tener en cuenta como colocamos nuestros materiales acústicos en las paredes de nuestra sala a tratar; ya que, aunque si colocamos por ejemplo 20 m² de material absorbente entre las paredes laterales obtendremos el mismo T60 que si colocamos el mismo material en las paredes frontal y trasera; seguramente existan diferencias notables en la calidad de la reproducción musical e incluso en la inteligibilidad de la música o de la palabra. Se ha comprobado que la mejor solución es



desplegar material absorbente en techos y en las partes frontales de las paredes laterales, ya que esto hace que el sonido radiado por los altavoces a estas superficies no sea devuelto a la sala (y por consiguiente al oyente) ocasionando reflexiones que lleguen pocos instantes después al oyente, las cuales, como ya se mencionado antes, son muy perjudiciales.

Uno de los problemas más extendidos a la hora de reproducir música en ambientes domésticos es el hecho de que, debido a su tamaño y disposición geométrica, nuestra sala presenta un comportamiento errático en bajas frecuencias. Así, si la longitud de onda de una nota musical coincide con una de las longitudes entre las superficies que limitan la sala, se producirán ondas estacionarias que harán que esa nota se refuerce o cancele, en función del lugar en el que estemos dentro de la sala y la frecuencia del modo. Este fenómeno se debe a que la mayoría de salas no pueden absorber la energía de baja frecuencia e impedir que sea devuelta a la sala, con lo que interfiere consigo mismo al cabo de unas cuantas reflexiones. Esto se refleja claramente en las curvas de T60 en función de la frecuencia, se observa que el T60 en bajas frecuencias en una sala pequeña es mucho mayor que el T60 a altas frecuencias, y que la densidad de la cola de la reverberación es más densa que en un auditorio. Pero aunque tratemos nuestra sala a conciencia, aunque la diseñemos con unas proporciones de tal manera que evitemos lo mejor que podamos la coloración que produce los modos propios, nuestra sala, tendrá diferentes respuestas en bajas frecuencias en diferentes posiciones. De este modo, por ejemplo, el control de un estudio de grabación puede sonar maravillosamente fiel en la posición en la que se siente el ingeniero de sonido, pero en un sillón situado digamos a tres metros detrás de él podrá sonar con demasiados contenido de bajas frecuencias, lo que se traduce en falta de brillo, falta de presencia, muy oscuro, etc...

Actualmente, el mejor método para corregir la respuesta de una sala



en bajas frecuencias pasa por lo que se conoce como RCS (*room correction system*) . La idea es simple y parte de la premisa de que queremos corregir la respuesta en la posición donde se realiza la escucha, así que colocamos un micrófono de medida en dicha posición y medimos la respuesta del conjunto formado por nuestros altavoces y nuestra sala. Una vez que sabemos con exactitud como interactúa en bajas frecuencias nuestro sistema de reproducción con nuestra sala en ese punto del espacio, podemos disponer de una esta herramienta, que no es más que un procesador digital de señal capaz de corregir los errores en bajas frecuencias. Por poner un ejemplo, hay sistemas que pueden llegar a tener una precisión de 2 Hz e incluso más. Pero también podría ser interesante medir ciertos puntos estratégicos, una vez corregida la respuesta y conocer con más detalle la respuesta de nuestra sala.

Pero no solo nos interesa saber la respuesta en frecuencia de la sala si no su respuesta temporal, es decir, como responderá a los transitorios; por lo que realmente vamos a medir es la respuesta al impulso. Para entender esto mejor pongamos un ejemplo: medimos la respuesta con un barrido sinusoidal, y un micrófono de medida conectado a un analizador de espectro; con dicha respuesta, pongamos por ejemplo, que una onda estacionaria provoca a 100 Hz un mínimo en la respuesta de unos 10 dB, por lo que la solución sería dar 10 dB de ganancia a nuestro sistema de corrección a 100 Hz. Lo que en realidad percibiría un oyente al reproducir música, sería un pico audible de unos 10 dB hasta que la onda estacionaria se forme y cancele dicho pico, por lo que nuestra respuesta en frecuencia, corregida aparentemente plana, tiene una respuesta temporal indeseable, ya que si tenemos en cuenta la música como una sucesión de transitorios, nuestro sistema no haría más que distorsionarlos. Con lo que queda demostrado que lo que se necesita corregir es tanto la respuesta en frecuencia como la respuesta a transitorios de la sala. Por lo que el sistema se puede resumir en un



algoritmo que mide y corrige la respuesta al impulso en la posición de escucha.

Sabine ya dejó claro que la respuesta de una sala es independiente del nivel de presión sonora con el que se la excite. Si nos ponemos en la piel ,o mejor dicho en los oídos, de un oyente en un gran auditorio, apreciaremos el carácter de dicho auditorio hasta en los momentos de silencio en los que el maestro se sube al podio y levanta la batuta (el sonido de sus pasos, estornudos de los músicos o público, o cualquier sonido no relacionado con la ejecución musical). Este "silencio" en el que apreciamos ya los matices que introduce la reverberación del auditorio, es muy difícil de conseguir en nuestro salón de una vivienda promedio ya que no esta ni diseñado ni construida para ello. Si apagamos cualquier cosa que pueda emitir cualquier ruido, cerramos las ventanas y puertas y nos concentramos un par de minutos en escuchar nos daremos cuenta del ruido indeseable se cuele a la sala del exterior. Para lidiar con este concepto de cuán "silenciosa" es una sala se han desarrollado las curvas NC (noise criteria) las cuales describen el ruido de fondo de una sala.

Estas curvas suelen ir en incrementos de 5 dB desde la NC-15 (muy silenciosa) hasta la NC-70 (muy ruidosa) y están ponderadas en frecuencia, así como existen diferentes curvas para diferentes naturalezas de ruidos (estacionarios, intermitentes). Para poner un ejemplo, un estudio de grabación tendría una curva NC-20, con lo que una sala acondicionada para la reproducción mediante un sistema ambiofónico no debería exceder la curva NC-35 para poder apreciar todos los detalles.

Otro problema fundamental de las salas de una vivienda es, que debido a su tamaño, pueden producirse ondas estacionarias en frecuencias cuya longitud de onda tenga relación con alguna dimensión de la sala, lo que conlleva máximos y mínimos en la respuesta en frecuencia



de nuestra sala dependiendo de la frecuencia y del sitio concreto de la sala en el que nos encontremos, lo que vendrá en detrimento de la calidad de la escucha; pero esto no solo afectará a esa frecuencia si no también a sus armónicos. Estas ondas estacionarias se producen debido a la incapacidad de la sala de absorber las reflexiones de baja frecuencia y evitar que interactuen entre sí, provocando una respuesta no plana en frecuencia. Esto se hace patente observando que la inmensa mayoría de los casos (salas pequeñas) el tiempo de reverberación T60 para bajas frecuencias es mayor que el T60 para altas frecuencias; a su vez la densidad de reflexiones en la cola de reverberación es mayor que en un auditorio. Aunque se ha estudiado que existen relaciones entre las dimensiones de la sala y materiales acústicos para evitar las reflexiones en baja frecuencia, cabe destacar que hasta la sala mejor diseñada y tratada acústicamente para distribuir lo más suavemente posible los modos de la sala en baja frecuencia, presentará algunos puntos con realce de bajas frecuencias, cancelaciones en otros puntos y buena respuesta en otras posiciones. Aunque para nuestro caso, lo único que nos interesa es una buena respuesta en el lugar de escucha del sistema formado por altavoces+sala.



CAPITULO 7: EL SISTEMA DE GRABACIÓN AMBIOFÓNICO

La gran mayoría de los discos grabados mediante técnicas microfónicas coincidentes o espaciados, al ser reproducido mediante un sistema ambiofónico, producen en el oyente una sensación de escucha mucho más real y satisfactoria que en el sistema estereofónico. Pero todavía se puede llegar más allá si se tiene en cuenta, a la hora de realizar la disposición microfónica para la toma de sonido, que en la reproducción de esa grabación a través de un sistema ambiofónico, la mitad de atrás así como los laterales del ambiente de la sala serán sintetizados, no habrá diafonía y que los altavoces frontales están muy juntos el uno del otro. Se pueden lograr grabaciones en las que el oyente experimente la sensación de "estar ahí", en el mismo espacio acústico que los interpretes (a diferencia de la sensación de "están allí" conseguido con el sistema estereofónico) empleando un micrófono con forma de cabeza humana sin oído externo pero con agujeros en el sitio de la oreja en donde se colocan los micrófonos. Para obtener los mejores resultados es necesario aislar el micrófono para que recoja lo mínimo posible del ambiente trasero de la sala; a esta disposición microfónica la llamamos ambiófono, el cual optimiza la grabación para la reproducción en un sistema ambiofónico.

Esta disposición microfónica es especialmente óptima para el caso de fuentes sonoras localizadas cerca del centro del escenario ya que las señales alcanzan a los oídos como lo harían en un auditorio real. Con lo que un rayo acústico de cualquier instrumento localizado cerca del centro del escenario alcanza el oído izquierdo del micrófono, se pasa por el altavoz izquierdo donde se radia directamente al oído externo izquierdo del oyente. El hecho de que la cabeza del micrófono y la del oyente no sean la misma no es un problema muy grave para fuentes sonoras



localizadas en el centro del escenario, las cuales no tienen que atravesar la cabeza del oyente ni la del micrófono. Para fuentes localizadas a los lados, la esfera que emula la cabeza humana hace de sustituto de la Función de Transferencia Relativa a la Cabeza (HRTF) del oyente, pero por lo menos en la cadena existe solo una HRTF y solo un oído externo, el cual además es el del oyente. Quizás la parte más complicada de la migración al sistema ambiofónico será la de convencer a los ingenieros de grabación a usar técnicas microfónicas que sean ambio-compatibles.

Como sabemos ya, el sistema de reproducción ambiofónico combina la cancelación de la diafonía, el empleo de un sistema de corrección de altavoces y la recreación del ambiente mediante convolución para conseguir entregar a cada oído una réplica casi exacta de lo que el oyente hubiese escuchado si éste estuviese situado en el lugar del micrófono durante la ejecución musical.

Otro hecho nada despreciable es, que a pesar de las múltiples formas de realizar una grabación estereofónica (micrófonos coincidentes, no coincidentes, toma multimicrofónica...), y las técnicas de ecualización, procesado de dinámicas, panorámicos (en definitiva el proceso de mezcla estereofónica); el sistema ambiofónico es totalmente compatible y eleva la sensación de viveza de las grabaciones "mal llamadas" estereofónicas. Estas grabaciones, que debemos considerarlas como de dos canales más que añadirles el calificativo de estereofónicas, no son inherentemente estereofónicas. Esta afirmación se debe a que si concebimos el sistema estereofónico como hizo Blumlein, es decir, como la reproducción sonora mediante la disposición en triángulo equilátero del oyente y los altavoces; al realizar las tomas de sonido, no se tienen en cuenta los fenómenos que tienen lugar en la reproducción estereofónica: como que la imagen sonora estará localizada en el espacio comprendido entre los altavoces, el error en el ángulo de incidencia y el errores en el efecto de la sombra acústica



de la cabeza para fuentes situadas en el centro, la localización se basará en fuentes fantasma, filtrado tipo peine, ambientes laterales y traseros radiados desde el frente, etc...

El hecho de que los ingenieros de grabación siguen monitorando las grabaciones mediante la disposición estereofónica estándar (triángulo equilátero), conlleva que no se haga mucho por contrarrestar las deficiencias del sistema estereofónico, se dan por hecho o se ignoran. Cabe preguntarse si existe algún método de realizar grabaciones teniendo en cuenta todos estos aspectos psicoacústicos y teniendo en mente que la grabación se va reproducir mediante un sistema ambiofónico; y si realmente habrá diferencias notables al compararlo con los métodos habituales de registro sonoro en dos canales o sistemas optimizados de grabación multicanal.

Al contrario que en el cine, donde las escenas y espacios acústicos varían cada poco tiempo y existen efectos de aviones pasando por encima, teléfonos sonando en la habitación de atrás; en una ejecución musical (normalmente salvo efectos añadidos) los músicos de una orquesta no suelen moverse por el escenario y las cualidades acústicas del recinto permanecen constantes durante la interpretación. Además no existen, en principio, fuentes sonoras fuera del escenario y el escenario rara vez abarca más de 150° para un oyente situado en un buen sitio. Esto pone de manifiesto, que parece bastante inútil y sin sentido capturar sonidos directos que no provengan del escenario o registrar el ambiente de la sala durante toda la ejecución musical nota tras nota. Si medimos las ecuaciones que describen el comportamiento acústico de la sala en el mejor punto de escucha de la sala para varias posiciones de la fuente en el escenario, no debería ser necesario medir la respuesta de la sala o grabar la señales de ambiente durante la interpretación de la obra. Se podría medir la respuesta de la sala antes o después de la ejecución



musical, con o sin público; o se podría emplear una biblioteca de respuestas al impulso de las mejores salas del mundo. Tras lograr esta medida solo tendríamos que convolucionar la respuesta al impulso de la sala con las señales grabadas y así recrear el ambiente de la sala que queramos.

El convolucionador entrega las primeras reflexiones y la reverberación a los altavoces de ambiente, la cantidad de altavoces de ambiente es escalable. El proceso de recrear el ambiente mediante convolución comparado con realizar grabaciones con micrófonos del ambiente, nos asegura que absolutamente nada del sonido directo se radia por nuestros altavoces de ambiente. Así, los ingenieros de grabación no tienen por que tener en cuenta la relación entre campo directo y campo reverberante en los micrófonos, o su direccionalidad. Al tener respuestas al impulso almacenadas en el convolucionador es innecesario capturar el ambiente de una interpretación; de esta forma eliminamos la necesidad de almacenar estos datos, como pistas de ambiente y demás, por lo que se economizan los medios necesarios para desarrollar grabaciones.

Otra ventaja que presenta el sistema ambiofónico frente al sistema esterofónico o al 5.1, es que el usuario puede decidir aspectos sobre la sala que va simular para la reproducción musical; podemos elegir tanto el tipo de sala como el número de altavoces de ambiente así como su colocación. Destacar el concepto de que una sala con acústica "mala" puede presentar al oyente la misma sensación de realidad que una sala considerada como "buena". De todas formas nada impide al ingeniero de grabación de incluir en el disco recomendaciones sobre que respuesta al impulso o indicar alguna librería de respuestas al impulso disponibles en internet.



Estudios han demostrado que se satisface a oyentes exigentes cuando las señales de ambiente provienen de direcciones laterales, traseras, de arriba y frontales; además en ese orden de importancia, y además esas señales de ambiente deben estar lo menos correladas como sea posible.

Existe una cuestión a tratar con el tema de los aplausos del público durante la grabación de un concierto. En la disposición ambiofónica ocurrirá que, esos aplausos supondrán una señal trasera directa a captar por nuestros micrófonos, la cual, al ser reproducida por nuestro sistema ambiofónico, se radiará por los altavoces frontales y tras el proceso de convolución, será correctamente radiada por los altavoces de ambiente. Si consideramos este hecho como un problema, existe la opción de codificar el disco de tal forma que cuando estos aplausos arranquen, se realice un "muteado" de los canales frontales; esto también podrá realizarse siempre que se reprodujese una señal directa trasera, o lateral.

7.1- El Ambiófono.

Ahora vamos a analizar que tipo de disposición microfónica necesitamos para poder llevar a cabo nuestras grabaciones de manera que aprovechemos al máximo las ventajas del sistema ambiofónico. Vamos a suponer que tenemos entre manos la grabación de una orquesta sinfónica en un gran auditorio y que nada nos impide colocar la disposición microfónica en un buen lugar, como podría ser en la quinta fila al centro. ¿Que tipo de micrófonos vamos a emplear?

Lo primero a tener en cuenta es que no es deseable que los micrófonos recojan señales desde los laterales, parte trasera o procedente del techo de la sala, ya que este ambiente será recreado mediante



convolución con la respuesta al impulso de la sala; tampoco es deseable que reflexiones o reverberación frontales sean radiadas desde los altavoces frontales en la reproducción. Si conseguimos aislar lo máximo posible la disposición microfónica de señales laterales, traseras y del techo mediante el empleo de material absorbente, de manera que solo se recoja en los micrófonos señal directa radiada frontalmente desde el escenario, se podría emplear micrófonos de alta calidad omnidireccionales, que colorean la señal lo mínimo posible. Al tratarse de sistema binaural, necesitamos entregar a la entrada de los oídos del oyente el mismo campo sonoro que escucharía sentado en la posición de la disposición microfónica, por lo tanto necesitamos que los micrófonos estén espaciados una distancia similar a la de la cabeza humana. La perspectiva y la sensación de profundidad del escenario que percibe el oyente permanecen intactas a las que se experimentaría estando en el mismo sitio durante la ejecución musical.

Esto conlleva que para fuentes sonoras situadas en el centro del escenario, al reproducir la grabación no tendremos errores introducidos por la sombra acústica provocada por la cabeza el estar fuente, micrófonos y altavoces enfrente del oyente, con lo que se producirá muy poca coloración de la señal al rodear la onda de presión sonora la cabeza del oyente para alcanzar el oído. No obstante para fuentes situadas a los lados del escenario no tendrá lugar la respuesta de la sombra acústica (o diferencias de nivel interaurales para micrófonos omnidireccionales) y como sabemos, en nuestra cadena debe haber una interacción de este tipo. Como no es indispensable que esa respuesta sea la de nuestra propia cabeza, una solución bastante eficaz es colocar dos micrófonos omnidireccionales sobre la superficie de una cabeza creada artificialmente. Así, las señales que se radian desde los laterales del escenario inciden en el micrófono situado al lado contrario de nuestra supuesta cabeza, tras haber sufrido la atenuación provocada por la sombra de la cabeza. Al



reproducir este suceso sonoro, la onda de presión sonora será radiada desde los altavoces frontales, con lo que no se introducirá una segunda respuesta por sombra acústica de una cabeza. Este micrófono existe, ha sido diseñado por Gunther Thiele, se trata del Schoeps KFM-6.



Figura 7.1. Micrófono Schoeps KFM-6.

Aunque un micrófono con la forma más parecida a la forma de una cabeza humana sería más conveniente que una esfera, se sabe que la respuesta del oído externo es mucho más crítica que la respuesta provocada por la sombra acústica de la cabeza. La razón es que el sonido incide en el oyente desde casi la totalidad de las direcciones posibles y

atraviesa la cabeza sufriendo atenuaciones, difracciones y reflexiones en nuestro cuerpo en función de la frecuencia y el ángulo de incidencia. Con lo que se pone de manifiesto que, para el caso de la sombra acústica provocada por la cabeza, la respuesta que ha de interpretar nuestro cerebro, se debe a diferencias de tiempos de llegada y atenuaciones más que a patrones de filtrado tipo peine (como ocurre con la respuesta del oído externo).

Si se mantiene el escenario abarcando alrededor de 150° , en la reproducción se mantiene la localización de fuentes con bastante facilidad y fidelidad. Se observa también el hecho de que a unos 70° a los lados del oyente, los canales auditivos no tienen mucha sombra producida por el oído externo y por lo tanto la respuesta del oído externo es mucho más suave. Queda claro que la respuesta del oído externo es mucho más crítica para señales incidentes desde el centro y de frente y desde en medio atrás, por lo que parece buena idea asumir que si tiene que haber un error sea en los extremos laterales (ambiofonía) en lugar del plano medio (estéreo).

Se ve que el ambiófono teóricamente ideal sería un maniquí sin oído externo, con algún tipo de barrera acústica que le prevenga de recoger señales procedentes tanto de los laterales como de la parte trasera así como de arriba; el cual tendría dos micrófonos omnidireccionales situados en el lugar correspondiente a los oídos del maniquí, y situado en el mejor asiento de la sala. Con soportes físicos multicanal como DVD-A o SACD sería posible incluir grabaciones de ambiófonos en varias posiciones de oyente con el fin de que el oyente en su casa elija la que mejor le parezca, sería como elegir butaca dentro del auditorio. En este caso lo ideal sería incluir también las diferentes respuestas al impulso de la sala para cada punto en concreto de escucha, así las señales de ambiente generadas mediante convolución tendrían consistencia psicoacústica.



Un hecho a tener en cuenta es que, en las grabaciones actuales existe la tendencia generalizada de utilizar micrófonos para un instrumento o familia de instrumentos, es decir, micrófonos localizados en fuentes concretas aparte de la disposición microfónica principal de dos canales. Este hecho se hace muy notable en el sistema de reproducción ambiofónico, aunque mucho menos notable en estilos con pequeñas agrupaciones de músicos (grupos de pop-rock...). Pero existe también la posibilidad de medir la respuesta al impulso del escenario en el punto donde colocamos el micrófono localizado puntualmente. Para esto se emplea una señal impulsiva desde el escenario midiéndose en el ambiofónico. Después de realizar la grabación, la señal captada por el micrófono localizado en una fuente se convoluciona con la respuesta al impulso obtenida anteriormente y se mezcla con las señales captadas por el ambiofónico principal. Esta técnica descrita no debería ser empleada en situaciones en las que se busque la máxima fidelidad de lo que realmente ocurre en la obra interpretada, ya que si el director de la orquesta deseara que uno o varios instrumentos suenen por encima de otros los pondría más adelante o elevados en tarimas, es por tanto el responsable absoluto de su obra, nuestra función es captarla de la forma más fiel que nos sea posible para que en la reproducción se cree la mayor sensación de realidad posible.



CAPITULO 8: EL SISTEMA DE REPRODUCCIÓN AMBIOFÓNICO

Los elementos básicos de una cadena de reproducción ambiofónica son:

- **Cancelación de Diafonía:** los altavoces frontales izquierdo y derecho deben estar acústicamente aislados impidiendo que se radie señal al oído contrario para que la cancelación de la diafonía sea más efectiva.
- **Reverberación Lateral:** la reverberación lateral izquierda y derecha deben ser reconstruidas y reproducidas mediante altavoces situados lateralmente al oyente.
- **Reverberación Trasera:** reverberación trasera debe ser reconstruida y reproducida desde altavoces (izquierdo y derecho) situados detrás del oyente.
- **Colocación de los altavoces frontales enfrente del oyente:** esto produce que se elimine gran parte del error producido por la respuesta del pabellón auditivo.
- **Corrección de Altavoces:** aunque no es prioritario, el sistema gana mucho si los altavoces frontales principales son idénticos en respuesta frecuencia y sensibilidad.
- **Opcional:** una colocación y diseño mejorado de la disposición microfónica, el ambiófono.



8.1- Altavoces para Sistemas Ambiofónicos.

En el sistema de reproducción ambiofónico existen dos funciones diferentes que puede realizar un altavoz. La primera es crear un imagen sonora central sin emplear fuentes fantasma, evitando así el filtrado tipo peine; y la segunda es reproducir el ambiente y reverberación de manera envolvente. Para lo que vamos a suponer que nuestra sala no presenta ningún problema con grandes consecuencias en la respuesta al impulso.

Suponemos que tenemos colocados los altavoces frontales formando 20° con el oyente, por lo que están bien enfocados y dispuestos de forma que las ondas lleguen lo más coherentemente posible al oyente, reduciéndose así en número y amplitud las señales ligeramente retrasadas que siguen al sonido directo. Si tenemos en cuenta que el algoritmo que cancela la diafonía depende de que los altavoces tengan una respuesta idéntica y están situados simétricamente respecto al oyente, se ve claramente como el uso de altavoces de varias vías con filtros de cruce complicados es contraproducente ya que es muy difícil que tengan respuestas idénticas; por contra, los altavoces electrostáticos *full range* son bastante más controlables en este sentido.

Pero vamos primero a observar el sistema de audio multicanal más extendido comercialmente por ahora, el 5.1. En este sistema envolvente de reproducción de audio se recomienda la disposición de dos altavoces con patrón polar en dipolo colocados en los extremos laterales traseros, con el mínimo del dipolo apuntando al oyente. Estos altavoces en dipolo radian sonido por igual a ambos lados pero con fases contrarias, con lo que provocará cancelaciones cuando coincidan en un mismo punto del espacio. Debido a este hecho hay gente que se decanta por emplear altavoces en monopolo para los altavoces de *surround*. Este tipo de disposiciones podrían ser aceptables en el caso de películas o videojuegos.



No obstante en el caso de reproducir música clásica, jazz, etc; el sistema 5.1 parece haber ignorado algunas deficiencias acústicas en ambos tipos de altavoces de *surround*. Al emplear, por ejemplo, los altavoces en dipolo, asumimos que la sala de escucha es bastante viva, ya que sino, estos altavoces pasarán bastante desapercibidos.

Pero esta condición de que la sala de escucha sea bastante viva implica que el sonido directo radiado por los altavoces frontales se reflejará en las superficies de nuestra sala interactuando con ella y con otras ondas acústicas, y teniendo en cuenta que, además, en este sistema multicanal disponemos de tres altavoces frontales radiando directamente se hace patente que no podremos tratar de eliminar estas reflexiones con materiales absorbentes o difusores si queremos que los dipolos contribuyan al campo sonoro generado por nuestro sistema 5.1. Con lo que, para películas, estas primeras reflexiones no nos impiden localizar el dialogo o los efectos sonoros debido a ley del primer frente de onda. Pero en el caso de reproducir música clásica, estas primeras reflexiones producirán contradicciones psicoacústicas en nuestro cerebro; ya que estas reflexiones le informarán a nuestro cerebro que nos encontramos en un espacio pequeño mientras que la grabación le indica a nuestro cerebro que estamos en un espacio acústico grande, lo que hará que esa experiencia de escucha se degrade hasta el punto de que el cerebro del oyente resuelva el conflicto psicoacústico decidiendo que el campo sonoro que rodea al oyente no es real, lo que mucha gente denomina "enlatado". Esta es una de las razones por las que simplemente la localización de fuentes sonoras, no es suficiente para lograr una sensación de realismo, tanto en sistemas estereofónicos como en sistemas 5.1.

También podríamos elegir la opción de altavoces de *surround* directivos y enfocados hacia el oyente, y tratar acústicamente nuestra sala, esto conllevaría que nuestra imagen sonora frontal (ya sea con dos



altavoces o los tres altavoces frontales de un sistema 5.1) mejore bastante, pero la reproducción musical seguirá siendo irreal. Esto se explica fácilmente en el caso del sistema 5.1, en el que todas las reflexiones y sonido ambiente de la parte trasera de la sala se radiarán desde dos únicos puntos, mientras que en una situación real, el sonido proviene de muchos sitios diferentes (campo sonoro difuso). Incluso en el supuesto caso de que la grabación sea perfecta en términos de que en estos altavoces envolventes no haya sonido directo del escenario, aún así, no existe ninguna sala en el mundo en la que las reflexiones traseras y la cola de reverberación vengan solo de dos posiciones espaciales.

Con lo que podemos concluir que, el error del ángulo de incidencia de las ondas sonoras en el oído externo, sumado al bajo factor de correlación cruzada interaural, indican al cerebro que algo no está bien, con lo que la experiencia de escucha de música resulta insatisfactoria para el oyente exigente, acostumbrado a escuchar música en directo. Esto es extensible a sistemas incluso con más canales como el 7.1; aún cuando tengamos el sistema envolvente basado en monopolos y nuestra sala este óptimamente tratada, el problema reside en realizar grabaciones multicanal o en extraer de una señal el ambiente para atacar a los altavoces de *surround* sin que se incluyan tanto sonido directo como reflexiones frontales. La solución propuesta por el sistema ambiofónico es sacar las señales de ambiente mediante convolución.

8.1.1- Altavoces Frontales:

Para un sistema ambiofónico, estos altavoces deben situarse enfrente del oyente enfocados hacia él. Para lograr los mejores resultados la pareja de altavoces frontales debe ser lo más directivos posibles. Idealmente deberían radiar un haz de sonido de forma que en la posición



del oyente incidan las ondas sonoras dejando en sombra acústica el resto de la sala. Esto se debe a que cuanto mejor enfocados estén los altavoces frontales, más efectivo es el software.

Estos altavoces deberían ser capaces de radiar niveles de presión sonora cercanos a los que tienen lugar en un concierto real. Naturalmente también se ha de tener en cuenta los factores clásicos de elección de altavoces como que tengan buena respuesta en frecuencia, baja distorsión, buena respuesta a transitorios, etc.



Figura 8.1. Pareja de altavoces centrales electrostáticos para un sistema ambiofónico.

Con dos de estos altavoces podemos crear un par de altavoces frontales para un sistema ambiofónico bastante preciso. El comportamiento de estos altavoces como arrays lineales verticales hacen más asequible la cancelación de diafonía.

8.1.2- Altavoces Frontales Radiando Primeras Reflexiones:

Se debería disponer de un par de altavoces situados aproximadamente a 55° , los cuales radien solo primeras reflexiones (pero no reverberación). A este ángulo el oído es muy sensible psicoacústicamente a contradicciones espaciales. El número de este tipo de altavoces es escalable y al añadir un nuevo altavoz o pareja, se deben colocar en donde se especifique que es más conveniente para el convolucionador. El altavoz ideal para este menester sería uno que radiase al oyente desde un área lo mayor posible, intentado imitar una pared; para ello altavoces electrostáticos o de cinta grandes son muy recomendables, especialmente si pueden disponerse horizontalmente. Una ventaja de estos altavoces es que, por su tamaño y por radiar todo el ancho de banda del espectro, ya proporcionan suficiente difusión al sonido radiado por ellos, por lo que es innecesario emplear paneles difusores. Se entiende fácilmente que lo que buscamos es que nuestros altavoces de ambiente tengan una enorme cobertura horizontal, que es lo que ocurre en una situación real en un auditorio, en la que las primeras reflexiones inciden desde múltiples direcciones debido al hecho de que los músicos se encuentran en diferentes puntos del escenario y las reflexiones que cada instrumento produce inciden desde direcciones diferentes al oyente. Pero nuestro sistema ambiofónico no puede reconstruir al 100% este hecho de esparcimiento de primeras reflexiones ya que estas reflexiones reconstruidas por ordenador, son las mismas para todas las fuentes del canal izquierdo, las mismas para todas las fuentes del canal derecho, y las mismas para las fuentes del canal central. Por lo que aquí existe una limitación de nuestro sistema.





Figura 8.2. Altavoz electrostático dispuesto horizontalmente.

8.1.3- Altavoces Laterales y Traseros para Radiar Campo Reverberante:

Los altavoces laterales y traseros radiaran algunas primeras reflexiones pero su función principal es radiar campo reverberante no correlado. Si se analiza la situación real en un auditorio, en donde varias colas de reverberación alcanzan al oyente desde casi todas las direcciones, los altavoces ideales para esta tarea serían de pequeño tamaño para poder ser colgados por la parte trasera de la sala. Se ha demostrado que también altavoces de gran tamaño como los de cinta o electrostáticos



cumplen bien esta tarea, especialmente si se pueden disponer horizontalmente; aunque también podríamos disponer de varios altavoces pequeños distribuido por la parte trasera del oyente. En esta caso aparece también la limitación del sistema ya que, en teoría, cada instrumento debería tener su propio procesador de señal que realice la convolución. Aunque también existe la ventaja de que los altavoces destinados a este fin no necesitan estar pareados ya que radiaran señales no correladas, mientras cumplan con las condiciones de nivel de presión sonora necesaria.

Es sabido que el campo reverberante tiene una componente vertical muy fuerte proveniente del techo, balcones en el auditorio, etc... Por lo que emplear una pareja de altavoces lo más elevados posible contribuye mucho a lograr esa sensación de espacialidad; aunque en muchos casos esto suponga rizar el rizo (a no ser que la respuesta al impulso medida de una sala incluya claramente información vertical).

8.2- Convolución del Ambiente:

Uno de los conceptos básico de la Ambiofonía es lograr que grabaciones musicales de dos canales tengan un campo reverberante envolvente con matices directivos. Esto se logra reproduciendo el campo reverberante de una sala mediante los altavoces envolventes (traseros y envolventes). Existe otra alternativa a la reconstrucción del ambiente no por convolución, esta opción pasa por usar un ambiófono para grabar la mitad trasera de la sala y con esa señal alimentar un nuevo sistema de altavoces en dipolo ambiofónico situado detrás del oyente. Pero este método pasa por requerir de grabaciones multicanal y disposiciones microfónicas especiales por lo que no aporta nada a el catálogo de grabaciones realizadas hasta la fecha.



Un punto a tener en cuenta es que, ambiofónicamente hablando, es contraproducente durante la grabación musical, captar la reverberación de sala en la que se ejecuta la música, ocupando así ancho de banda en el soporte de grabación para luego reproducir este ambiente en la reproducción, lo que distorsionará la sensación de realidad. Para comprender esto mejor repasemos cosas que se saben sobre como responden auditorios, óperas, iglesias, estudios de grabación o cualquier otro espacio destinado a la ejecución musical ante un estímulo acústico. Estos lugares y situaciones (ya que no obtendremos la misma respuesta si la fuente esta situada en uno u otro lugar, y lo mismo para la elección del punto de medida o estudio) los podemos entender como un sistema lineal que realiza una convolución de cada onda de sonido directo procedente del escenario, transformado su amplitud, respuesta en frecuencia, respuesta en fase y dirección antes de que incida en el oyente como ambiente o reverberación. En un auditorio bien diseñado, en el cual no existen obstrucciones entre el escenario y los oyentes, se asume que el sonido directo alcanza al oyente antes que las reflexiones y reverberación cuya respuesta esta influenciada por la sala. Si tenemos en cuenta todos los asientos del auditorio el número de ecuaciones se dispara rápidamente, pero para nuestro propósito asumiremos que solo nos interesa lo que ocurre en una o dos de las mejores localidades del auditorio. Si ahora montamos nuestro dispositivo de medida en la mejor localidad de la sala y lanzamos una serie de señales de prueba desde, por ejemplo, tres sitios diferentes del escenario, sería posible hallar las ecuaciones que se aproximen a la respuesta que entrega la sala a ese punto del espacio.

Las ecuaciones que describen el comportamiento acústico de nuestra sala permanecen constantes en el tiempo, tanto en el periodo que duré la ejecución musical como el periodo de vida útil de esa sala. Salvo que se reforme la sala y estas reformas tengan consecuencias acústicas. Una vez



se conocen las ecuaciones que describen el comportamiento de la sala carece de sentido realizar medidas cada vez que se realice una grabación o concierto determinado, obviando la variación en la respuesta de la sala dependiendo de la cantidad de público que presencie la obra. Con esto queda claro el por qué grabar con micrófonos la reverberación de la sala para alimentar altavoces de *surround* no es buena idea para lograr la máxima fidelidad.

En un auditorio las reflexiones y la reverberación alcanzan al oyente desde todas las direcciones posibles, no obstante, en auditorios bien diseñados estas señales de ambiente no son iguales en todas direcciones ya que existe una componente direccional interaural provocada por el efecto de sombra acústica debida a la cabeza del oyente y la respuesta del oído externo, lo que hace que percibamos de una manera única las cualidades acústicas de un espacio concreto. Si se pudiese despreciar esta componente direccional bastaría con alimentar los altavoces frontales de un sistema estereofónico sin altavoces de *surround* de ambiente; pero tras más de 80 años de triangulo estereofónico queda claro que haciendo esto no conseguiremos nunca una sensación de que lo que se escucha es real.

8.3- Características del Ambiente de una Sala.

A una onda sonora que se propaga en un espacio cerrado solo le pueden ocurrir dos cosas: que se atenúe y que cambie de dirección. La atenuación casi siempre es función de la frecuencia, siendo más fácil atenuar las altas frecuencias que las bajas. Los cambios de dirección se producen por dos fenómenos físicos, la reflexión y la difracción ambas también dependientes de la frecuencia siendo las altas frecuencias más dóciles de cambiar su dirección.



Con lo que una sala y más concretamente un auditorio puede ser descrito acústicamente en términos de su atenuación y de su patrón de reflexión tridimensional en función de la frecuencia para una posición relativa fuente-oyente. El problema es medir todas estas características en auditorios reales para luego poder recrear esas cualidades acústicas en el salón de nuestra casa mediante altavoces de *surround*. El fin último es poder recrear cualquier acústica en el salón de nuestra casa, y esto pasa por desarrollar un procesador de ambiente (convolucionador) que pueda generar cualquier campo que el oyente o el ingeniero de grabación quieran. Lo único que quedaría por discutir es quién debe tener y operar el convolucionador, el usuario o el productor del disco.

8.3.1- Descripción de Parámetros que Rigen la Respuesta de una Sala.

1º- Parámetros de las Primeras Reflexiones:

Con el fin de lograr un ambiente realista, es decir que satisfaga psicoacústicamente al cerebro del oyente, tenemos que recrear las primeras reflexiones mediante un DSP que puede tener control sobre los siguientes parámetros de forma independiente para el canal derecho e izquierdo. Los siguientes parámetros determinan la geometría de la sala que percibimos subjetivamente (tamaño de la sala, forma...):

- Diferencia de tiempos de llegada al oyente entre el sonido directo y la primera reflexión.
- Diferencia de tiempos de llegada entre las reflexiones siguientes y su densidad.



- Respuesta en frecuencia de estas reflexiones.
- Amplitud y patrón de atenuación de las reflexiones siguientes.
- Dirección de incidencia en el oyente de las reflexiones.

Estos parámetros se miden en auditorios, iglesias y cualquier sala en general, y se almacenan. Si esta recreación acústica no fuese del gusto del usuario se podría afinar al gusto.

2º- Parámetros de la Reverberación:

Cuando el conjunto de reflexiones que alcanzan al oyente es tan denso que no podemos percibir reflexiones aisladas, las cualidades de la reverberación de una sala se hacen patentes. Los parámetros que debe recrear el DSP tanto para las señales del canal derecho como para las del canal izquierdo son:

- Envoltente de caída de la reverberación para altas frecuencias.
- Envoltente de caída de la reverberación para bajas frecuencias.
- Respuesta en frecuencia dependiente del tiempo para reverberación frontal, lateral, trasera...
- Densidad del campo reverberante.
- Características direccionales de la reverberación.



Por ejemplo, si en una sala dada, las primeras reflexiones persisten en el tiempo un periodo tal que la cola de la reverberación se solapa con estas reflexiones, la sala será percibida como viva y grande. Si el tiempo de reverberación es largo la sala se percibirá como viva, y si es muy largo se asemejará a una catedral. Otro aspecto que también hace que un espacio acústico parezca grande es la atenuación en altas frecuencias de la reverberación. Con lo que podemos afirmar que la distribución espacial de las reflexiones y las cualidades de la reverberación determina la impresión espacial del espacio acústico (forma, tamaño, posición relativa...).

Esto aclara la importancia de las respuestas al impulso y la convolución como herramientas indispensables para el correcto diseño de salas y auditorios. Por poner un ejemplo, el auditorio de la Ciudad de la Ópera de Tokyo se diseñó utilizando simulaciones por ordenador y una maqueta a escala 1:10 que permitió a Leo Baranek y a Takahiko Yanagisawa escuchar como sonará la sala antes de construirla. Podían escuchar como variaba la respuesta de la sala en función de la posición del oyente, cambios en la geometría de la sala, etc. Así podían variar parámetros y ajustar la respuesta a las necesidades concretas de la sala.





Figura 8.3. Imagen de la Ciudad de la Ópera de Tokyo.

8.3.2- Ajustando los Parámetros del Ambiente para la Escucha Ambiofónica.

Para reproducir una grabación ambiofónica y sintetizar fielmente el ambiente mediante un convolucionador, primero debemos saber en que espacio acústico se realizó la grabación, información que debería acompañar a cada grabación, es decir, la grabación se realizó en un estudio, en una iglesia, en una sala de cámara, en un gran auditorio, en un teatro...etc. Grabaciones bien hechas deben incluir primeras reflexiones frontales procedentes del proscenio y reverberación frontal, que será radiada por los altavoces frontales. Con lo que parece obvio que deberíamos seleccionar esa sala en concreto de nuestra biblioteca de salas, o la sala con las propiedades más parecidas posibles a la que se



realizó la grabación. Con un poco de práctica esto se puede realizar fácilmente, escuchando solo los altavoces frontales principales es decir, todo los altavoces envolventes apagados, y estimando el tiempo de reverberación de la sala que, como se sabe, en la mayoría de grandes auditorios y ópera es de 1,5 a 3 segundos; luego se puede analizar otras cualidades como lo viva que es la sala o el tamaño subjetiva de dicha sala. Luego subiremos los altavoces envolventes hasta conseguir la mayor sensación de realidad posible. La gran ventaja de todo esto es que podemos salvar y cargar todos estos ajustes a nuestro gusto y capricho.

Otro aspecto nada despreciable es que los convolucionadores pueden ser configurados de tal manera que el dispositivo es "consciente" de que hay que compensar el hecho de que en algún momento se esta re-reverberando la reverberación natural de la sala capturada en la grabación y que algo del ambiente trasero se esta colando por los altavoces frontales. Este ambiente trasero radiado por altavoces frontales puede suponer la adición de un error considerable al ahora de buscar la máxima sensación de realidad; pero esto en la práctica no supone nada ya que ese ambiente queda enmascarado por el ambiente radiado por los supuestos múltiples altavoces envolventes. Además, en la realidad se da el hecho de que las reflexiones traseras que conforman el ambiente trasero reboten en el proscenio frontal alcanzando al oyente desde el frente. Al escuchar esto, nuestro cerebro llega a la conclusión de que la sala es más viva de lo que sugiere la respuesta al impulso, y este parámetro se puede ajustar hasta el punto de exigencia del oyente.

Si la grabación lleva reverberación añadida a la señal directa (la mayoría de las grabaciones) el convolucionador convolucionará esta reverberación como si fuese señal directa, generando ambiente adicional; lo que conlleva que la sala creada por convolución tendrá un tiempo de reverberación mayor al que deseábamos y que el declive al final de la cola



de la reverberación no es tan pronunciado, si no más suave. En la vida real esto llevaría a que en la sala de verdad se hubiese instalado difusores. Este parámetro es fácilmente afinable, aunque si no se compensa este hecho, pasará desapercibido a la mayoría de oyentes. El ajuste del convolucionador se hace más instintivo tras un rato de manejo y normalmente se tarda menos de un minuto en ajustar.

El objetivo es recrear en el sitio de escucha de casa una replica exacta del campo sonoro original de la sala de conciertos. Esto se hace transportando las fuentes sonoras, el escenario y el ambiente de la sala a nuestro salón, dicho de otra, la ambiofonía produce un efecto binaural externalizado, todo esto empleando solo dos señales grabadas, dos altavoces delanteros principales y unos ocho altavoces envolventes. Vamos a ver como conseguimos reproducir un escenario frontal empleando dos altavoces sin que esto produzca un filtrado tipo peine, fuentes fantasma o errores en el ángulo de incidencia en el oído externo; y como realizar grabaciones que se aprovechen de la tecnología binaural ambiofónica.

El hecho de tener solo dos oídos hace patente el hecho de que solo necesitamos grabar dos señales. Recordemos lo que se postula en la teoría binaural: si somos capaces de posicionar dos micrófonos diminutos en los canales auditivos de un oyente sentado en el auditorio y grabamos el concierto, y luego lo reproducimos mediante auriculares colocados en el canal auditivo, experimentaremos una sensación de realidad casi perfecta. El único inconveniente de este método es que si dicho sujeto moviese la cabeza durante el desarrollo del concierto, al reproducirlo se sentirá ese movimiento como que el escenario se mueve, cosa que rompe con la máxima de recrear la realidad. No obstante este método se acerca mucho a lograr la sensación de realidad por varios motivos:



- El sonido del escenario y el de ambiente alcanza el canal auditivo tras pasar por la respuesta del oído externo y la sombra acústica provocada por la cabeza del oyente.

- Al estar los auriculares colocados en la entrada del canal auditivo, el sonido solo pasa una vez por el oído externo, y solo se produce una vez el efecto de sombra acústica provocado por la cabeza.

- Además, el oído externo es el propio del oyente, no el de un maniquí de plástico.

Con todo esto aclarado se puede concluir una de las leyes básicas del proceso de grabación binaural realista. En cualquier cadena de grabación-reproducción binaural debe haber una y nada más que una respuesta del oído externo, y además debe ser la del oyente. También en toda la cadena de grabación-reproducción binaural debe haber una y nada más que una sombra acústica, aunque en este caso no es tan crítico que sea la propia cabeza del oyente, lo que apunta a que la función de transferencia de la sombra que produce la cabeza no es tan individual como la respuesta del oído externo. Esto se entiende fácilmente si observamos que el sonido incide en la cabeza, la rodea, le incide desde arriba (independiente de lo estafalarario de nuestro peinado o de nuestra alopecia particular), desde abajo, y da igual la expresión facial que tengamos.

Supongamos que realizamos una grabación de dos canales con un maniquí sin oído externo, es decir, solo la cabeza y los micrófonos en el lugar del oído. Supongamos que colocamos el maniquí en la quinta fila y centrado en el auditorio. Esas señales se graban y se reproducen mediante dos altavoces colocados delante del oyente. Supongamos también que estos altavoces radian en forma de rayo ultradireccional y



apuntados perfectamente uno a cada oído. En este caso cada oído del oyente escucha lo que ha recogido cada micrófono, y el sonido incide en su propio oído externo con un mínimo error de ángulo de incidencia para fuentes sonoras centrales. Para fuentes situadas más hacia los lados el oyente escuchara el efecto de la sombra de la cabeza del maniquí. El oyente puede mover la cabeza y el escenario se mantiene en su sitio, lo que hace que este método sea mejor al descrito anteriormente, el caso del oyente con micrófonos colocados en su canal auditivo. Existe un error en el ángulo de incidencia en el oído externo para fuentes situadas más lateralmente, pero afortunadamente estos son los ángulos en los que el sonido directo tiene un camino más directo hacia el canal auditivo sin ser interferido en mayor medida por la respuesta del oído externo, y también en estos ángulos de incidencia se hace más patente el efecto de la sombra acústica producido por la cabeza, lo que hace que seamos más sensible al efecto de la sombra acústica que a la respuesta del oído externo para dichos ángulos de incidencia, produciendo una localización horizontal natural.

Lo que ahora nos preocupa es ¿cómo hacer altavoces centrales que se comporten como rayos ultradireccionales? Existen dos posibilidades, una es colocar una pared o panel enfrente del oyente. Esto hace que el altavoz derecho no radie al oído izquierdo y viceversa. Esta técnica funciona muy bien y es bastante barata. El oyente deberá colocarse de tal manera que su ojo derecho no vea al altavoz izquierdo y viceversa.

Esta idea de colocar una barrera para eliminar la diafonía entre canales fué descrita en 1986 por Timothy Bock y Don Keele Jr. en la convención nº 81 de la A.E.S. [10]; llegaron a la conclusión de que un oyente podía situarse más apartado de la pantalla (más atrás) si está era más ancha y los altavoces colocados más cerca entre sí. Con lo que llegaron a describir este fenómeno mediante la siguiente ecuación, donde



L es la distancia máxima entre la barrera y la cabeza del oyente (en pulgadas); **X** es la distancia entre el punto de escucha y los altavoces; **D** es la distancia entre los centros de los altavoces; **H** es la distancia entre los oídos del oyente y **T** es el espesor de la barrera. La ecuación es la siguiente:

$$L = X(H+T)D$$

Para el caso de una barrera acústica en el sistema Ambiofónico nos podemos situar unos 4 pies (1,2192 m), teniendo en cuenta el detalle que a mayor distancia de los altavoces más importante es que nuestra cabeza esté bien centrada. Con esta distancia de cuatro pies entre la barrera y la cabeza del oyente, se pueden situar en fila dos oyentes y experimentar la sensación de una imagen sonora más ancha al mismo tiempo, además el oyente situado delante sirve como prolongación de la barrera acústica para el oyente de detrás. Si surgieran dudas sobre la colocación del oyente en el sistema, la regla de los ojos es fácil de recordar: mientras que un ojo del oyente sea incapaz de ver al altavoz del lado opuesto la separación esta garantizada. Por contra, sentarse demasiado cerca de la barrera sería contraproducente ya que perderíamos mucha respuesta en altas frecuencias.





Figura 8.4. Proceso de escucha con barrera acústica.

De todas formas el despliegue más comercial ambiofónico se compone de un software y un PC o un DSP que elimine la diafonía. El término Ambiodipolo se refiere a un par de altavoces y el sistema que elimina la diafonía. Aunque, en principio, se puede emplear cualquier tipo altavoz, los mejores resultados se obtendrán con altavoces muy directivos y bien emparejados (es decir que sus parámetros electroacústicos sean lo más iguales posible). Un altavoz electrostático ligeramente cóncavo es capaz de focalizar el sonido radiado lo suficientemente bien como para comportarse como un rayo acústico; además resulta lógico pensar que cuanto mejor alienados y emparejados están los altavoces, mejor trabajo realizará el software de cancelación de la diafonía.

En definitiva lo que hace un software de cancelación de diafonía



recursivo, es generar señales de polaridad invertida ligeramente retardadas para que se produzcan cancelaciones en las señales radiadas por los altavoces antes de que las ondas de presión sonora incidan en el oyente, es decir, la cancelación es acústica. La cancelación que tiene lugar es recursiva, esto es debido a que la diafonía introducida por la señal empleada para la cancelación a su vez produce diafonía que ha de cancelarse y así sucesivamente. Si los altavoces estuviesen muy separados entre sí, la corrección de la diafonía se complicaría muchísimo ya que se tendría que tener en cuenta el fenómeno de la sombra acústica que produce la cabeza, así como la respuesta del oído externo en función del ángulo de incidencia; además dependientes de cada oyente. Con lo que todo apunta a que parece buena idea disponer los altavoces próximos, formando 20°.

En un sistema estéreo, si el oyente se mueve a lo largo de la línea media entre los altavoces ocurren dos cosas: si nos movemos hacia los altavoces se crea un vacío en el centro de la imagen sonora hasta que se escuchan dos altavoces por separado; si nos alejamos en la misma línea la imagen sonora se va estrechando hasta conseguir una sensación monofónica. Si nos movemos lateralmente se distorsionará la imagen sonora hasta que solo se escuche un solo canal. Efectos similares ocurren en los sistemas multicanal como el 5.1, sistema en el que se añade un altavoz central frontal para mantener los diálogos audibles de manera nítida. Por contra, en el sistema Ambiofónico, si nos acercamos a los altavoces el oyente escucha un sistema estéreo; y si nos movemos hacia atrás no se nota mucha diferencia. La conclusión es que el sistema ambiofónico tiene una zona de audiencia útil mayor, siempre que nos encontremos más o menos centrados.



8.3.3- Reconstrucción del Ambiente.

A la hora de reconstruir el ambiente presente en una sesión de grabación, lo más lógico parecería registrar ese ambiente en pistas adicionales en un DVD. El problema de usar tres, cuatro o cinco micrófonos adicionales apuntando idealmente a las paredes traseras o laterales, y registrarlas señales en pistas adicionales en un DVD, es que estos micrófonos inevitablemente captarán señales provenientes de las fuentes sonoras directamente, lo que, al ser reproducido mediante altavoces traseros o laterales, producirán diafonía, confusión en el ángulo de llegada al oído externo y la aparición de un filtro peine en la respuesta. Radiar las señales de ambiente desde solo dos altavoces traseros (o laterales) puntuales supone un error en el ángulo de entrada de las señales al oído externo que conlleva confusión y por ello pérdida de la sensación de estar allí, aunque los altavoces sean dipolos homologados THX.

Resulta muy útil y barato medir las respuestas al impulso de salas desde el mejor sitio (o varios) de la sala para por ejemplo cinco posiciones a la izquierda, derecha y centro del escenario (para salas simétricas el proceso se simplifica) e incluir esta información en el DVD, almacenarlo en el sistema de reproducción o proporcionar una biblioteca en DVD de los mejores ambientes del mundo. Con lo que mediante la convolución de las señales frontales directas y la respuesta al impulso de una determinada sala (en una determinada posición relativa fuente-oyente) obtenemos las señales de ambiente; con lo que será trabajo de un DSP específico o PC calcular y procesar estas señales. Por lo que este método de reconstrucción del ambiente deja claro que es innecesario emplear sistemas de grabación multicanal como el sistema DTS o Dolby Digital, por lo menos en lo que concierne a la música clásica. A diferencia del sonido directo, el ambiente debería ser radiado por el mayor número de altavoces



que nos podamos permitir económicamente, por lo que el resultado es un sistema escalable. Ahora la diafonía y el efecto del filtro peine no son problemas ya que estas señales no están correladas (difieren en amplitud, espectro, duración, tiempo de llegada...), que suele ser el caso en los auditorios reales así como en los convolucionadores.

Con lo que un pilar fundamental del sistema ambiofónico es que es mejor no grabar el ambiente trasero y lateral de la sala o recrearlo mediante reconstrucción, sino regenerar la parte ambiental del campo sonoro empleando respuestas al impulso reales que crearan patrones de primeras reflexiones y colas de reverberación utilizando procesadores digitales. Se puede disponer de una biblioteca de las mejores salas del mundo para crear el ambiente del campo sonoro. La ventaja de este método de recuperación del ambiente es que es escalable en el número de altavoces, así como que la calidad y posicionamiento de los altavoces no es tan crítico. Este sistema externaliza el efecto binaural registrando solo dos canales pero con dos altavoces frontales y un número escalable de altavoces de ambiente; es capaz de generar un escenario de 180° de ancho con una precisión y realismo que exceden cualquier otro sistema de dos canales o incluso multicanal.

Como las primeras reflexiones centrales que proceden del proscenio se radian al reproducir la grabación desde los altavoces principales, estas no tienen que regenerarse mediante la convolución, y por definición, son naturales y vienen de la dirección correcta. También hay que tener que en cuenta que los diferentes instrumentos en el escenario producen patrones de primeras reflexiones tan diversos que exceden el umbral de realidad del cerebro.



CAPITULO 9: PARTE PRÁCTICA

9.1- Objetivos de la Parte Práctica.

Para la parte práctica del proyecto se van a realizar una serie de grabaciones musicales empleando tanto técnicas estereofónicas tradicionales como ambiofónicas de grabación con el fin de describir y comparar ambas técnicas microfónicas. También servirá para estudiar hasta que punto es favorable subjetivamente para el oyente el hecho de realizar la toma de sonido teniendo en cuenta las propiedades del sistema de reproducción ambiofónico. Esta comparación nos dará una idea de hasta donde se puede llegar, en cuanto a sensación de realidad para el oyente, al tener en cuenta durante el proceso de grabación efectos como la respuesta del pabellón auditivo del oyente, la cual es única, y que posteriormente la diafonía interaural va a ser cancelada mediante un procesado digital de señal (*plug-in* VST llamado "Ambio One").

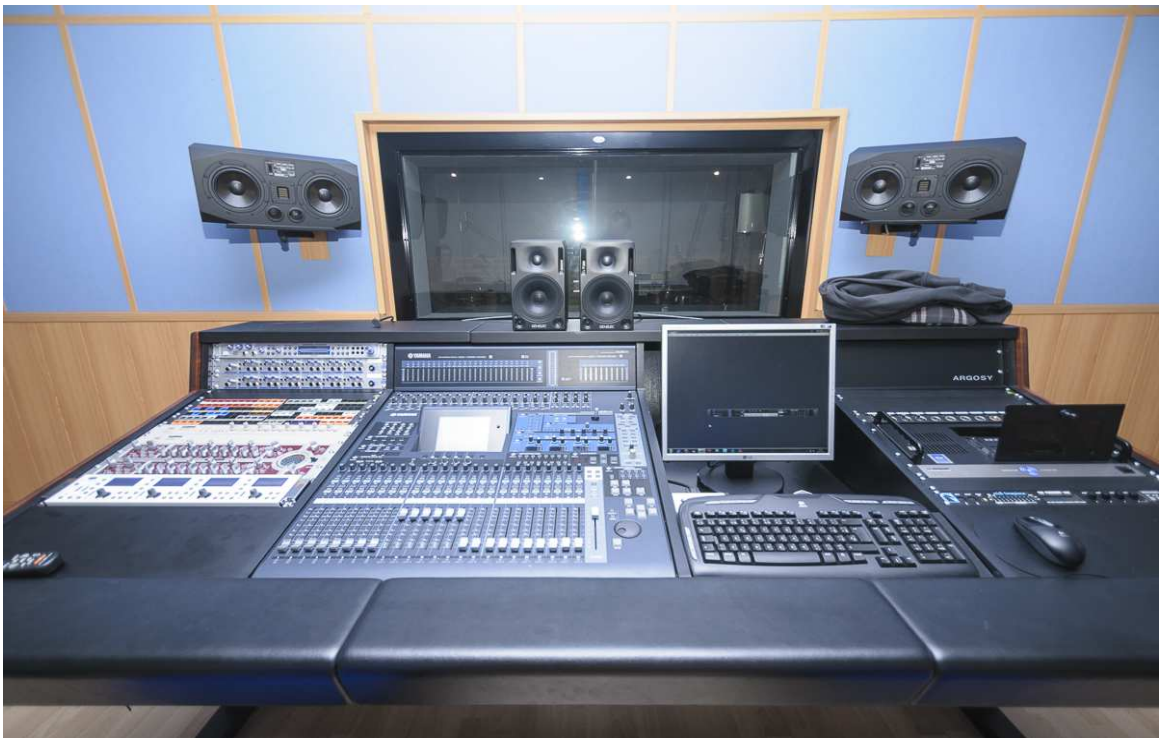


Figura 9.1. Control del estudio de grabación.



Posteriormente a las grabaciones se van a realizar varias comparaciones entre los diferentes métodos de grabar y reproducir audio:

- Grabación utilizando en la toma de sonido el par A-B (técnica de grabación estereofónica), para ser reproducida mediante el sistema ambiofónico. Comparando dicha situación de escucha con la reproducción mediante sistema estereofónico de la misma grabación.
- Grabación utilizando en la toma de sonido el ambiófono para ser reproducido mediante el sistema ambiofónico. Comparando con la situación de escucha de la grabación empleando el par estéreo reproduciéndose mediante un sistema ambiofónico.

Para la correcta comparación de ambos métodos se ha decidido por utilizar tres disposiciones microfónicas diferentes (ambiofónica, par estéreo A-B y toma multimicrofónica cercana a las fuentes sonoras); de manera que se registre en los diversos sistemas las mismas ejecuciones musicales.

9.2- Implementación del Ambiófono.

Recordemos lo que en esencia es un ambiófono, un dispositivo compuesto por un maniquí sin oído externo, un par de micrófonos omnidireccionales y una estructura que impida, en la medida de lo posible, la captación de sonido trasero.

Para el maniquí se ha optado por emplear un busto de poliespán, el cual puede adquirirse en cualquier tienda de manualidades. El que se usó en este proyecto hubo que lijarlo debido a que tenía unos rasgos faciales muy marcados así como poseer orejas. Se lijaron las orejas, los rasgos y



lijó la expresión facial con el fin de que la sombra acústica que produce esté más cerca de la sombra promedio producida por las cabezas de los posibles oyentes (a la cual emula). Posteriormente se aplicó a modo de imprimación un par de manos de aquaplast y finalmente se pintó con spray negro mate.

El busto se incrustó en un pie de micrófono, se colocaron en el lugar de los oídos los micrófonos omnidireccionales, apuntando hacia adelante y se colocó una pantalla acústica en su parte trasera que impidiese la captación de sonido trasero.



Figura 9.2. Detalle del Ambiófono implementado.

9.3- Descripción del Material y Métodos Empleado para las Tomas de Sonido.

Las tomas de sonido se han realizado en el estudio de grabación localizado en los laboratorios de audio de la E.U.I.T.T. en el que se dispone tanto de un control como de una sala aislada y acondicionada acústicamente para las tomas de sonido. Se realizarán una serie de grabaciones de un combo acústico formado por batería acústica (kit formado por bombo, caja, charles y un plato), contrabajo, guitarra acústica, saxofón tenor y un cantante. Los músicos se colocarán abarcando un ángulo de 120° aproximadamente con el ambiófono.

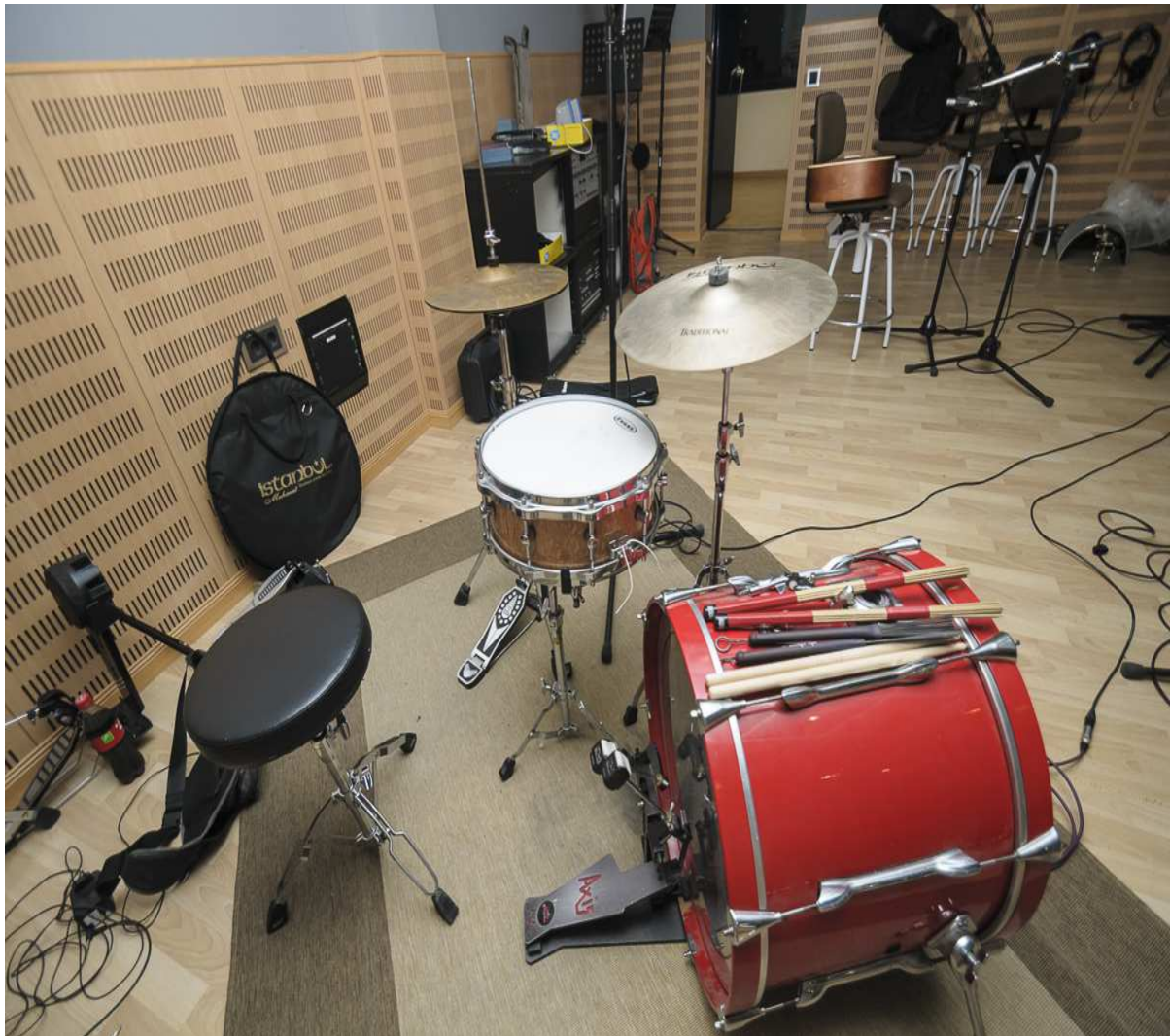


Figura 9.3. Detalle del kit de batería.

9.3.1 – Microfonía Empleada.

- Par de micrófonos electrostáticos de pequeño diafragma, de patrón polar omnidireccional de la casa Schoeps. Se utilizaron para crear el ambiofónico.

- Par de micrófonos electrostáticos de pequeño diafragma, de patrón polar cardioide de la casa Schoeps. Se utilizaron para realizar la técnica de grabación estereofónica del par espaciado A-B; montado próximo espacialmente al ambiofónico.



Figura 9.4. Detalle de la posición relativa del ambiofónico y el par estéreo A-B.

- Un micrófono dinámico de gran diafragma, de patrón polar cardioide AKG-D112. Se empleó para la toma de sonido cercana del bombo de la batería. En la grabación el bombo estaba amortiguado y atenuado con una manta gruesa dentro y el micrófono se colocó dentro del bombo.

- Un par de micrófonos electrostáticos de pequeño diafragma, de patrón polar cardioide Neumann. Uno de ellos se utilizó para la toma cercana de la guitarra acústica a unos 20cm aproximadamente de la guitarra apuntando perpendicularmente hacia la mitad de la porción de mástil que entra en la caja de la guitarra. El otro micrófono se empleó para realizar la toma de micrófono aéreo de la batería (*over-head*) colocado a 1,70m aproximadamente de altura y enfocado hacia un punto medio entre caja, charles y plato.

- Un micrófono electrostático de gran diafragma, de patrón polar variable, colocado en la posición de cardioide y sin emplear el PAD de atenuación ni filtros de los dispone el micrófono Rode NT2000. Este micrófono se usó en la toma cercana del contrabajo; colocado a unos 40cm de distancia de la tapa delantera y a unos 50-60cm de altura.

- Un micrófono de diafragma pequeño dinámico, de patrón polar cardioide Shure Beta57. Este se empleó para la toma de sonido cercana del saxofón. Colocado a unos 40cm del músico y a 1,5m de altura aproximadamente.

- Un micrófono dinámico de pequeño diafragma, de patrón polar cardioide Shure 55sh (tipo Elvis). Este micrófono fué empleado en la toma cercana de la voz, colocado a unos 20cm aproximadamente.



9.3.2- Previos de Micrófono.

Para la etapa preamplificadora se ha empleado el equipo del estudio de la E.U.I.T.T. En estos previos solo se ajustaron las ganancias, no se trataron dinámicas ni se realizó ecualización; solo se activó la alimentación *phantom* de +48V cuando fué necesario.

Tanto para los micrófonos del ambiófono como el par A-B se ha usado cuatro previos iguales Focusrite, igualmente configurados en "Clean-Gain" ya que se dispone de diversas configuraciones (como por ejemplo el tipo de previo a emular). Se emplearon dos previos a válvulas Mindprint para voz y contrabajo. El resto de señales (bombo, *over-head* de batería, guitarra acústica y saxofón) se grabaron utilizando los previos Tascam disponibles en el estudio de grabación.

9.3.3- Flujo de Señal en la DAW.

Tras ser preamplificada a un nivel de línea y digitalizada, la señal que cada micrófono entrega al previo, entrá en la mesa Yamaha 02R (que hace las veces de interfáz y DAW) para su conexión con un PC y poder grabar mediante el secuenciador Cubase7. Para ello se creó una sesión para grabar diez pistas: AmbioL, AmbioR, StereoL, StereoR, Bombo, OverHead, Contrabajo, Guitara, Saxo y Voz.

9.4. Cancelación de Diafonía en la Reproducción.

La cancelación de la diafonía se en la reproducción ambiofónica se va a realizar mediante un *plug-in* gratuito llamado AmbioOne descargable de internet. Este *plug-in* se insertará en el bus Master del secuenciador, se



ajustarán los parámetros a oído para lograr la mayor anchura de escenario sonoro posible.

En la figura 9.5 se observa el interfaz gráfico del programa tras ser ajustado para la escucha ambiofónica de una mezcla de las señales grabadas mediante la toma microfónica próxima a las fuentes.



Figura 9.5. Interfaz gráfico del *plug-in* VST AmbioOne donde se ve la posibilidad de ajustar los parámetros del algoritmo de cancelación de diafonía.

Para su ajuste, el *plug-in* incluye la función de *calibrate* (calibrar), se trata de un ruido rosa que se desplaza de forma continua del canal izquierdo al canal derecho, así el oyente puede calibrar el algoritmo cancelador de diafonía para conseguir la máxima anchura del escenario sonoro, esto es, que el la señal de prueba para la calibración llegue a localizarse en la mayor dirección angular como sea posible para ambos hemisferios del plano medio.

Tras realizar estos ajustes en el *plug-in* y mandarle las señales grabadas, se pone de manifiesto una mejora en cuanto a sensación de realidad para el oyente y, una vez situados en el punto de escucha, la anchura de la imagen sonora así como su profundidad se engrandecen.



9.5. Comparación entre Sistemas.

Tras realizar las grabaciones llega el momento de realizar las comparaciones subjetivas. Tras realizar diversas escuchas en ambos métodos de reproducción de audio se observa que la reproducción ambiofónica es más sensible a los cambios de timbre en las fuentes sonoras, al conmutarse de un tipo de toma de sonido a otra (par estéreo A-B a ambiófono). Este es un hecho nada despreciable ya que apunta a que este sistema tiene mayor fidelidad además de mayor detalle tímbrico y espacial. Por ejemplo si en la escucha se conmuta (con los niveles de las señales colocados de tal forma que no haya un cambio en el nivel de sonoridad percibida) entre las señales grabadas con el ambiófono y las grabadas con el par estéreo A-B, se aprecia claramente un mayor brillo y atenuación en las frecuencias más graves en el par A-B, mientras que el sonido capturado por el ambiófono produce unos timbres muy fieles a la realidad, sin apenas coloración.

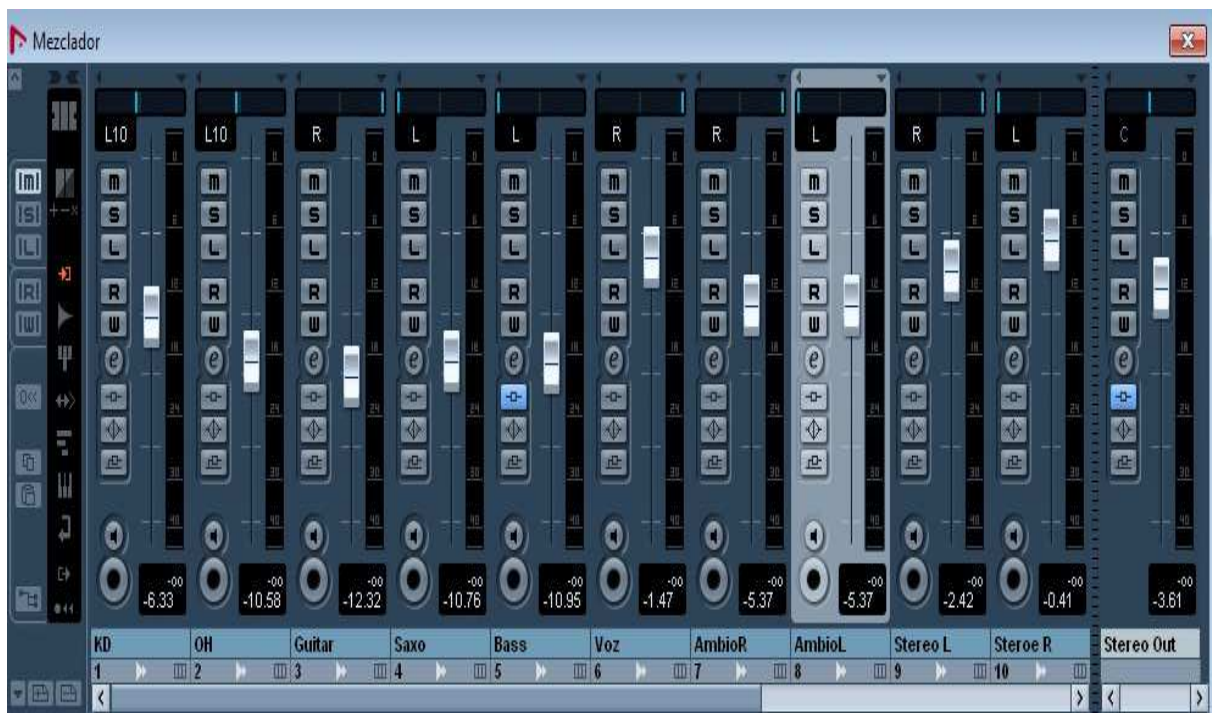


Figura 9.6. Detalle de las diferentes pistas grabadas en el mezclador de Nuendo.



Comparando nuestras grabaciones con otras grabaciones musicales de dos canales (no inherentemente estereofónicas) se observa que estas, al ajustarse el *plug-in* cancelador de diafonía, consiguen una mayor anchura del escenario sonoro que nuestra grabación del ambiofóno por sí solo. Esto debe ser por la disposición espacial adoptada durante la grabación y ejecución por parte de los músicos.

No obstante los mejores resultados se obtienen mezclando las señales captadas en toma cercana, creando una mezcla equilibrada entre instrumentos, y posteriormente añadir el ambiente deseado con las señales del ambiofóno. El resultado es una imagen sonora con máxima anchura espacial (entre 150° y casi 180°) así como una gran fidelidad tímbrica de las fuentes sonoras. Esto conlleva el panoramizar las fuentes puntuales de las tomas multimicrofónicas cercanas conforme a la localización de fuentes recogida por el ambiofóno para tener las mínimas contradicciones psicoacústicas en la reproducción sonora.



APÉNDICE: CONCLUSIONES

Tras todo el trabajo realizado se puede llegar a diferentes conclusiones. La primera es la que ya se apuntaba en el Capítulo 1, se trata del concepto de que, en una sociedad como la actual, donde los avances científicos y tecnológicos provocan que protocolos y dispositivos de telecomunicación queden obsoletos y anticuados en un periodo de diez años; la única explicación que se encuentra a la supremacía del sistema estereofónico en la industria del entretenimiento, es meramente comercial. Por suerte siempre existen personas que siguen empujando el progreso tecnológico sin ser interferidos por lo que dicta el mercado.

Es bastante obvio que, sin un apoyo por parte de la industria del entretenimiento (cine, discográficas, videojuegos, etc.), no va a ser posible la implantación en la sociedad del sistema ambiofónico; y aunque así fuese el caso, tampoco se puede llegar a creer que este desbancara al sistema estereofónico, así como el sistema estereofónico no ha desbancado al monoaural en la actualidad (ejemplos de su utilización serían la telefonía, megafonía, todo el catálogo existente de discos grabados en monoaural...).

La mayor ventaja que tiene el sistema ambiofónico es su compatibilidad con las grabaciones de dos canales, es decir, con todo el vasto catálogo de grabaciones mal llamadas estereofónicas. Casi cualquier disco, independientemente del género musical o, del método empleado en la grabación y mezcla, se beneficia de las propiedades del sistema de reproducción ambiofónico. Por lo que parece ser que, la barrera a superar en lo relativo a la implantación generalizada del sistema, se ha de centrar en el sistema de reproducción más que en el de grabación.

También es de esperar que, debido al desarrollo de procesadores



digitales de señal y algoritmos (capaces de procesar a tiempo real sin producir distorsión armónica ni ruido audible), la industria especializada en el audio, empiece a ofertar procesadores canceladores de diafonía y convolucionadores para uso doméstico a precios razonables.



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

• Referencias:

[1], [3], [4]- British Patent Specification 394325 "Improvements in and Relating to Sound Transmission, Sound Recording and Sound Reproducing Systems" (Mejoras en y en lo Relativo a la Transmisión del Sonido, Registro Sonoro y Sistemas de Reproducción Sonora). Alan Blumlein.

[2]- "Introducción a las Salas para la Palabra". Constantino Gil Gonzalez.

[5], [7]- "Ambiophonics". Ralph Glasgal.

[6]- "Ambiophonic Principles for the Recording and Reproduction of Surround Sound for Music". Angelo Farina, Ralph Glasgal, Enrico Armelloni, Anders Torger.

[8] [9]- "Concert Hall Acoustics". YoIchi Ando

[10]- "The Effects of Interaural Crosstalk on Stereo Reproduction and Minimizing Interaural Crosstalk in Nearfield Monitoring by the Use os a Physical Barrier". Timothy Bock, Don Keele (Convención de la AES 81).

• Bibliografía.

• "Ambiophonics". Ralph Glasgal.

• "Introducción a las Salas para la Palabra". Constantino Gil Gonzalez.



- “Evaluating Loudspeakers”. Robin Miller.
- “Ambiophonic Principles for the Recording and Reproduction of Surround Sound for Music”. Angelo Farina, Ralph Glasgal, Enrico Armelloni, Anders Torger.
- “The Ambiophone”. Ralph Glasgal.
- “Understanding and Installing an Ambiophonic System”. Les Leventhal, Ralph Glasgal.

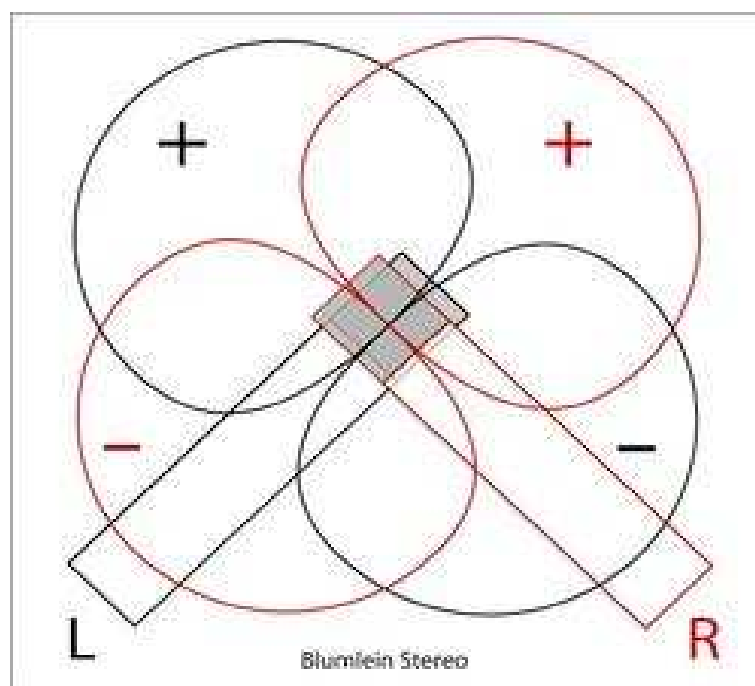


Relación de Figuras

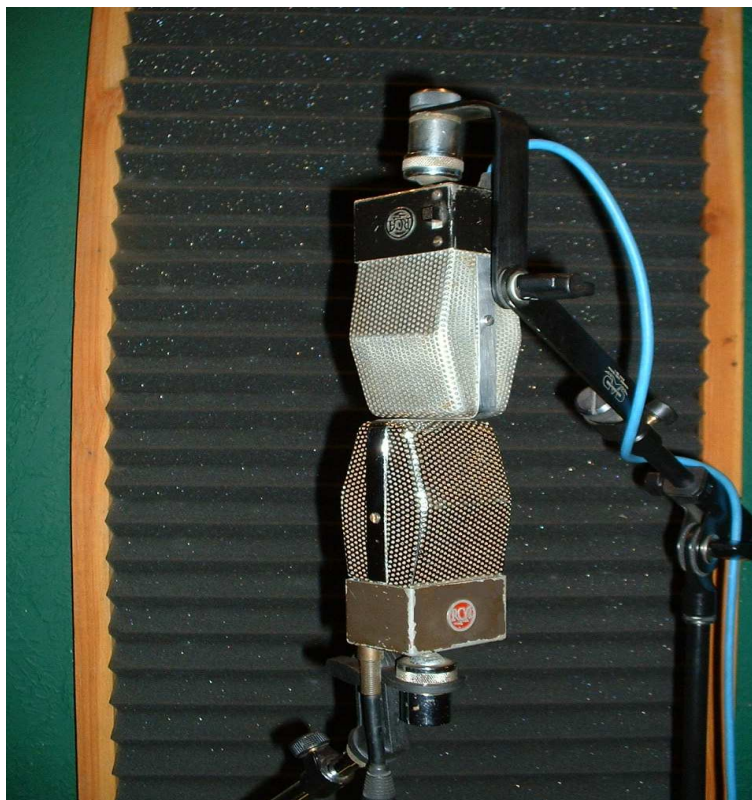
- Figura 1.1. Alan Blumlein.



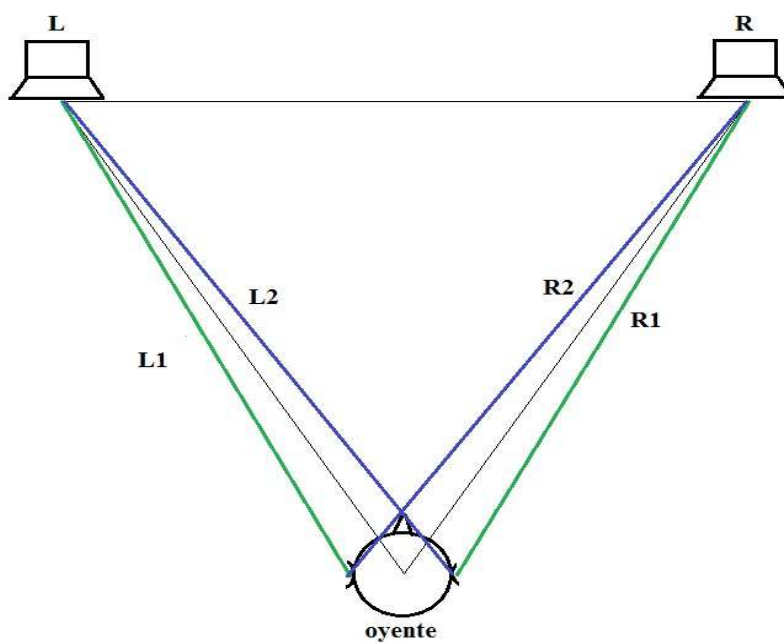
- Figura 1.2. Diagrama de directividad del par Blumlein



- Figura 1.3. Fotografía de disposición microfónica de Blumein.



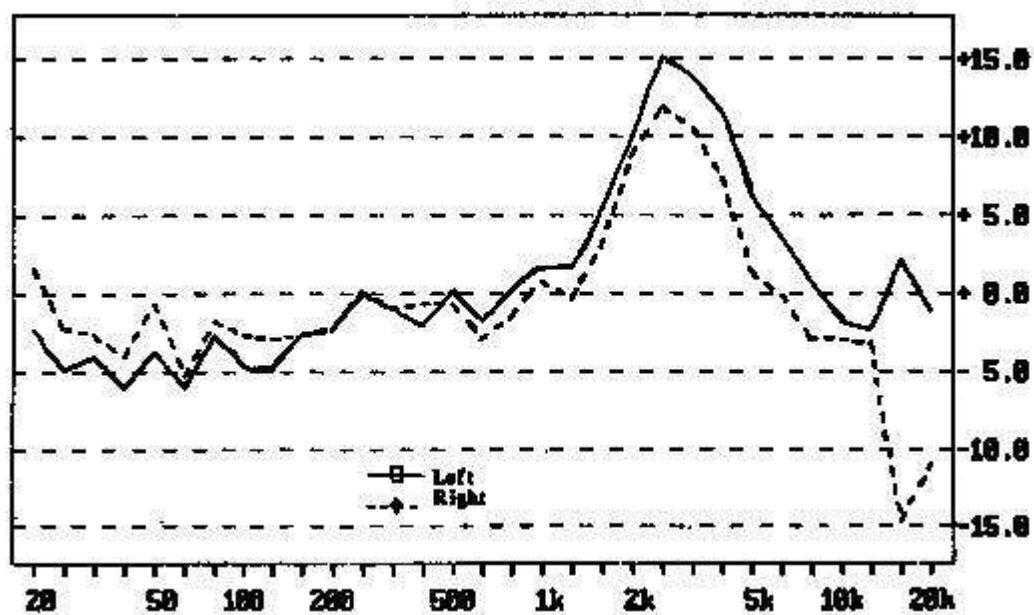
- Figura 1.4. Disposición estereofónica estándar. Cuatro señales alcanzan al oyente. En una situación de escucha de fuentes sonoras reales las señales "L2" y "R2" no existirían.



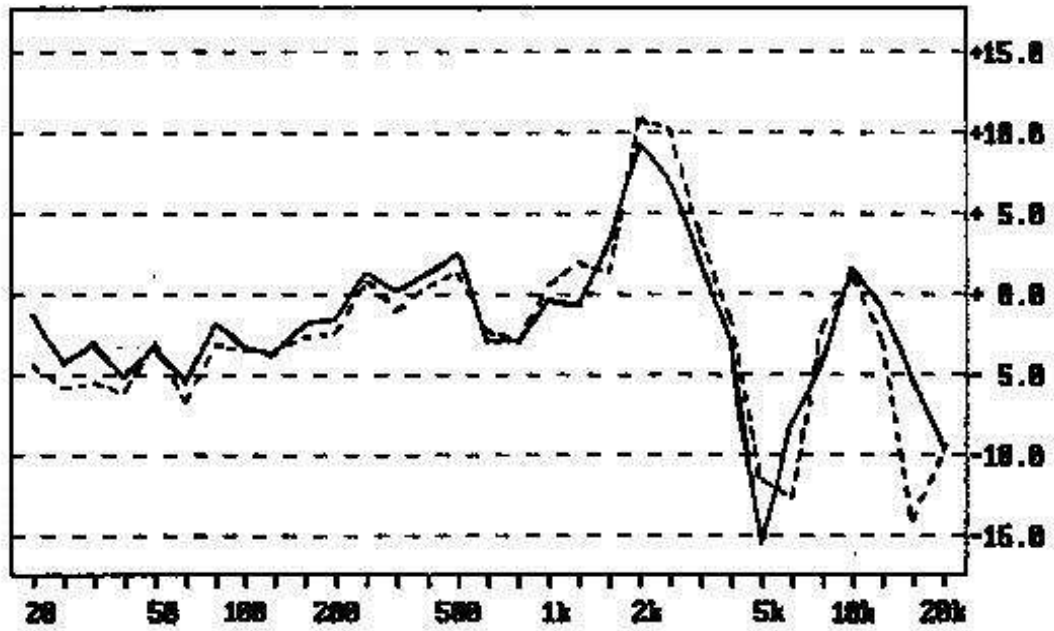
• Figura 1.5. Carnegie Hall



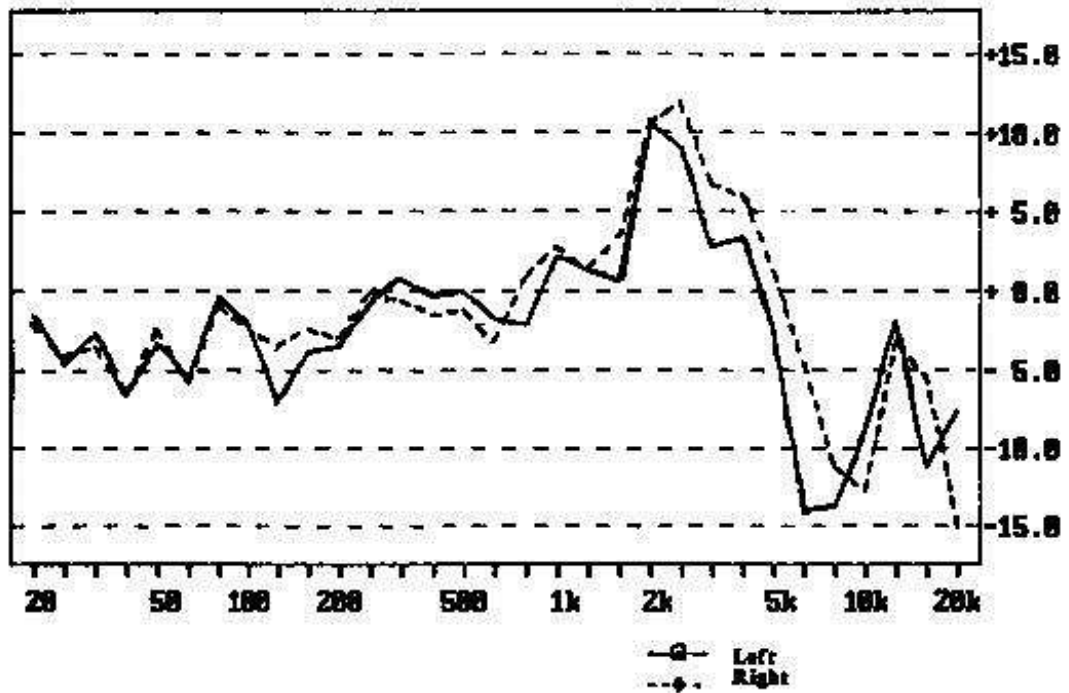
• Figura 2.1. Respuesta de ambos oídos para una fuente central, sujeto 1.



- Figura 2.2. Respuesta de ambos oídos para una fuente central, sujeto 2.



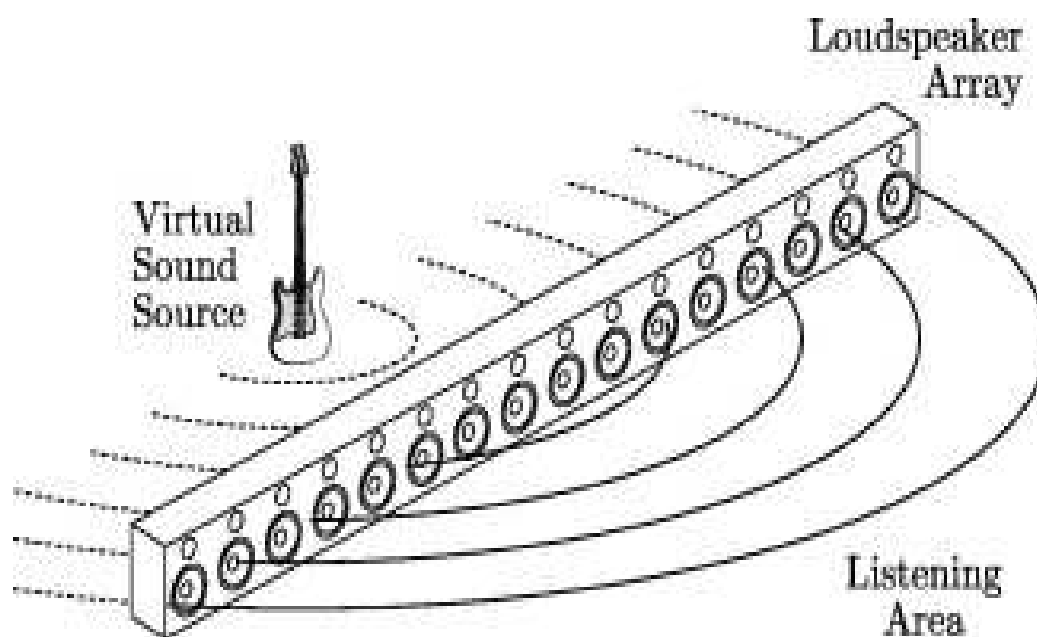
- Figura 2.3. Respuesta de ambos oídos para una fuente central, sujeto 3.



- Figura 2.4. Disposición microfónica (dos micrófonos bidireccionales y uno omnidireccional) y sala de escucha compatibles con Ambisonics.



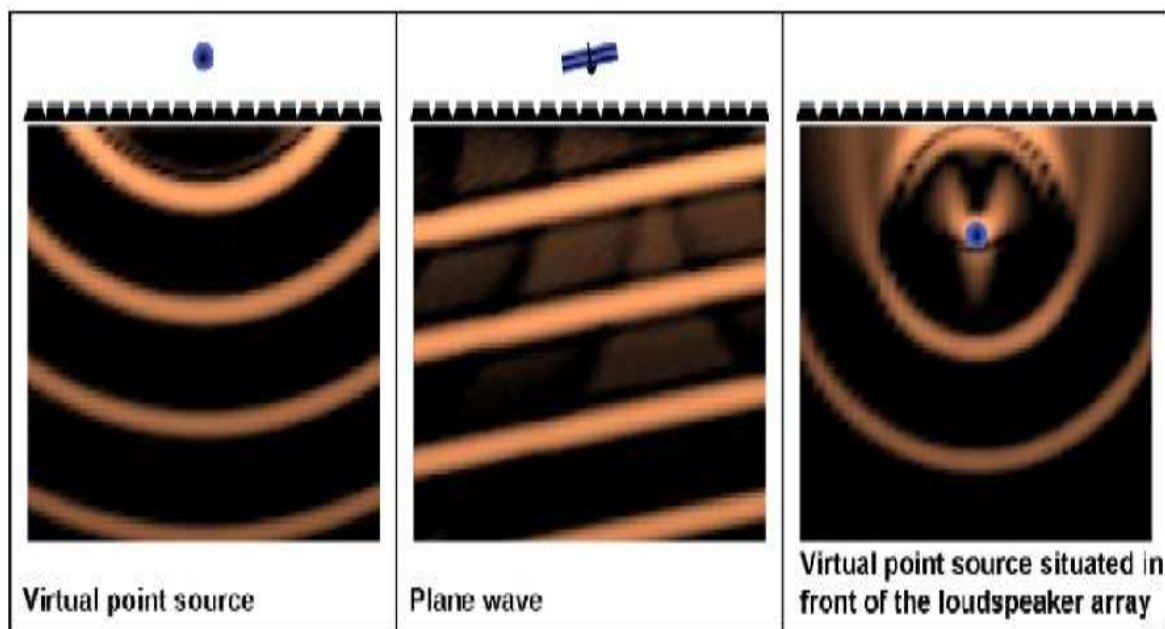
- Figura 2.5. Ilustración de como un frente de onda de una fuente sonora se reconstruye a partir de la superposición de fuentes puntuales.



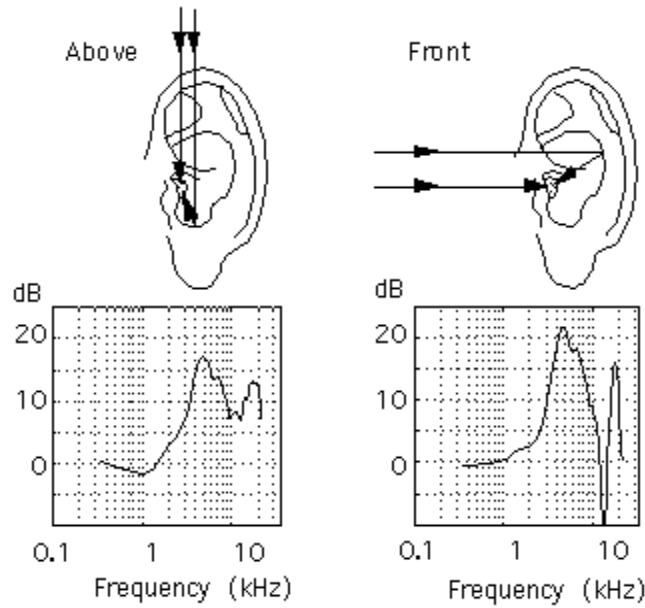
- Figura 2.6. Sala de escucha compatible con el Método de Reconstrucción de Frente de Onda.



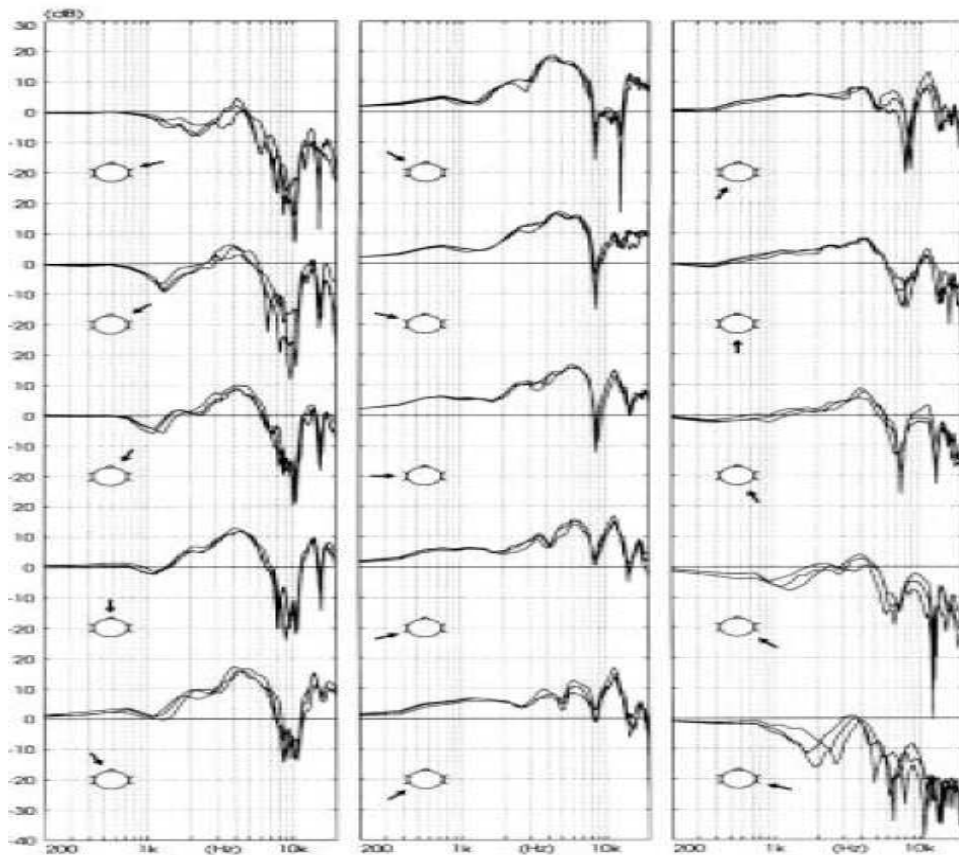
- Figura 2.7. Ilustración de los tipos de fuentes elementales del Método de Reconstrucción de Frente de Onda.



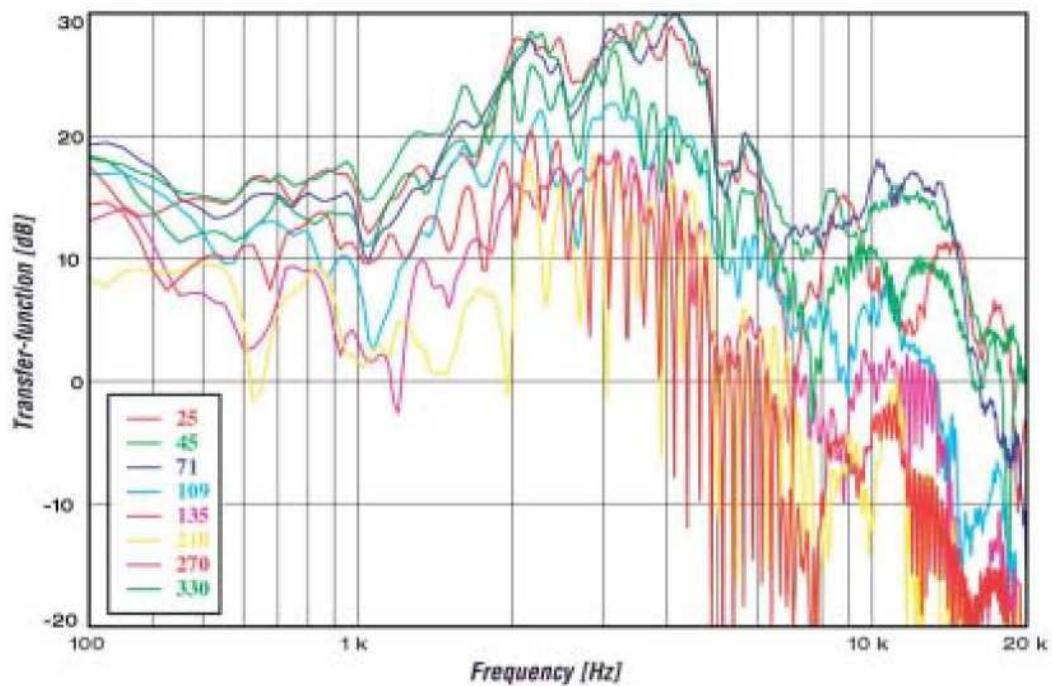
- Figura 3.1. Ejemplo de respuestas del oído externo para dos direcciones de incidencia, desde arriba y desde el frente del oyente.



- Figura 3.2. Respuesta del oído externo para diferentes ángulos de incidencia.



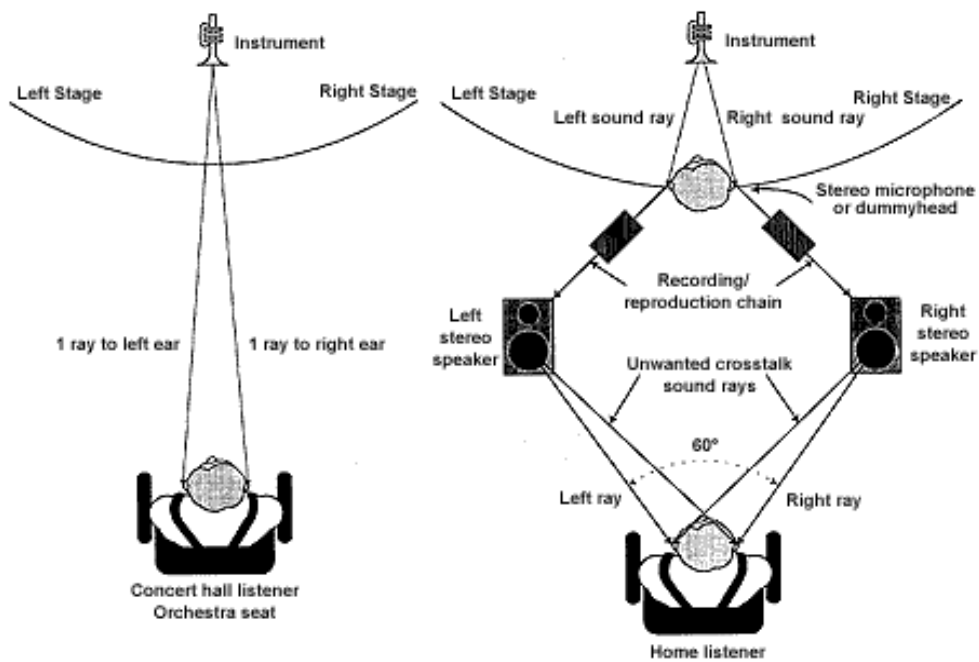
- Figura 3.3. Respuesta HRTF en función del ángulo de incidencia.



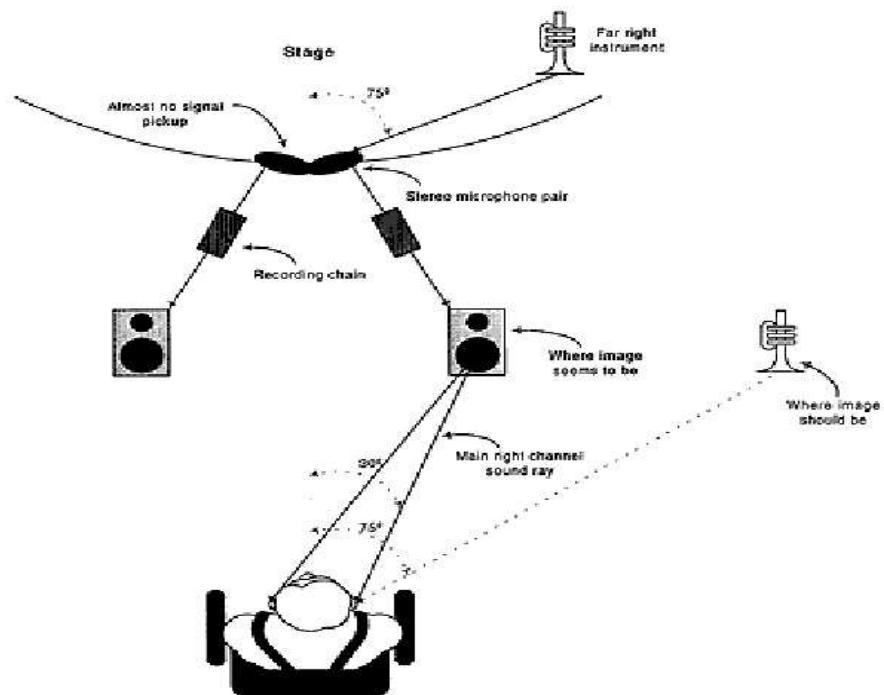
- Figura 3.4. Micrófono de maniquí Neumann KU100. Para grabaciones estereofónicas.



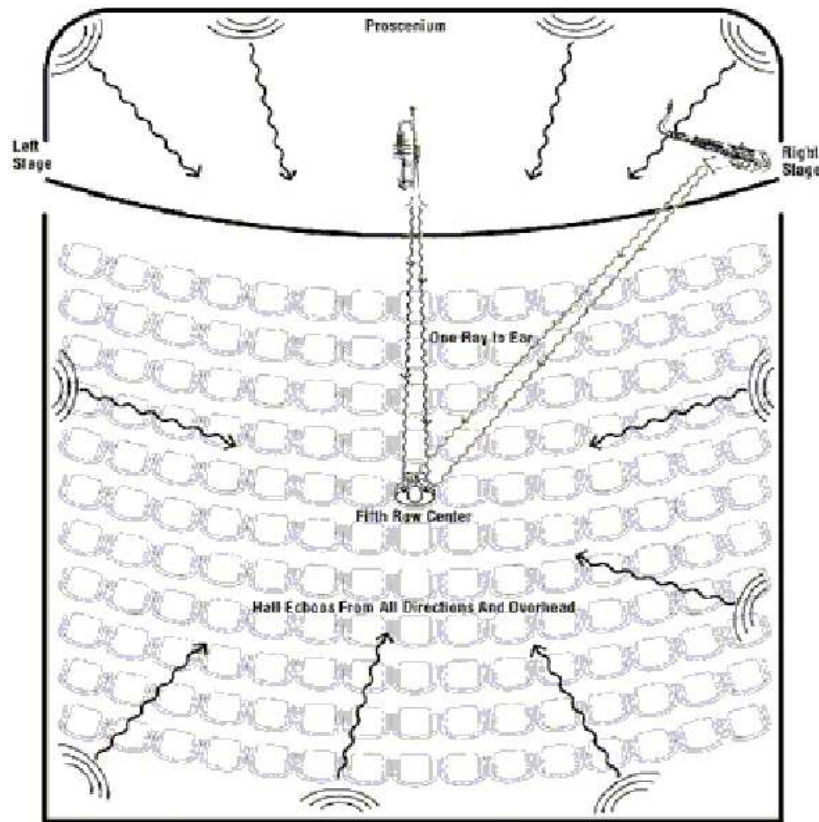
- Figura 3.5. Comparación del proceso de escucha en una situación real con una reproducción estereofónica para una fuente central.



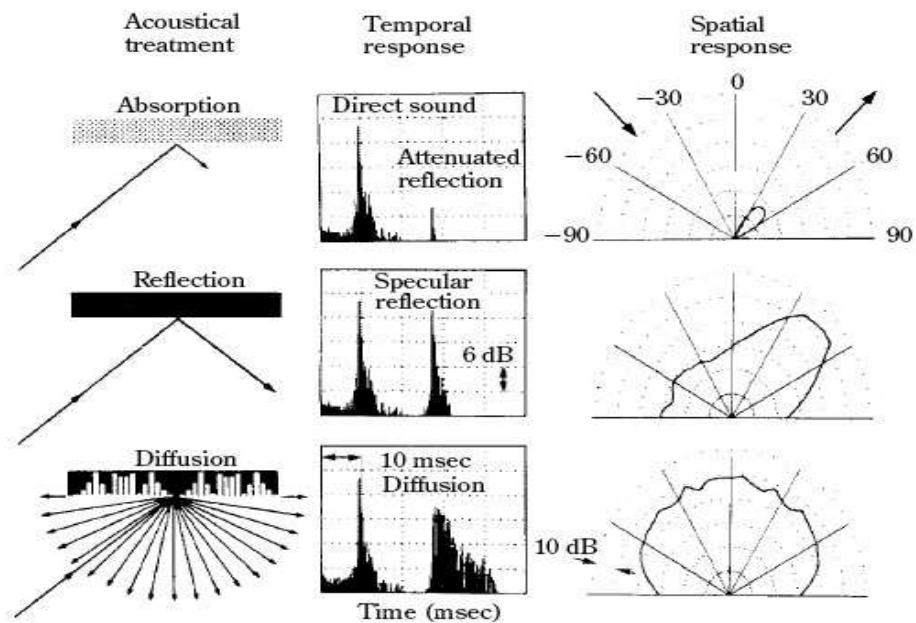
- Figura 4.1. Compresión de la anchura del esenario sonoro en un sistema de reproducción estereofónico.



- Figura 5.1. Ilustración de las diferentes señales que alcanzan a un oyente en un auditorio.



- Figura 6.1. Comparación de los tres fenómenos físicos: absorción, reflexión y difusión.



- Figura 6.2. Difusor Auralex.



- Figura 7.1. Micrófono Schoeps KFM-6.



- Figura 8.1. Pareja de altavoces centrales electrostáticos para un sistema ambiofónico.



- Figura 8.2. Altavoz electrostático dispuesto horizontalmente.



- Figura 8.3. Imagen de la Ciudad de la Ópera de Tokyo.



- Figura 8.4. Proceso de escucha con barrera acústica.



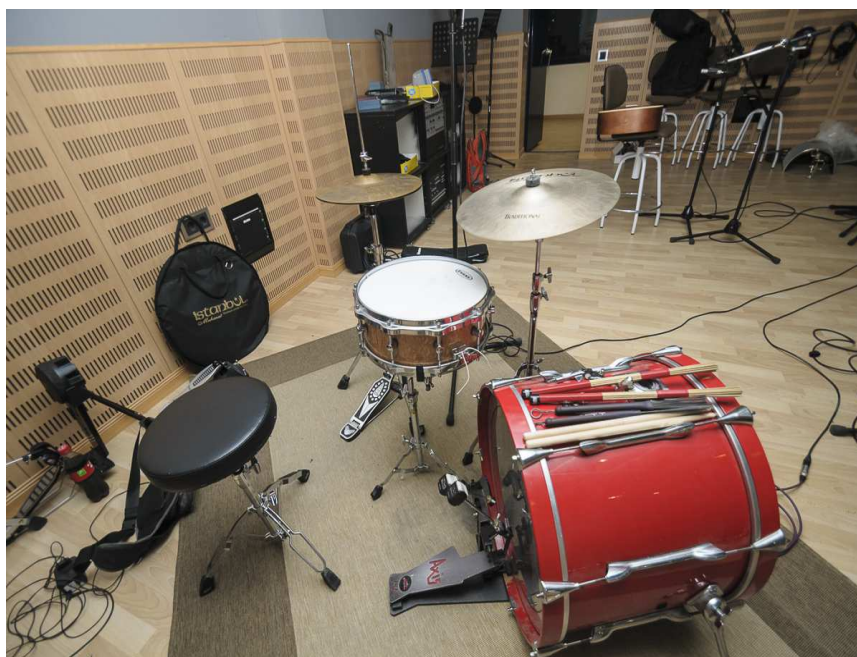
- Figura 9.1. Control del estudio de grabación.



- Figura 9.2. Detalle del Ambiófono implementado.



- Figura 9.3. Detalle del kit de batería.



- Figura 9.4. Detalle de la posición relativa del ambiófono y el par estéreo A-B.



- Figura 9.5. Interfaz gráfica del *plug-in* VST AmbioOne donde se ve la posibilidad de ajustar los parámetros del algoritmo de cancelación de diafonía.



- Figura 9.6. Detalle de las diferentes pistas grabadas en el mezclador de Nuendo.

