



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A107

Generación de espacios auditivos 3-D

Antonio Quintero-Rincón^(a),
Pablo Ignacio D'Ambrosio^(b),

(a) Grupo de Electrónica Digital Aplicada G.E.D.A., Escuela de Ingeniería, Departamento de Electrónica, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Argentina. E-mail: aquinter@itba.edu.ar

(b) Escuela de Ingeniería, Departamento de Electrónica, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Argentina E-mail: pabloignaciодambrosio@gmail.com

Abstract

Mathematical model and a reverberation system implementations that emulates the form, in that the sound propagates in real form and how it influences in the veracity of the sound with the HRTF system of three-dimensional sound mix, for this goal real measurements and simulations are used, first to process the depth sound and second for the modifications that this sound would experience until arriving at the eardrum.

Resumen

Implementación de un modelo matemático y de un sistema de reverberación que emula la forma, en la que el sonido se propaga en un medio real y cómo influye en la veracidad del sonido resultante al combinarse con la HRTF de un sistema de sonido tridimensional, para este fin se utilizan mediciones reales para procesar el sonido al cual se pretende darle “profundidad” y simulaciones para las modificaciones que sufriría dicho sonido hasta llegar al tímpano.

1 Introducción

La percepción espacial del sonido está dada por la posición del oyente, esto implica un marco de referencia para describir distancias y ángulos de la Fuente Sonora o “imagen del sonido”, esta está localizada en un punto de origen directamente entre los oídos aproximadamente a nivel de los ojos en el centro de la cabeza. Por ende la Fuente Virtual del Sonido puede ser localizada objetivamente como una distancia lineal y subjetivamente como la distancia percibida.

Las dos convenciones para describir la percepción angular de una Fuente de Sonido son el azimuth (Medida angular en grados usada para localizar un objeto) y la elevación. Por ejemplo 0 grados de elevación y azimuth son un punto directamente delante del oyente.

El azimuth y la elevación pueden indicar la posición de la fuente sonora percibida solo en términos de su localización en una superficie esférica que envuelve la cabeza del oyente. Ver figura 1. Esto genera una percepción de distancia, la cual se sabe que es multidimensional ya que involucra la interacción de todas las señales que están interactuando, o sea, el espacio dimensional del auditorio, el tamaño de la fuente y la reverberación, esta última es causada por repetición de múltiples reflexiones de la fuente de un sonido en una superficie cerrada.

Un Espacio Auditivo natural se refiere a cómo oímos los sonidos espaciales en la vida diaria, esto quiere decir: con los oídos destapados, con movimientos de la cabeza y con la interacción de alguna otra entrada sensorial. Es importante tener en cuenta que las imágenes auditivas espaciales no están confinadas solamente a los “dos oídos” o a la audición “binaural”; por ejemplo están las experiencias en conversaciones telefónicas donde la recepción en un oído puede mantener señales espaciales. Un caso especial de la audición binaural es el Espacio Auditivo Virtual, se refiere a la formación de “imágenes acústicas espaciales sintéticas” usando un sistema de sonido tridimensional y auriculares estéreos (1). Ver figura 1.

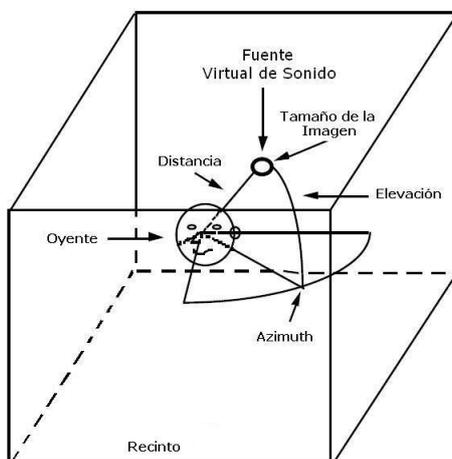


Figura 1. Posición Espacial de una fuente sonora percibida (perspectiva del oyente). Tomado de (1)

En el oyente las experiencias espaciales auditivas naturales y sintéticas son transformaciones físicas y perceptivas. El sistema físico básico del oído es el siguiente: el sonido que transforma la **pinna** (la porción visible de la oreja) está dado básicamente por el sonido directo, la difracción de la cabeza y la reflexión del hombro y el torso, el sonido viaja por el canal auditivo para llegar al oído medio, su función es la de transformar la energía

acústica que llega al tímpano en energía mecánica por medio de la cadena de huesecillos (Martillo, yunque y estribo), la energía mecánica se convierte en presión de fluido por medio de la cóclea, por el movimiento de la ventana oval. La presión de fluido causa patrones dependientes de la frecuencia de vibración de la membrana basilar dentro del oído interno, esto causa que numerosas fibras salgan de las células ciliares al doblarse, creando un control automático de ganancia (Sensibilidad del oído). Éstos alternadamente activan potenciales eléctricos dentro de las neuronas del sistema auditivo, que se combinan en niveles más altos con la información del oído. Este proceso neurológico es eventualmente transformado en percepción aural y cognitiva, incluyendo la percepción de atributos espaciales de un sonido resultante ya sea monoaural como binaural (2). Ver Figura 2.

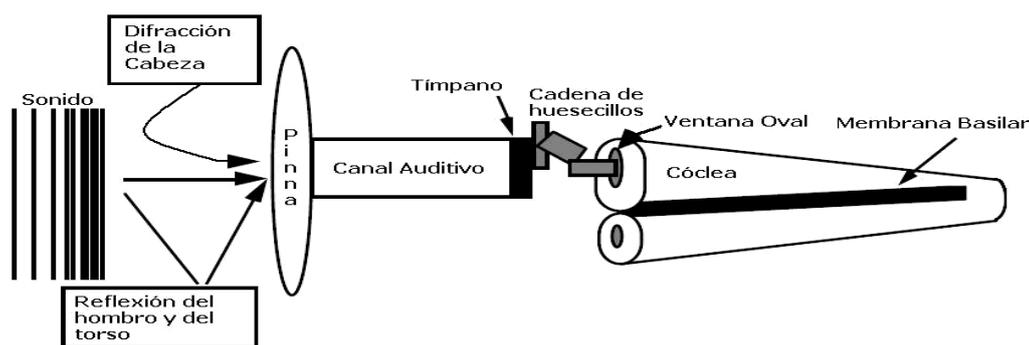


Figura 2. Esquema Físico simplificado de Oído. Tomado de (1)

La principal forma de localizar una fuente de sonido es de acuerdo a su posición angular, la cual involucra la diferencia relativa de la forma de onda entre los dos oídos en el plano horizontal. Es importante recalcar que desde el punto de vista evolutivo, la posición horizontal de los oídos maximiza las diferencias de los eventos auditivos que ocurren a través del oyente, ya sea hacia arriba o hacia abajo, esto permite la audición de fuentes auditivas fuera del campo visual. La frecuencia depende de la diferencia de tiempo interaural **ITD** y de la diferencia de intensidad interaural **IDD**, estas ayudan a determinar la sensibilidad relativa de los mecanismos fisiológicos de las señales. Para describir estas señales bajo experimentos psicoacústicos, se recurre al paradigma de lateralización. El cual involucra la manipulación experimental de la ITD y de la IID para determinar la sensibilidad relativa de los mecanismos fisiológicos a estas. Aunque la lateralización pueda ocurrir con parlantes en ambientes anecoicos, los experimentos de lateralización utilizan casi siempre los audífonos. La palabra "lateralizada" significa un caso especial de la localización, donde: la percepción espacial se escucha dentro de la cabeza sobre todo a lo largo del eje interaural entre los oídos; y los medios de producir la percepción implican la manipulación de las diferencias de tiempo o de intensidad interaural sobre los audífonos. Con el paradigma de lateralización, es posible hacer hipótesis limitadas pero demostrables sobre la fisiología del sistema auditivo y de la localización por parámetros simples controlados por algún medio. Por ejemplo cuando sonidos idénticos (Monoaurales) son emitidos por audífonos estéreos, la "imagen espacializada" aparece en una posición virtual en el centro de la cabeza, algo parecido a lo que pasa cuando dos sonidos pasan por algún transductor. Una situación similar ocurre con los sistemas de altavoz de dos vías, donde una buena manera de encontrar el "sweet spot" para un sistema estéreo casero es ajustando la perilla del balance hasta lograr un sonido de emisión de radio monoaural, el sonido suena como una fuente virtual localizada en el punto medio entre los altavoces (1).

El Efecto de Precedencia o Efecto Hass, se define perceptivamente de la siguiente manera: si varios sonidos independientes llegan a nuestro cerebro con un intervalo inferior a 50 ms, éste los fusiona y los interpreta como uno sólo sonido. Esto se debe a que el cerebro deja de percibir la dirección y entiende los sonidos posteriores como un eco o reverberación, usualmente descrito como resultados de los procesos de ITD e IID. Este efecto explica un mecanismo inhibitorio importante del sistema auditivo, el cual permite que se localicen sonidos en presencia de la reverberación (3).

La filtración espectral de una fuente sonora antes de que alcance el tímpano es causado primariamente por el oído externo, ese término se llama la función de transferencia cabeza (HRTF). El HRTF binaural (terminología para referirse ambos HRTFs del oído izquierdo y el oído derecho) se puede pensar como una amplitud dependiente de la frecuencia y de las diferencias de retardo de tiempo que resultan de las diferentes formas de los oídos. Por ejemplo las asimetrías y los dobleces o pliegues de las orejas causan diminutos retardos en un rango de 0 a 300 μ s; esto causa que el contenido espectral en el tímpano difiera perceptiblemente del de la fuente sonora, por ejemplo esto se puede percibir si fuera medido con un micrófono omnidireccional. La compleja construcción de los oídos externos causa un sistema único de microretardos de tiempo, resonancias y difracciones que la HRTF traduce colectivamente como una sola señal para cada posición de la fuente sonora. En otras palabras, una única frecuencia que depende de las diferencias de amplitud y de tiempo se imponen ante una señal entrante para una posición dada de la fuente.

Como Regla Básica de Acústica, la HRTF altera el espectro y la sincronización de la señal de entrada dependiendo de la localización admitiendo diferentes grados (ya sea mayor o menor) tanto para un oyente como para una señal espacial. El uso de espectros a partir de la HRTF es un componente clave de un sistema de sonido tridimensional ya sea para una medición directa o para una modelación del sistema en cuestión. (4).

2 Fundamentos acústicos y perceptivos

Los humanos pueden localizar con gran precisión las fuentes sonoras en 3D independiente de su dirección de arribo, si el sonido lo recibe el oyente por medio de unos audífonos estéreos, el sonido no tendrá el efecto de filtrado del sistema pinna-cabeza-torso. Experimentos clásicos de psicoacústica muestran que cuando se excita con una onda seno simple, el sistema auditivo usa dos señales fuertes para estimar la dirección aparente de la fuente sonora, la IID y ITD, aunque la más usada para este propósito es la IID, se usa alrededor de los 1500 Hz donde la sombra acústica producida por la cabeza es efectiva, es decir, donde se reduce la intensidad de las ondas que alcanzan el oído contrario. Para un rango de frecuencias más alto y para ondas estacionarias la ITD no es muy confiable, además se produce una diferencia de fase en las ondas seno, las cuales a menudo exceden 360 grados. Para frecuencias menores a 1500 Hz la IID llega a ser más pequeña que la difracción de la cabeza, la cual esta por encima del efecto de sombra. En este rango bajo de frecuencias es posible contar con diferencias de fase producidas por la ITD. La IID y la ITD pueden explicar parcialmente la habilidad de discriminar entre diferentes direcciones espaciales. Si la fuente del sonido se mueve lateralmente alrededor de la superficie esférica, ver figura 1, la IID y la ITD pueden no cambiar, el cono formado por el círculo con centro en la cabeza se llama *Cono de Confusión*; la discriminación frontal, trasera y vertical dentro del cono de confusión es lo utilizado para entender qué pasa con la direccionalidad del sonido en términos de la HRTF. El sistema pinna-cabeza-torso actúa como un filtro lineal de la onda plana que viene de una dirección. Las respuestas de magnitud y fase de este filtro son muy complejas dependiendo de las direcciones, por lo tanto es posible que para el oyente no encuentren ambigüedades entre

las direcciones similares, estacionarias, ITD y IID. En estos casos, es preferible pensar en los efectos de filtrado en el dominio del tiempo, HRIR.

En la vida real el oyente nunca está estático cuando escucha una fuente auditiva, hasta pequeños movimientos de la cabeza ayudan a discriminar las posibles confusiones, por ejemplo la incertidumbre entre una fuente central frente al oyente o la misma fuente exactamente detrás del oyente. Por lo tanto, una serie pequeña de señales como la IID y la ITD y las diferencias importantes de las HRTFs pueden ser suficientes para dar una fuerte impresión de la dirección, siempre y cuando las señales se relacionen con los movimientos del oyente (5).

3 Diferencias Interaurales - Externalización

La espacialización con audífonos pueden ser usados con la intensidad interaural y las diferencias de tiempo. La amplitud y el tiempo de retardo de cada canal se pueden controlar de acuerdo al azimuth. El tiempo interaural y las diferencias en intensidad son capaces de mover el azimuth aparente de la fuente sonora sin un sentido de elevación, sin embargo la posición del sonido aparente está localizada dentro de la cabeza del oyente, sin ningún sentido de externalización. Una localización fina puede ser obtenida al introducir una frecuencia que depende de las diferencias interaurales, de hecho la difracción de las señales en baja frecuencia son apenas afectados por la IID mientras que la ITD no es afectada (6). La limitante de baja frecuencia puede ser obtenida para un ángulo general de incidencia θ por medio de la ecuación 1).

$$ITD = \frac{1.5\delta}{c} \sin \theta \quad (1)$$

Donde δ es la distancia hasta el oído interno y c es la velocidad del sonido. El punto de cruce entre las altas y bajas frecuencias está localizado alrededor de 1 kHz, la IID y la ITD muestra cambios cuando la fuente está cerca de la cabeza, particularmente si las fuentes están cerca de cinco veces el radio de la cabeza, se incrementa la diferencia de intensidad en bajas frecuencias, en la ITD los cambios no revelan información significativa respecto al rango de la fuente.

Escuchar sonidos binaurales a través de parlantes, causan internalización de las fuentes de sonido en la cabeza del oyente, esto se debe a que los humanos tienden a internalizar los objetos percibidos del estímulo total, pero como vienen de todos los modos sensoriales, no pueden ser producidos en situaciones naturales que involucren fuentes distantes, una técnica para que la externalización sea efectiva es la decorrelación. En situaciones naturales las señales que alcanzan los oídos son significativamente decorrelacionadas, especialmente en una sala reverberante

La correlación de ambos canales está dado por la función de la ecuación 2).

$$r(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2Tv} \int_{-T}^{+T} x_L(t)x_R(t+T)\delta t \quad (2)$$

El argumento T es el tiempo de retardo entre los dos canales y v es un factor normalizado definido por la ecuación 3).

$$v = \frac{1}{2T} \sqrt{\int_{-T}^{+T} x_L^2(t)\delta t \int_{-T}^{+T} x_R^2(t)\delta t} \quad (3)$$

Si un canal es una copia desplazada del otro, la función de correlación puede tener un pico fuerte para un valor del argumento igual al tiempo de desplazamiento. Usualmente el grado de correlación es medido por un único número tomando el valor absoluto del máximo de la función de correlación. El factor de normalización es elegido para producir un grado de correlación igual a 1 para desplazamientos puros y -1 para señales que está 180 grados fuera de fase. Si dos señales tienen un grado de correlación igual a uno en magnitud, se dice que son coherentes, la coherencia entre los canales izquierdo y derecho es mantenida sobre diferencias de tiempo e intensidad y hasta sobre la inversión de fase (7). Ver ecuación 4).

$$r_{LF} = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} x_L(n)x_F(n) \quad (4)$$

Cuando se escucha por medio de los audífonos y por ambos canales ruido de banda ancha, el grado relativo de correlación produce una imagen espacial del sonido que se extiende desde la parte central dentro de la cabeza hasta las partes laterales, ver figura 3. La coherencia parcial de las señales produce imágenes que son localizadas repentinamente con mayor o menor precisión (8). El grado de correlación es generalmente reducido por medio de la reverberación, razón por la cual es usada comúnmente para decorrelacionar dos canales. Por lo tanto, si el propósito es externalizar la imagen de un sonido, se busca evitar artificios como una excesiva coloración y/o reverberación.

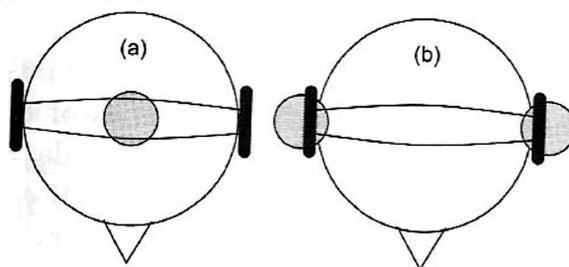


Figura 3. Percepción de la imagen de un sonido cuando ruido de banda ancha con grado de correlación igual a 1 (a) y 0 (b).

4 Modelación de la HRTF

Muchos autores han medido las propiedades de filtrado del sistema pinna-cabeza-torso por medio de maniqués o humanos. Una recolección popular de medidas fueron tomadas por Gardner y Martin usando una cabeza de maniquí KEMAR. Las medidas de este tipo son comúnmente tomadas en una cámara anecoica por medio de parlantes que emiten una señal de prueba, la cual se aproxima a los de la cabeza para la dirección deseada (9).

Modelar las propiedades de las estructuras del sistema pinna-cabeza-torso da la posibilidad de aplicar continuas variaciones de las posiciones de las fuentes del sonido y de la morfología del oyente. Muchas de las propiedades físicas y/o geométricas pueden entenderse por medio de un análisis muy cuidadoso de las HRIRs, de la grafica de superficies, de las funciones de las variables de tiempo y del azimuth o tiempo y elevación. Esta aproximación es tomada por Brown y Duda (10) quienes dividen la estructura del modelo en 3 partes:

- Sombra de la cabeza y ITD
- Distorsión de Eco
- Reflexiones de la Pinna

Empezando con la aproximación de la cabeza como una esfera rígida que difracta la onda plana, el efecto de la sombra puede ser aproximado de forma efectiva por medio de un sistema de primer orden continuo en el tiempo y por una pareja de polo-cero en el plano complejo Lapace por medio de las ecuaciones 5) y 6).

$$S_z = \frac{-2\omega_0}{\alpha(\theta)} \quad (5)$$

$$S_p = -2\omega_0 \quad (6)$$

Donde ω_0 esta relacionado con el radio efectivo a de la cabeza y la velocidad del sonido c por medio de la ecuación 7).

$$\omega_0 = \frac{c}{a} \quad (7)$$

La posición del cero varía con el azimuth θ de acuerdo a la función de la ecuación 8).

$$\alpha(\theta) = 1.05 + 0.95 \cos\left(\frac{\theta}{150^\circ} 180^\circ\right) \quad (8)$$

La pareja polo-cero puede ser directamente trasladada dentro de un filtro digital IIR estable por medio de una transformación bilineal con un apropiado escalamiento (11), resultando el filtro de la ecuación 9).

$$H_{hs} = \frac{(\omega_0 + \alpha Fs) + (\omega_0 - \alpha Fs)Z^{-1}}{(\omega_0 + Fs) + (\omega_0 - Fs)Z^{-1}} \quad (10)$$

La ITD puede ser obtenida por medio de un filtro pasa todo (12), cuyo retardo de grupo en segundos esta dado para un azimuth con ángulo θ por la e función de la ecuación 11).

$$\tau_h(\theta) = \begin{cases} -\frac{a}{c} \cos \theta & \text{Si } 0 < |\theta| < \frac{\pi}{2} \\ \frac{a}{c} (|\theta| - \frac{\pi}{2}) & \text{Si } \frac{\pi}{2} < |\theta| < \pi \end{cases} \quad (11)$$

La distorsión y efectos del torso son sintetizados en un único eco. Una aproximación del retardo de tiempo puede ser deducida por las medidas reportadas por Brown y Duda (10) por medio de la ecuación 12) en ms

$$\tau_{sh} = 1.2 \frac{180^\circ - \theta}{180^\circ} \left(1 - 0.00004 \left((\phi - 80^\circ) \frac{180^\circ}{180^\circ + \theta} \right)^2 \right) \quad (12)$$

La pinna suministra múltiples reflexiones que pueden ser obtenidas por medio de líneas de retardo. En el dominio de la frecuencia, estos pequeños ecos se reubican en secciones cuya posición depende de la elevación, estas son frecuentemente consideradas como la señal principal para la percepción de elevación. La formula para el tiempo de retardo de los ecos esta dado por la ecuación 13).

$$\tau_{pn} = A_n \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(D_n(90^\circ - \phi)) + B_n \quad (13)$$

Los parámetros son dados en la tabla 1, junto con los valores del amplitud ρ_{pn} de las reflexiones, el parámetro D_n permite el ajuste del modelo para características individuales de la pinna, de este modo suministra un efectivo control para optimizar las propiedades de localización del modelo.

La estructura del modelo del sistema pinna-cabeza-torso esta dado por la figura 4, donde se muestran todos los diagramas de bloque para ambos oídos.

Tabla 1. Parámetros para calcular la amplitud y el tiempo de retardo de las reflexiones producidas por le modelo de la pinna

N	ρ_{pn}	A_n [Muestras]	B_n [Muestras]	D_n
2	0.5	1	2	≈ 1
3	-1	5	4	≈ 0.5
4	0.5	5	7	≈ 0.5
5	-0.25	5	11	≈ 0.5
6	0.25	5	13	≈ 0.5

5 Interpolación

Dado que solo existen un número finito de mediciones de las HRTFs, el resto de “posiciones” espaciales de las cuales no se poseen datos deben estimarse por medio de algún algoritmo de interpolación. Ya que la HRTF es una función de la elevación y el azimuth para cada frecuencia, se parte de cuatro puntos geométricos de un plano rectangular cuyas HRTF son conocidas, se estima la HRTF buscada a partir de la ponderación de estos cuatro puntos. Para calcular dichos pesos se tiene en cuenta la cercanía geométrica del punto que se quiere estimar con respecto a los otros cuatro para determinar el peso de cada uno por medio de una interpolación lineal. En primer lugar se determinan las posiciones de todos los puntos en cuestión como funciones de la elevación y el azimuthal (θ, ϕ) , y luego se calculan las distancias entre los cuatro puntos del rectángulo que queda formado, con respecto al deseado, mediante el teorema de Pitágoras. Si (θ_c, ϕ_c) es la posición del punto buscado y (θ_i, ϕ_i) para $i = 1, 2, 3, 4$ son los cuatro puntos conocidos entonces d_i , las distancias de cada vértice al centro (13), queda determinado por la ecuación 14):

$$d_i = \sqrt{(\theta_c - \theta_i)^2 + (\phi_c - \phi_i)^2} \quad (14)$$

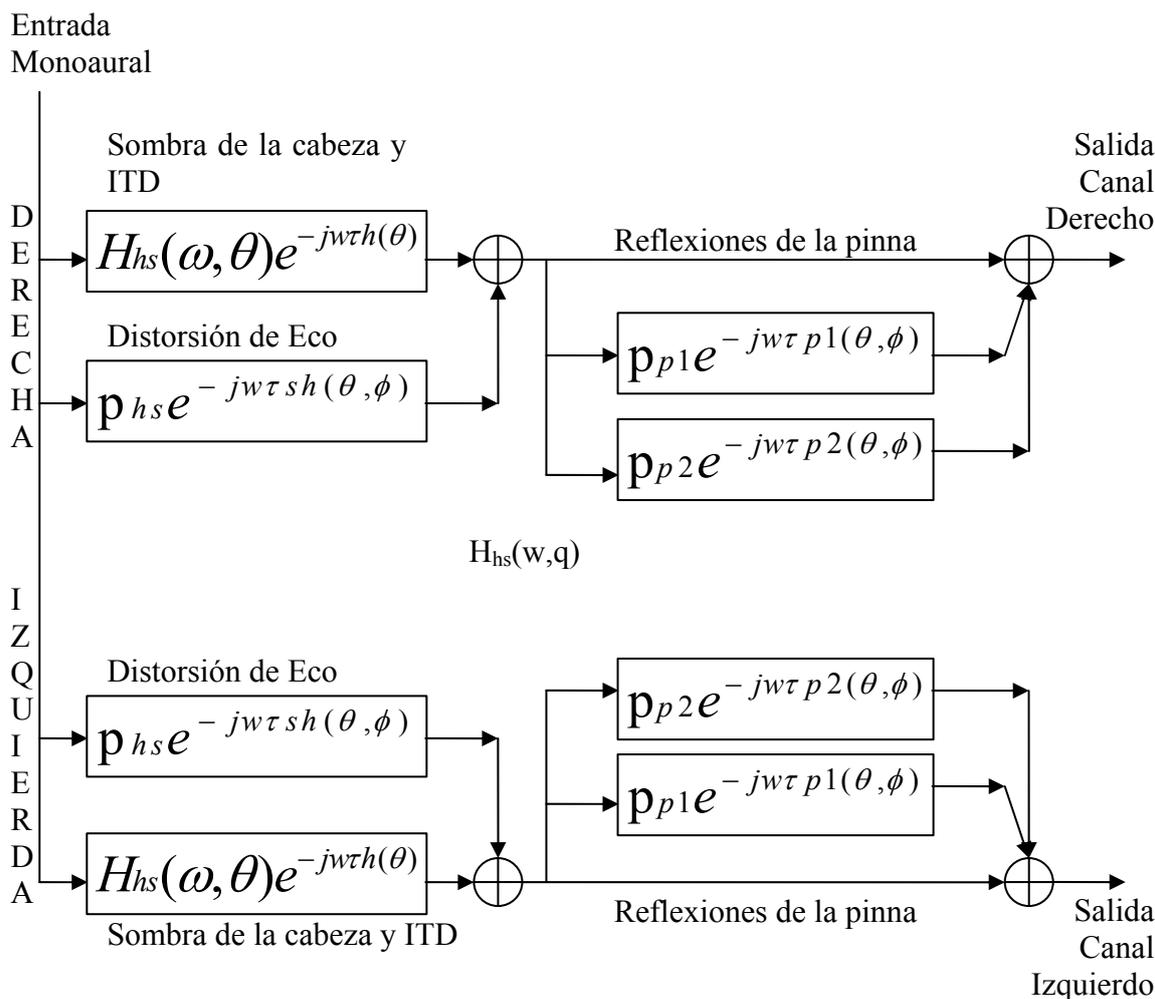


Figura 4. Modelo Estructural del sistema pinna-cabeza-torso

El método de interpolación basado en un plano geométrico construye la respuesta en frecuencia deseada frecuencia por frecuencia, de acuerdo a una ponderación a partir de puntos tomados directamente de la SFRS lo que permite la contribución directa de cada una de ellas sobre el resultado final para cada una de las frecuencias, cosa que no ocurre con otros métodos más simples. Por otro lado este método no requiere el precalculo de parámetros internos, como el método de polos y ceros, lo que lo convierte en un algoritmo óptimo para aplicaciones en tiempo real, ya que todo el algoritmo se realiza en el dominio del tiempo, ver Figura 5.

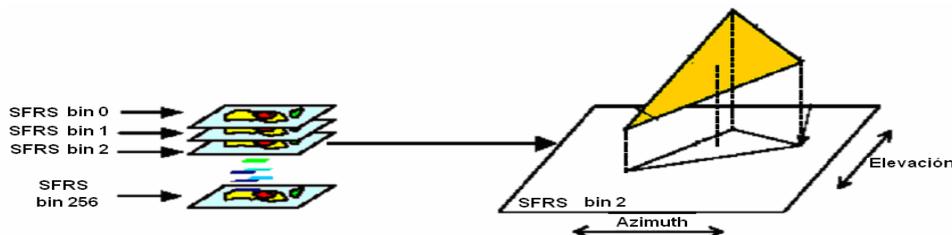


Figura 5. Método de interpolación basándose en un plano geométrico.

6 Ley de Snell

A la hora de simular ambientes reales existe la posibilidad de utilizar la respuesta impulsiva binaural (14) de una sala (BRIR) ya que a diferencia de la HRTF, la misma es calculada sin eliminar los efectos de reverberación. Sin embargo, al no contar con este tipo de mediciones, se optó por trabajar mediante un modelo matemático para representar la reverberación de manera tal de mantener la validez de las HRTF medidas. Para realizarlo, se recurrió a un modelo de un cuarto rectangular cerrado, ubicando al oyente en el centro del mismo. El modelo físico a través del cual se obtienen las ubicaciones de las fuentes virtuales provocadas por la reflexión del sonido en el cuarto es el sugerido por Stephen McGovern (15), que consiste en la aplicación de la ley de Snell a las ondas de sonido, ver Figura 6.

Las repeticiones estarán a una distancia x de la posición del oyente x_0 donde i indica de qué fuente se trata, pudiendo ser negativo o positivo de acuerdo a su posición en el eje, ver ecuación 15).

$$x_i = (-1)^i x_f + \left[i + \frac{1 - (-1)^i}{2} \right] x_c - x_o \tag{15}$$

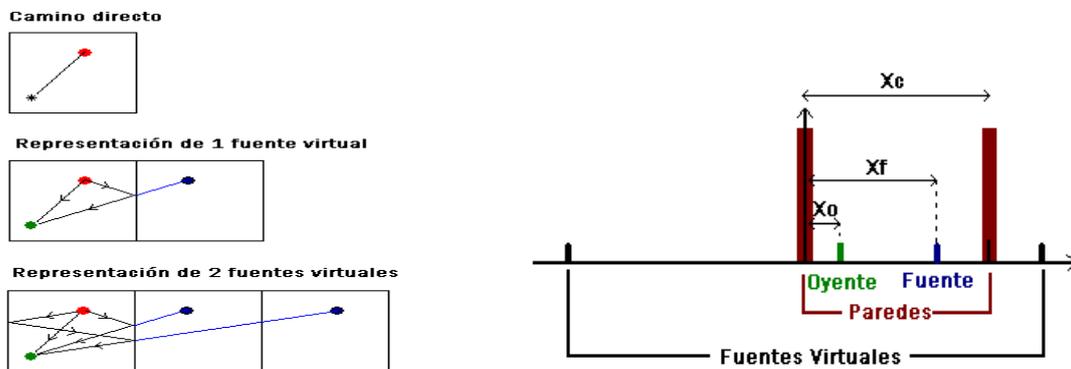


Figura 6. ley de Snell para las ondas de sonido, Modelo planteando para una sola dimensión.

7 Implementación y Conclusiones

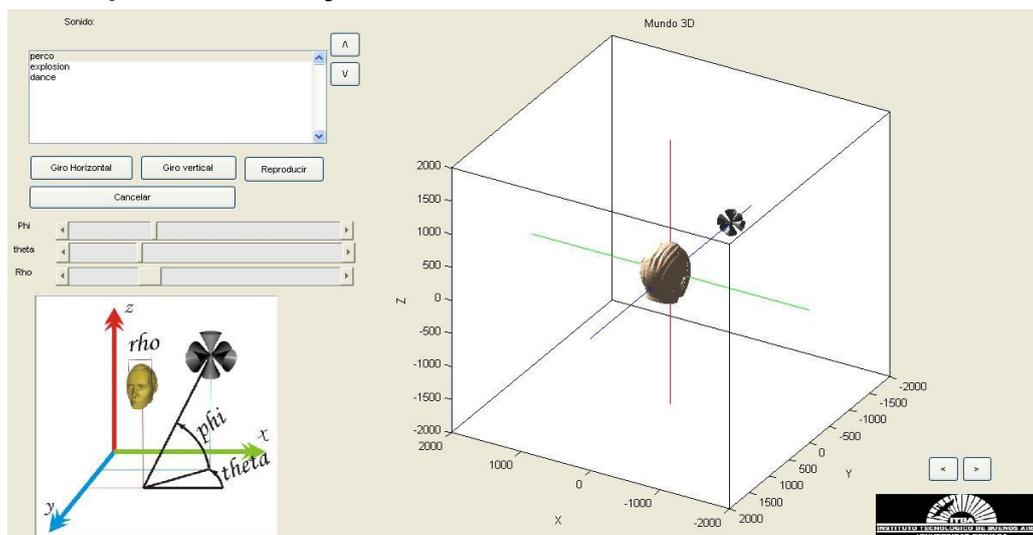


Figura 7. Interfase de la implementación en MATLAB.

La simulación se hizo con diferentes oyentes bajo dos experimentos diferentes, el primer caso por medio de sonidos aislados unos de otros donde se pide que ubique la imagen del sonido; el segundo caso se le establece una referencia en puntos alrededor de los 360° del ángulo azimutal. Experimentalmente se comprobó que la percepción de la fuente varía notablemente debido a la ubicación, al ambiente y al factor psicoacústico individual de cada persona, ver Figura 8. Los mejores resultados se obtuvieron para el segundo caso, ya que se comprobó que los oyentes se ubican mejor luego de poseer una referencia, indiscutiblemente una percepción más fina requiere de puntos de ubicación por parte del oyente. Esto se debe a que orientación previa del individuo en el ambiente, hace que el sonido nuevo haga recordar el sonido anterior para ubicar la fuente. Es por ello, que en el software se incluye un botón de prueba en el cual la señal se mueve alrededor de los 360° en ángulo horizontal.

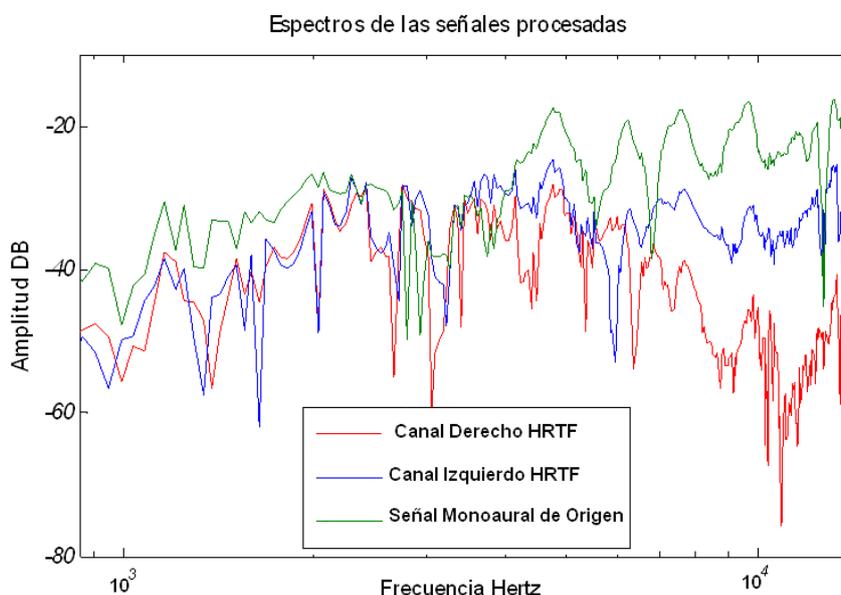


Figura 8. Espectros correspondientes a la señal de prueba utilizada y a las dos señales obtenidas como producto de la transformación de la HRTF.

En general se logró posicionar satisfactoriamente sonidos en tres dimensiones, mediante el uso de mediciones reales de HRTF e interpolando las mismas para darle continuidad al espacio. Para ciertas condiciones particulares, se ambientó el sonido a un cuarto, logrando así la externalización del mismo, algo que de por sí la HRTF no llega a proporcionar adecuadamente.

8 Direcciones Futuras

Incorporar las reflexiones tempranas para externalizar el sonido, así como mejorar y optimizar la implementación matemática en MATLAB.

9 Agradecimientos

Agradecemos a los estudiantes Marina D'Angelo, Gabriel Squillace, Santiago Perrotto y Matías Cavuoti del Departamento de Electrónica, Escuela de Ingeniería del Instituto Tecnológico de Buenos Aires I.T.B.A., por su colaboración en este trabajo y su aporte como punto de inicio.

Referencias

- Begault Durand R., (1994), "3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia", Academic Press Professional, Inc.
- Roederer, Juan G., (2001), "The Physics and Psychophysics of Music", Springer.
- Moore Brian C.J., (1997), "An Introduction to the Psychology of Hearing", Academic Press.
- Rossing, (2007), "Handbook of Acoustic", Springer
- Zölzer Udo, (2005), "Digital Audio Effects", Wiley.
- Pulkki V.; Karjalainen M.; Huopaniemi J., (1999), "Analyzing Virtual Sound Source Attributes using Binaural Auditory Models", *Journal of the Acoustical Society of America* 47(4):203-217
- Kendall G.S., (1995), "The Decorrelation of Audio Signals and its Impact on Spatial Imagery", *Computer Music Journal*, 19(4):71-87
- Blauert J.,(1983), *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press.
- Garder W.G.; Martin K, (1994), "HRTF measurement of a KEMAR dummy-head microphone", Technical Report #128, MIT Media Lab.
- Brown C.P.; Duda R.O., (1998), "A Structural Model for Binaural Sound Synthesis", *IEEE Transactions Speech and Audio Processing* 6(5):476-488.
- Mitra S.K., (2001), "Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach", McGraw-Hill.
- Oppenheim A.V.; Schaffer R.W., (1989), "Discrete Time Signal Processing", Prentice-Hall.
- Cheng Corey I., (2001), "Visualization, Measurement, And Interpolation Of Head-Related Transfer Functions (HRTF's) With Applications In Electro-Acoustic Music", A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Electrical Engineering: Systems) in The University of Michigan
- Rindel, Jens Holger, (2000), "The use of computer modelling in room acoustics", *Journal of Vibroengineering*, vol: 3, pages: 219-224.
- McGovern Stephen, (2003), "A model for room acoustics", <http://www.2pi.us/articles.php>