

XV Congreso Argentino de Acústica, AdAA 2017

Bahía Blanca, 23 y 24 de noviembre de 2017

AdAA2017-07

Análisis estadístico de difracción en respuestas al impulso de bases de datos de HRTF

Jorge Petrosino^(a),
Georgina Lizaso^(a)

- (a) Instituto de Cultura y Comunicación, Departamento de Humanidades y Artes, Universidad Nacional de Lanús. 29 de Septiembre 3901, Remedios de Escalada, Argentina. jpetrosino@unla.edu.ar; glizaso@unla.edu.ar

Abstract

In previous works, our team has published preliminary results on the effects of head diffraction caused by sources in different locations in the horizontal plane, using the measurements available in the CIPIC HRTF database. The proposed hypothesis considers that the results of the average between many ears diminish the contribution of the particularities of the individual transfer function for each subject. For theoretical considerations, diffraction was expected to generate shelving filter profiles. The present work extends this study to the IRCAM Lab database that contains responses to the impulse of one hundred and two ears, and gives rise to a schematic model that simulates the differences of interaural levels through a set of filters. The coefficient of determination (R^2) was considered to evaluate the adequacy of the model to the experimental data.

Resumen

En trabajos previos, nuestro equipo ha publicado resultados preliminares sobre los efectos de difracción de la cabeza causados por fuentes en diferentes ubicaciones del plano horizontal, utilizando las medidas disponibles en la base de datos CIPIC HRTF. La hipótesis propuesta considera que los resultados del promedio entre muchos oídos disminuyen la contribución de las particularidades de la función de transferencia individual de cada sujeto. Por consideraciones teóricas, se esperaba que la difracción generara perfiles de filtros shelving. El presente trabajo amplía este estudio a la base de datos de IRCAM Lab que contiene respuestas al impulso de ciento dos oídos, y da lugar a un modelo esquemático que simula las diferencias de niveles interaurales a través de un conjunto de filtros. Se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) para evaluar la adecuación del modelo a los datos experimentales.

Introducción

1.1 Percepción de la localización de fuentes sonoras

Nuestro sistema auditivo utiliza diferentes indicios para poder localizar fuentes sonoras. Los estudios clásicos tomaban en cuenta los indicios referidos a las diferencias de tiempo interaural (ITD) y a las diferencias de nivel interaural (ILD) en lo que se conocía como teoría dúplex. Los indicios de diferencias temporales de arribo del sonido a cada oído resultan fundamentales en baja frecuencia. Para frecuencias superiores a 1500 Hz la longitud de onda es menor que la distancia entre oídos por lo que los indicios temporales pierden eficacia. Los indicios de diferencias de nivel interaural se deben fundamentalmente a los efectos de difracción de la cabeza, cuello y torso. Para frecuencias bajas, las dimensiones de estas estructuras resultan menores que la longitud de onda provocando que el sonido pueda rodear estos obstáculos lo que da lugar a leves diferencias de nivel interaural. Para frecuencias elevadas, el efecto de sombra provocado por estas estructuras genera diferencias mayores de nivel interaural. La teoría dúplex sugería que para determinar la localización de una fuente sonora los indicios de ITD resultan fundamentales en baja frecuencia y los de ILD en alta frecuencia. Tomando como referencia solamente estos dos tipos de indicios y suponiendo un modelo esférico de la cabeza humana la localización se mantenía indeterminada dentro de una zona denominada “cono de confusión”. En 1969 Butler sugirió que la forma particular del pabellón auricular provoca cambios espectrales que resultan críticos para determinar la localización de fuentes sonoras, principalmente en la dirección vertical, aportando nuevos indicios espectrales que permitirían resolver la indeterminación del cono de confusión.

El espectro de la señal emitida por la fuente resulta alterado por todos estos fenómenos, dando por resultado una nueva señal a la entrada del conducto auditivo externo. Es posible considerar que todo este proceso se corresponde con el de un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI), el cual puede ser caracterizado mediante su función de transferencia $H(\omega)$. La función de transferencia puede obtenerse como el cociente entre la Transformada de Fourier (espectro) de la señal de salida del sistema respecto de la Transformada de la señal de entrada al sistema. Considerando que la señal emitida por la fuente es la entrada al sistema es posible definir para cada punto del espacio dos funciones de transferencia, una que toma como salida la señal que llega al conducto auditivo derecho y otra al izquierdo. Esta función de transferencia respecto de fuentes en distintas localizaciones se conoce como función de transferencia de la cabeza (HRTF). Las HRTF correspondientes a determinada posición de la fuente pueden multiplicarse por el espectro de cualquier nueva señal de la fuente sonora para obtener las señales que llegarían a cada uno de los oídos. Las señales resultantes contienen en forma integrada los efectos finales de todos los indicios mencionados anteriormente.

Una función impulso (delta de Dirac) utilizada como señal de entrada a un sistema tiene espectro plano, por lo cual la respuesta al impulso de un sistema LTI da por resultado una caracterización de la función de transferencia de dicho sistema. En otras palabras, el espectro de la respuesta al impulso es la función de transferencia del sistema. Existen bases de datos públicas conteniendo el conjunto de mediciones de respuestas al impulso desde distintas localizaciones para gran cantidad de sujetos (IRCAM LAB, 2003; Algazi, 2001), que pueden ser utilizadas para generar señales sonoras que al ser reproducidas con auriculares produzcan sonidos espacialmente localizados.

1.2 Diferencias de nivel interaural por difracción de cabeza y torso

Para poder analizar en forma separada los efectos de la difracción de la cabeza y el torso humanos es necesario encontrar modos de aislar este fenómeno del retardo temporal y de las alteraciones provocadas por el pabellón auricular. El estudio de la difracción ha sido realizado tanto por medio de modelos matemáticos de simulación como por mediciones de niveles sonoros utilizando estructuras geométricas como modelo de la cabeza y el torso.

El modelo más sencillo corresponde a una esfera de radio $a = 8,75$ cm (estándar en la literatura específica para el valor promedio de una cabeza). Las presiones en dos puntos opuestos de la esfera permiten determinar las presiones sonoras que llegan a cada oído (P_L y P_R). La diferencia de nivel interaural dependerá de r (distancia de la fuente al centro de la esfera), de la frecuencia y de los ángulos de acimut y elevación.

$$ILD(r, \theta, \phi, f) = 20 \log_{10} \left| \frac{P_R(r, \theta, \phi, f)}{P_L(r, \theta, \phi, f)} \right| \quad (dB)$$

Xie (2013) analiza la diferencia de nivel interaural para el caso de una fuente sonora muy alejada de la esfera ($r \gg a$). En estas condiciones puede calcularse la presión en cada punto considerando una onda plana que incide sobre una esfera rígida. Si la distancia r es mucho mayor que a , los resultados son independientes del valor de r . Al tratar con el modelo más simplificado de una esfera (sin incluir modelo del torso), la simetría del sistema permite representar los resultados en función del ángulo de acimut (sin considerar la elevación). La figura 1a muestra los resultados presentados por Xie de la diferencia de nivel interaural en función del ángulo de acimut, para distintos valores de frecuencia.

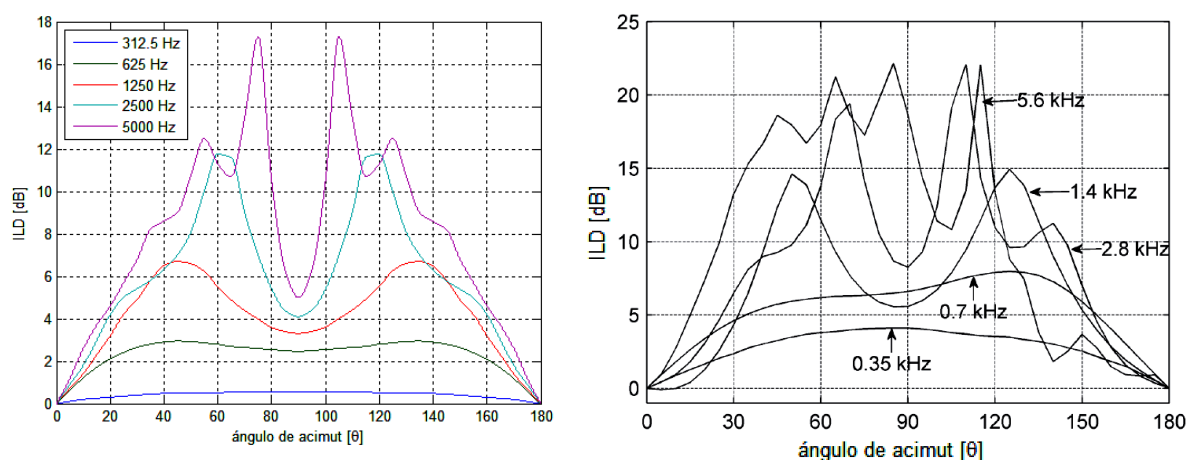


Figura 1. Diferencia de nivel interaural en función del ángulo de acimut para fuente muy alejada. a) esfera rígida, b) maniquí KEMAR MIT

Las mediciones de ILD realizadas con el maniquí KEMAR MIT con pabellón auricular pequeño generan los resultados mostrados en la figura 1b. En este último conjunto de mediciones la fuente sonora se encuentra a 1.4 m de la cabeza, por lo que no cumple con la condición $r \gg a$. Esto provoca un incremento en la diferencia de nivel interaural en frecuencias bajas. Por otra parte, el resultado ya no es simétrico debido al resto de características del maniquí en relación con el modelo simplificado de la esfera.

Los resultados de ILD para una esfera pueden ser también representados en función de la frecuencia, utilizando el ángulo como parámetro. En la figura 2a, se muestra el nivel de presión sonora P de una onda plana ($r \gg a$) que incide sobre una esfera rígida desde distintos ángulos

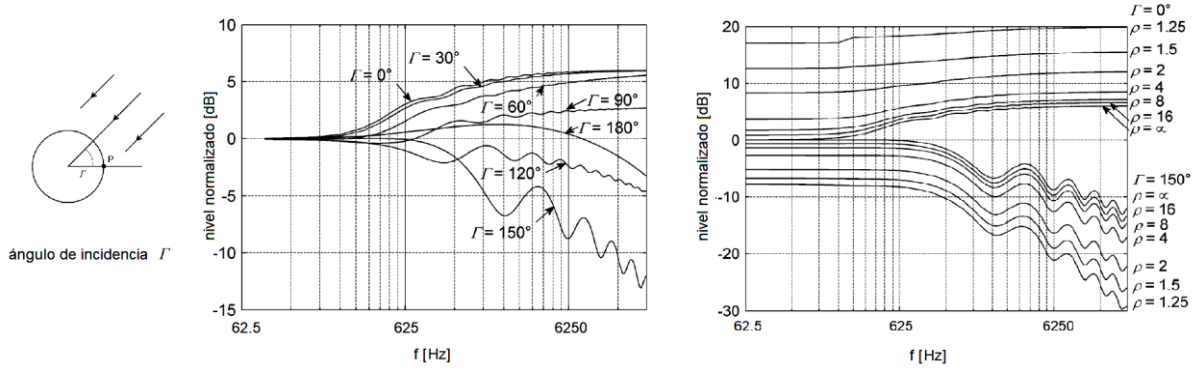


Figura 2. Nivel SPL en función de la frecuencia para distintos ángulos de incidencia Γ . a) fuente alejada, b) fuente a diferentes distancias ($\rho = r/a$)

Las diferencias de nivel interaural pueden obtenerse restando curvas de la figura 2a. Así, para un ángulo de acimut de 30° , la fuente se correspondería con un ángulo de incidencia de 60° para el oído homolateral y de 120° para el oído contralateral. En la figura 3a se muestra la función de transferencia para ambos oídos con acimut de 90° y elevación 0° utilizando el maniquí KEMAR con pabellones auriculares pequeños. La figura 3b muestra la situación equivalente para el modelo de una esfera (fuente con acimut 90° hacia la derecha, correspondiendo a una incidencia de 0° para el oído derecho y de 180° para el oído izquierdo). Las alteraciones espectrales debidas al pabellón y al torso prácticamente desaparecen en el modelo de la esfera.

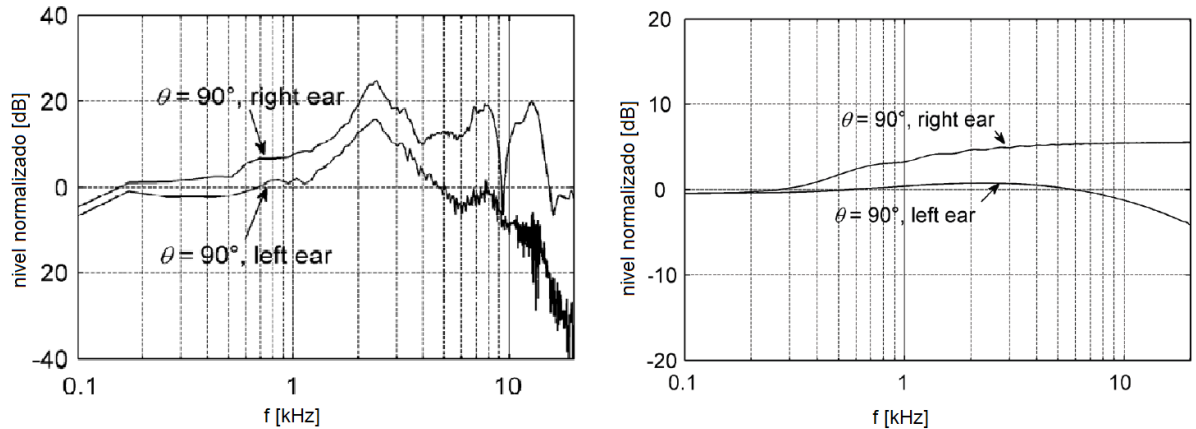


Figura 3. Función de transferencia de ambos oídos. a) maniquí KEMAR MIT, b) esfera rígida

Es necesario tener en cuenta que las curvas con nivel normalizado obtenidas para la esfera fueron tomadas para $r \gg a$ y por tanto no incluyen diferencias de nivel interaural en baja frecuencia que dependen de la distancia a la que se encuentra la fuente sonora. Duda y Martens (1998) realizaron estudios de las diferencias de nivel interaural en función de la distancia a la fuente. En la figura 2b se muestran resultados variando $\rho = r/a$, para ángulos de incidencia de 0° y de 150° . Cuando la fuente está cerca de la cabeza, las diferencias de nivel interaural se incrementan.

1.3 Análisis estadístico de bases de datos de HRTF para estimar la difracción

Existe un conjunto de bases de datos de acceso público (Xie, 2013) con funciones de transferencia de la cabeza (HRTF) que contienen información de gran variedad de sujetos. Esta información permite en principio, procesar muestras de audio para aportar espacialidad a un determinado sonido. El modo en que algunas de estas bases se encuentran organizadas es consistente con este tipo de uso de la información. Sin embargo, es posible adoptar un punto de vista en el cual la disponibilidad de mediciones sobre una gran cantidad de sujetos pueda servir para estudiar regularidades o particularidades del conjunto.

Es razonable suponer que los efectos debidos a la difracción de la cabeza tengan relación con sus características geométricas generales (radio y forma global). Dado que estas características tienen menos variabilidad entre sujetos que aquellos efectos que se relacionan con otros aspectos antropométricos, como la forma particular del pabellón de la oreja, es de suponer que al realizar promedios sobre gran cantidad de datos las diferencias individuales tiendan a disminuir, dejando aflorar los aspectos comunes. De este modo podría utilizarse esta diferencia como un modo de aislar los aspectos comunes del resto de las alteraciones espectrales más específicas.

Nuestra propuesta consiste en promediar las funciones de transferencia de un gran número de casos, para intentar aislar los efectos de la difracción. La base de datos del IRCAM contiene mediciones de respuestas al impulso de 51 personas. Al centrar nuestro interés en determinar las diferencias de nivel interaural, las mediciones correspondientes a un mismo valor absoluto de ángulo de acimut pueden considerarse como dos mediciones distintas. Esto nos permite tener en cuenta 102 casos de funciones de transferencia.

El supuesto de resaltar los aspectos comunes a las distintas funciones de transferencia no garantiza que los resultados sean exclusivamente producto de la difracción en la cabeza o torso, pero de todas maneras consideramos que obtener estos perfiles promedio de ITD estudiando su dispersión puede aportar información valiosa tanto para las consideraciones relativas al estudio de la difracción como para otras cuestiones de índole práctica asociada con la generación de señales binaurales con fines de exploración estética. El trabajo busca, en este sentido, emular las curvas promedio de diferencias de nivel interaural modelizando estas curvas de nivel mediante filtros de uso común (filtros shelving y paramétricos).

2 Proceso de obtención de curvas promedio de nivel interaural

2.1 Caracterización general de la base de datos del IRCAM

La base de datos del IRCAM Lab contiene mediciones de respuestas al impulso obtenidas para 51 personas desde 187 direcciones diferentes. En el plano horizontal se tienen mediciones para ángulos de acimut cada 15°. Las respuestas al impulso tienen 44.1 kHz de frecuencia de muestreo y 24 bits de resolución. La duración de las mismas es de 185,76 ms (8192 muestras) para las mediciones en crudo, ofreciendo también una versión compensada de las mismas conteniendo 512 muestras por punto de medición.

Las mediciones fueron realizadas en cámara anecoica, con una distancia $r = 1.95\text{m}$, en base a un barrido logarítmico de frecuencias para personas sentadas con micrófonos miniatura en sus oídos con sus canales auditivos bloqueados.

La base es pública, conteniendo información en formato de archivo de audio (wav) y versiones en formato MATLAB. Para cada sujeto las variables de MATLAB utilizadas son las mismas, por lo cual es necesario realizar un proceso de descarga individual y de reorganización de la información para su proceso posterior. La figura 4 muestra un fragmento de las respuestas al impulso de cada oído para el sujeto 1002 y sus correspondientes espectros (HRTF), para 60° de ángulo de acimut y 0° de elevación.

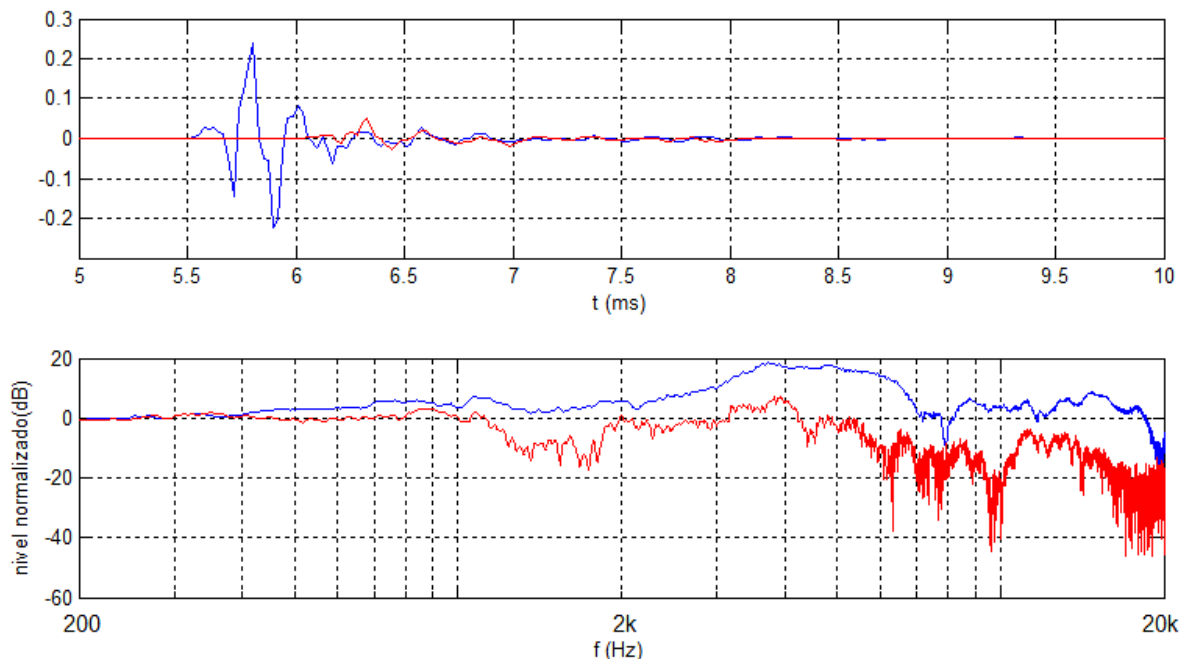


Figura 4. Respuestas al impulso de ambos oídos y la función de transferencia correspondiente para acimut de 60° y elevación de 0°

2.2 Diferencia de nivel interaural por tercios de octava

Los cálculos del presente trabajo se concentran en los puntos correspondientes al plano horizontal, para ángulos de acimut que varíen entre 0° y 90° . Para cada ángulo de acimut, se construye una nueva curva computando la energía por tercios de octava de cada HRTF.

Es posible inferir que debido al tamaño de la cabeza las diferencias de nivel interaural tendrán una variación con la frecuencia que podría resultar semejante a un filtro pasabajos con una frecuencia de corte cercana a los 1500 Hz. Considerando los resultados de la figura 2a para la difracción provocada por una esfera rígida, es esperable que existan además ciertas alteraciones (ripple) para frecuencias correspondientes a la zona de atenuación.

Para nuestros propósitos hemos calculado el nivel de energía por tercio de octava para cada función de transferencia.

La figura 5 representa la función de transferencia y los valores de energía por tercio de octava (para ambos oídos del sujeto 1002 con acimut de 60° en el plano horizontal)

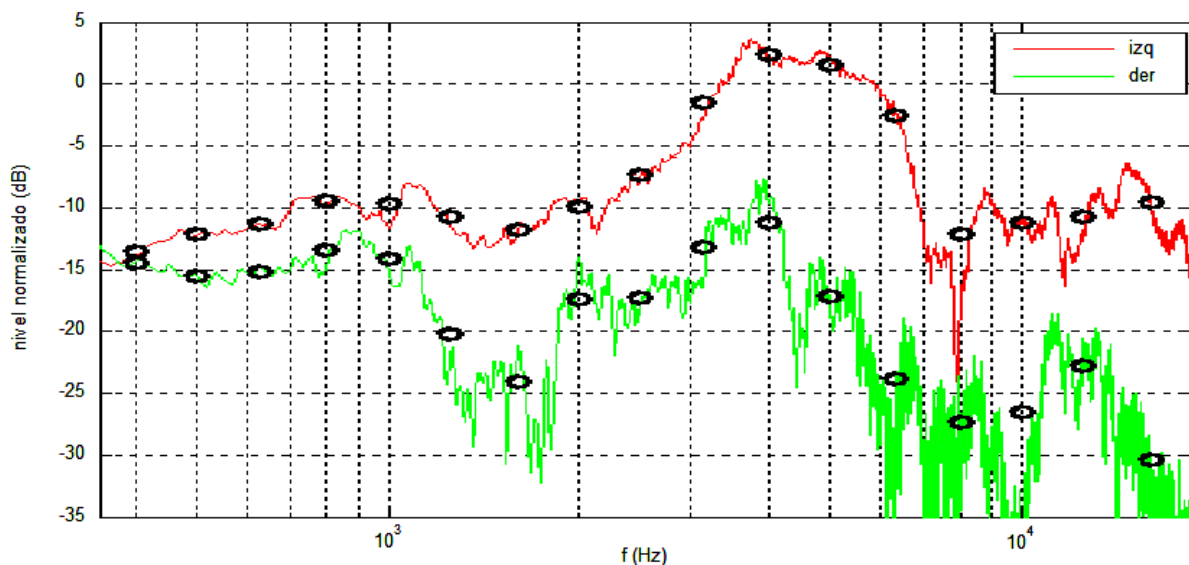


Figura 5. Función de transferencia de ambos oídos y niveles de energía por tercios de octava.

Calculando la diferencia de nivel entre estas curvas se obtiene el perfil de nivel de energía interaural por tercios de octava. La figura 6a muestra la diferencia de nivel interaural por tercio de octava para un sujeto y una posible curva de interpolación. Esta curva representa la pérdida en dB del oído contralateral respecto del oído homolateral, para un ángulo de acimut de 60° .

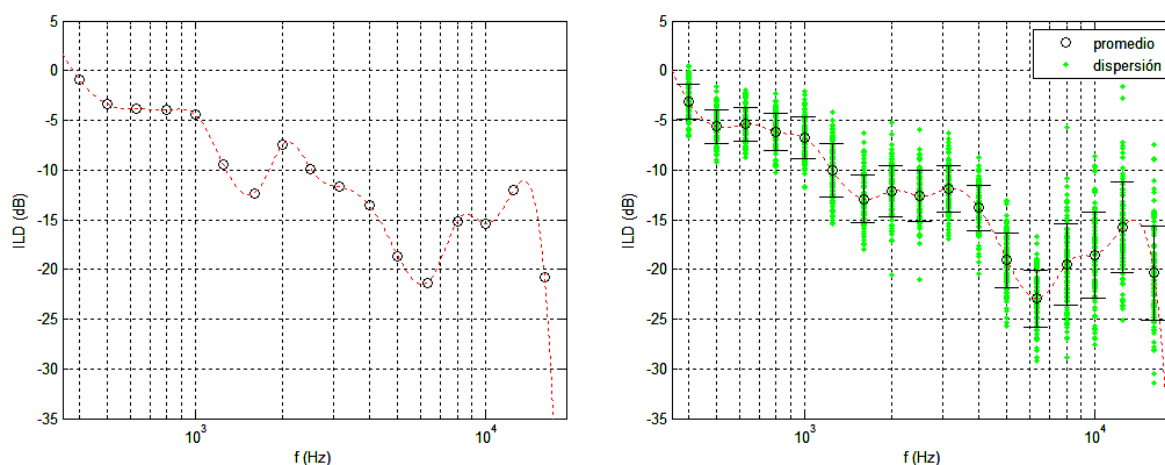


Figura 6. Diferencia de nivel interaural a) Valores del sujeto 1002 de la base de datos, b) desviación estándar y dispersión para el total de sujetos

Si se considera el caso simétrico de -60° se obtiene una nueva curva con roles invertidos entre ambos oídos. Al disponer de 51 sujetos en la base hemos calculado 102 curvas de ILD por octavas para cada valor absoluto de ángulo de acimut. La figura 6b muestra el promedio general de ILD para 60° , la dispersión de ILD individuales y la desviación estándar para cada banda de tercio de octava.

Este proceso repetido para cada ángulo de acimut entre 15° y 90° da por resultado una familia de curvas que se muestra en la figura 7. Allí se indican los puntos correspondientes a cada banda de tercio de octava junto a curvas de interpolación.

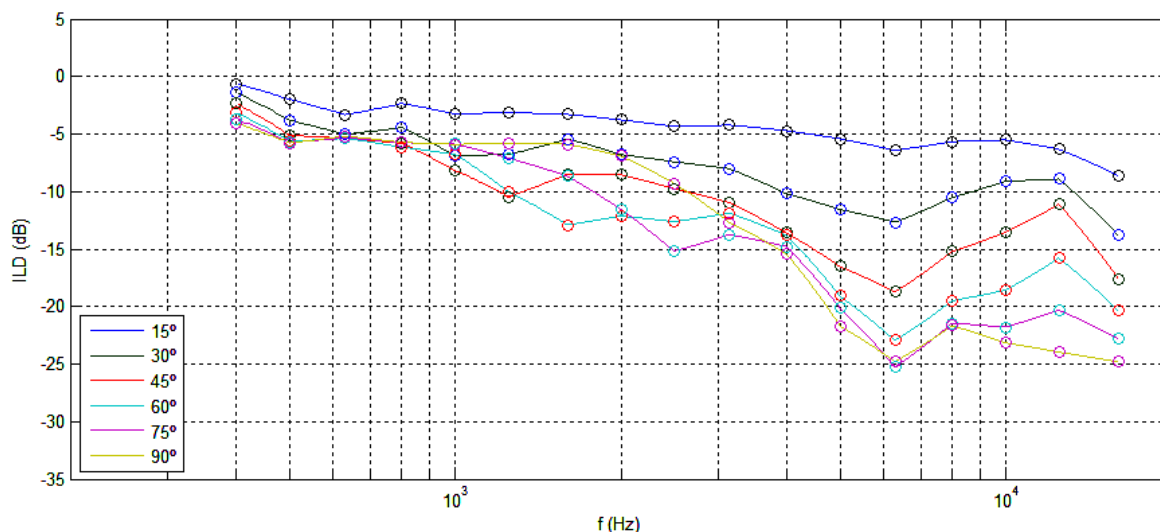


Figura 7. Promedio de diferencias de nivel interaural por tercio de octava en función de la frecuencia para distintos ángulos de acimut

2.3 Esquemas simplificados de las curvas de ILD mediante filtros

En función de los resultados reportados por Duda y Martens para una esfera rígida con la fuente sonora a diferentes distancias de la figura 2b, puede esperarse que la diferencia interaural tenga la forma general de un filtro shelving con algunas ondulaciones que dependerán del ángulo de acimut (los autores lo reportan como “ripple”). Estas curvas pueden ser ajustadas mediante un modelo simplificado que utilice filtros shelving y paramétricos (pasa banda y suprime banda). El precio de tal simplificación implica, por supuesto, la pérdida de información relativa a la fase en las curvas de ILD.

2.3.1 Supuestos de la modelización

Para obtener el modelo se analizó con detenimiento la forma de las curvas de la figura 7, notándose entre otras cosas que todas tienen una caída en dB para las bandas de frecuencia de 5kHz y 6.3 kHz. La curva correspondiente a $\theta = 90^\circ$ parece tener la forma general de un filtro shelving, al que se superpone la caída mencionada. El resto de las curvas tiene un par de oscilaciones adicionales cuya frecuencia central varía con el ángulo. Esto nos permite proponer una serie de supuestos para buscar los parámetros de los filtros que permitan modelizar las curvas:

- (i) El módulo de las curvas de nivel de energía por tercio de octava puede aproximarse mediante un filtro shelving y tres filtros paramétricos que den cuenta de las oscilaciones (ripple).
- (ii) El factor q del filtro shelving variará en función del ángulo de acimut. El ancho de banda del mismo se mantendrá constante para los diferentes ángulos de acimut, asumiendo que dependen fundamentalmente de las dimensiones de la cabeza.
- (iii) Tanto la frecuencia central como la ganancia de dos de los filtros paramétricos tendrá una variación gradual con el ángulo de acimut.
- (iv) Un tercer filtro, suprime banda, mantendrá su frecuencia central constante.

2.3.2 Parámetros del shelving y suprime banda de frecuencia fija

Para obtener los parámetros del filtro shelving se tomó en cuenta en primer lugar la curva de ILD para $\theta = 90^\circ$ que se muestra en la figura 8. Aceptando la suposición de que la caída (oscilación o ripple) en ciertas bandas será modelada mediante filtros paramétricos, y observando que la curva de 90° sólo tiene una caída, decidimos realizar en esta curva un ajuste por cuadrados mínimos que variase los parámetros del filtro shelving excluyendo del ajuste las bandas de tercio de octava de 5 kHz y de 6.3 kHz.

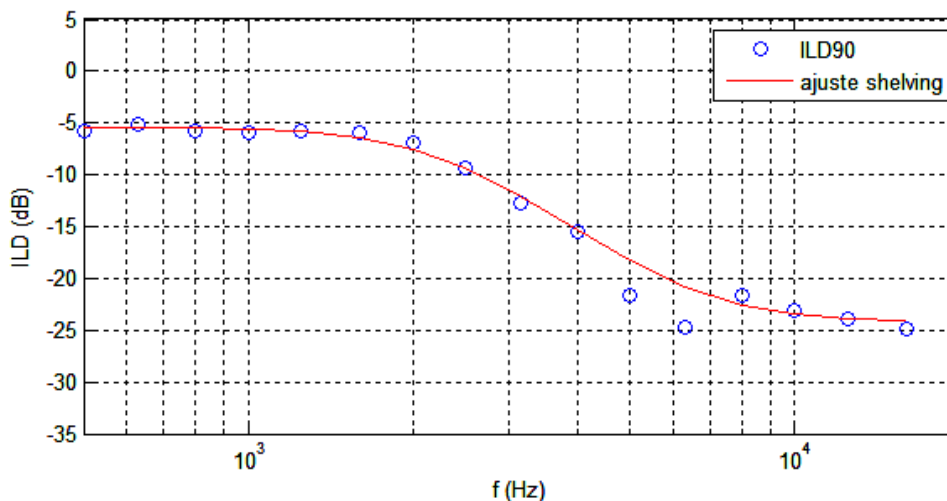


Figura 8. Promedio de diferencia de nivel interaural para $\theta = 90^\circ$ y curva de ajuste mediante un filtro shelving (ignorando 5.3 kHz y 6 kHz).

La curva de ajuste se define mediante las ecuaciones (1) y (2). Los parámetros de ajuste son las dos frecuencias críticas f_1 y f_2 , el factor q y un parámetro k (dB) que responde a la diferencia de nivel relativo entre oídos independiente de la frecuencia.

$$G(f) = \frac{1 + j \cdot \left(\frac{f}{f_2}\right)^q}{1 + j \cdot \left(\frac{f}{f_1}\right)^q} \quad (1)$$

$$H_{dB}(f) = 20 \cdot \log_{10}(|G(f)|) + k \quad (2)$$

Al ignorar las bandas de tercio de octava correspondientes a la caída sistemática que se repite en todas las demás curvas es posible lograr un buen ajuste por cuadrados mínimos mediante un filtro shelving que utiliza los siguientes parámetros: $f_2 = 7700$ Hz, $f_1 = 2200$ Hz, $q = 1.91$ y $k = -5.4$ dB.

Tomando la diferencia entre la curva modelizada con el filtro shelving y la curva de energía de la figura 8 pueden estimarse los parámetros de un filtro suprime banda que de cuenta de las variaciones correspondientes a dicha zona. Los parámetros obtenidos del filtro

que ajusta la curva son la frecuencia central $f_c=5600$ Hz, el ancho de banda $BW=0.28$ (expresado en partes de octava) y su ganancia $G = -4.9$ dB.

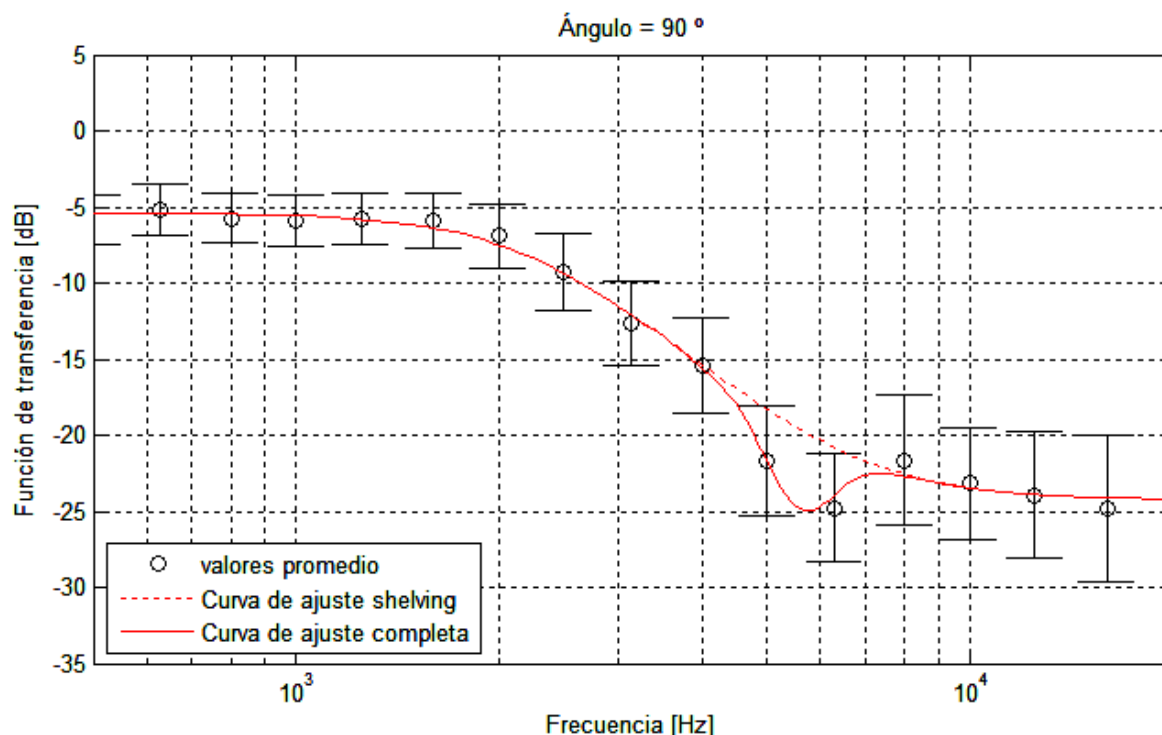


Figura 9. Promedio de diferencia de nivel interaural para $\theta = 90^\circ$ y curva de ajuste mediante un filtro shelving y filtro paramétrico suprime banda

2.3.3 Estimación de parámetros de los filtros de frecuencia variable

Para el resto de los filtros, con el fin de establecer el modelo, consideraremos que se mantienen fijas las frecuencias f_1 y f_2 del filtro shelving en todas ellas, así como la frecuencia central y el ancho de banda del filtro suprime banda centrado en 5.6 kHz.

Tomando una nueva curva, como por ejemplo la de 45° , los parámetros del filtro shelving que ajustan con los datos son $q = 1.22$ y $k = -6$ dB. La caída central se modeliza con el suprime banda determinado previamente, seleccionando un valor apropiado de ganancia.

Mediante un procedimiento semejante, podemos estimar las características de dos filtros adicionales, uno suprime banda en bajas frecuencias y otro pasa banda en frecuencias altas. Para el caso de $\theta = 45^\circ$, se adopta un filtro suprime banda (filtro #1) con $f_c = 1250$ Hz , $BW=0.28$ oct, $G = -4.9$ dB, y un pasa banda (filtro #3) con frecuencia central $f_c = 11.5$ kHz, $BW= 0.3$ oct, $G = 7.1$ dB. La curva obtenida puede verse en la figura 10.

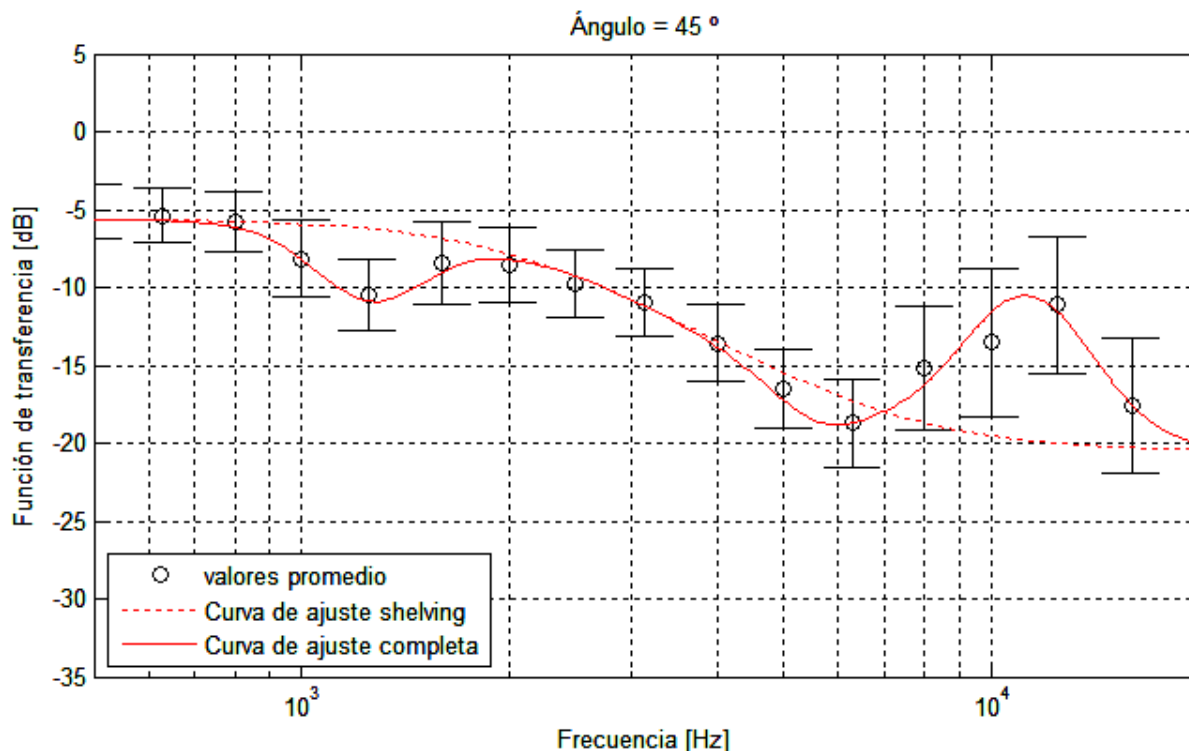


Figura 10. Promedio de diferencia de nivel interaural para $\theta = 45^\circ$ y curva de ajuste mediante un filtro shelving y tres filtros paramétricos.

Las suposiciones realizadas permiten estimar los filtros de ajuste para el resto de los ángulos de acimut. La validación de los ajustes se apoyará en la simplicidad que puede notarse en los cambios de parámetros de los filtros al variar el ángulo de acimut y en base la evaluación del ajuste final entre las curvas y los datos (cálculo del coeficiente R2).

3 Resultados

El proceso general permitió obtener un esquema simplificado con cuatro filtros en serie: un filtro shelving, y tres filtros paramétricos (en realidad semiparamétricos, ya que el ancho de banda relativo de estos filtros no varía en los ajustes realizados). Con estos cuatro filtros fue posible lograr curvas de ajuste con valores satisfactorios de R2.

El filtro shelving fue definido mediante los parámetros de cálculo de su función de transferencia, utilizando frecuencias fijas para todos los ángulos de acimut y un valor de q que depende del ángulo. A la curva característica del filtro shelving se le incorpora una pérdida de nivel independiente de la frecuencia que puede atribuirse a la distancia de la fuente respecto de los puntos de medición y que se representa por un factor de atenuación k que varía con el ángulo de acimut. En frecuencias bajas se definió un filtro suprime banda (filtro #1) cuya frecuencia central crece con el ángulo de acimut. Para todas las curvas se definió un filtro suprime banda adicional (filtro #2) de frecuencia central y ancho de banda fijos. En frecuencias altas se utilizó un filtro pasa banda (filtro #3) en el que la frecuencia central aumenta ligeramente con el ángulo de acimut.

La figura 11 muestra la familia de curvas características de cada filtro y la figura 12, la familia de curvas de ajuste logradas con ellos. Los parámetros utilizados se encuentran en la tabla 1.

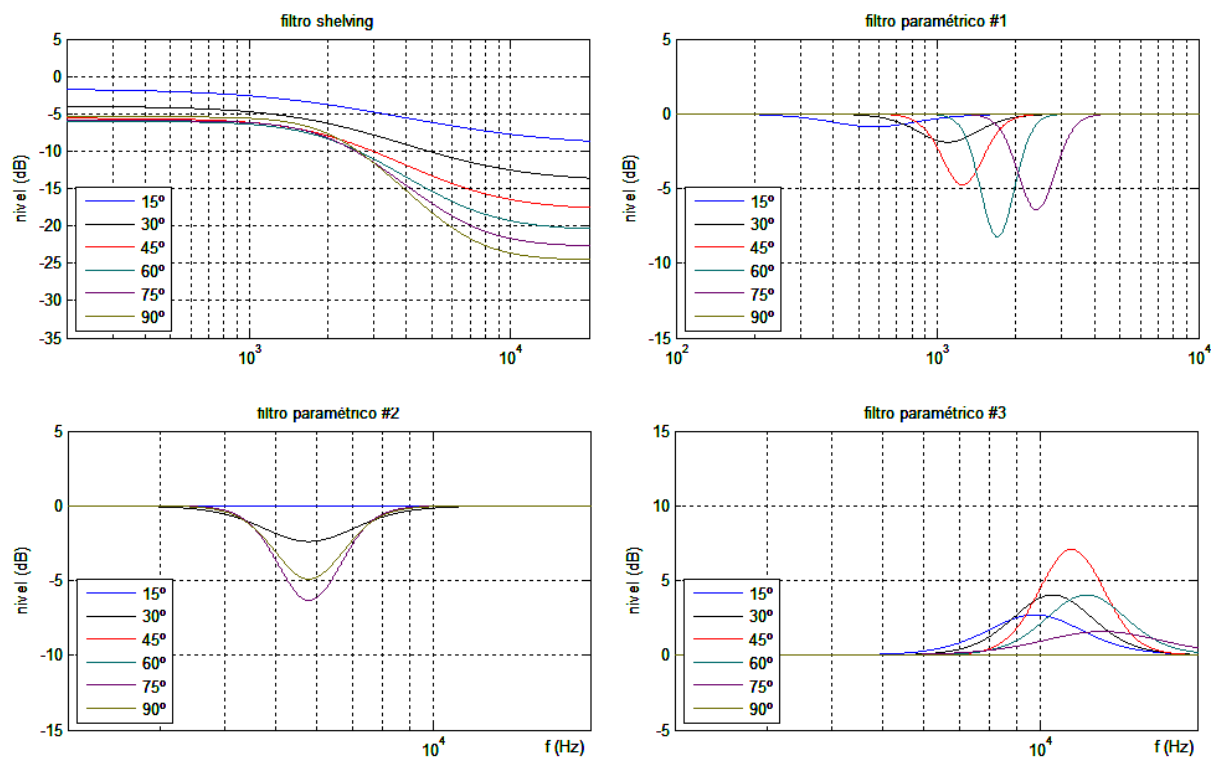


Figura 11. Curvas características de los filtros para cada ángulo de acimut.

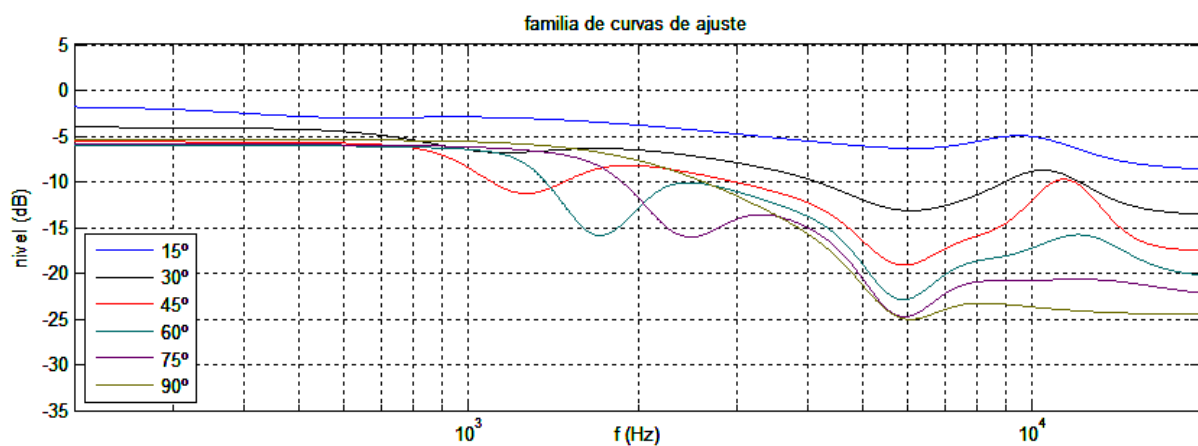


Figura 12. Curvas de ajuste de los perfiles de ILD por tercio de octava.

Tabla 1. Parámetros de los filtros utilizados para el ajuste

	Acimut [θ]	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Filtro shelving f1=2200 Hz f2=7000 Hz	q	0.76	1	1.22	1.45	1.68	1,91
	k (dB)	-1.2	-4	-5,6	-6	-5,9	-5,4
filtro #1 BW=0.33 (oct)	fc1 (Hz)	570	1100	1250	1700	2400	2800
	G1 (dB)	-0.9	-1.9	-4.8	-6.4	-6.4	0
filtro #2 BW=0.28 (oct) fc=5600 Hz	G2 (dB)	-0.6	-2.4	-4.9	-6.3	-6.3	-4.9
	fc3 (kHz)	9.8	10.6	11.5	12.3	13.2	14
filtro #3 BW=0.3 (oct)	G3	1.6	4	7.1	4	1.6	0

El conjunto de parámetros utilizados presenta una variación suave con la frecuencia, como puede notarse en la figura 13.

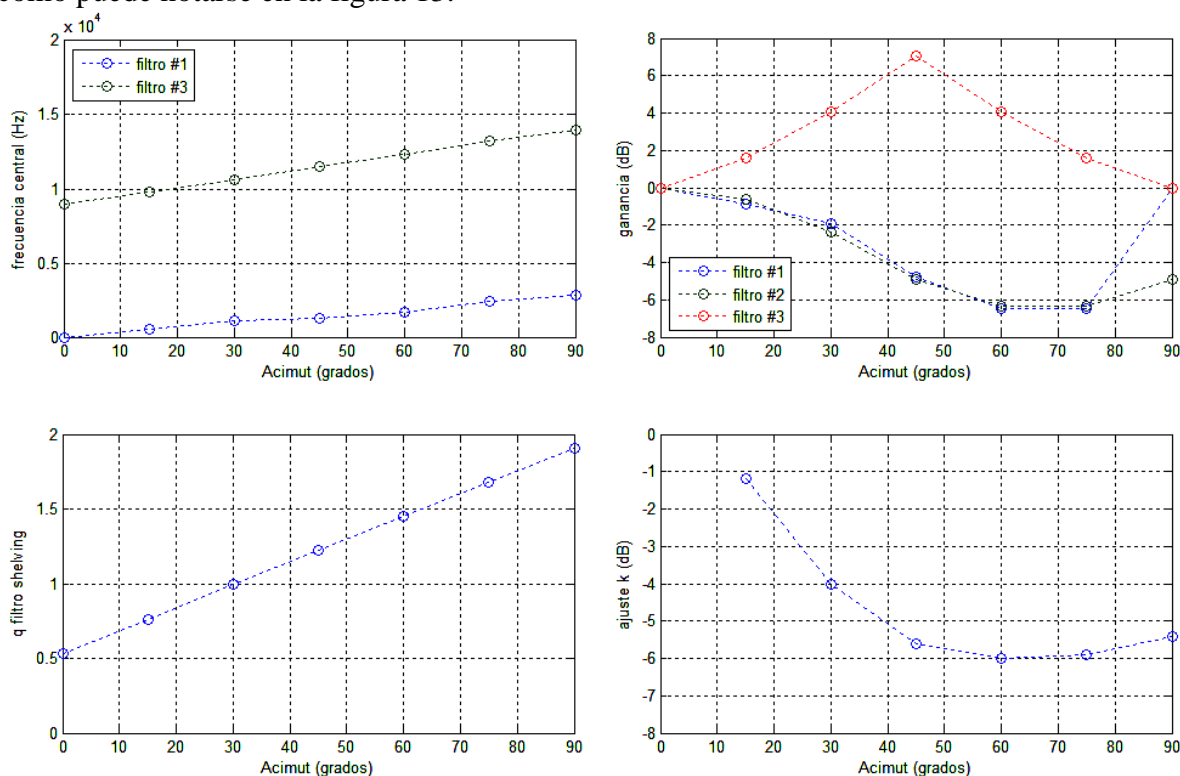


Figura 13. Parámetros de los filtros utilizados para obtener los perfiles. a) frecuencia central de filtros #1 y #2, b) ganancia de filtros #1, #2 y #3, c) factor q del filtro shelving, c) factor k (dB) independiente de la frecuencia

Con el fin de evaluar el nivel de adecuación entre el modelo y los datos experimentales se calculó el coeficiente de correlación R2 para los distintos ángulos de acimut considerados.

Los resultados de esta evaluación se indican en la figura 14 dentro de cada gráfico que muestra el ajuste y los valores experimentales con su desviación estándar.

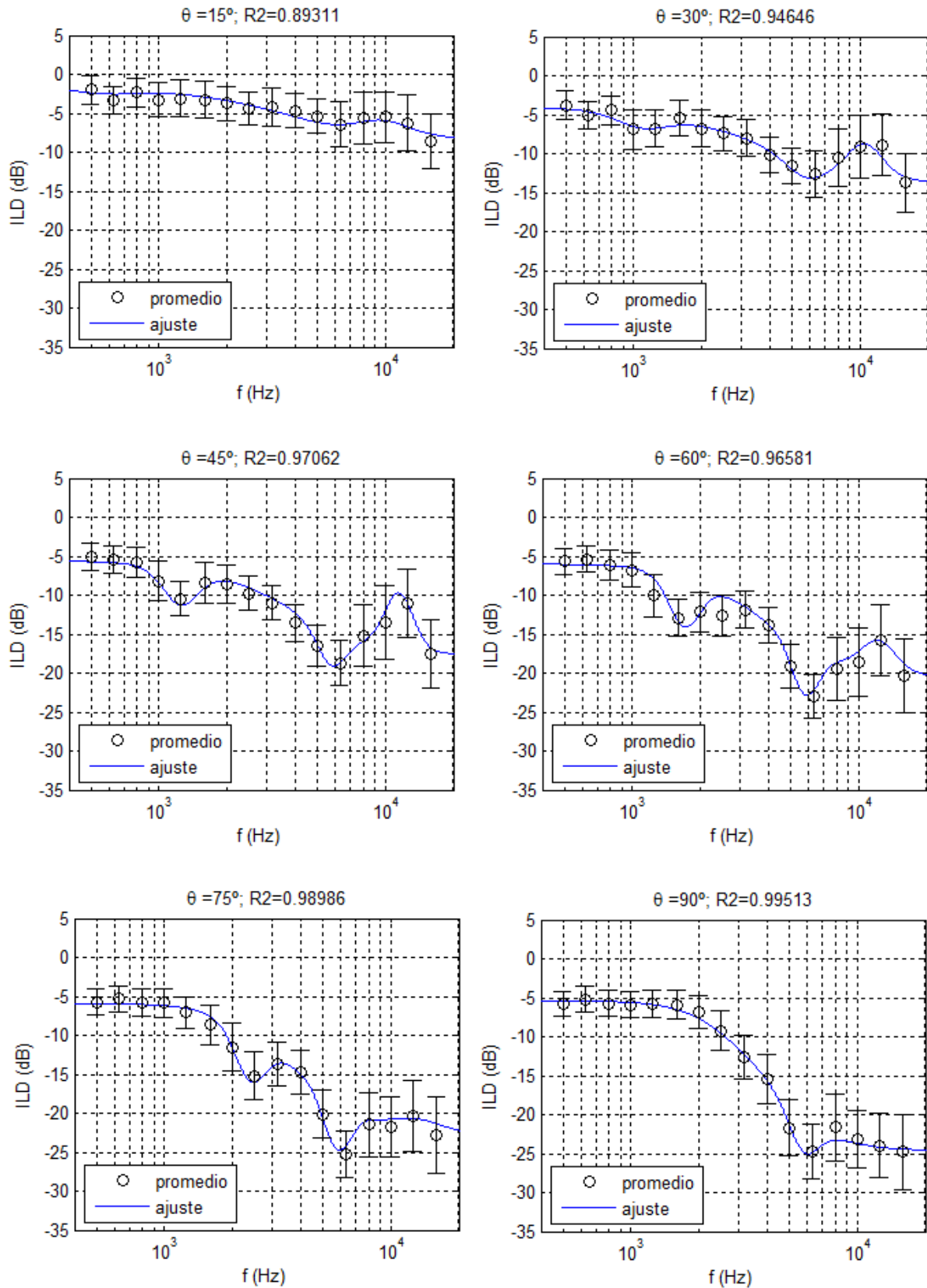


Figura 14. Curvas de ajuste y cálculo de coeficiente de determinación (R^2)

4 Discusión y conclusiones

En una publicación reciente expusimos resultados preliminares que permitían obtener una aproximación a las curvas de diferencia de nivel interaural utilizando la base de datos del CIPIC (Lizaso, 2016). En esa oportunidad realizamos un ajuste de curvas utilizando solamente un filtro shelving, obteniendo las variaciones de parámetros que se muestran en la figura 15 y que resultan semejantes a las mostradas de las figuras 13c y 13d.

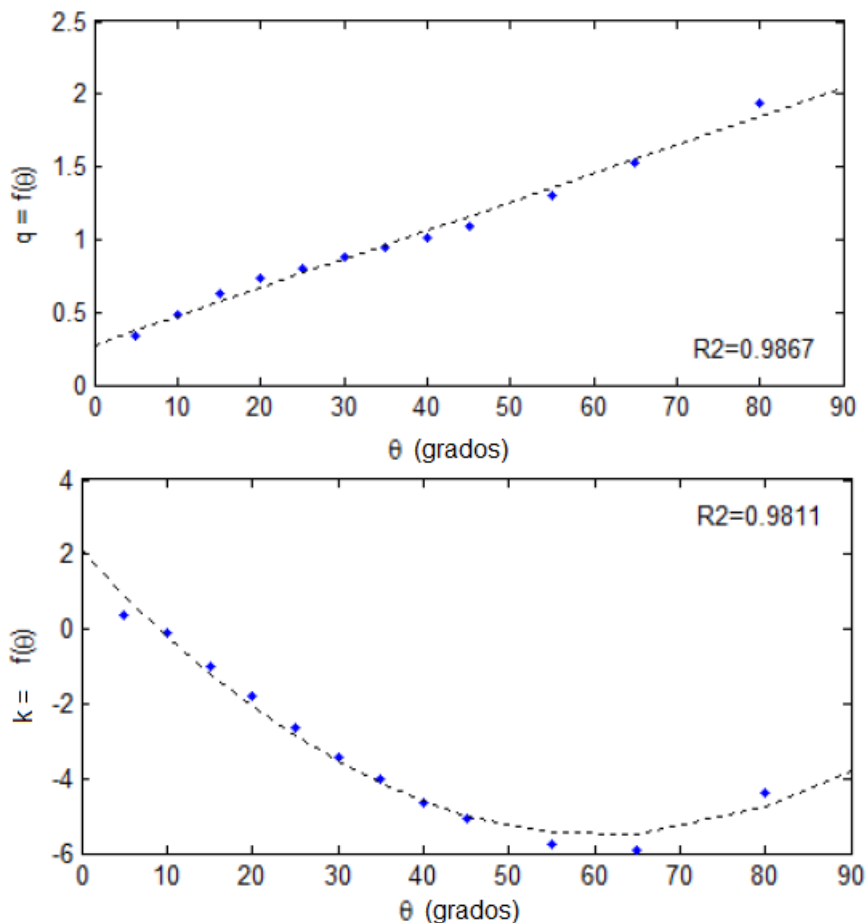


Figura 14. Parámetros de ajuste de filtro shelving para la base de datos del CIPIC MIT (Lizaso, 2016)

En el presente trabajo incluimos en el ajuste otros tres filtros paramétricos y trabajamos con la base de datos del IRCAM que contiene mayor número de sujetos. Con las suposiciones adicionales realizadas pudieron obtenerse una serie de parámetros que varían en forma gradual con el ángulo de acimut, y por tanto pueden a su vez ser modelizados mediante ecuaciones simples o bien representados en tablas, gráficos o nomogramas con el fin de permitir reproducir en modo aproximado la forma general de las curvas para distintos ángulos de acimut en el plano horizontal de hasta 90° .

Para poder considerar de alguna utilidad el modelo esquemático obtenido se ha considerado necesario obtener el coeficiente de determinación R^2 para evaluar la calidad del ajuste de las curvas con respecto a los datos originales, habiendo obtenido valores satisfactorios (entre 0.89 y 0.99).

La limitación de rango del ángulo de acimut y la elección de centrarse en el plano horizontal se relacionan con posibles representaciones de músicos frente a espectadores. Nuestro equipo ha realizado algunas pruebas preliminares de mezclas de audio para auriculares utilizando el modelo descrito que resultan alentadoras para continuar con la exploración.

Referencias

- Algazi, V. R., Duda, R. O., Thompson, D. M., & Avendano, C. (2001). The cipic hrtf database. In *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001 IEEE Workshop on the* (pp. 99-102). IEEE.
- Avendano, C., Algazi, V. R., & Duda, R. O. (1999). A head-and-torso model for low-frequency binaural elevation effects. In *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 1999 IEEE Workshop on* (pp. 179-182). IEEE.
- Butler, R. A. (1969). Monaural and binaural localization of noise bursts vertically in median sagittal plane. *Journal of Auditory Research*, 9(3), 230-235.
- Duda, R. O., & Martens, W. L. (1998). Range dependence of the response of a spherical head model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5), 3048-3058.
- IRCAM Lab (2003). Listen HRTF database, <http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/>
- Lizaso, G.; Petrosino, J. (2016, September). Simplified filter bank to emulate head diffraction depending on the azimuth angle of the source. In *Proceedings of Meetings on Acoustics 22ICA* (Vol. 28, No. 1, p. 055006). ASA.
- Satarzadeh, P., Algazi, V. R., & Duda, R. O. (2007). Physical and filter pinna models based on anthropometry. *Proc. 122nd Conv. Audio Eng. Soc*, 718-737.
- Xie, B. (2013). *Head-related transfer function and virtual auditory display*. J. Ross Publishing
- Xie B.S., Zhong X.L., and Rao D., et al. (2007a). "Head-related transfer function database and analyses," *Science in China Series G, Physics, Mechanics & Astronomy* 50(3), 267-280.