



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Evaluación de técnicas de crosstalk aéreo utilizando el método pseudo espectral (PSTD)

Jofré, F.¹; Lizaso, G.²; Petrosino, J.^{1,2}

¹ DCyT, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Caseros, Buenos Aires, Argentina, francoj.jofre@gmail.com, jpetrosino@untref.edu.ar

² DHyA, Universidad Nacional de Lanús, Remedios de Escalada, Buenos Aires, Argentina, glizaso@unla.edu.ar

Resumen

Las técnicas de cancelación de crosstalk aéreo (XTC) buscan que cada oído reciba una señal diferente con mínima interferencia entre señales. Esto requiere procesarlas mediante retardos, inversiones o alteraciones espectrales para cancelar el crosstalk acústico que ocurre cuando llega al oído izquierdo señal de la derecha y viceversa. Los primeros trabajos fueron desarrollados por Atal y Schroeder en la década del 60. En las últimas décadas, la disponibilidad de herramientas digitales de procesamiento ha dado lugar a diversas técnicas para superar los obstáculos intrínsecos que se presentan al momento de implementar esta cancelación en la práctica. Según el estado del arte, alcanzar un nivel de XTC superior a los 20 dB resulta suficiente para lograr una buena percepción de binauralidad. El presente trabajo realiza una comparación entre resolución analítica, medición y simulación en el dominio del tiempo para evaluar los niveles de cancelación alcanzados mediante el diseño de filtros inversos con regularización de parámetro constante. El diseño de filtros y el desarrollo analítico se basan en las descripciones realizadas por Choueiri (2018), ajustando el parámetro de regularización para un rango de frecuencia adecuado a la palabra hablada. La medición fue realizada en un ambiente semi anecoico con dos altavoces y micrófonos de medición en la posición de los oídos. Para la simulación se utilizó el toolbox k-Wave para Matlab que implementa la resolución de ecuaciones diferenciales de propagación acústica en base al método pseudo espectral del espacio k en el dominio del tiempo (PSTD). Los resultados muestran que se alcanza un nivel de XTC satisfactorio para lograr percepción binaural y que la simulación en el dominio del tiempo con el método pseudo espectral puede considerarse una herramienta útil para la evaluación de técnicas de XTC.

Palabras claves: cancelación de crosstalk por altavoces (XTC-BAL), método pseudo espectral (PSTD), binauralidad.

PACS: 43.55.Ka, 43.60.Gk.

Evaluation of crosstalk cancelation techniques with loudspeakers using pseudo-spectral method (PSTD)

Abstract

Crosstalk Cancellation for binaural audio through loudspeakers (XTC-BAL) techniques seek to ensure that each ear receives a different signal with minimal interference between them. Processing the signals through delays, inversions, or spectral alterations is required to cancel the acoustic crosstalk from the right channel to the left ear and vice versa. The first studies were published by Atal and Schroeder in the 1960s. In the last decades, the availability of digital processing tools has given rise to various techniques to overcome the intrinsic obstacles that arise when implementing this cancellation in practice. According to previous research, reaching an XTC level greater than 20 dB is enough to achieve an adequate binaural perception. The present work shows a comparison between analytical resolution, measurement, and simulation in the time domain to evaluate the cancellation levels achieved by designing inverse filters with constant parameter regularization. Filter design and analytical development are based on the descriptions made by Choueiri (2018), adjusting the regularization parameter for a frequency range appropriate to the spoken word. Measurements were carried out in a semi-anechoic environment with two loudspeakers and measurement microphones in the position of the ears. Simulations run using the Matlab toolbox, named k-Wave, which solves differential equations of acoustic wave propagation using the k-space pseudo-spectral method in the time domain (PSTD). Results show an adequate XTC level to achieve binaural perception and suggest PSTD simulations can be considered helpful in evaluating XTC techniques.

Keywords: crosstalk cancellation with loudspeakers (XTC-BAL), pseudo-spectral method (PSTD), binaural audio.



1. INTRODUCCIÓN

La utilización de altavoces para la reproducción de señales genera un campo sonoro en una región del espacio cuya recepción se verá influenciada por la función de transferencia de la cabeza HRTF (Head Related Transfer Function) y también por las características acústicas del ambiente. Para el caso de la utilización de auriculares, cada oído recibe una señal diferente que no es afectada por elementos externos. Esto implica que, para recrear una sensación de binauralidad, se deberá procesar el audio con filtros que imiten las condiciones acústicas del recinto y el HRTF del oyente, o bien que promuevan la localización espacial mediante otras técnicas. Para ello será necesario compensar la función de transferencia entre la señal emitida por el auricular y la detectada por el tímpano mediante la aplicación de una ecualización precisa y diferente para cada individuo [1]. Por su parte, las técnicas de audio transaural pretenden lograr reproducir una señal binaural mediante el uso de altavoces. Esto podría pensarse como semejante a lograr “auriculares virtuales”. Se pretende que cada oído reciba una señal diferente pero de manera tal que esta recepción se logre mediante la propagación de ondas sonoras en el entorno del oyente. Sin embargo, es necesario dejar establecido que estas señales emitidas por cada uno de los altavoces no se corresponden directamente con lo que reciben los oídos. Por ejemplo, si se considera el caso de la reproducción mediante dos altavoces, la señal del canal derecho llegará en forma más directa al oído derecho, pero parte de su emisión también llegará al oído izquierdo luego de rodear la cabeza del oyente. Lo mismo sucederá con la señal del canal izquierdo. Esto significa que la información que llega a cada oído contendrá una determinada mezcla de lo que fue emitido por ambos altavoces. Los sistemas de audio transaural tienen que procesar la señal de información de ambos canales de modo que al emitirlos la contribución cruzada tienda a cancelarse para que cada oído reciba la información original de cada canal. Por este motivo también se los denomina sistemas de cancelación de crosstalk aéreo (de aquí en adelante los nombraremos sistemas XTC). El primer sistema XTC fue propuesto por Atal y Schroeder en la década del 60 [2] y

si bien han pasado varios años de su creación, aún traen aparejados tres problemas intrínsecos que incluyen lograr una separación de canales para poder conseguir el nivel XTC deseado, mantener dentro de niveles aceptables la exigencia de rango dinámico en los altavoces y atenuar la coloración tonal en relación al tamaño del sweet spot. Para lograr sistemas XTC perfectos debe considerarse que los altavoces y toda la cadena electroacústica se encuentren apareados, que las condiciones de recinto sean anecoicas y que no se produzcan variaciones en la posición de la cabeza del oyente. Aun contando con estas condiciones absolutamente ideales, se produce una exagerada exigencia de rango dinámico en los altavoces para lograr una respuesta plana en los oídos. Para solucionar esto se deben modificar las ecuaciones de las matrices numéricas que conforman los sistemas XTC dando lugar a una solución aproximada a través de un proceso denominado regularización. Esta regularización afecta al conjunto de filtros que lo componen. En este caso la solución que se obtiene ya no es perfecta ni siquiera estando en la posición central con condiciones ideales. Se produce entonces un nivel de XTC variable con la frecuencia lo que limita el resultado a un rango de frecuencias útiles. Este proceso no solo reduce la exigencia en rango dinámico de los altavoces, sino que produce coloraciones menos drásticas ante pequeños movimientos del oyente.

2. TEORÍA DEL AUDIO BINAURAL POR ALTAVOCES (BAL - XTC)

El esquema de la Figura 1 muestra el proceso completo que corresponde a la técnica implementada [3], que se refiere a un único oyente en posición fija frente a los altavoces. Las señales sL y sR (audio binaural) son procesadas por la matriz de XTC para dar lugar a las señales xL y xR que alimentan los altavoces. La propagación de sonido al aire se representa en el modelo por la matriz H (función de transferencia de la cabeza). El sistema pretende que las señales yL e yR que llegan a los oídos resulten ser proporcionales a sL y sR respectivamente, con algún retardo relacionado con tiempo de propagación.

Al expresar estas relaciones en forma matricial se obtiene la Ecuación 1. Para cada componente

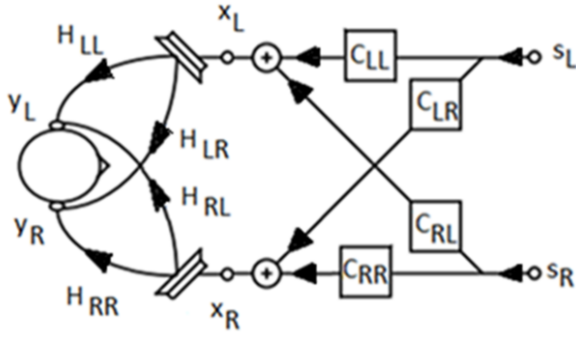


Figura 1: Diagrama en bloques del proceso.

de frecuencia, H y C son matrices cuadradas.

$$y(\omega) = H(\omega) \cdot C(\omega) \cdot s(\omega) \quad (1)$$

Al imponer la condición $y = K \cdot e^{-j\omega\Delta t}$, se obtiene la expresión de la matriz C que implementa la cancelación (Ecuación 2).

$$C = H^{-1} \cdot K \cdot e^{-j\omega\Delta t} \quad (2)$$

La matriz C adopta el rol de filtro inverso respecto del resto del proceso. Este procedimiento tiene varios inconvenientes. El punto óptimo de escucha (sweet spot) es muy limitado. El rango dinámico exigido en los altavoces puede rondar los 30 dB para lograr un nivel plano en los puntos correspondientes a los oídos. Estos dos aspectos están relacionados entre sí, ya que los movimientos alrededor del punto óptimo alteran el espectro de la señal, produciendo coloración como efecto indeseable. La técnica de regularización permite obtener soluciones con menor exigencia en los altavoces atenuando de esta manera también el problema de coloración en puntos cercanos al óptimo. Sin regularización el nivel de XTC es teóricamente infinito (con fuentes y sensores puntuales).

En las situaciones prácticas, la matriz H tiene una condición de número inadecuada para algunas frecuencias. La condición de número k de una matriz, expresada en la Ecuación 3, se calcula como la norma de la matriz multiplicada por la norma de la matriz inversa

$$k = \|H\| \cdot \|H^{-1}\| \quad (3)$$

Cuando este valor es inadecuado (mucho mayor que uno), pequeñas variaciones en los paráme-

tros pueden dar lugar a grandes cambios en la solución. Por este motivo se aplica un proceso de regularización para obtener C (Ecuación 4), donde el coeficiente β es un número real mayor que cero, el superíndice TC indica matriz transpuesta conjugada, y la expresión I se refiere a la matriz identidad.

$$C_\beta = [H^{TC} \cdot H + \beta \cdot I]^{-1} \cdot H^{TC} \cdot K \cdot e^{-j\omega\Delta t} \quad (4)$$

Cuando el valor de β seleccionado es constante (independiente de la frecuencia), el proceso se conoce como de regularización con parámetros constantes. Choueiri [3] define una serie de métricas que permiten analizar los cambios provocados dependiendo el valor de β elegido y calcula estas métricas para una situación idealizada en la cual considera libre propagación entre altavoces puntuales y los puntos de registro ubicados en el lugar de los oídos. Esto es, sin modelizar la cabeza del oyente. Este modelo es el que se utiliza en el presente trabajo para comparar resultados analíticos con medición y simulación numérica temporal.

3. MEDICIONES ACÚSTICAS

Las mediciones fueron realizadas en la sala del estudio de grabación Enrique Santos Discépolo de la Universidad Nacional de Lanús. Se tomó como referencia un trabajo de Choueiri, disponible en la página web de la Princeton University [4] que contiene audios binaurales procesados como ejemplo para su descarga, calculados para utilizarlos con un dispositivo portátil de altavoces bluetooth. Estos audios fueron diseñados para ser escuchados sosteniendo los parlantes en el frente del oyente con el brazo semiextendido. En este trabajo se utilizó un sistema portátil de altavoces estéreo por Bluetooth (JBL flip 4) como fuente sonora, por su semejanza con el propuesto por Choueiri, y un micrófono de medición Earthworks M-30. La disposición de los mismos se muestra en la Figura 2. Se utilizó una placa de audio externa Komplete Audio 6 para el registro de señal.

Se colocó el micrófono en un sitio equivalente al que correspondería al oído derecho de un potencial oyente. La distancia entre el plano de los altavoces y el de los oídos fue de 35 cm, ubi-



Figura 2: Foto de la medición realizada

cando el micrófono a 6 cm hacia la derecha del plano de simetría de los altavoces. El registro fue realizado con propagación libre (sin obstáculos que representen la cabeza del oyente), siguiendo la estructura general del proceso de diseño descrito por Choueiri [3]. En una segunda instancia se repitió el proceso colocando el micrófono en la posición del oído izquierdo.

Como señal de prueba se utilizó una secuencia de barridos exponenciales [5, 6] que contiene una imagen lateral izquierda y a continuación una imagen lateral derecha. Al procesar estas señales imagen mediante la matriz C calculada mediante la Ecuación (2) — con un parámetro de regularización $\beta = 0,05$ se obtienen las señales emitidas por los altavoces. Un esquema de estas señales y de los registros a obtener en las posiciones de los oídos se muestran en la Figura 3. Al aplicar convolución entre estos registros y el barrido inverso se obtienen las respuestas al impulso necesarias para el cálculo del nivel de XTC.

El nivel de XTC puede determinarse de dos maneras complementarias. La primera, por la diferencia de niveles registrados en la posición del oído izquierdo entre la imagen L y la imagen R. La segunda, comparando niveles para la imagen L entre los registros de ambos oídos.

4. SIMULACIONES NUMÉRICAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Las simulaciones fueron realizadas utilizando el *toolbox kWave* [7] para Matlab que implementa el método pseudo espectral del espacio k de pro-

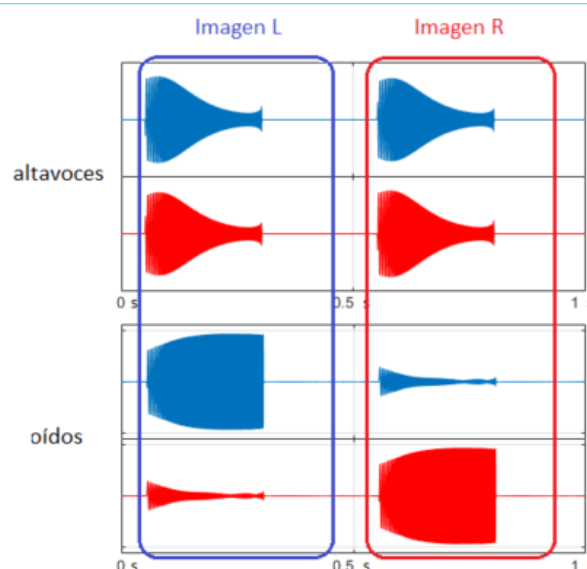


Figura 3: Esquema de señales. a) Señales procesadas para los altavoces; b) Señales registradas en los oídos

pagación de ondas acústicas en el dominio del tiempo (PSTD). Este método no posee dispersión numérica espacial. Si bien, presenta dispersión numérica temporal, esta puede ser corregida en forma exacta cuando la velocidad de propagación es la misma en todos los puntos del espacio de simulación, como es el caso que corresponde a la situación en estudio [8]. Se utilizó un modelo 3D, aún cuando casi todos los elementos podrían situarse en un mismo plano, para que las características de propagación puedan compararse con las mediciones. En un modelo 2D, los elementos se comportan como fuentes cilíndricas y no como fuentes puntuales.

El espacio de simulación utilizado fue una cuadrícula tridimensional de 64 cm x 64 cm x 32 cm con resolución de 1 cm. La elección de dimensiones con forma 2^n es por motivos de eficiencia informática en el cómputo de la transformada rápida de Fourier (FFT). Todas las paredes de la superficie externa de la cuadrícula incluyen una capa de absorción para evitar reflexiones conocida como PML, por *Perfectly Match Layer* [9] de un espesor de 10 cm por lado. Sin esta capa, el método pseudo espectral genera propagaciones que una vez que alcanzan un extremo continúan su propagación por el extremo opuesto. Esta capa modeliza un entorno anecoico (suprimiendo tanto la propagación mencionada como las reflexiones). Una capa de 10 puntos en un modelo 3D provoca una disminución de la propagación indeseada de -64 dB y de las reflexiones de -80

dB [10]. El agregado de esta capa de PML implica una disminución de 20 puntos en el espacio útil de cada una de las dimensiones, dejando un volumen efectivo de 44 cm por 44 cm por 12 cm. Suficiente para el tipo de estudio realizado.

Para la simulación se utilizó un valor de CFL (condición de Courant-Friedrich-Lewis) de 0,5. Este coeficiente, que siempre debe ser menor que uno para lograr estabilidad de las soluciones [11], se relaciona con la resolución espacial y la velocidad de propagación ($c = 340$ m/s) para determinar la frecuencia de muestreo adecuada para la simulación. En las simulaciones desarrolladas esta frecuencia fue de 68 kHz. Este valor permite obtener simulaciones exactas (sin dispersión numérica para el caso de c constante) para señales limitadas en banda en 17 kHz, que surge de multiplicar el CFL por la frecuencia de Nyquist. El método permite trabajar con varias fuentes con señales independientes. Se plantearon dos escenarios de simulación. En el primero se utilizan dos fuentes puntuales, emitiendo cada una de las señales de los altavoces. En el segundo, se utilizan dos fuentes extensas de 2 cm de radio para representar el tamaño de los altavoces, como se muestra en la Figura 4.

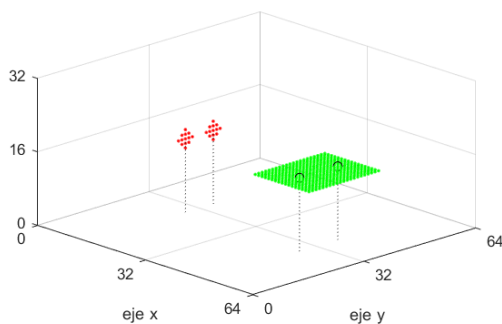


Figura 4: Fuentes (rojo) y sensores (verde) en la simulación con fuentes extensas. Los semicírculos negros representan la posición de los oídos.

Las fuentes de la simulación emiten las mismas señales que se envían a los altavoces en la medición (Figura 5), con la única salvedad de un remuestreo previo para convertir los 44.1 kHz, utilizados en el audio para la medición, en una versión con muestreo de 68 kHz. La simulación utilizada establece la señal de las fuentes en modo “dirichlet” [10].

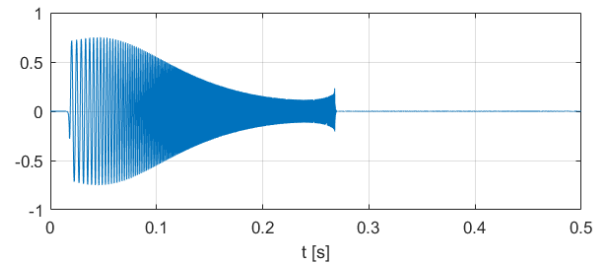


Figura 5: Señal entregada al altavoz izquierdo. Barrido exponencial procesado mediante la matriz C .

El tiempo de la simulación utilizando el método pseudo espectral es prácticamente independiente de la cantidad de fuentes y sensores utilizados, por lo cual el uso de fuentes extensas y de un arreglo de sensores no implica un incremento significativo del tiempo de procesamiento. En general se teme que las simulaciones en el dominio del tiempo de resolución de las ecuaciones de propagación de onda acústica exijan tiempos de simulación y un nivel de recursos inalcanzables. Las simulaciones fueron realizadas en Matlab en una laptop con procesador Ryzen 5 5600H de 3.3 GHz con 32 GB de RAM. Cada simulación, correspondiente a la propagación de la secuencia de señales durante 1 s, tomó 13 minutos de tiempo de cómputo.

5. RESULTADOS

5.1 Método analítico

Se calcularon las métricas propuestas por Choueiri [3] para realizar predicciones sobre posibles niveles de XTC, exigencia de rango dinámico de altavoces y niveles de señal en el oído ipsilateral y el contralateral de una imagen lateral única. El proceso de cálculo de la matriz C descrito daría lugar en teoría a la cancelación total de señal en el oído contralateral, dando por resultado un nivel de XTC infinito. Al aplicar el proceso de regularización el XTC deja de ser infinito y pasa a depender de la frecuencia. En el estado del arte se considera que es suficiente un nivel de crosstalk de unos 20 dB para lograr una buena sensación de binauralidad [12].

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran las predicciones analíticas para nivel XTC, exigencia de rango dinámico y niveles en ambos oídos de una imagen lateral única, para distintos valores de β .

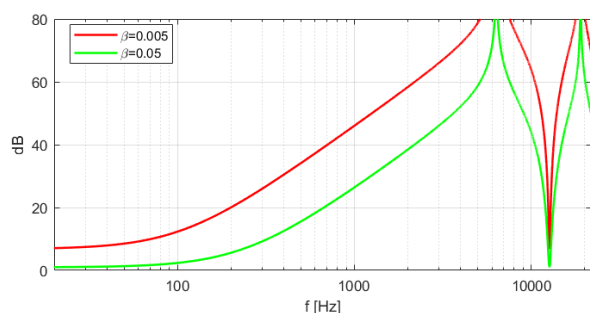


Figura 6: Predicción analítica de cancelación de crosstalk. Con $\beta = 0$ el nivel de XTC es infinito.

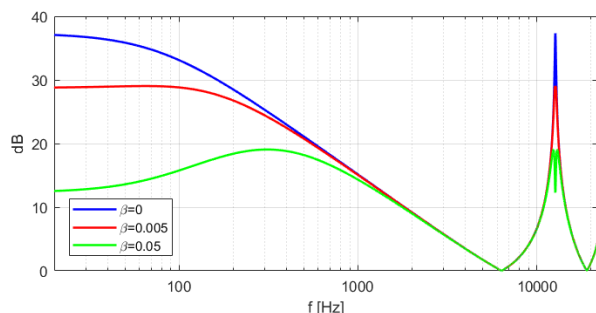


Figura 7: Exigencia de rango dinámico del altavoz para distintos valores de β .

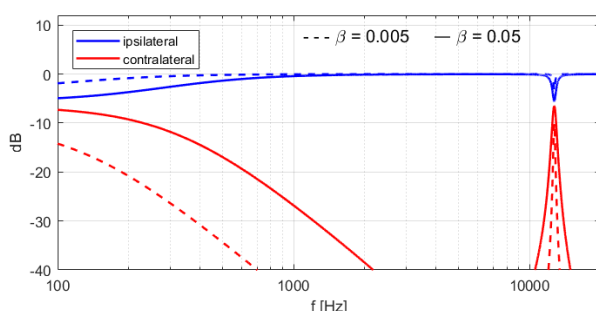


Figura 8: Predicción analítica de nivel ipsilateral y contralateral para imagen lateral única. Con $\beta = 0$ el nivel de XTC es infinito.

5.2 Mediciones

En primer lugar se analizó el nivel de ruido del ambiente. En la Figura 9 puede notarse que el nivel de ruido es aceptable por encima de los 200 Hz, frecuencia que es utilizada para iniciar el barrido exponencial. Para los cálculos de potencia la señal registrada se procesó con un filtro pasa altos con frecuencia de corte en 200 Hz. Pueden verse picos en una secuencia armónica con fundamental en 4300 Hz. Estos picos resultaron ser generados por la alimentación phantom de la placa de audio Komplete Audio 6. Para el

cálculo de potencia por tercios de la señal los dos primeros picos fueron eliminados mediante filtros notch con $Q=20$. Los restantes picos caen fuera de la banda de frecuencias utilizada en el barrido exponencial y fueron eliminados mediante un pasa bajos con frecuencia de corte en 10 kHz.

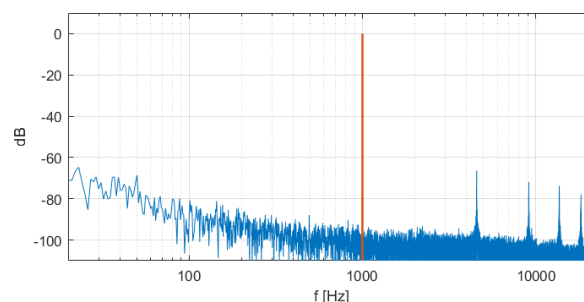


Figura 9: Relación señal ruido de los registros (relativo a una senoidal tomada como referencia en rojo).

Se determinó la respuesta en frecuencia de la sala y la cadena electroacústica. La Figura 10 muestra los resultados. Pueden observarse dos curvas que corresponden a las transferencias desde cada altavoz hasta el micrófono ubicado en uno de los oídos. La disposición se mantuvo simétrica en todo momento.

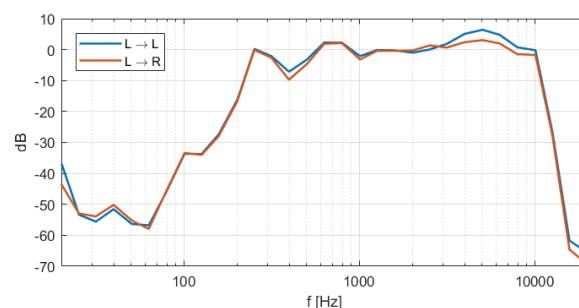


Figura 10: Función de transferencia del Sistema por tercios de octava. Desde Altavoz L hasta oídos L y R

Para la medición de crosstalk aéreo, se registraron tres secuencias correspondientes a la señal imagen L y tres correspondientes a la señal imagen R. Se calculó la potencia por tercios de octava de cada registro y se promediaron los resultados.

La Figura 11 muestra los niveles de señal en el oído ipsilateral y el contralateral. En la Figura 12 se muestra el nivel de XTC por tercios de octava.

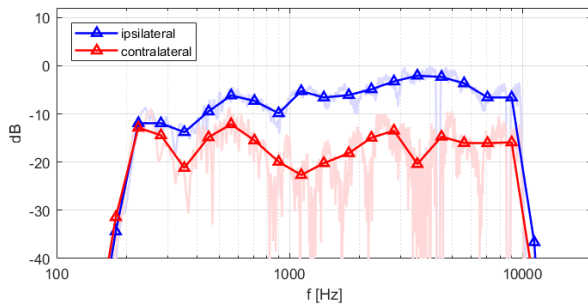


Figura 11: Nivel ipsilateral y contralateral por tercios de octava

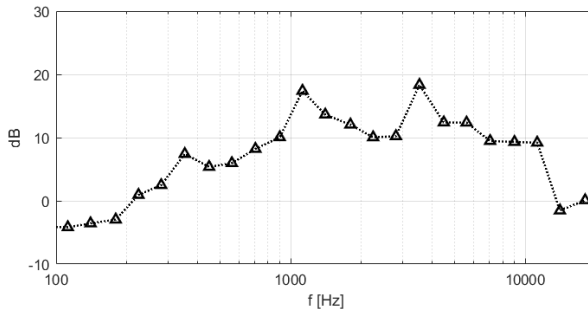


Figura 12: Nivel de cancelación de crosstalk por tercios de octava

5.3 Simulación numérica

Para la simulación fueron utilizados los mismos audios que en la medición con altavoces, con la única excepción de un remuestreo de 44.1 kHz a 68 kHz que resultaba adecuado a los parámetros elegidos de simulación. La Figura 13 muestra el registro en la posición del oído L para una secuencia de barrido L y barrido R, utilizando fuentes puntuales.

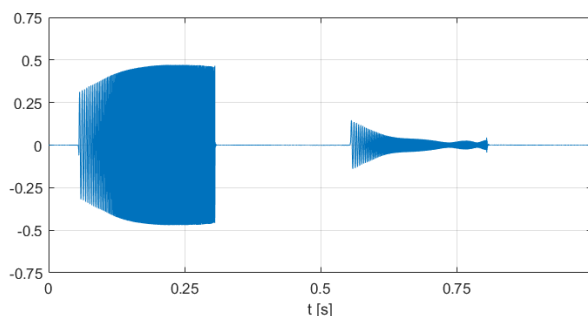


Figura 13: Secuencia temporal recibida en un el sensor del oído izquierdo utilizando fuente puntual

En la Figura 14 se presenta el mismo caso para fuentes extensas.

Considerando que los tiempos de procesamiento eran bajos, se decidió simular las dos secuencias,

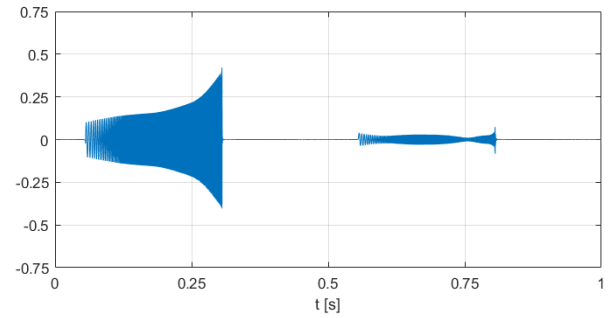


Figura 14: Secuencia temporal recibida en el sensor del oído izquierdo utilizando fuente extensa

de 1 segundo de duración cada una, para mantener condiciones estrictamente similares a las de la medición. Los registros obtenidos al completarse la propagación de ondas hasta los sensores ubicados en los oídos fue dividida en dos partes de 0,5 s cada una. Se procedió a analizar cada parte con el mismo procedimiento utilizado en la medición. Se obtuvieron los registros de nivel ipsilateral (azul) y contralateral (rojo) correspondientes a los casos de fuentes puntuales (Figura 15) y de fuente extensa (Figura 16).

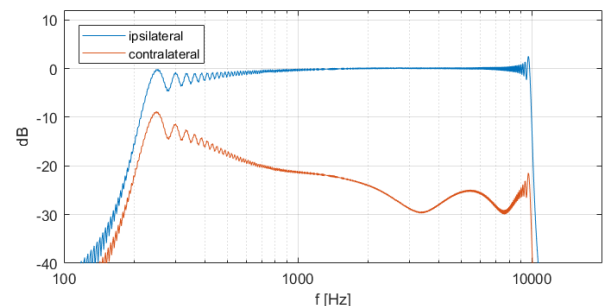


Figura 15: Niveles ipsilateral y Contralateral para fuentes puntuales.

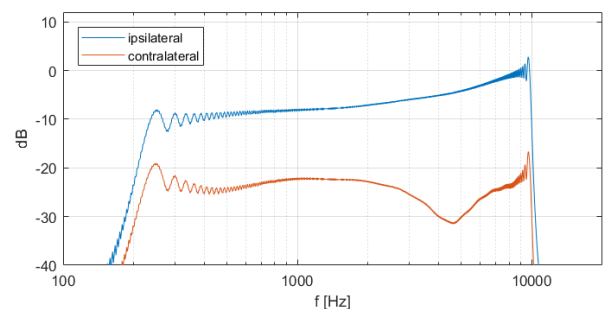


Figura 16: Niveles ipsilateral y Contralateral para fuentes extensas.



5.4 Análisis de resultados

En primer lugar se muestra la comparación de resultados analíticos, de medición y de simulación con fuente puntual. Dado que la solución analítica de Choueiri considera fuentes y sensores puntuales en sentido estricto, no resulta pertinente compararla con la simulación de fuente extensa. En rigor de verdad, la simulación de fuentes puntuales tiene una resolución mínima de 1 cm con lo cual es posible que se presenten diferencias con respecto a la resolución analítica. En la Figura 17 se muestran estos resultados.

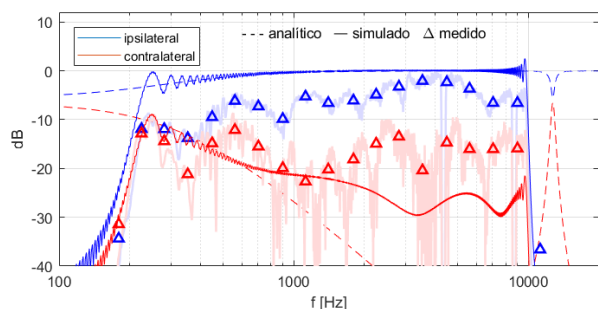


Figura 17: Las líneas punteadas corresponden a la solución analítica, las líneas llenas a la simulación con fuentes puntuales y los triángulos a las mediciones.

La zona de comparación debe limitarse a la banda entre 200 Hz y 10 kHz, debido a que se utilizó un barrido exponencial que comprende ese rango. Puede notarse que las curvas de nivel ipsilateral de los resultados analíticos y los simulados se encuentran prácticamente superpuestas. En el caso del nivel contralateral se encuentran diferencias que podrían ser atribuidas a los límites de resolución utilizados. Los resultados de la medición no presentan coincidencia con el resto de las curvas, lo que es esperable dado que la simulación con fuentes puntuales contempla las mismas condiciones ideales respecto del tamaño de las fuentes que el cálculo analítico. Con respecto al oído contralateral, en la curva calculada se observa un amplio rango de frecuencias con niveles inferiores a los 30 dB, mientras que en la simulación no se alcanzan estos valores. No disponemos de hipótesis que justifiquen esta falta de coincidencia. Por otra parte, aunque las mediciones tampoco logran valores tan bajos no resultan coincidentes con lo simulado.

La Figura 18 presenta los resultados de la medición junto a los de la simulación con fuentes

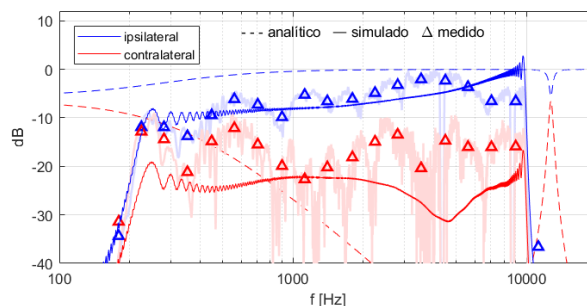


Figura 18: Las líneas punteadas corresponden a la solución analítica, las líneas llenas a la simulación con fuentes extensas y los triángulos a las mediciones.

extensas. En este caso las mediciones de nivel ipsilateral presentan un buen ajuste con las obtenidas por simulación, en un amplio rango de frecuencias. Esto apoya la hipótesis de que resulta fundamental considerar las dimensiones de las fuentes a la hora de simular. Si bien el modelo de fuente extensa utilizado en la simulación no incorpora todas las características del par de altavoces empleado, podría considerarse que al tener en cuenta el tamaño de los transductores lo simulado se adecúa mejor a la situación experimental.

El nivel de XTC obtenido en la medición (Figura 12) no llega a superar los 20 dB que suelen mencionarse en el estado del arte como necesarios para lograr binauralidad [12]. Sin embargo, Choueiri afirma que en muchas situaciones prácticas este grado de cancelación de 20 dB no es necesario ni alcanzable [13]. El sistema utilizando los parámetros de diseño mencionados genera una buena sensación de binauralidad.

6. CONCLUSIONES

Las simulaciones numéricas basadas en el modelo ondulatorio son las que permiten obtener resultados más precisos si se las compara con aquellas que utilizan el modelo geométrico. Sin embargo, las primeras suelen demandar muchos recursos informáticos para poder resolver la ecuación de onda acústica en el dominio del tiempo para cada punto del espacio de simulación. En las simulaciones presentadas se utilizó una matriz de 131072 puntos y 68000 instantes de tiempo para recrear la propagación de las señales acústicas de testeo descritas en la Sección 3 durante un segundo requiriendo un tiempo total de cómputo de solamente 13 minutos. El presente

estudio sugiere que el método pseudo espectral del espacio k en el dominio del tiempo (PSTD) resulta ser una herramienta eficiente para la resolución de situaciones como las planteadas. Si bien con el método de diferencias finitas se emplearía la misma cantidad de tiempo, los problemas de dispersión numérica que trae aparejados el propio método dificultan extender los tiempos de simulación. La principal ventaja del PSTD es que no posee dispersión numérica espacial y que la dispersión numérica temporal que presenta puede corregirse de forma exacta cuando la velocidad de propagación c es la misma en todos los puntos del espacio [8, 11]. Adicionalmente, permite utilizar gran cantidad de sensores y fuentes con señales temporales diferentes en una misma ejecución, sin que esto incremente significativamente el tiempo de cómputo. El máximo de fuentes y sensores sólo se encuentra limitado por la cantidad de puntos del espacio a simular y por la capacidad de memoria RAM disponible.

Es por ello, que los resultados de este trabajo sugieren que el PSTD es una interesante y poco utilizada alternativa para explorar diversas configuraciones y condiciones que resultan difíciles de incorporar en el cálculo analítico, presentando una buena concordancia con lo obtenido en situaciones experimentales. Como trabajo futuro sería interesante explorar la posibilidad de analizar la información de todo un plano de sensores ubicado a la altura de los oídos del oyente con la intención de mapear las variaciones de presión que darían lugar al análisis del sweet spot con distintos valores de parámetro de regularización.

7. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte de los proyectos de investigación: "Cancelación de crosstalk para audio binaural por altavoces" de la Universidad de Tres de Febrero y "Desarrollo de software de simulaciones acústicas basado en herramientas de uso libre y gratuito, utilizando el método pseudo espectral en el dominio del tiempo" de la Universidad Nacional de Lanús. Agradecemos a Juan Manuel Cáseres, Director de la Licenciatura en Audiovisión, de la Universidad Nacional de Lanús por las gestiones que permitieron realizar las mediciones en el Estudio de Grabación Enrique Santos Discépolo.

REFERENCIAS

- [1] Vorländer, Michael. Acoustic load on the ear caused by headphones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(4):2082–2088, 2000.
- [2] Atal, BS; Hill, M e Schroeder, MR. Apparent sound source translator. us patent no. 3,236,949. *US Patent and Trademark Office*, 1966.
- [3] Choueiri, Edgar. Binaural audio through loudspeakers. En *Immersive Sound*, págs. 124–179. Routledge, 2018.
- [4] Choueiri, Edgar. Bacch demos for the jambox. <http://www.princeton.edu/3D3A/Jambox+BACCHDemos.html>, Visitado por última vez el 24 de mayo de 2022.
- [5] Farina, Angelo. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. En *Audio engineering society convention 108*. Audio Engineering Society, 2000.
- [6] Farina, Angelo. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. En *Audio engineering society convention 122*. Audio Engineering Society, 2007.
- [7] Treeby, Bradley E e Cox, Benjamin T. k-wave: Matlab toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields. *Journal of biomedical optics*, 15(2):021314, 2010.
- [8] Robertson, James L; Cox, Ben T e Treeby, Bradley E. Quantifying numerical errors in the simulation of transcranial ultrasound using pseudospectral methods. En *2014 IEEE International Ultrasonics Symposium*, págs. 2000–2003. IEEE, 2014.
- [9] Liu, Qing-Huo. *The PSTD algorithm: A time-domain method combining the pseudospectral technique and perfectly matched layers*. Tesis doctoral, Acoustical Society of America, 1997.
- [10] Treeby, Bradley; Cox, Ben e Jaros, Jiri. k-wave a matlab toolbox for the time domain simulation of acoustic wave fields user manual. *Manual Version 1.0. 1*, 2012.
- [11] Igel, Heiner. *Computational seismology: a practical introduction*. Oxford University Press, 2017.
- [12] Parodi, Yesenia Lacouture e Rubak, Per. Analysis of design parameters for crosstalk cancellation filters applied to different loudspeaker configurations. *Journal of the Audio Engineering Society*, 59(5):304–320, 2011.
- [13] Choueiri, Edgar Y. Optimal crosstalk cancellation for binaural audio with two loudspeakers. *Princeton University*, 28, 2008.