

INVERSIÓN EN LA PERCEPCIÓN BINAURAL: DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN PSEUDÓFONO

L. Guillermo Gilberto^a, Imanol F. Sánchez Bellini^a, Fernando R. Bermejo^{a,b,c}, G. Agustín Cravero^a, Sebastián P. Ferreyra^a, Valentín Lunati^{a, c} y Claudia Arias^{a,b,c}

^a*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), FRC - UTN - UA CONICET, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina, acustica@scdt.frc.utn.edu.ar, <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

^b*Facultad de Psicología, Universidad Nacional de Córdoba, Enfermera Gordillo esq. Enrique Barros, Ciudad Universitaria. Córdoba, Argentina, <http://www.psychology.unc.edu.ar>*

^c*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina, <http://www.conicet.gov.ar>*

Palabras Claves: Pseudófono, adaptación sensorial, audición binaural, localización sonora.

Resumen. El estudio empírico de procesos adaptativos en seres humanos resulta significativo para conocer los principios sensoriomotores que subyacen al aprendizaje de habilidades perceptivas. Los protocolos experimentales que introducen perturbaciones y permiten readaptaciones ofrecen una importante ventana para estudiar cómo una persona aprende nuevas dinámicas sensoriomotoras. En este sentido, la utilización de dispositivos que modifican las claves perceptuales permite generar al usuario un nuevo espacio perceptivo que lo obliga a generar nuevos patrones sensoriomotores. A fines de estudiar estos fenómenos en la audición binaural se desarrolló un dispositivo llamado Pseudófono, que invierte las claves de audición espacial, produciendo que las ondas sonoras que arribarían al oído izquierdo estimulen el oído derecho y viceversa. En este trabajo, se presenta el diseño del Pseudófono y distintos análisis llevados a cabo con el propósito de validar de manera objetiva y subjetiva su funcionamiento. Se realizaron pruebas acústicas y electroacústicas para verificar una correcta inversión sonora, baja diafonía y diferencias interaurales de tiempo y nivel adecuadas. Asimismo, se analizó la respuesta en frecuencia del sistema y se realizaron pruebas subjetivas de localización de fuentes sonoras para evaluar su usabilidad. A partir de los resultados obtenidos se pudo determinar que el dispositivo es adecuado para realizar pruebas de adaptación sensorial. Además, se realizan recomendaciones sobre posibles modificaciones a tener en cuenta en el diseño de este tipo de herramientas de investigación.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Adaptación sensoriomotora

Los abordajes desde las teorías de la complejidad están ganando progresivamente mayor poder explicativo en las ciencias cognitivas (Chemero, 2009). En tanto que un agente y su ambiente constituyen un sistema dinámico, la actividad cognitiva debe ser entendida como resultado emergente de la compleja interacción entre ambos. Cualquier cambio en el sistema puede alterar la estabilidad de su dinámica. Un agente debe ser capaz de modificar su comportamiento a medida que suceden estas interrupciones, debe generar acciones para regular adaptivamente el acoplamiento con el mundo (Barandarian, et al., 2009). En la vida diaria, cambios como los que genera el crecimiento, dominar una máquina, o enfrentarse a una discapacidad sensorial, obligan constantemente a aprender nuevas dinámicas de interacción. Desde estas perspectivas, llamadas enactivas, se sostiene que la percepción implica tanto la actividad de vías sensoriales como la actividad exploratoria que realiza el agente. La percepción se constituye a partir de reglas de acoplamiento que ocurren entre la acción y el cambio subsecuente en las sensaciones. El aprendizaje perceptual hace referencia al logro de un uso hábil de estos patrones sensoriomotores para obtener información del ambiente.

A pesar que estas propuestas tienen un importante sustento empírico, aún resta investigar las relaciones precisas entre acción, dinámica sensoriomotora y percepción. Es preciso estudiar cómo un agente construye, organiza, mantiene y regula esos patrones sensoriomotores. Para facilitar el estudio empírico de estos procesos adaptativos diferentes estrategias metodológicas buscan hacer evidente estas interacciones sensoriomotoras. Tal es el caso de los estudios que recrean situaciones en donde el agente se enfrenta a eventos disruptivos, como la inversión de claves perceptuales, y se encuentra forzado a generar nuevos patrones sensoriomotores para percibir adecuadamente.

1.2 Experimentos en inversión perceptual

Son conocidos los estudios sobre los efectos de la modificación del campo visual a través del uso de lentes que invierten de arriba/abajo y/o izquierda/derecha la orientación de arribo de la luz a los ojos (Degenaar, 2013; Kohler, 1964; Stratton, 1897). En términos generales, estas experiencias muestran que las personas que comienzan a utilizar los lentes sienten que la estabilidad de la experiencia visual se descompone al momento que mueven su cabeza, tal como si la escena se movería independientemente. Esta situación evidencia la crítica relación entre la estimulación sensorial y el movimiento corporal. A medida que el participante logra adaptarse a la nueva situación, los movimientos de cabeza ya no producen la sensación de inestabilidad. Una vez que la persona aprende nuevos patrones sensoriomotores puede diferenciar sin inconvenientes los movimientos que se dan dentro de la escena visual de aquellos producidos por sus propios movimientos: puede ver como lo hacía normalmente (Myin y Degenaar, 2014). Finalmente, una vez que se quitan los lentes, su experiencia es similar a la que tuvo cuando se los colocó por primera vez, normalizándose (nuevamente) al poco tiempo, cuando re-aprenden los patrones sensoriomotores.

En audición también se han llevado a cabo experiencias similares. A comienzos del siglo pasado diferentes investigadores utilizaron un dispositivo llamado Pseudófono, que invierte las claves de audición espacial, produciendo que las ondas sonoras que deben arribar al oído izquierdo estimulen el oído derecho y viceversa. El Pseudófono mantiene las principales claves auditivas involucradas en la localización de fuentes sonoras en el plano acimutal

(diferencias interaurales de nivel (ILD) y de tiempo (ITL) (Blauert, 1990)), pero de manera invertida, haciendo que el usuario perciba, por ejemplo, a su derecha una fuente sonora que está a su izquierda.

Los primeros trabajos con el Pseudófono evidenciaron que los participantes, si bien lograron aprender a localizar sonidos con las claves auditivas intercambiadas, no pudieron experimentar una inversión completa, tal como ocurre en la visión. Este efecto se observó aun cuando los participantes utilizaban el dispositivo de manera continua durante una semana (Young, 1928; Willey, Inglis y Pearce, 1937). Recientemente, un estudio volvió a replicar estos resultados (Hofman, et al., 2002). Una de las hipótesis que explica esta incapacidad de adaptarse completamente a la inversión perceptual es que los participantes durante el entrenamiento, al estar expuestos a fuentes sonoras visibles, no evaluaban críticamente la localización de los sonidos y resolvían la grave de discordancia auditivo-visual con el efecto de ventriloquia (Welch, 1978). Esto es, la localización de un estímulo auditivo es percibida en la localización del estímulo visual. Los participantes de todas las experiencias previas, al contar con claves visuales durante el entrenamiento, habrían desatendido o suprimido la información espacial de las señales auditivas. Es esperable que si se elimina la información visual, los participantes estén obligados a atender a las claves sonoras.

Al igual que en la visión, con el Pseudófono la estimulación en sí misma no es conflictiva, sólo está invertida. Recién cuando los participantes se mueven se genera una sensación de inestabilidad. Esto ha sido expuesto en un estudio de localización de sonidos (Ohtsubo, et al., 1980): si los participantes movían su cabeza durante la emisión de un pulso sonoro, aumentaba notablemente la variabilidad de las respuestas. Incluso, los participantes reportaron que cuando movían la cabeza notaban que las fuentes sonoras también se movían. Una cuestión similar fue reportada en el trabajo pionero de Young (1928), donde el autor, que fue participante, comentó: "Yo caminaba en círculo alrededor de la fuente que era un metrónomo, a 1,5 m, apuntándolo con mi hombro derecho. Localizaba el sonido a la izquierda y sentía que se movía por la habitación mientras caminaba. Cuando caminé en paralelo a las paredes de la habitación, el sonido fantasma se movía conmigo y siempre lejos del centro de la habitación" (Young, 1928, p.403, traducción propia).

1.3 Pseudófono como herramienta de investigación

La posibilidad de equipar a una persona con un dispositivo de este tipo ofrece una oportunidad única para estudiar la re-calibración sensoriomotora de los seres humanos. No se han encontrado estudios que analicen los movimientos que realizan espontáneamente los participantes mientras utilizan estos dispositivos, ni en audición ni en visión. Tampoco, cómo los cambios de estos patrones se relacionan con la experiencia que van teniendo los participantes. Bajo esta perspectiva, el Pseudófono se presenta como una valiosa herramienta de investigación, que nos permitirá analizar los diferentes procesos involucrados en el aprendizaje sensoriomotor (Di Paolo, et al., 2014), a la vez que, podremos contrastar novedosos modelos de readaptación auditiva (Mendonça, 2014) y localización auditiva (Aytekin, et al., 2008). En este trabajo se presentan las actividades llevadas a cabo en el diseño de un Pseudófono y los diferentes análisis realizados para validar de manera objetiva y subjetiva su funcionamiento.

2 METODOLOGÍA

2.1 Diseño electroacústico

Tal como se mencionó anteriormente el Pseudófono es un dispositivo que intercambia las señales acústicas que arriban a cada uno de los oídos (Figura 1). El diseño electroacústico de esta herramienta se enfocó sobre sus dos principales funcionalidades: 1- evitar que el sonido directo arribe a cada uno de los oídos; y 2- emitir en cada oído la señal que originalmente debería arribar al oído contralateral (oído opuesto).



Figura 1. Diagrama de un Pseudófono recibiendo e invirtiendo las claves binaurales de audición.

La primera acción es clave ya que una correcta inversión no debería permitir que la señal acústica directa se combine con la señal acústica contralateral, provocando confusiones indeseadas en el usuario. Esta combinación se conoce en circuitos electroacústicos como diafonía (Vorlander, 2008), donde la señal de un canal se mezcla con la del canal opuesto y viceversa. Para evitar este efecto se utilizó un protector auditivo tipo cobertor, que produzca la atenuación sonora necesaria de la señal directa.

La segunda funcionalidad se proyectó mediante la utilización de pequeños altavoces ubicados dentro de cada una de las copas del protector auditivo. Cada uno de ellos reproduce de la señal captada por sendos micrófonos situados en el exterior de cada copa contralateral. Como se explicará más adelante, para realizar esta tarea fue necesario desarrollar una etapa de amplificación electrónica y una fuente de alimentación que suministre energía al circuito electrónico. Con el fin de obtener una situación de control en las pruebas perceptuales con el dispositivo, se cumplió con el requerimiento de permitir, mediante un conmutador, escuchar los canales de forma directa, esto es, sin inversión.

2.2 Validaciones objetivas y subjetivas

Un elemento clave para la utilización de una herramienta de investigación es el procedimiento de validación de la misma. Este proceso permite orientar y delimitar el campo de acción de la herramienta, además de proporcionar firmeza a los resultados de las investigaciones que utilizan el dispositivo. El funcionamiento de la implementación realizada se comprobó con procedimientos de carácter objetivo y subjetivo.

Por una parte, se realizó un estudio detallado de la inversión, simetría y respuesta en frecuencia de la implementación realizada. Además se analizaron las claves ILD e ITD que se presentan en el dispositivo cuando la fuente sonora se localiza a diferentes ángulos. Estas verificaciones fueron llevadas a cabo utilizando dos métodos diferentes de medición: 1- utilizando señales de ruido rosa de banda ancha y 2- midiendo la respuesta impulsiva del sistema. En el primer caso se estimuló al Pseudófono con una señal de ruido aleatorio de banda ancha (20 a 20000 Hz.) cuya densidad espectral es inversamente proporcional a la frecuencia (ruido rosa). Es conveniente el uso de este tipo de señal ya que presenta un nivel constante en todas las bandas de octava. En el segundo caso se midió la respuesta al impulso

(RI) del sistema mediante el método indirecto, utilizando barridos sinusoidales de frecuencia (20 a 20000 Hz.). La reconstrucción de la respuesta impulsiva de un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI) excitado con una señal de barrido, se obtuvo a través de la convolución de la señal de salida del sistema con el filtro inverso de la señal de excitación. En este trabajo sólo se presentarán las validaciones realizadas mediante la técnica de respuesta al impulso. Cabe señalar que en la mayoría de los casos los resultados fueron prácticamente idénticos entre una y otra técnica de medición.

Las mediciones fueron hechas con un simulador de torso y cabeza (HATS) marca Brüel & Kjaer, modelo 4128 y con un dispositivo de ensayo acústico (DEA) normalizado (IRAM, 2012) (Figura 2). El primer dispositivo posee micrófonos en sus oídos y sus medidas antropométricas se encuentran normalizadas. Por su parte el DEA es un elemento utilizado para mediciones de pérdidas por inserción de protectores auditivos tipo cobertor. En cualquiera de los casos, el dispositivo de captura fue conectado a una computadora a través de una placa de sonido marca Focusrite, modelo Scarlett 18i6. Los diferentes análisis mostrados fueron llevados a cabo mediante los programas computacionales Matlab (Mathworks), Audition (Adobe) y Dirac (Brüel & Kjaer).



Figura 2. Dispositivos de captura para el análisis del Pseudófono: a) Dispositivo de ensayo acústico normalizado; b) simulador de torso y cabeza.

Por otra parte se examinó la atenuación sonora provista por el Pseudófono con su circuito electrónico desactivado. En primer lugar se midió la atenuación de manera subjetiva, con un sujeto experimental portando el Pseudófono y utilizando los lineamientos sugeridos por la norma IRAM 4060-1 (IRAM, 1999). En segundo término se midió la pérdida por inserción del dispositivo utilizando el DEA mostrado en la Figura 2 a), y según la norma IRAM 4060-2 (IRAM, 2012).

Finalmente, se realizó una prueba psicofísica para determinar la validez del dispositivo en términos subjetivos. Para esta verificación se realizaron pruebas de localización con fuentes sonoras en diferentes posiciones, distancias y tipos de sonidos. En ellas el participante, con su visión ocluida, se sienta en el centro de un semicírculo a una distancia de 1 m. La fuente sonora se posiciona a la altura del rostro en una de 7 posiciones fijas del semicírculo: $-67,5^\circ$, -45° , $-22,5^\circ$, 0° , $22,5^\circ$, 45° y $67,5^\circ$. Antes de comenzar cada ensayo el participante enfrenta con el rostro al centro del arreglo de parlantes, 0° en el plano acimutal. En ese momento se emite el sonido experimental desde alguna de las 7 posiciones. Su tarea consiste en enfrentar la fuente, para ello, debe girar su cabeza hasta justo enfrentarla e indicar verbalmente cuando da

su respuesta.

Un experimentador controla el registro de datos en una computadora y otro se encarga de posicionar la fuente sonora para cada ensayo. El orden de la presentación es definido de antemano de manera aleatoria. Entre los ensayos, se activa un parlante con música justo detrás del participante para enmascarar los ruidos que se hace el experimentador al mover la fuente sonora.

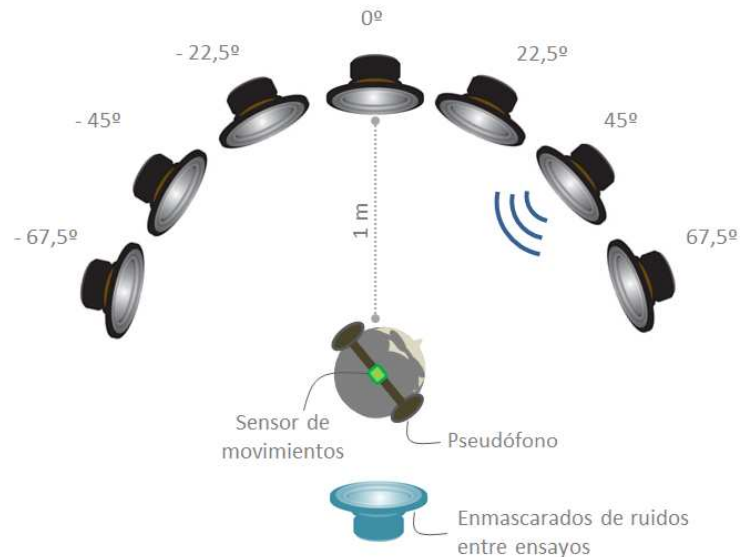


Figura 3. Arreglo experimental de las pruebas de localización sonora.

3 RESULTADOS

3.1 Diseño electroacústico

El protector auditivo elegido para el diseño es el 3M Peltor - Optime MT155H530A 380 (Figura 4) tipo cobertor, con altura ajustable y un conveniente índice de atenuación sonora (SNR = 31 dB). Este modelo de protector cuenta además con un circuito de comunicación en una de sus copas, que al activarlo permite escuchar el entorno, mediante un micrófono externo y un altavoz interno. El circuito es controlado con un interruptor que abre y cierra la comunicación. Para la implementación del Pseudófono se configuró un único protector auditivo a partir de dos, utilizando sus dos copas activas (con circuito de comunicación).



Figura 4: Protector auditivo marca/modelo: 3M Peltor / Optime MT155H530A 380

Este circuito de comunicación se evaluó para verificar si era posible su utilización en el Pseudófono. En este sentido se realizaron mediciones de respuesta en frecuencia del circuito electrónico aislado, y del conjunto protector-circuito electrónico. En las primeras se inyectó una señal eléctrica de banda ancha y respuesta en frecuencia plana, observando los resultados en un osciloscopio; y en la segunda se utilizó una señal acústica, también de banda ancha y espectro plano, montando el protector en el DEA y observando los resultados en un analizador de audiofrecuencias. En ambos casos los resultados mostraron una espectro con una gran concentración de energía en frecuencias medias (150~2000 Hz). Este efecto no es deseable, ya que confiere al dispositivo un sonido poco natural, similar al sonido telefónico. Este resultado era esperable ya que el circuito electrónico del protector auditivo está diseñado para favorecer la comunicación de la voz humana.

Dados los resultados obtenidos con el circuito original se proyectó conservar los micrófonos y altavoces originales del protector auditivo, y diseñar un nuevo circuito electrónico ad hoc para el Pseudófono. El diagrama de bloques del circuito, y sus principales componentes electrónicos se presentan en la Figura 5.

Finalmente el Pseudófono implementado cuenta con dos micrófonos tipo electret de 1 cm de diámetro, conectados a un circuito de polarización y preamplificación basado en un amplificador operacional LM358. Seguidamente se encuentra una llave selectora que permite intercambiar o no las señales que irán a cada altavoz. La amplificación de la señal se realizó mediante un amplificador LM4811MM, en su versión de montaje superficial (SMD). Este dispositivo ofrece una amplificación de hasta 12 dB, con una respuesta en frecuencia plana en el espectro de audiofrecuencias y posee muy baja diafonía entre sus dos canales de amplificación (Figura 5). La etapa de alimentación se implementó con una batería de 9V y un circuito regulador de bajas pérdidas (LDO: low-dropout) basado en el circuito integrado TVL1117. Los altavoces se encuentran integrados en las copas y son de tipo electrodinámicos de 1.5 cm de diámetro.

El diseño final se muestra en las Figura 7. Debido a que en pruebas subjetivas informales se detectó un lóbulo de recepción muy angosto por parte de los micrófonos del Pseudófono se optó por reubicarlos por fuera de la copa, evitando la cavidad original en la que se encontraban.

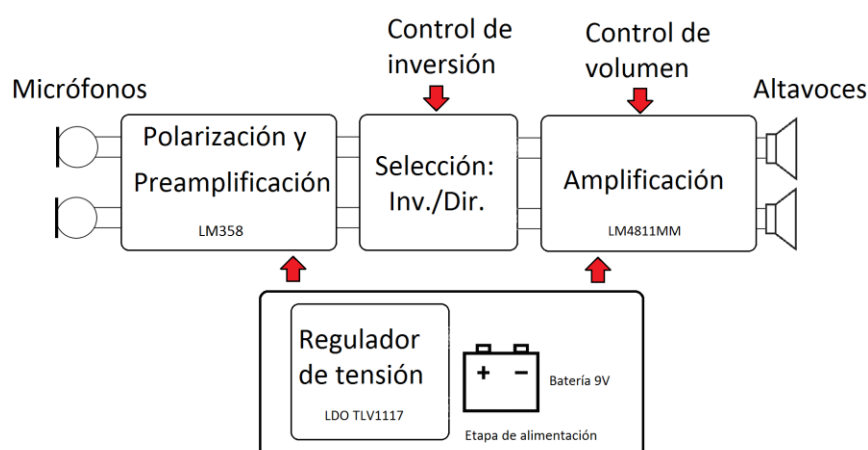


Figura 5: Diagrama de bloques del circuito electrónico del Pseudófono.

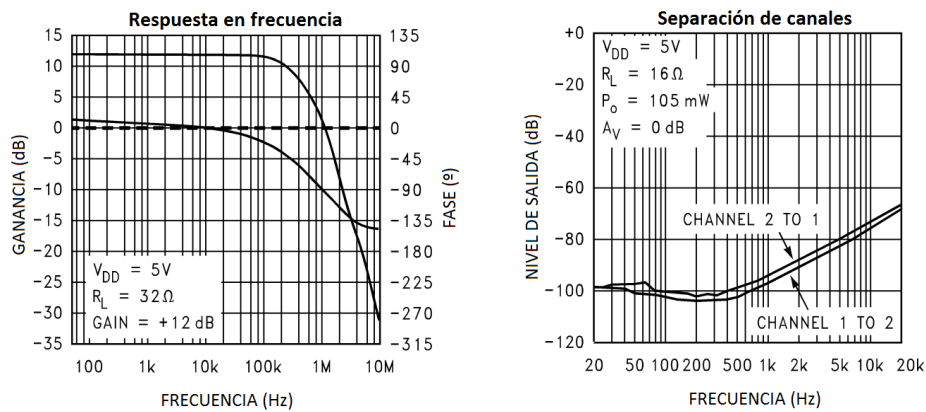


Figura 6: Respuesta en frecuencia y diafonía del amplificador utilizado (LM 4811MM)

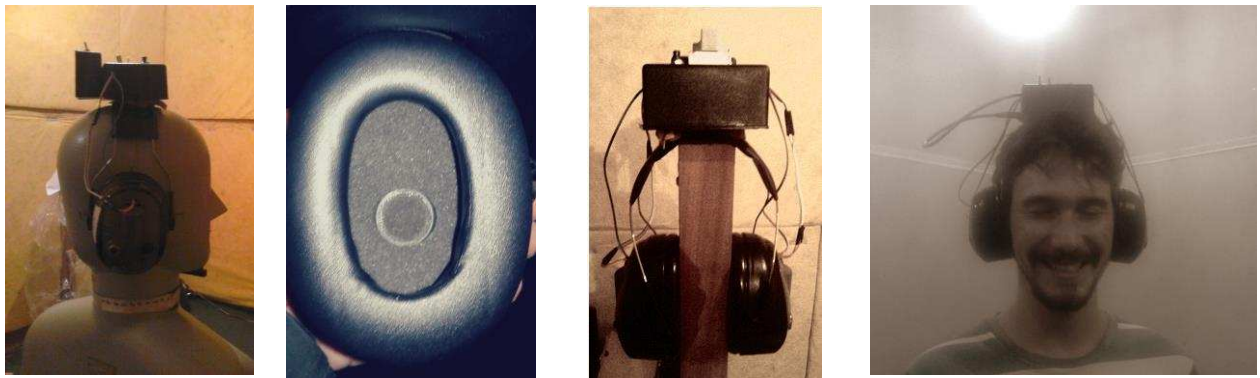


Figura 7: Imágenes de la implementación finalizada.

3.2 Validaciones

3.2.1. Verificación de inversión binaural

Esta es la característica central en el funcionamiento del Pseudófono. Para constatar la correcta inversión de los canales se midieron dos RI con el dispositivo montado en el HATS: la primera con una inclinación de 45° a la izquierda y con los canales del Pseudófono no invertidos (PD), y la segunda en la misma posición pero con los canales del dispositivo invertidos (PI). La verificación se realizó analizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de la RI del canal derecho de la primera medición, contrastándola con el canal izquierdo de la segunda medición. En la Figura 8 se muestra el esquema de la medición y en la Figura 9 se muestran ambas respuestas en frecuencia.



Figura 8: Esquema de medición para validación de correcta inversión.

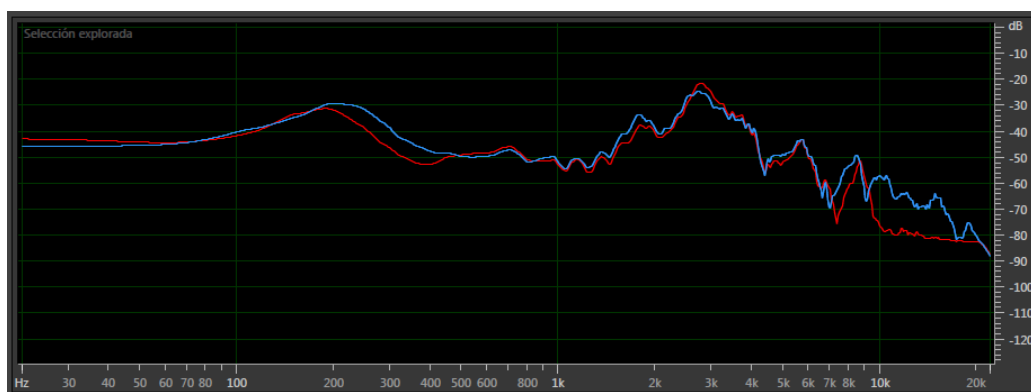


Figura 9: Respuesta en frecuencia del Pseudófono medida con el montaje mostrado en la Figura 8.

La figura muestra que la inversión efectivamente se produce, verificándose dos respuestas muy similares, con algunas diferencias en las altas frecuencias, y en la franja espectral entre 200-400 Hz, probablemente producidas por las filtraciones del sonido directo y asimetrías en la colocación del Pseudófono sobre el HATS.

3.2.2. Medición de atenuación sonora y pérdida por inserción

Si bien el protector auditivo elegido para el diseño contaba con un buen índice de atenuación sonora, las intervenciones realizadas sobre el mismo podrían haber afectado esta propiedad. Para verificar una correcta aislación del sonido directo se realizaron ensayos de atenuación sonora. En ambas situaciones el circuito electrónico se desactivó antes de realizar las mediciones.

En la Tabla 1 se muestra la atenuación sonora del Pseudófono cuando lo porta un sujeto "S". Esta medición se realizó buscando el umbral de audición del sujeto sin el protector colocado y con él. La atenuación sonora resulta de la diferencia entre estas dos mediciones. Por otro lado se midió la pérdida por inserción del Pseudófono utilizando el DEA. Esta medición es análoga a la anterior: se realiza midiendo el nivel sonoro sin el Pseudófono colocado y luego con él. La pérdida por inserción en este caso es también la diferencia entre ambas mediciones. Se comprueba que las atenuaciones observadas en el rango analizado siguen siendo elevadas, a pesar de las intervenciones realizadas sobre el dispositivo.

Frecuencia central (ancho de 1/3 octava)	1000	2000	4000	5000	6300	8000	10000
Sin Pseudófono	10.9	12.8	11.6	22.4	28.5	36.8	44.2
Con Pseudófono	40.5	46.1	46.7	54.8	65.4	65.8	74.7
Atenuación	29.6	33.3	35.1	32.4	36.9	29	30.5

Tabla 1: Atenuación Sonora del Pseudófono para el sujeto "S", con el circuito electrónico desactivado.

Frecuencia central (ancho de 1/3 octava)	1000	2000	4000	5000	6300	8000	10000
Sin Pseudófono	69.1	73.5	71.5	78.2	76.3	72.1	70.9
Con Pseudófono	44.7	42.5	42.3	47.5	52.1	58.7	58.6
PPI	24.4	30.9	29.3	30.6	24.2	13.4	12.2

Tabla 2: Pérdida por Inserción del Pseudófono, con el circuito electrónico desactivado.

3.2.3. Caracterización de respuesta en frecuencia

Para analizar la respuesta en frecuencia del dispositivo se midió la RI con el Pseudófono en modo PD colocado en el HATS a un ángulo de $+90^\circ$ y -90° , y 1 metro de distancia de un altavoz dentro de una cámara semianecoica. La respuesta en frecuencia del sistema se obtuvo mediante la FFT de la RI medida. En la Figura 10 se observan ambas RI y en la Figura 11 sus FFT.

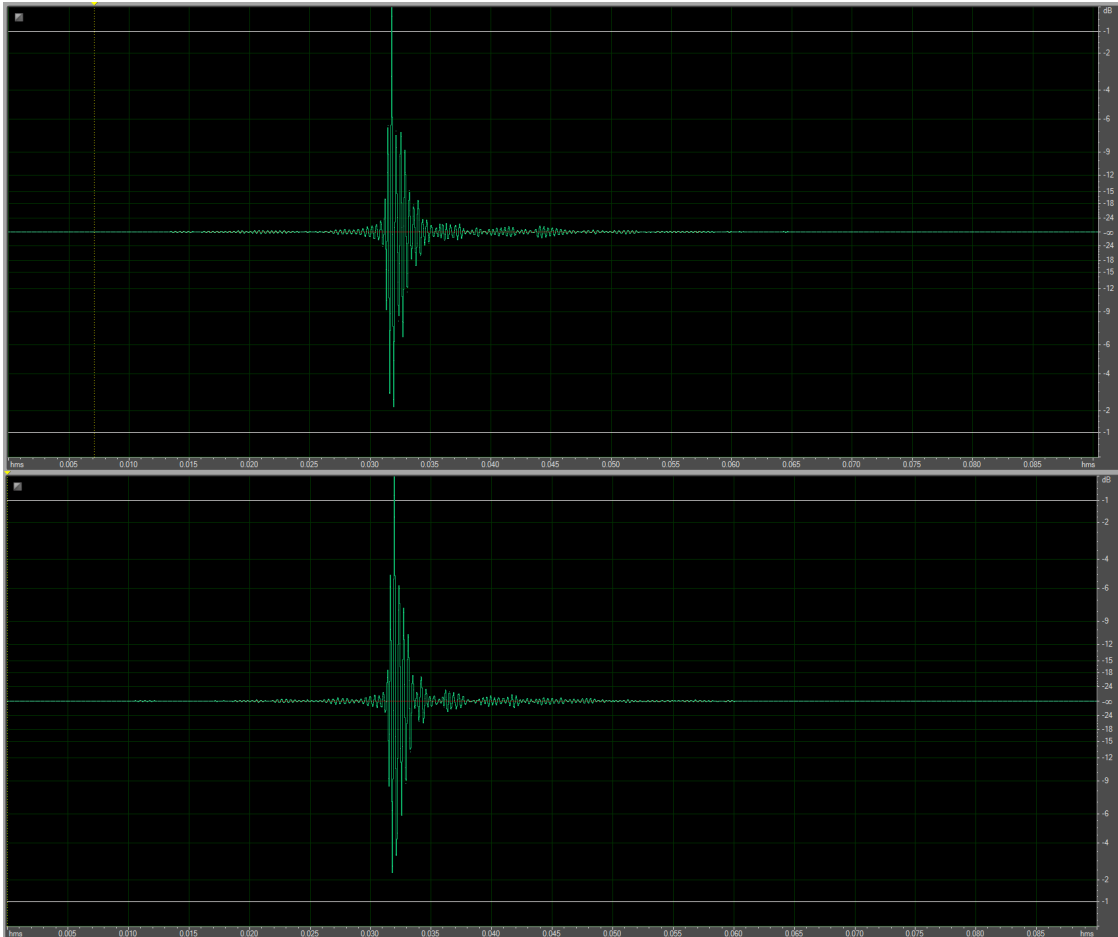


Figura 10: Respuesta al impulso del Pseudófono: arriba canal izquierdo con la fuente sonora a 90° , abajo canal derecho con la fuente a -90° .

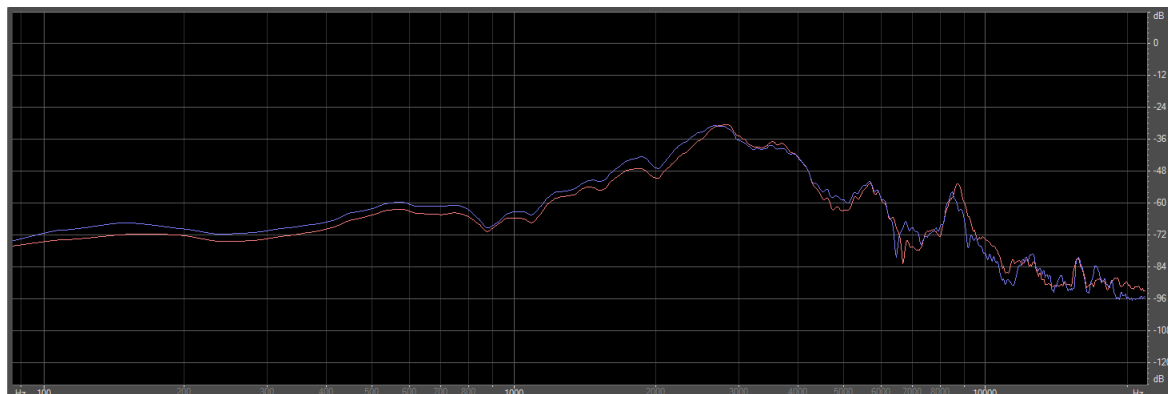


Figura 11: Respuesta en frecuencia del Pseudófono: azul canal izquierdo con la fuente sonora a $+90^\circ$, rojo canal derecho con la fuente a -90° .

Se observa un espectro relativamente plano desde las bajas frecuencias hasta los 1000 Hz, desde allí en adelante se observa un claro realce de las frecuencias medias-altas, además de una resonancia alrededor de los 9000 Hz. También es visible la similitud entre los espectros, aunque con un poco menos nivel el canal derecho. Esto es indicio de que las etapas acústicas y electrónicas están apareadas y difieren poco entre sí, aunque es necesario un ajuste en la ganancia de uno de los canales.

3.2.4. Medición de ITD e ILD

Se midió la diferencia en los tiempos de arribo de las señales a los oídos del HATS para diferentes ángulos de incidencia en el plano acimutal frontal. Para ello se realizaron mediciones de RI girando la cabeza del HATS con saltos de 10° desde $+90^\circ$ hasta -90° , y a una distancia de 1 m del altavoz, con el Pseudófono en modo PD. En la Figura 12 se muestra la disposición del HATS para realizar las mediciones.

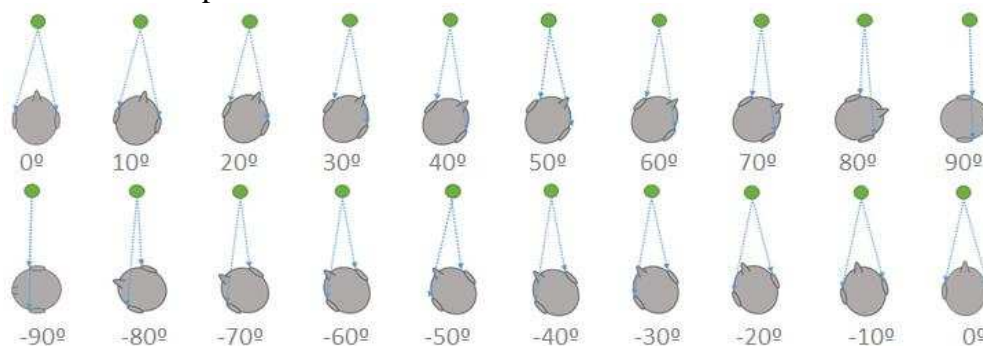


Figura 12. Disposición del HATS para los ensayos. Los ángulos son respecto al eje vertical del torso (azimut).

La medición del ITD para cada posición se realizó a partir del cálculo de la correlación cruzada entre las RI de los canales izquierdo y derecho. El resultado de esta operación da una medida de la similitud entre ambas señales, y presenta un máximo absoluto en una posición relacionada con el desfase temporal entre ambas señales. En la Figura 13 se observan los valores medidos para el ITD en cada posición.

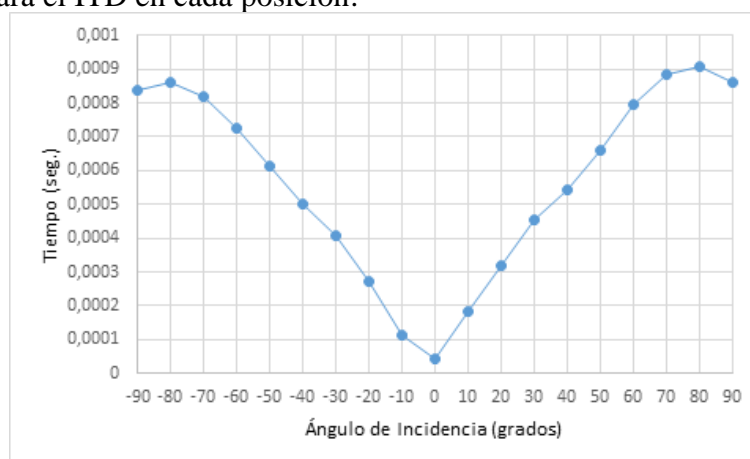


Figura 13: Diferencias interaurales de tiempo (ITD) según ángulo de incidencia.

Por otra parte, para cada una de las RI medidas, se calculó la diferencia de nivel entre las señales que arriban a los oídos del HATS cuando porta el Pseudófono. Para ello se calculó el valor eficaz (RMS) de las señales izquierda y derecha, y luego se obtuvo su diferencia en dB. En la Figura 14 se muestran los resultados obtenidos.

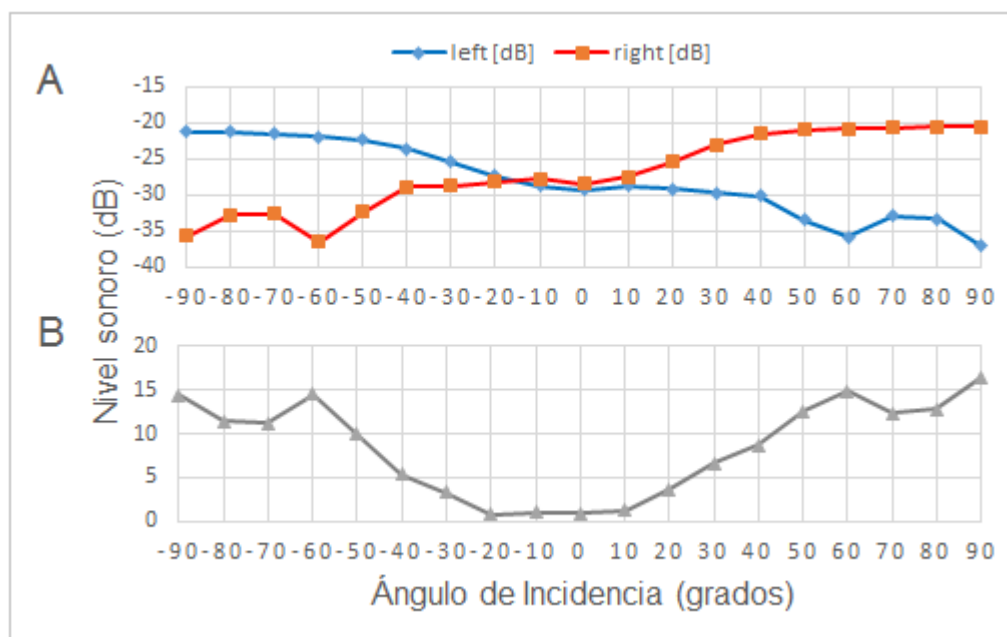


Figura 14: Diferencias interaurales de niveles (ILD) según ángulo de incidencia. En la parte superior (A) se observa el comportamiento de ambas copas (líneas azul y roja). En la parte inferior (B) se observan las diferencias absolutas en dB entre los canales.

3.2.5. Pruebas subjetivas

Para validar subjetivamente la correcta inversión del dispositivo se realizó una prueba de localización sin claves dinámicas, esto es, sin permitir que el participante pueda obtener información de la posición de la fuente a través de sus movimientos. En lugar de restringir los movimientos de la persona, se optó por utilizar señales breves, que no le den tiempo de mover la cabeza.

En un primer momento la prueba se realizó utilizando un pulso de ruido blanco de 2 seg. El participante sabía que podía empezar a moverse recién cuando finalizaba el sonido. No obstante, se observó que en el modo PI las respuestas eran más variables que en la condición PD. Probablemente, la duración del pulso era suficiente para que pequeños movimientos intervengan en la respuesta de localización, por lo que se repitió la prueba con un pulso más breve, de 500 ms.

Resolvieron la prueba 4 participantes, cada uno resolvió 70 ensayos (2 condiciones de inversión x 7 posiciones x 5 repeticiones), excepto un participante que sólo resolvió la tarea en el modo PI. Los resultados se muestran en las Figuras 15 y 16.

Se puede observar en las gráficas un correcto funcionamiento “no inversivo” e “inversivo” del Pseudófono. Las respuestas de localización fueron simétricas en función del modo de funcionamiento del dispositivo. En ambos casos se obtuvo un alto índice de correlación entre la respuesta y la posición de la fuente, en el modo PD fue positivo y en el modo PI fue negativo.

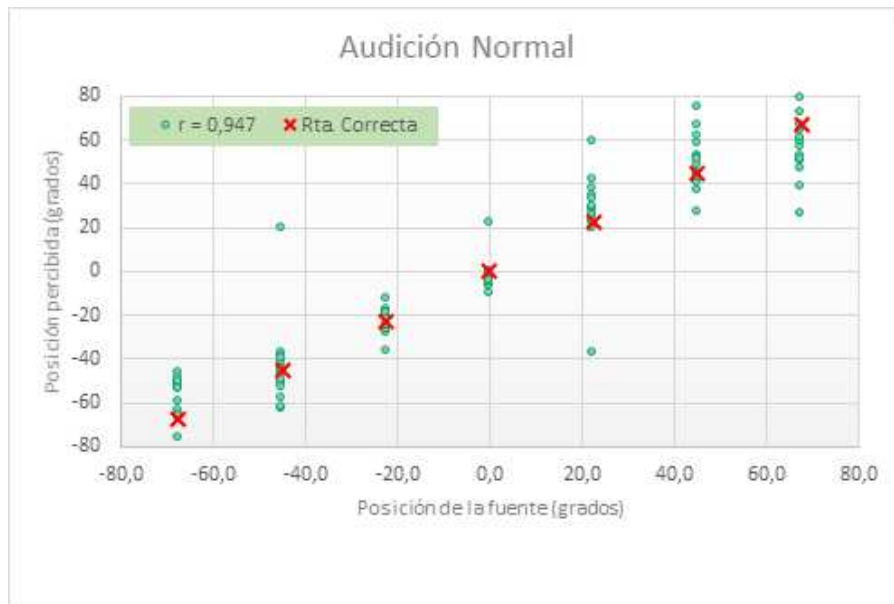


Figura 15. Prueba sin claves dinámicas, con Pseudófono en condición PD.

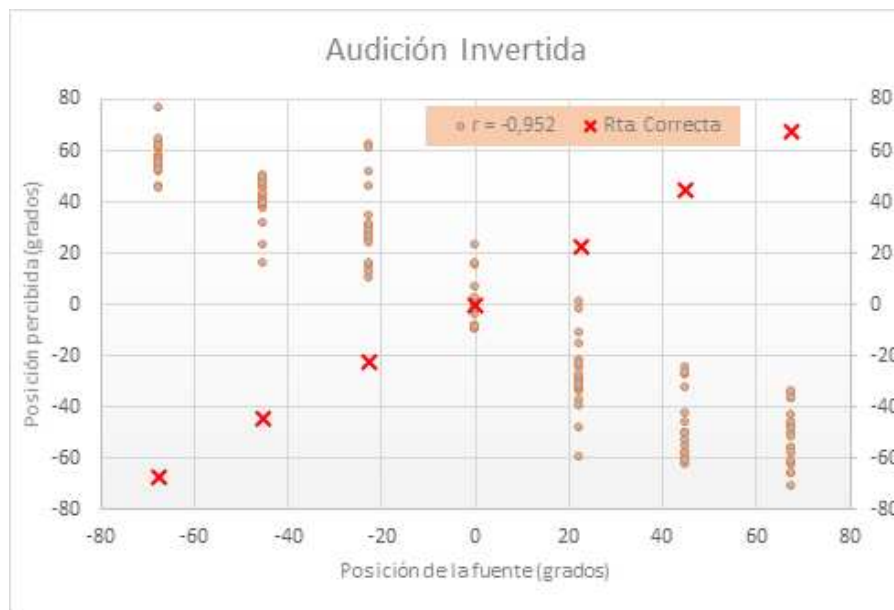


Figura 16. Prueba sin claves dinámicas, con Pseudófono en condición PI.

4 COMENTARIOS FINALES Y TRABAJO FUTURO

La evaluación del Pseudófono diseñado señala que el dispositivo es adecuado para realizar pruebas de adaptación sensorial. Tanto las validaciones objetivas como la subjetiva revelaron datos que corroboran un apropiado funcionamiento, verificando una correcta y ajustada inversión.

Las mediciones llevadas a cabo permitieron caracterizar en detalle la herramienta de investigación construida. Respecto a la correcta inversión, por un lado, tanto las mediciones de atenuación sonora como las de pérdidas por inserción revelaron que el Pseudófono presenta muy buenas características para aislar al usuario del sonido directo. Por otro lado, se caracterizó la respuestas en frecuencia del circuito implementado y se confirmó una adecuada

conservación de diferencias binaurales (ITD e ILD) al presentar fuentes sonoras en los diferentes ángulos de incidencia al dispositivo.

Las pruebas subjetivas muestran que los usuarios del Pseudófono experimentan una evidente inversión perceptual. Las respuestas de localización de fuentes sonoras en la condición de inversión se ajustan con alta precisión a las respuestas espejadas de la condición sin inversión. En relación al diseño, la herramienta se mostró confortable y robusta durante la toma de las pruebas.

Con respecto al trabajo futuro, se está diseñando una nueva versión para ser utilizada en pruebas de localización de fuentes sonoras en el plano medial, además del acimutal. Para ello es necesario conservar la función de transferencia de torso y cabeza (HRTF) del usuario, ya que ésta es una de las claves más importantes para este tipo de localización (Blauert, 1990). Para lograr este objetivo en el nuevo diseño se liberará el pabellón auditivo, evitando encerrarlo con la copa de un protector auditivo tipo cobertor.

REFERENCIAS

- Aytekin, M., Moss, C.F., y Simon, J.Z., A sensory-motor approach to sound localization. *Neural Computation*, 20: 603-635, 2008.
- Barandiaran, X.E., Di Paolo, E. y Rohde, M., Defining Agency: Individuality, Norativity, Asymmetry, and Spatio-Temporality in Action. *Adaptive Behavior*, 17(5): 367–386, 2009.
- Blauert J., *Spatial hearing. The psychophysics of human sound Localization*. Cambridge MA: MIT, 1990.
- Chemero, A., *Radical Embodied Cognitive Science*. Cambridge, MA: MIT Press, 2009.
- Degenaar, J., Through the inverting glass: first-person observations on spatial vision and imagery. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 13, 373-393, 2013.
- Di Paolo E. A., Barandiaran X.E., Beaton M., and Buhrmann T., Learning to perceive in the sensorimotor approach: Piaget's theory of equilibration interpreted dynamically. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8:551, 2014.
- Hofman P. M., Vlamig M. S. M. G., Termeer P. J. J. y van Opstal A. J., A method to induce swapped binaural hearing. *Journal of Neuroscience Methods*, 113, 167–179, 2002.
- Idelsohn, S., and Oñate, E., Finite element and finite volumes. Two good friends. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37:3323–3341, 1994.
- Instituto Argentino de Normalización, IRAM 4060-1:1999. Acústica. Protectores auditivos. Parte 1 - Método subjetivo de medición de atenuación sonora.
- Instituto Argentino de Normalización, IRAM 4060-3:2012. Acústica. Protectores auditivos. Parte 3 - Método simplificado de control de calidad para medir la pérdida por inserción de protectores del tipo cobertor.
- Kohler, I. (1964). The formation and transformation of the perceptual world. *Psychological Issues*, 3, 1–173.
- Mendonça C., A review on auditory space adaptations to altered head-related cues. *Frontiers in Neuroscience*, 8:219, 2014.
- Meyer, E.S., Morrison, A.J., and Plummer C.S., Finite differences and finite volumes. Two old friends. *Journal of Numerical Methods*, 32:1223–1241, 1995b.
- Meyer, E.S., Morrison, A.J., and Plummer, C.S., The finite element method: A good friend. *Journal of Numerical Methods*, 32:2223–2241, 1995a.
- Myin, E., y Degenaar, J., “Enactive vision,” in *Routledge Handbook of Embodied Cognition*, ed L. Shapiro (New York, NY: Routledge), 90–98, 2014.
- Ohtsubo, H., Teshima, T. y Nakamizo, S., Effects of head movements on sound localization

- with an electronic pseudophone. *Japan Psychological Research*, 22, 110-118, 1980.
- Stratton, G., Vision without inversion of the retinal image. *Psychological Review*, 4, 341–60 y 463–81, 1897.
- Vorländer M., *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
- Welch, R., *Perceptual Modification: Adapting to Altered Sensory Environments*, Academic Press, NY, 1978.
- Willey, C. F., Inglis, E. y Pearce, C. H., Reversal of auditory localization. *Journal of Experimental Psychology*, 20 (2):114, 1937.
- Young P. T., Auditory localization with acoustical transposition of the ears. *Journal of Experimental Psychology*, 11, 399–429, 1928.
- Zienkiewicz, O.C., and Taylor, R.L., *The finite element method, volume II*. McGraw Hill, 1991.