

LOCALIZACIÓN AUDITIVA EN INFANTES APLICANDO LA TÉCNICA DE ASIR OBJETOS SONOROS EN LA OSCURIDAD: DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS

Mercedes X. Hüg^{a,b}, Fabián C. Tommasini^{a,c}, Facundo Barrera^a, Aldo H. Ortiz Skarp^{a,c} y
Claudia Arias^{a,b,c}

^aCentro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA) – UA CONICET – Universidad
Tecnológica Nacional., Facultad Regional Córdoba, Maestro Marcelo López esq. Av. Cruz Roja,
5016, Córdoba, Argentina, mhug@scdt.frc.utn.edu.ar.

^bFacultad de Psicología, Universidad Nacional de Córdoba, Enf. Gordillo esq. Enrique Barros,
Ciudad Universitaria, 5000, Córdoba, Argentina.

^cConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Palabras Clave: Localización auditiva, Desarrollo auditivo infantil, Evaluación de
movimientos de localización sonora, Propagación de errores de medición.

Resumen. La investigación sistemática sobre la capacidad de los niños pequeños para localizar fuentes sonoras comenzó recién en la década del 80. La conducta de asir objetos sonoros en la oscuridad es una respuesta temprana que ha comenzado a utilizarse para evaluar este tipo de procesos perceptuales. Los resultados de estudios experimentales indican que niños pequeños pueden localizar juguetes sonoros con precisión aunque no dispongan de información visual sobre el entorno ni sobre sus manos y brazos.

Esta ponencia se enmarca en un proyecto doctoral cuyo propósito es estudiar aspectos evolutivos de la localización sonora y otros fenómenos auditivos en niños ciegos y con visión normal. Específicamente, la prueba a la que pertenece el presente trabajo tiene por objetivo caracterizar el rendimiento de infantes de 6 y 12 meses de edad con visión normal y ciegos en una prueba de localización de sonidos directos con la técnica de asir objetos sonoros en la oscuridad. Para ello, se requería medir con validez las variables de interés: distancia (cerca-lejos), posición dentro del mismo hemisferio (30°- 60°), trayectoria recorrida, duración, latencia, velocidad y aceleración del movimiento.

Para cumplir con el requerimiento mencionado, se implementó un sistema que consta de dos cámaras de video con visión nocturna que permiten capturar y almacenar imágenes, dos sensores de movimiento que se colocaron en las manos de los niños y diferentes programas informáticos. Para validar el sistema se construyeron herramientas que facilitaron la sincronización de las imágenes con la posición de los sensores de movimiento.

En este trabajo se presentan en detalle las herramientas y los procedimientos seguidos para la validación objetiva del sistema, que mostró ser apropiado para medir las variables involucradas, consiguiéndose minimizar los errores de medición. Además, los resultados preliminares obtenidos con dos infantes indican que lograron localizar fuentes sonoras sin claves visuales y fueron capaces de ajustar su movimiento en función de la información provista por la fuente sonora.

1 INTRODUCCIÓN

Se define la localización sonora como la percepción de la posición de una fuente sonora en el plano horizontal (azimut) y en el vertical (elevación), y la percepción de la distancia relativa entre sujeto y fuente (Blauert, 1997).

El estudio de la localización sonora en infantes es muy reciente: es en la década del 80 que esta habilidad se comienza a estudiar de forma sistemática y bajo condiciones experimentales controladas. Muir y Field (1979) fueron los primeros en demostrar de manera experimental que, bajo ciertas condiciones, los recién nacidos localizan una fuente sonora colocada a 90° en el plano horizontal (izquierda-derecha) girando su cabeza hacia el hemicampo correspondiente.

Este trabajo se enmarca en un proyecto doctoral desarrollado en el Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), cuyo propósito es estudiar aspectos evolutivos de la localización sonora y otros fenómenos auditivos en niños ciegos y con visión normal. Específicamente, la prueba que se presenta a continuación tiene por objetivo caracterizar el rendimiento de infantes de 6 y 12 meses de edad con visión normal y ciegos en una prueba de localización de sonidos directos con la técnica de asir objetos sonoros en la oscuridad. Para ello, se requería medir con validez las variables de interés: distancia (cerca-lejos), posición dentro del mismo hemicampo (30°- 60°), trayectoria recorrida, duración, latencia, velocidad y aceleración del movimiento. En el presente estudio se describen las herramientas y los procedimientos seguidos para la validación objetiva y subjetiva del sistema desarrollado.

2 ANTECEDENTES ESPECIFICOS

La investigación en niños pequeños plantea una complejidad a nivel metodológico distinta a la que se presenta en el caso de los adultos. Para estudiar procesos perceptuales y cognitivos en infantes se debe contar con medidas de evaluación indirectas como las conductas motoras, por ejemplo la succión, la dirección de la mirada, el giro de cabeza o la conducta de asir objetos (*reaching*).

La respuesta de asir con las manos un objeto sonoro se ha utilizado para medir localización sonora en el plano horizontal y, en la última década, también ha comenzado a ser aplicada para estudiar percepción de distancia. El procedimiento metodológico seguido en este caso consiste en presentarles a los infantes un objeto sonoro (en general., un sonajero) y observar el movimiento que el niño hace con sus brazos y manos para contactar y asir este objeto. Se estudia la conducta desde que el niño inicia el movimiento, la trayectoria que sigue el brazo, los movimientos preparatorios de la mano y el contacto final exitoso (o no) con el objeto.

En la década del 90 el equipo de Clifton y colaboradores (Clifton et al., 1991; Clifton et al., 1993; Clifton et al., 1994) realizaron una serie de estudios que mostraron que a los 6 meses de edad los infantes son capaces de alcanzar con precisión objetos sonoros que no pueden ver.

En uno de sus trabajos llevaron adelante una investigación longitudinal con infantes de entre 2 y 6 meses para analizar si necesitan o no ver sus manos cuando comienzan a contactar objetos. Para ello presentaron a los niños un sonajero en condición de luz y oscuridad. Sus resultados mostraron que no hubo diferencias en la edad en la que se produjo el primer intento de asir el juguete en condición de luz y oscuridad. Los autores señalaron que el éxito en esta conducta indica que el control necesario para guiar los brazos y manos reside en claves propioceptivas y no en claves visuales (Clifton et al., 1993).

En un estudio posterior, le presentaron a un grupo de niños de 6 meses de edad un sonajero en condiciones de luz, oscuridad y oscuridad con el sonajero fluorescente. En las tres

condiciones los infantes disponían de claves propioceptivas del brazo y el tronco, claves auditivas sobre la posición del objeto e información almacenada de experiencias anteriores sobre cómo ejecutar el movimiento. En el caso de la condición de luz, los niños tenían además información visual sobre el entorno, sus manos, brazos y sobre la posición del sonajero. En la condición de fluorescencia veían el sonajero pero no sus brazos. En la oscuridad no contaban con claves visuales. Para analizar características motoras de los movimientos del brazo y las manos se midió la distancia recorrida entre la posición inicial y final de la mano, el desplazamiento en promedio respecto a una línea media, la velocidad y aceleración. Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas en el rendimiento en las condiciones de luz y fluorescencia. En la oscuridad los infantes cometieron más errores aunque movieron sus manos a mayor velocidad (Clifton et al., 1994).

Clifton et al. (1991) realizaron dos estudios con infantes de entre 6 y 8 meses para determinar si percibían la distancia a la que se les presentaba una fuente sonora. En el primer estudio le presentaron juguetes sonoros en cuatro posiciones: 30° a la derecha o 30° a la izquierda a una distancia próxima (15 cm) o a una distancia lejana (60 cm). Los ensayos fueron presentados en la oscuridad. Se intercalaron algunos ensayos en condición de luz a una distancia cercana para recordarle al infante la vista del juguete. Los resultados mostraron que los infantes realizaron más intentos de asir el juguete sonoro cuando éste se encontraba a una distancia próxima respecto a cuando se encontraba lejos. En un segundo estudio se conservó el mismo diseño, salvo que los juguetes fueron presentados enfrente del niño en los ensayos en la luz y desplazados a la derecha o izquierda en la oscuridad. El resultado fue similar al del primer estudio: en los ensayos en la oscuridad los infantes intentaron asir los juguetes que estaban próximos y no los buscaron en el lugar donde los habían visto anteriormente sino desde dónde provenía el sonido.

3 METODOLOGÍA

La prueba de localización de sonidos directos que se aplicó se basó en los trabajos de Clifton y colaboradores (Clifton et al., 1991; Clifton et al., 1994) mencionados anteriormente. El objetivo específico de la misma fue evaluar la habilidad de infantes con visión y audición normales para localizar un juguete sonoro en la oscuridad en función de su distancia (cerca-lejos) y posición dentro del mismo hemicampo (+30° y +60°)¹.

La prueba fue realizada en la cámara silente del CINTRA especialmente diseñada para administrar pruebas psicoacústicas.

3.1 Participantes

Se trabajó con 2 infantes, de 6 meses y 12 meses de edad. Los padres firmaron un consentimiento informado y recibieron retribución monetaria por su participación en la experiencia.

3.2 Arreglo experimental

Se construyó un sistema de medición y análisis. A continuación se describe el subsistema de medición, consistente en dos módulos: un módulo de video y otro de captura de movimiento. El subsistema de análisis se detalla más adelante.

¹ Se trabajó en el hemicampo derecho debido a que no se reportan diferencias en el rendimiento de los infantes en función de la posición derecha o izquierda del sonajero (Clifton et al., 1991).

3.2.1 Módulo de video

Se instaló un sistema de monitoreo de video que funciona en condición de total oscuridad, integrado por una cámara Sony (modelo DCR-SR40) y una cámara conectada a una computadora marca Philips (modelo SPC9100/NC) adaptada para capturar imágenes en la oscuridad².

La cámara Sony estaba conectada a un televisor de 14" marca Philips (modelo 14PT4131/77R) y fue montada en la cámara silente con un par de soportes de manera de obtener una vista vertical de los movimientos del infante (Figura 1).

La cámara Philips fue colocada de modo de obtener una vista horizontal del niño. Para lograr capturar el movimiento del infante en la oscuridad se montó una placa de LEDs (light-emitting diode) infrarrojos colocada detrás de esta cámara, lo que permitió "iluminar" la escena. Esta tenía un control de intensidad para regular el nivel de iluminación infrarroja y evitar el exceso de brillo en la imagen.

Además se desarrolló un programa informático de captura de video denominado *ReachCaptura* para adquirir y almacenar el video provisto por esta cámara en una computadora ubicada fuera de la sala de pruebas. Esta aplicación, desarrollada en C#.NET, captura streams de video a través de la API DirectX. Permite configurar la resolución del video y la tasa de captura (fps, frames per second) e indica el momento en que comienza y finaliza la captura. El video fue capturado a 25 fps (una imagen cada 40 ms) a una resolución de 640x480 píxeles³.



Figura 1: Módulo de video

3.2.2 Módulo de captura de movimiento

Para obtener información respecto a las características del movimiento de las manos de los infantes en la oscuridad, se utilizó un sistema de medición de movimientos Patriot de Polhemus (http://www.polhemus.com/?page=Motion_PATRIOT), integrado por dos sensores. Éstos brindan información sobre las coordenadas geométricas de un punto en el espacio (x, y, z) con una precisión de 0.0254 m, junto con una referencia temporal del instante de captura, a una frecuencia de 60 muestras por segundo⁴.

Los valores arrojados por los sensores eran registrados indicando momento de inicio y fin,

² La adaptación consistió en reemplazar el sistema óptico por otro de similares características, extrayéndole el filtro para luz infrarroja.

³ Se optó por este modelo de cámara Phillips debido a que ofrece una buena relación entre el costo del producto y la tasa de captura y resolución de la imagen, además de estar diseñada para capturar video en condiciones de escasa luminosidad.

⁴ Especificaciones brindadas por el fabricante.

y almacenados por otra aplicación desarrollada por el equipo, *Permisos*, construido en lenguaje Delphi, que permite exportar estos datos para su posterior procesamiento y análisis.

3.3 Estímulo sonoro

El estímulo sonoro empleado en la prueba fue producido por un sonajero no comercial construido especialmente. Siguiendo los mismos principios que los estudios de referencia, se construyó un sonajero consistente en una caja plástica con granos pequeños de maíz colocada en el interior de un muñeco de peluche. En la parte posterior del juguete se ubicó un imán que posibilitaba fijar el sonajero a una vara de sostén y también permitía al infante desprenderlo fácilmente. Como se muestra en la [Figura 2](#), el sistema de sujeción del sonajero consistía en una vara transversal móvil, sujeta a un pie, con dos varas más cortas de sostén en cada extremo. La vara transversal estaba ubicada de manera tal que al girarla permitía ubicar el juguete cerca y lejos del infante. Se utilizaron dos sistemas de sujeción idénticos ambos en el hemisferio derecho, ubicados en dos posiciones fijas: 30° y 60° .

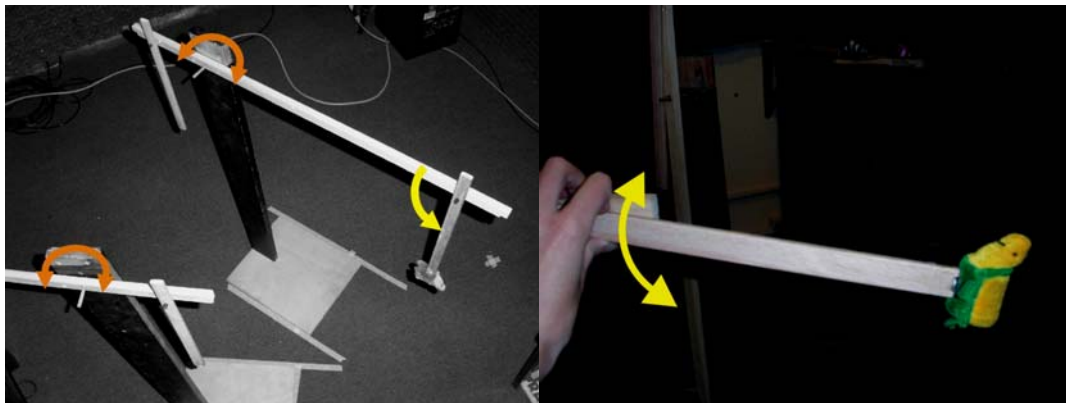


Figura 2: Sistema de sujeción del sonajero.

3.4 Diseño y procedimiento

El infante permaneció sentado durante la prueba en la falda de su madre o padre. El experimentador se ubicó enfrente del niño. Antes de empezar, se le colocó al infante un delantal de tela en el que estaban adheridos los sensores, uno en cada mano a la altura de la muñeca.

La prueba quedó conformada con un máximo de 12 ensayos. En primer lugar se presentaron dos ensayos de familiarización con la tarea en la luz. Luego se presentaron 12 ensayos, 4 a distancia cercana (OC), 4 a distancia lejana (OL) y 4 en la luz (L). Los ensayos en la luz eran a distancias cercanas, a 0° (justo enfrente del niño). Los ensayos en la oscuridad se presentaron a $+30^\circ$ y $+60^\circ$, con dos repeticiones de cada posición. Para esta prueba se utilizó el siguiente orden de presentación de ensayos: OC 30° , L, OC 60° , L, OC 30° , OL 60° , L, OL 30° , OC 60° , L, OL 30° , OL 60° .

3.5 Evaluación de la respuesta infantil

Los movimientos del infante fueron categorizados según las siguientes dimensiones:

- 1) Ensayos a distancia cercana:
 - a) Intento de alcance exitoso: cuando en un lapso menor o igual a 20 s el infante dirige su brazo directamente hacia el sonajero y este movimiento termina en el contacto con el juguete o en el acercamiento de la mano a una zona muy próxima al

- sonajero (área de 4 cm alrededor del mismo). Antes de asir el sonajero el infante podía quedarse quieto o por el contrario, girar su cuerpo y mover brazos y manos.
- b) Intento de alcance no exitoso: cuando en un lapso menor o igual a 20 s el infante dirige su brazo hacia el sonajero pero este movimiento no termina en una zona próxima al mismo.
 - c) Intento incorrecto: cuando en un lapso menor o igual a 20 s el infante dirige su brazo hacia una zona en la que no está el sonajero.
 - d) Sin intento de alcance: cuando en un lapso de 20 s el infante no realiza ningún intento de asir el sonajero.
- 2) Ensayos a distancia lejana:
 - a) Sin intento de alcance: cuando en un lapso de 20 s el infante no realiza ningún intento de asir el sonajero
 - b) Con intento de alcance: cuando en un lapso menor o igual a 20 s el infante dirige su brazo directamente hacia una zona aunque no sea la zona en la que se encuentra el sonajero.
 - 3) Duración del movimiento de alcance: tiempo en segundos que transcurre entre que comienza el movimiento y contacta el objeto.
 - 4) Latencia en iniciar el movimiento de alcance: tiempo en segundos que transcurre entre que comienza el ensayo y el infante inicia el movimiento.
 - 5) Preferencia manual: mano con la que toma contacto con el juguete, derecha, izquierda o ambas manos.
 - 6) Trayectoria, velocidad y aceleración del movimiento: se calcula la trayectoria, aceleración media, aceleración máxima, velocidad media, velocidad máxima, de los movimientos que fueron exitosos.

Para evaluar la respuesta infantil, se utilizó el subsistema de análisis integrado por: a) el programa *ReachVisualizador* (desarrollado en C#.NET) que posibilita visualizar cuadro a cuadro el video almacenado por el *ReachCaptura*, de modo de poder analizar los movimientos del niño, indicar el comienzo y el fin del movimiento de alcance, y calcular la latencia; y b) el programa *ReachDatos* (desarrollado en MATLAB), que permite el cálculo de la duración, trayectoria, velocidad y aceleración de los movimientos de alcance.

4 VALIDACIÓN OBJETIVA DEL SISTEMA

A continuación se presenta la validación objetiva del sistema, organizada en cuatro etapas.

4.1 Etapa 1

Como primera medida, era necesario sincronizar en forma adecuada el módulo de video con el de captura de movimiento. Para ello se diseñó y construyó un sistema pendular que reproduce un determinado movimiento con valores de desplazamiento, velocidad y aceleración similares a los obtenidos por los autores de referencia (Clifton et al., 1994). El sistema está compuesto por una varilla de madera de unos 130 cm de longitud que pivota libremente sobre un eje desde un extremo. En el extremo inferior se colocó el sensor de movimiento (Figura 3).

Para poder sincronizar los valores de tiempo que arroja el módulo de captura de movimiento con los del video, se tomó como referencia el tiempo del sistema operativo Windows XP con una resolución de 1 ms. Fue necesario sincronizar los tiempos de captura de un cuadro del video con una posición del sensor debido a que la frecuencia de muestreo de la cámara (25 fps) y del sensor de movimiento (60 Hz) eran diferentes. Para ello se tomó, en

cada caso, la muestra del sensor cuyo tiempo era más cercana al tiempo de la imagen correspondiente, de modo de minimizar el error temporal.

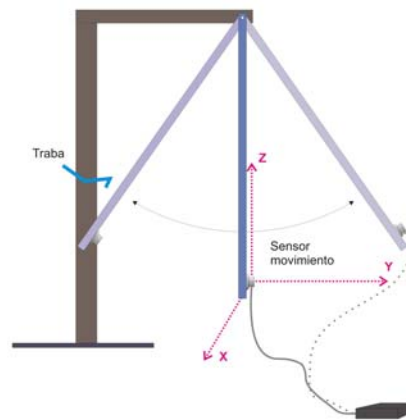


Figura 3: Representación esquemática del sistema pendular

Se tomaron 12 ensayos en los que se liberaba el péndulo de una traba sujetadora desde una posición lateral, se dejaba que alcance el recorrido máximo respecto de la posición inicial (punto de máxima elongación) y se lo volvía a detener una vez completados dos ciclos. Paralelamente, con el programa *Permis* se registraban las posiciones del sensor durante la trayectoria del péndulo y las imágenes eran tomadas con el programa *ReachCaptura*.

Mediante un análisis cuadro por cuadro de las imágenes se marcó el instante en el que el péndulo era liberado y el instante en el que retornaba a la posición inicial luego de recorrer un período completo.

A continuación se muestra un gráfico que ejemplifica los resultados obtenidos, para dos ensayos diferentes.

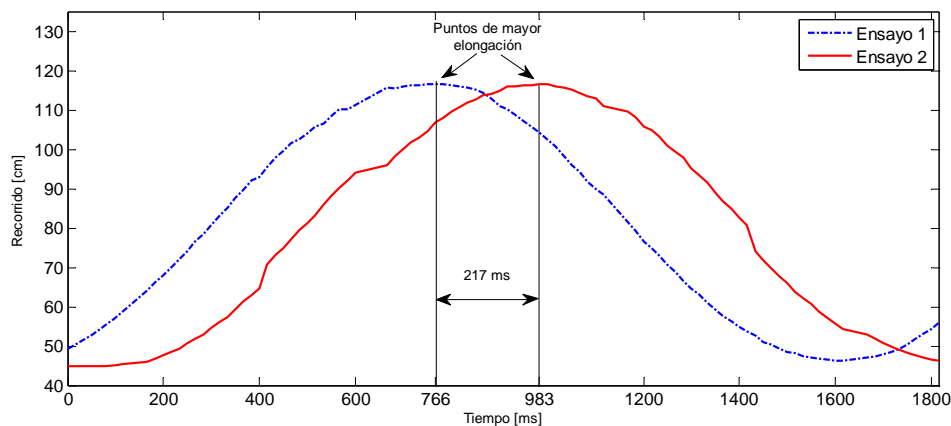


Figura 4: Recorrido del sensor en dos ensayos diferentes del movimiento pendular

Como puede observarse, se evidencia un importante error de desfase temporal entre ambas mediciones. Las posiciones de mayor elongación en cada uno de los ensayos se producen en tiempos diferentes. El desfase temporal promedio de los 12 ensayos realizados fue de -599.99 ms, con una desviación estándar de 217.72 ms. Debido a que en el trabajo de [Clifton et al. \(1994\)](#) la duración promedio del intento de asir el juguete sonoro en la oscuridad era de 562 ms, este desfase resultaba inaceptable.

4.2 Etapa 2

El análisis de las primeras mediciones mostró importantes demoras en la sincronización entre los datos. En los sistemas operativos de propósito general., como Windows XP, la predictibilidad y la baja latencia son una cuestión secundaria. No aseguran la ejecución de una tarea en un tiempo determinado, como por ejemplo la actualización del valor del reloj del sistema cada 1 ms.

Debido al poco tiempo disponible para el desarrollo de la prueba y al hecho de que los controladores y librerías existentes estaban disponibles sólo para Windows XP, no se pudo optar por el uso de algún sistema operativo de tiempo real (como Linux con RTAI⁵, por ejemplo), que tienen un control estricto sobre los límites de tiempo de ejecución de cada tarea.

Lo que se hizo fue prescindir de la utilización del reloj del sistema operativo para sincronizar las capturas de video y movimiento, de manera tal que ambos programas posean una única referencia temporal externa. Se construyó un dispositivo temporizador consistente en un sistema electrónico microcontrolado que transmitía, a través de una conexión serie RS-232 de manera asíncrona, un contador binario de 24 bits cuyo valor se incrementaba a intervalos de 3.318 ms (ticks). Tanto el programa *ReachVisualizador* como el *Permios* fueron modificados para obtener la base de tiempo de este contador.

Por otra parte, en esta segunda etapa de validación el sistema pendular fue modificado de manera de obtener una mayor cantidad de muestras por ensayo y mayor precisión en la sincronización. Se colocó un indicador fijo que marcaba la posición de reposo del péndulo, posición que también fue relevada por el módulo de captura de movimiento para obtener una medida contra la cual comparar posteriormente con las imágenes del péndulo en movimiento. Se realizaron varias mediciones de la posición del sensor en reposo que fueron promediadas.

Al realizar nuevas mediciones con los cambios implementados en el sistema se encontró una disminución en la magnitud de los errores. El promedio de 32 observaciones arrojó un desfase promedio de -298.67 ms con una desviación estándar de 43.57 ms. Se mejoró un 50.22% el desfase y un 79.98% la desviación estándar respecto a la etapa anterior.

Estos resultados evidenciaron que el movimiento realizado por el sistema pendular había mejorado pero todavía no era lo suficientemente preciso y consistente. En este caso se conjeturó que la variabilidad era causada por las fuerzas de rozamiento presentes en el eje y el amortiguamiento producido en cada movimiento.

4.3 Etapa 3

Para salvar este último inconveniente se diseñó un nuevo sistema mecánico que permitiera representar un movimiento armónico simple “lo más puro posible”. Consistía en un motor eléctrico que movía un disco excéntrico al que se sujetó una varilla rígida, en cuyo extremo se colocó el sensor de movimiento (Figura 6). Se marcó un punto en el recorrido que fue relevado previamente con fines de comparación.

⁵ Real-Time Application Interface (www.rtai.org)

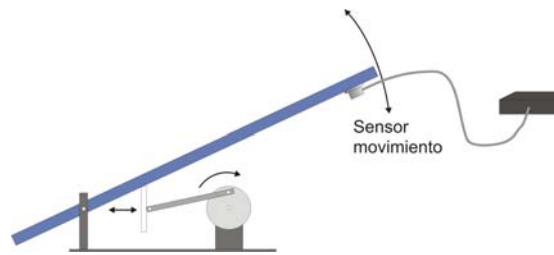


Figura 5: Representación esquemática del sistema mecánico

Se realizaron 175 ensayos, obteniéndose una reducción considerable del error de desfase promedio y de su desviación: -78.75 ms y 31.16 ms respectivamente. Se mejoró un 73.63% y un 28.48% respectivamente, con respecto a la etapa anterior.

A continuación se muestra un gráfico con el histograma de los desfases.

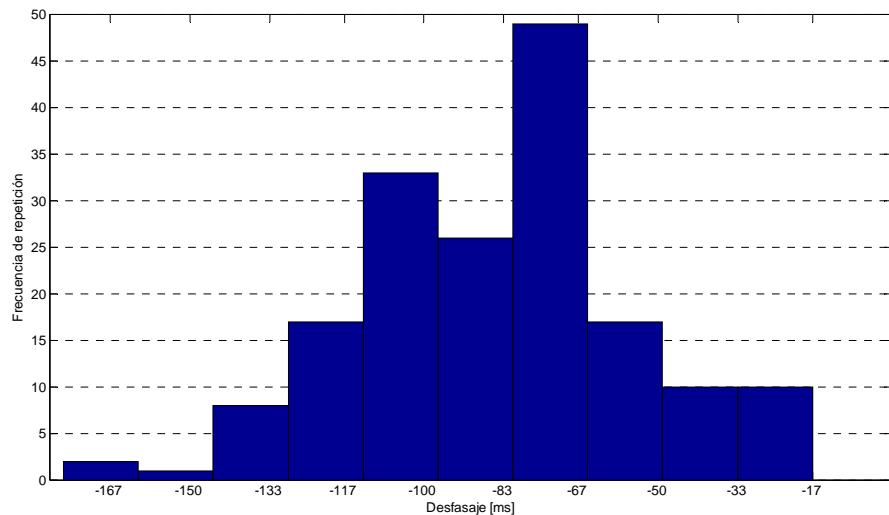


Figura 6: Histograma de los desfases

En este caso el desfase se mantuvo relativamente constante. La desviación estándar apenas superó el 5% de la duración promedio de los movimientos a medir. Además, como el error intrínseco al modulo de video es de 20 ms, sólo se podía mejorar la precisión en aproximadamente 10 ms. Por estos motivos, se optó por compensar en las pruebas de localización, el error de desfase promedio.

4.4 Etapa 4: Reducción de ruido

Para el cálculo del desplazamiento, se computó la diferencia de la posición entre muestras, obteniéndose así el desplazamiento instantáneo entre muestras para cada uno de los ejes $(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n)$.

$$\begin{aligned}\Delta x_n &= x_{n+1} - x_n \\ \Delta y_n &= y_{n+1} - y_n \\ \Delta z_n &= z_{n+1} - z_n\end{aligned}\tag{1}$$

El desplazamiento instantáneo Δs_n en 3 dimensiones está dado por

$$\Delta s_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2} \quad (2)$$

Los valores de velocidades instantáneas se calcularon en base a este desplazamiento.

$$v_n = \frac{\Delta s_n}{T_s} \quad (3)$$

Para el caso de la aceleración se siguió el mismo procedimiento.

$$a_n = \frac{\Delta v_n}{T_s} = \frac{v_{n+1} - v_n}{T_s} \quad (4)$$

Al calcular los valores de aceleración y velocidad a partir de la información medida, se observó la presencia de un error aleatorio (ruido) de gran importancia en los valores de aceleración y algo inferior en los de velocidad. Este ruido fue generado por la incertidumbre del sensor para determinar su posición (posee un error de precisión de ± 0.00254 m RMS⁶) y por su tiempo de muestreo. Si bien el período de muestreo (T_s) es de 16.66 ms aproximadamente, los valores de instantes de tiempo determinados por el sensor tienen una resolución de 1 ms, truncando los decimales. Realiza un redondeo de la siguiente forma: 16 ms – 17 ms – 17 ms, cada 3 muestras. Esto implica también un error en el tiempo de muestreo de ± 0.5 ms.

Se plantea ahora el problema de determinar con qué error están afectados los resultados de los cálculos (principalmente el de velocidad) realizados sobre los valores obtenidos por medición directa. Entonces, sabiendo que la aceleración es

$$a = f(x, t) = \frac{x}{t^2} \quad (5)$$

El error de la medición indirecta está dado por el entorno de la aceleración a , tal que abarque al intervalo de indeterminación a_{\max} y a_{\min}

$$\Delta a = \frac{1}{2}(a_{\max} - a_{\min}) \quad (6)$$

Usando el desarrollo en serie de Taylor y considerando sólo los términos de primer orden se puede hacer (Galles, 1985)

$$a_{\max} = f(x, t) + \left| \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} \right| \Delta t \quad (7)$$

$$a_{\min} = f(x, t) - \left| \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right| \Delta x - \left| \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} \right| \Delta t \quad (8)$$

Sustituyendo en (6) se obtiene la expresión

$$\Delta a = \left| \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} \right| \Delta t \quad (9)$$

$$\Delta a = \frac{\Delta x}{t^2} + 2x \frac{\Delta t}{t^3} \quad (10)$$

⁶ Raíz cuadrada media (Root Mean Square)

Se puede observar que el error relativo de la aceleración es directamente proporcional a la variación de posición entre muestras y es afectado inversamente por el tiempo de muestreo en forma cuadrática. Para pequeños movimientos, donde la variación del desplazamiento es pequeña, predomina el error de posición (Δx_n). Si solo tenemos en cuenta este error de posición del sensor y no el del tiempo, el menor error se obtiene en la condición de reposo donde $x = 0$. El error relativo mínimo estará dado por

$$\Delta a = \frac{\Delta x}{t^2} \quad (11)$$

Tomando $t \approx 16.66 \text{ ms}$ y $\Delta x = 0.00254 \text{ m}$, el error relativo de la aceleración es de $\Delta a \approx 9.144 \text{ m/s}^2$. Este será el menor error en el cálculo de la aceleración que se puede obtener en dichas condiciones de medición. Lo cual constituye un error claramente inaceptable para el propósito de la prueba.

Para ver gráficamente el error cometido, los datos arrojados por el sistema fueron comparados con un conjunto de datos creados por computadora que simulan un movimiento armónico ideal de características similares. En el análisis sólo se tuvo en cuenta el movimiento en el eje Y (Figura 3).

Los resultados de dicha comparación se muestran en los gráficos que siguen a continuación. En la Figura 7 se pueden observar los valores de desplazamiento del movimiento real y el ideal. Existe una contribución pequeña del error de precisión en dichos valores. En la Figura 8 están representados los valores de velocidad y de aceleración. Se puede apreciar que el error de precisión y el redondeo en los tiempos de muestreo, empiezan a afectar la precisión de dichos valores. Particularmente para el caso de la aceleración, el ruido presente hace casi imposible obtener una información válida.

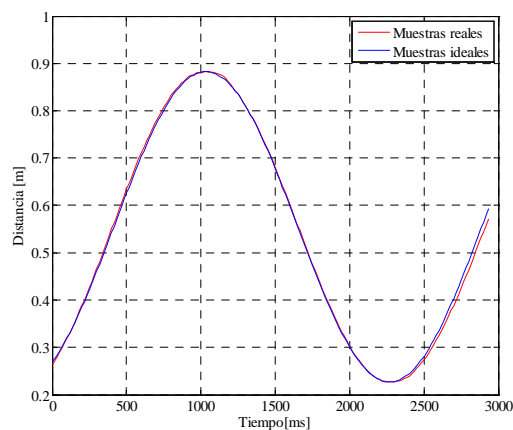


Figura 7: Representación del movimiento real/ideal en el eje Y.

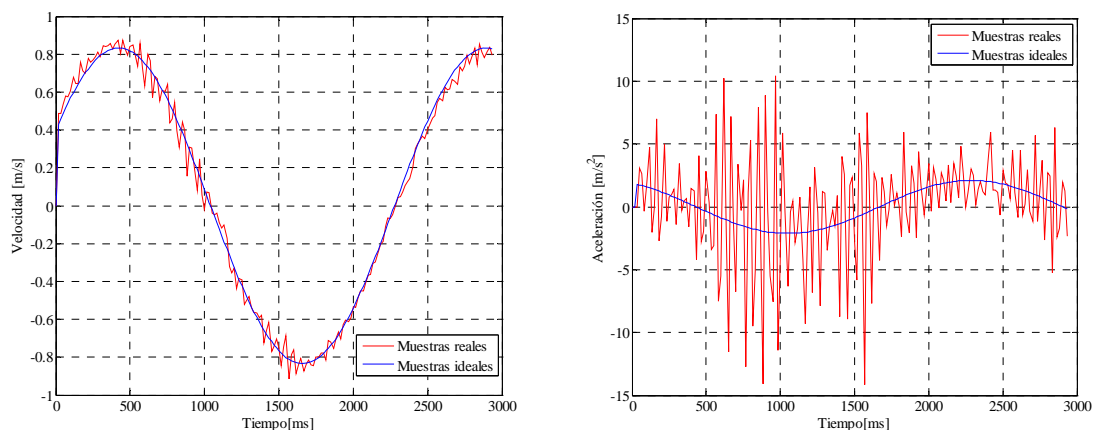


Figura 8: Representación de la velocidad (izquierda) y de la aceleración (derecha) real/ideal en el eje Y.

Se incorporaron técnicas de reducción del ruido en el programa *ReachDatos* de MATLAB. En el trabajo de referencia (Clifton et al., 1994) se reporta que se aplica un filtro para frecuencias superiores a los 20 Hz debido a que no existen movimientos por encima de este valor. Por consiguiente, se procedió a reducir el ancho de banda del ruido presente en el sistema, aplicando un filtro digital IIR (infinite impulse response) simétrico de Butterworth pasa-bajo de 20 Hz.

Por otro lado, debido a que se está trabajando con valores discretos de desplazamiento, se decidió realizar un sobre-muestreo de las coordenadas provistas por el sistema de posicionamiento (se elevó al doble la tasa de captura) a través de interpolación *spline*.

Finalmente, se calcularon los valores de velocidad y aceleración y sobre los mismos se aplicó la técnica de *moving average*⁷. Como parámetro de este algoritmo, se estableció en 7 la cantidad de muestras a promediar (tamaño de la ventana del filtro).

Además, debido a que el error mínimo relativo de aceleración es demasiado grande, se usó un filtro pasa-bajo de 10 Hz para “limpiar” las curvas y obtener mejores aproximaciones. Si bien esto altera los valores de aceleración, es posible obtener una estimación más precisa en las gráficas que describen el movimiento.

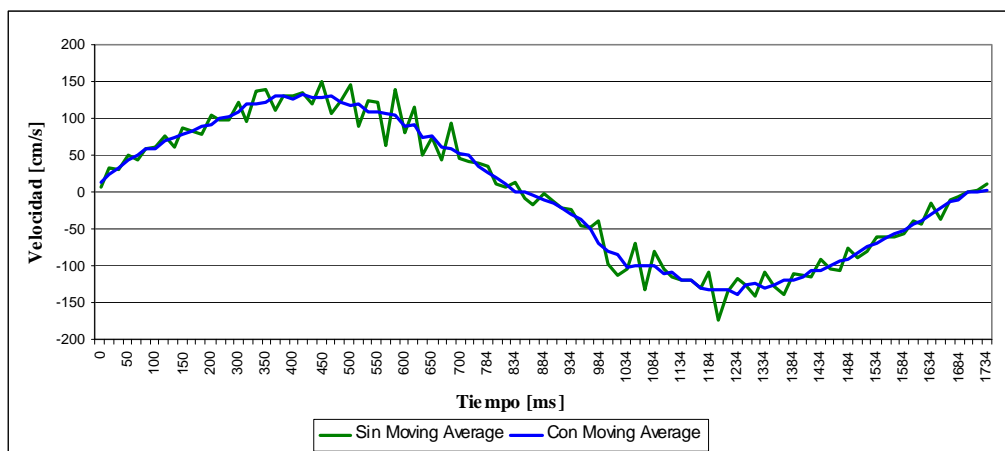


Figura 9: Velocidad del movimiento con y sin *moving average* en el eje Y.

⁷ El *moving average* es una técnica que se utiliza para analizar datos en series de tiempo que permite recalcularlos a partir de un promediado, de modo de eliminar valores extremos.

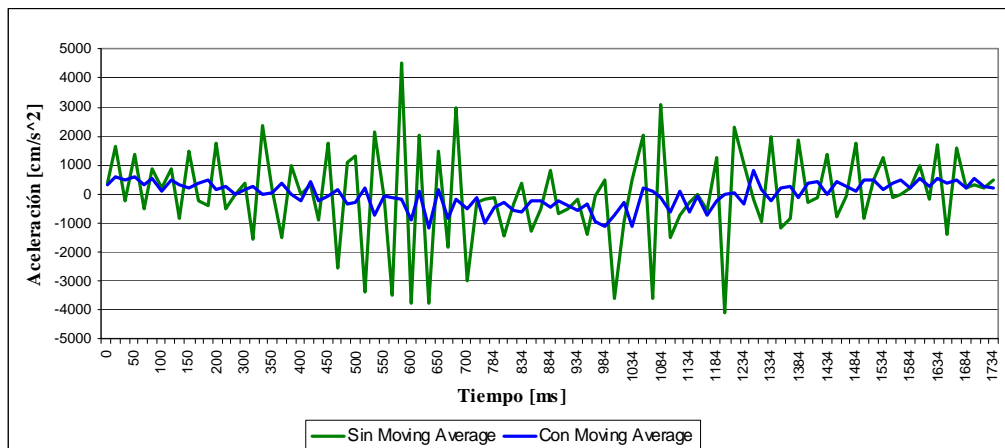


Figura 10: Aceleración del movimiento con y sin *moving average* en el eje Y.

5 VALIDACIÓN SUBJETIVA

Se analizaron los movimientos del niño teniendo en cuenta las categorías detalladas anteriormente. Los resultados mostraron que en los ensayos en la luz y en la oscuridad a distancia cercana, ambos niños obtuvieron el 100% de alcances exitosos. En los ensayos en la oscuridad a distancias lejanas el porcentaje de respuestas correctas fue de 63%.

A continuación se sintetizan los datos obtenidos respecto a la latencia y duración del movimiento en los ensayos en la luz y oscuridad a distancia cercana (Tabla 1).

		Latencia promedio inicial [s]	Duración promedio del movimiento [s]
Luz	6 meses	2.78 (0.95)	0.68 (0.42)
	12 meses	1.18 (1.46)	0.73 (0.44)
Oscuridad cerca	6 meses	1.16 (1.68)	0.27 (0.23)
	12 meses	1.43 (1.63)	0.30 (0.06)

Tabla 1: Latencia y duración de movimiento en los ensayos de luz y oscuridad cerca (entre paréntesis se consigna la desviación estándar).

Respecto a la latencia en iniciar el movimiento de alcance, no hubo diferencias entre la condición de luz y oscuridad, salvo para en el caso del infante de 6 meses que fue un poco más lento en iniciar el movimiento de alcance en la luz respecto a la de 12 meses (2.78 versus 1.18 segundos, respectivamente).

Respecto a la duración del movimiento, la conducta de ambos niños fue más rápida en la oscuridad que en la luz.

El análisis del rendimiento en función de la posición del sonajero, reveló que los infantes contactaron el juguete en un porcentaje similar de ensayos a 30° o a 60°.

Respecto a los parámetros de distancia recorrida, velocidad y aceleración (Tabla 2), se observó que en la oscuridad a distancia cercana la trayectoria recorrida fue mayor que en la luz (16.88 cm versus 10.30 cm) pero la velocidad media y máxima del movimiento fueron mucho mayores cuando los infantes no contaban con claves visuales (38.47 cm/s versus 13.78 cm/s y 71.29 cm/s versus 23.77 cm/s, respectivamente).

	Luz	Oscuridad cerca
Trayectoria recorrida promedio [cm]	10.30	16.88
Trayectoria inicial-final promedio [cm]	8.58	13.12
Velocidad promedio [cm/s]	13.78	38.47
Velocidad máxima [cm/s]	23.77	71.29
Aceleración media [cm/s ²]	73.94	287.69
Aceleración máxima [cm/s ²]	257.39	760.88

Tabla 2: Distancia, velocidad y aceleración en los ensayos de luz y oscuridad cerca.

En la [Figura 11](#) se representa la aceleración promedio de los últimos 200 ms antes de finalizar cada ensayo en condición de luz y oscuridad. Como puede observarse, los bebés desaceleraron el movimiento justo antes de tomar el sonajero, y esta desaceleración fue menor en los ensayos en la oscuridad cerca.

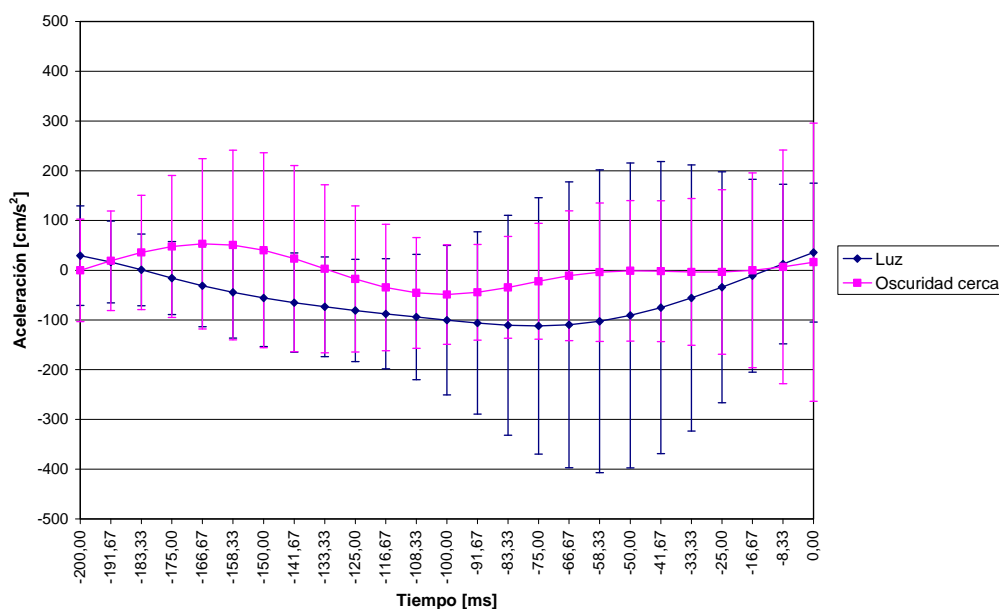


Figura 11: Aceleración promedio en los ensayos de luz y oscuridad en los últimos 200 ms antes de contactar el sonajero

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron en detalle las herramientas y los procedimientos seguidos para la validación objetiva y subjetiva de un sistema de medición y análisis para una prueba de localización auditiva en niños pequeños, aplicando la técnica de asir objetos sonoros en la oscuridad.

La validación objetiva realizada en sucesivas etapas permitió minimizar los errores de medición y aumentar la confiabilidad y validez de los datos obtenidos con el sistema. El desfase temporal final obtenido fue de -78.75 ms con una desviación estándar de 31.16 ms. Al lograrse un desfase relativamente constante con una desviación estándar que apenas superó el 5% de la duración promedio de los movimientos a medir, se optó por compensar este error en la prueba de localización. Además, se aplicaron técnicas de reducción de ruido para lograr una mejor estimación de los valores de aceleración.

Los resultados obtenidos con dos infantes indican que lograron localizar fuentes sonoras

sin claves visuales y fueron capaces de ajustar su movimiento en función de la información provista por la fuente sonora. En la misma dirección que los autores de referencia, el análisis del movimiento mostró que los infantes alcanzaron el sonajero en todos los ensayos en la luz y en la oscuridad a distancia cercana. En los ensayos a distancia lejana hubo una menor proporción de intentos de alcanzar el sonajero. Las características del movimiento de alcance en condición de luz y oscuridad fueron diferentes: en la oscuridad los niños fueron más rápidos y fue menor la desaceleración del movimiento justo antes de alcanzar el sonajero.

REFERENCIAS

- Blauert, J., *Spatial Hearing: the psychophysics of human sound localization*. Revised edition. The MIT Press, 1997.
- Clifton, R; Muir, D. Ashmead, D. and Clarkson, M., Is visually guided reaching in early infancy a myth. *Child Development*, 64 (4): 1099-1110, 1993.
- Clifton, R; Rochart, P.; Litovsky, R. and Perris, E., Object representation guides infant's reaching in the dark. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 17(2):323-329, 1991.
- Clifton, R; Rochart, P.; Robin, D. and Berthier, N., Multimodal perception in the control of infant reaching. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 20(4):876-886, 1994
- Galles, C., Sobre la propagación del error en las mediciones indirectas. *Revista Mexicana de Física*, 32(I):169-173, 1985.
- Muir, D. and Field, J., Newborn infants orient to sounds. *Child Development*, 50:431-436, 1979.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias a subsidios otorgados a Claudia Arias por la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT) de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina).

Además, se agradece especialmente al Dr. Luis Canali del Centro de Investigaciones en Informática para la Ingeniería (CIII) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, por sus valiosos comentarios y sugerencias durante el proceso de validación objetiva del presente estudio.