

# Localización acústica en 3D mediante DTI y DNI en un modelo biomimético usando grabación binaural

J. I. Galván, G. Miramontes, E. de la Rosa, M. A. Araiza. A, e I. de la Rosa

Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales,

Universidad Autónoma de Zacatecas,

Zacatecas, Zac. 98000.

TEL: +(492)9239407, ext. 1518,

correo-e: gatejo@yahoo.com, rumplestinski@hotmail.com

**Resumen** — Este trabajo presenta el análisis de diferencia de tiempo interaural (DTI) y de diferencia de nivel interaural (DNI) para diferentes tonos senoidales puros, usando grabación binaural y un maniquí tipo KEMAR, se obtienen las características de potencia y retardo de los tonos. Estas características permiten la correcta localización de tonos puros.

**Abstract** — This work presents the analysis of interaural time differences (ITD) and interaural level differences (ILD) for pure sine tones, using binaural recordings and a KEMAR kind manikin. The characteristics of power difference and time difference in the tones are obtained. These characteristics allow the correct localization of the acoustic source.

**Descriptores** — *Diferencia de tiempo interaural, diferencia de nivel interaural, localización acústica, modelo biomimético*

## I. INTRODUCCIÓN

**M**EDIANTE el sistema auditivo, los humanos somos capaces de detectar

sonidos tales como la música, la voz o el ruido, y al mismo tiempo somos capaces de determinar la posición de la fuente acústica con relativa facilidad. Por lo tanto, es muy interesante conocer este sistema, tanto física como fisiológicamente.

La localización define la capacidad del individuo de determinar la ubicación de una fuente sonora en el espacio. Sólo es posible a partir de la audición binaural, o binaural [1]. Con un solo oído no es posible localizar fuentes sonoras.

En este trabajo, mediante el uso de las técnicas binaurales se exploran los puntos clave para la localización acústica. El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección II se presentan los aspectos básicos y el sistema de referencia utilizado en este trabajo. En la sección III se describe el arreglo experimental. En la sección IV se muestran algunos resultados y finalmente en la sección V se dan las conclusiones de este trabajo.

## II. SISTEMA DE REFERENCIA

Para la grabación binaural se debe contar con un maniquí especialmente adaptado para éste propósito, el maniquí debe ser anatómicamente similar a la cabeza o a la cabeza y torso humanos. En la Figura 1 se puede apreciar un maniquí comercial.



Figura 1. Maniquí comercial para grabación binaural de Newman.

El sistema auditivo utiliza un conjunto de pistas para determinar la ubicación de la fuente sonora en el espacio. Necesitamos, para poder estudiarlas, un sistema de coordenadas [2], [3]. Una elección natural es establecer un sistema de ejes coordenados centrado en la cabeza (ver Figura 2).

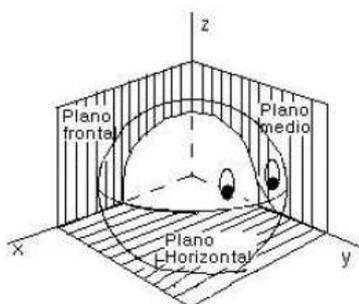


Figura 2. Sistema de coordenadas cartesianas.

Una alternativa importante es el sistema co-

ordenado interaural-polar [1]. Aquí primero se mide el ángulo de elevación como el ángulo desde el plano horizontal hasta un plano a través de la fuente y el eje X (que es el eje interaural). Después se mide el ángulo azimutal como el ángulo sobre el plano medio. Con esta elección, las superficies de elevación constantes son planos a través del eje interaural, y las superficies de azimut constante son conos concéntricos alrededor del eje interaural.

Para la localización del sonido, el cerebro realiza dos procesos, determina una dirección y una distancia. Para determinar la dirección de la fuente sonora se realizan a su vez dos pasos: determinación de un ángulo lateral y de un ángulo de elevación, para este propósito hace uso de la Diferencia de Tiempo Interaural (DTI) y la Diferencia de Nivel Interaural (DNI) entre otras.

Diferencia de tiempo interaural (DTI)

Para sonidos senoidales (tonos puros) las diferencias de tiempo son equivalentes a diferencias de fase entre las ondas sonoras que llegan a cada uno de los dos oídos, dado que para estas ondas se cumple [4]

$$\Delta t = \frac{\Delta \phi}{2\pi f}, \quad (1)$$

donde  $\Delta t$  es la diferencia de tiempo interaural,  $\Delta \phi$  es la diferencia de fase y  $f$  es la frecuencia.

La diferencia de fase es tal que no sólo es función de la distancia entre los oídos y la orientación de la cabeza, sino también de la longitud de onda de los sonidos. Para tonos puros de muy baja frecuencia (es decir, de gran longitud de onda) la diferencia de fase entre el sonido recibido por los dos oídos es una fracción de la longitud de onda comparativamente pequeña, aunque un oído esté di-

rectamente hacia la fuente sonora. Por ejemplo, si la distancia entre los dos oídos es aproximadamente 20 cm, esta distancia es sólo el 3% de la longitud de onda para una frecuencia de 50 Hz. Es difícil que una fracción tan pequeña se pueda observar. A medida que aumenta la frecuencia, disminuye la longitud de onda con lo que aumenta la diferencia de fase. Para una frecuencia de 800 Hz, la separación entre los dos oídos es aproximadamente media longitud de onda [5].

#### A. Diferencia de nivel interaural (DNI)

Las DNI se dan principalmente a partir de las diferentes distancias que deben recorrer las ondas para llegar a uno y otro oído, pero también por la sombra acústica producida por la cabeza del individuo (difracción de la onda) [4], [2].

Los sonidos de bajas frecuencias tienen longitudes de onda relativamente grandes con respecto a las dimensiones de la cabeza. El estudio de la difracción determina que cuando la longitud de la onda es suficientemente grande con respecto al obstáculo que encuentra la onda, ésta se difracta fácilmente y no se genera una "sombra acústica" (o, al menos, se produce una sombra acústica pequeña). Por el contrario, cuando las longitudes de onda son pequeñas, se produce poca difracción y por lo tanto existe una sombra acústica mayor [6], [7].

### III. ARREGLO EXPERIMENTAL

Para la medición de las características de audición es necesario un maniquí tipo KEMAR (Knowles Electronics Manikin for Acoustics Research) [8]. Existen varios modelos prefabricados en el mercado, pero para este proyecto se optó por construir un maniquí propio. Una cabeza de unicel hueca al centro y recubierta de latex, con oídos de latex tomados

de un molde de un oído humano, con canales auditivos internos que alojan un par de micrófonos de respuesta plana y alta ganancia, con respuesta en frecuencia en rangos humanos (20 Hz a 20000 Hz). (ver Figuras 3 y 4).



Figura 3. Maniquí tipo KEMAR.



Figura 4. Vista lateral del maniquí tipo KEMAR.

Para el montaje se utilizó una estructura metálica como se muestra en la Figura 5. Ahí se coloca una bocina que, a diferentes ángulos de azimuth y elevación, mantiene la misma distancia al maniquí.

Para la grabación de las muestras se utilizaron un par de micrófonos para grabación profesional marca Shure modelo Beta 98. Se utiliza un par para lograr el efecto binaural buscado. Para la captura y digitalización se utilizó una estación de trabajo de audio profesional Yamaha AW16G dadas las características de bajo ruido y capacidad de proporcionar alimentación phantom de 48V a los

micrófonos de condensador.

Se utilizó una versión de prueba del programa Cool Edit (trial version) en su versión 2.0, la cual permite la grabación multicanal desde la tarjeta de sonido.



Figura 5. Montaje del equipo en la cabina: Estructura metálica graduada en azimuth y elevación, maniquí y bocina.

Se generaron 4 diferentes tonos puros, uno de 500 Hz, uno de 2.5 KHz, otro de 7 KHz y por último uno de 10 kHz. Estas frecuencias fueron elegidas basándose en los experimentos de Paul Thomas Calamia [4], de donde se tomaron los picos de resonancia, que se encuentran en 2.5, 7 y 10 kHz. El tono de 500 Hz [1] se utiliza para mostrar el comportamiento de las bajas frecuencias y su influencia en la localización del ángulo de llegada.

#### IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### A. Cálculo del Azimuth

Para la identificación del ángulo de llegada de un sonido en azimuth hace falta calcular la distancia interaural de nuestro modelo, para esto se toman las ecuaciones de Lord Rayleigh [1] aplicadas a nuestro maniquí.

Para tonos puros se calcula que la diferencia de fase es igual a la diferencia de tiempo interaural dentro de los límites de la longitud de onda, tomando en cuenta el modelo de cabeza circular, la diferencia de tiempo

TABLA I  
DTI CALCULADA Y EXPERIMENTAL.

ángulo	calculado	obtenido
$\pm 90^\circ$	$\pm 0,654$ ms	$\pm 0,650$ ms
$\pm 60^\circ$	$\pm 0,566$ ms	$\pm 0,566$ ms
$\pm 30^\circ$	$\pm 0,327$ ms	$\pm 0,430$ ms
$00^\circ$	0.000 ms	0.000 ms

TABLA II  
ÁNGULOS DE LLEGADA: CALCULADO Y EXPERIMENTAL.

calculado	ángulo	obtenido	ángulo
$\pm 0,654$ ms	$\pm 90^\circ$	$\pm 650$ ms	$\pm 83,6^\circ$
$\pm 0,566$ ms	$\pm 60^\circ$	$\pm 566$ ms	$\pm 60,0^\circ$
$\pm 0,327$ ms	$\pm 30^\circ$	$\pm 430$ ms	$\pm 43,1^\circ$
$\pm 0,000$ ms	$\pm 00^\circ$	$\pm 0,00$ ms	$\pm 00,0^\circ$

interaural se define como  $\Delta t$  en función del ángulo de azimuth como se muestra en (2).

$$\Delta t = \frac{3a}{c} \sin(\theta) \quad (2)$$

En el caso del maniquí se usó (2), donde  $a$  es el radio de la cabeza (7.5 cm) y  $c$  es la velocidad del sonido (34400 cm/s).

Para el cálculo de la DTI se utilizó la frecuencia de 500 Hz, ya que según lo que reporta la bibliografía y la experimentación es la más adecuada para este propósito. En la Tabla I se muestran comparativamente los valores de tiempo interaural teórico y experimental

Para la obtención del ángulo de llegada o azimuth se despejó de la ecuación de Rayleigh el ángulo. En la Tabla II se muestran comparativamente los ángulos de llegada teóricos y obtenidos.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c\Delta t}{2a}\right). \quad (3)$$

B. Cálculo de elevación

Para determinar la diferencia en elevación se usaron los valores RMS de los tonos (señales senoidales) para saber con cuánta potencia llegaron las mismas a cada uno de los oídos desde las diferentes posiciones.

Hay que aclarar que no se están comparando los niveles de un oído con respecto al otro, sino que se comparan los niveles de cada uno por separado comparando los diferentes tonos notando que cada uno tiene un comportamiento particular dependiendo de la elevación (ver Figuras 6 a 13).

Los resultados obtenidos nos muestran un comportamiento regular de las diferentes frecuencias, es decir, cada frecuencia tiene un nivel de potencia definido y casi igual en ambos oídos para cada cambio en la altura. Estos niveles de potencia se pueden tomar como parámetros para encontrar la elevación, si se toma en cuenta que el cambio de potencia parece ser definido por la altura, por supuesto analizando solamente las señales son tonos puros y no una señal multifrecuencia.

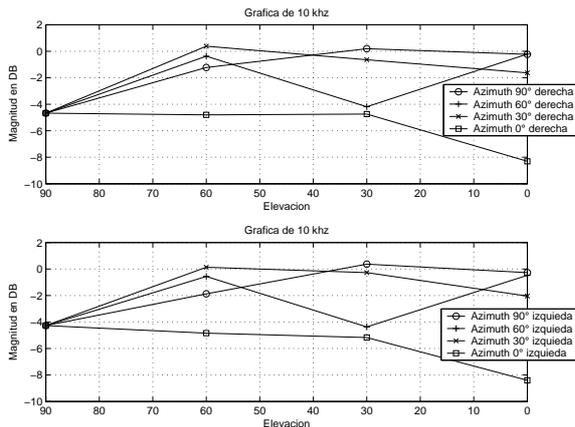


Figura 6. Comportamiento de la elevación de la señal de 10 kHz.

Del mismo modo se confirma que para la localización en el plano horizontal es suficiente con la diferencia de tiempo interaural, claro

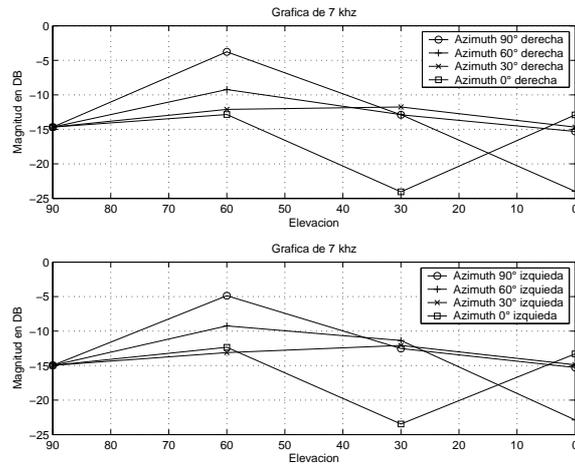


Figura 7. Comportamiento de la elevación de la señal de 7 kHz.

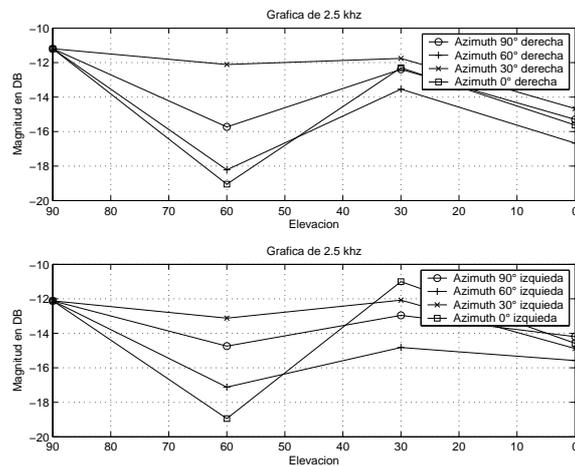


Figura 8. Comportamiento de la elevación de la señal de 2.5 kHz.

está, que las señales deben cumplir con las características de frecuencia requeridas, no menores de 500 Hz y no mayores de 1500 Hz.

V. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se concluye que es posible determinar características individuales de cada frecuencia que hacen posible su localización en altura, utilizando la información de un sólo canal, mientras que para determinar el azimuth sigue siendo más conveniente la DTI. Se concluye también, que en el caso de las señales multifrecuencia, es posi-

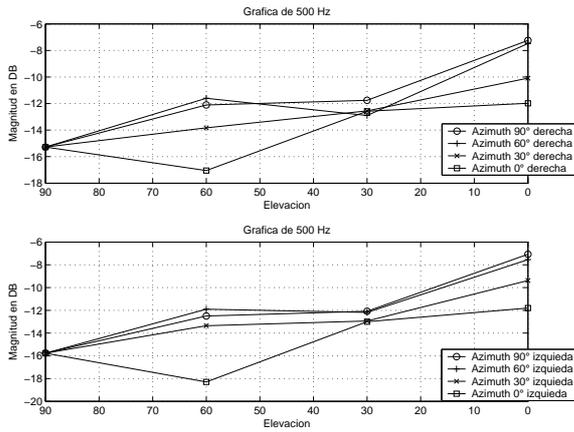


Figura 9. Comportamiento de la elevación de la señal de 0.5 kHz.

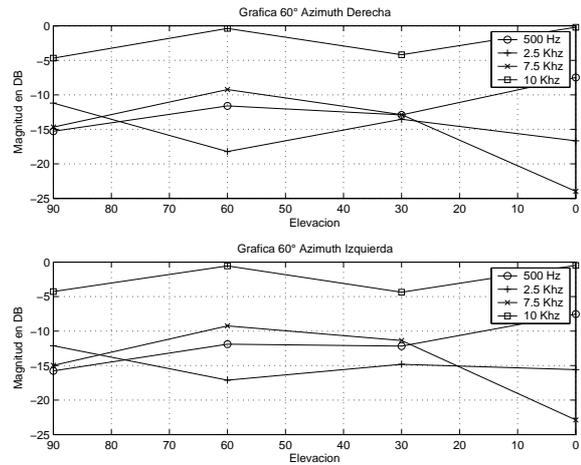


Figura 11. Comportamiento de la potencia a 60° de azimuth.

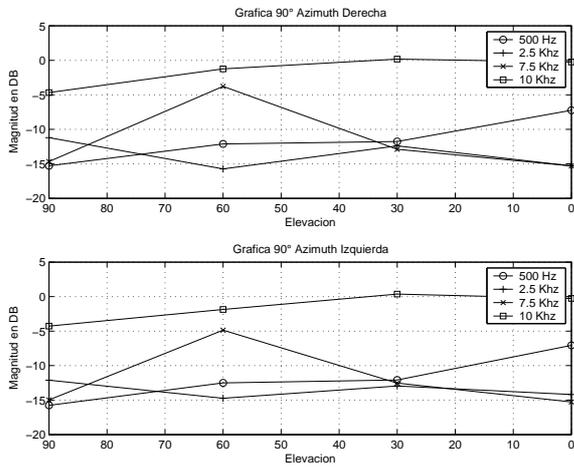


Figura 10. Comportamiento de la potencia a 90° de azimuth.

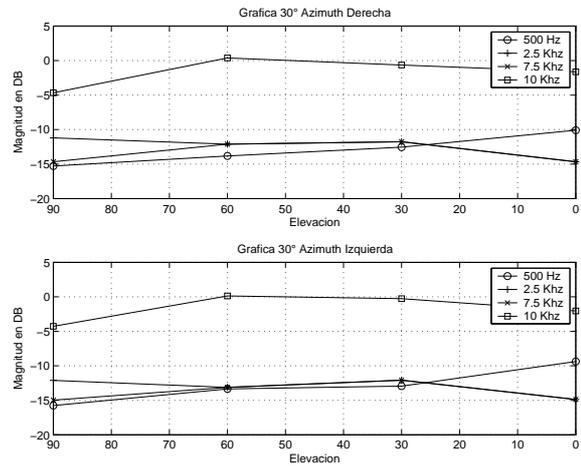


Figura 12. Comportamiento de la potencia a 30° de azimuth.

ble su localización horizontal debido a que las ondas de más alta frecuencia se modulan en las de baja frecuencia, por lo que la diferencia de tiempo interaural nos entrega información de la posición en azimuth, y la información de las diferentes frecuencias y sus niveles de potencia nos pueden entregar información sobre su altura.

Encontramos que la más mínima variación en cuanto a las características del modelo hacen grandes cambios en el comportamiento de las ondas, por lo que resulta que los modelos generales tienen errores en su aplicación,

debido a que toman modelos esféricos o redondos según sea el caso, cosa que en la naturaleza no encontramos de manera común.

### A. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se proponen varias mejoras al sistema de captura, principalmente, se propone una mejora en el maniquí, tanto en su anatomía general como en los materiales, el uso de monitores de campo corto como bocinas, ya que estos entregan una gran potencia de salida sin distorsión y tienen una respuesta en frecuencia bastante plana. Un

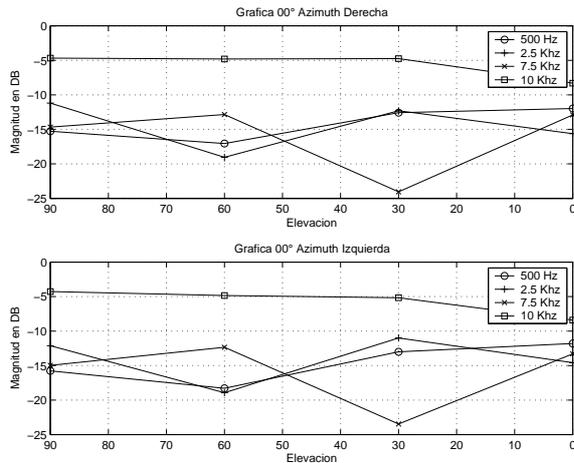


Figura 13. Comportamiento de la potencia a  $0^\circ$  de azimuth.

correcto modelado del oído interno, así como una adecuación más sólida del oído externo deberán entregar resultados más exactos. En la parte de la captura se propone contar con una cámara anecoica para las mediciones de referencia, y así poder comparar con las mediciones con ruido.

## VI. RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo otorgado por PROMEP con clave P/CA-68 2006-33-20. Jorge Galván agradece al cuerpo académico de PDS de la UAZ por su apoyo para el desarrollo de este trabajo, y a PROMEP, con la misma clave, por el apoyo con una beca durante la culminación de sus tesis de maestría.

## REFERENCIAS

- [1] Hartman, W. "How we localize sound", *Physics today* (1999) 24-29.
- [2] Park, T, "Interaural Level Difference Processing in the Lateral Superior Olive and the Inferior Colliculus", *J. Neurophysiol* 92 (2004) 289-301.
- [3] Miller, J. "Modeling Interaural Time Difference Assuming a Spherical Head", *Stanford University* (2001).
- [4] Calamaia, T. "Three-dimensional localization of a Close-range acoustic source using Binaural cues" . *University of Texas at Austin*. (1998)

- [5] Goupell, M., "Interaural fluctuations and the detection of interaural incoherence", *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (2), (2007) 1029-1045.
- [6] Stanley T., "Acoustic localization by interaural level difference", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)* (2005).
- [7] Hartman, W.. "Constant Interaural level differences and the level-meter model", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 112 (3), Pt. 1, (2002) 1037-1045.
- [8] Mahlon, B. "A Manikin Useful for Hearing Aid Tests Revisited". *ICA* (2004), 2443-2446