

# CLAVES PERCEPTUALES SOBRE DIRECCIONALIDAD Y ESPACIALIDAD DEL SONIDO

NICOLAS A. MASERA<sup>1</sup>, JUAN I. MORALES<sup>1</sup> Y ANA M. MORENO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Electrónica. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC). Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, CP X5016ZAA, Córdoba, Argentina  
seat\_peugeot@hotmail.com, morales.juan.ignacio@gmail.com,  
anamariamoreno88@gmail.com

**Resumen** – El sistema auditivo es un sofisticado procesador espacial que le permite al individuo detectar y posicionar fuentes sonoras en el espacio y además suministra información para distinguirla. La totalidad de los distintos entornos sonoros poseen características sonoras envolventes, que a su vez son captados por el ser humano desde su cualidad de escucha omnidireccional o de 360°. Jhon W. Strutt (Lord Rayleigh) propone en su trabajo “Teoría Duplex” que en el proceso de localización de una fuente sonora intervienen dos factores: las diferencias interaurales de nivel presión sonora y las diferencias de tiempos de arribo de las ondas sonoras. Estas diferencias ofrecen información en el plano horizontal (azimut) de las fuentes sonoras, pero no ofrecen información sobre su elevación, en particular si se ubican a medio camino entre ambos oídos. Investigaciones posteriores aportaron a indicar que también tienen influencias la anatomía humana en la percepción de la ubicación de la fuente sonora dando lugar a la llamada función de transferencia relativa a la cabeza (HRTF). La capacidad auditiva que permite asociar el sonido al espacio en el cual se propaga se denomina espacialidad. Esta depende de la distancia que hay entre la fuente y el sonido, de las reflexiones tempranas generadas por las paredes u obstáculos que impiden que la onda se aleje de la fuente, de la reverberación producida por las reflexiones tardías del sonido y por último, del movimiento de la fuente. En este trabajo se analizan en forma sintética las claves perceptuales relacionadas a la direccionalidad y espacialidad del sonido en seres humanos. La importancia del conocimiento de las mismas permite generar y mejorar sistemas de audio con características tales que permiten una capacidad de distribución espacial de las fuentes creando una sensación de realismo.

## 1. INTRODUCCIÓN

El oído humano es capaz de situar en el espacio una fuente de sonido. Esto lo realiza conjuntamente con la configuración anatómica y el procesamiento cerebral de cada oyente.

En la actualidad se conocen tres factores que permiten a los seres humanos la localización del sonido: las diferencias interaurales de intensidad y tiempo, y las funciones de transferencia relativas a la cabeza, cuyos parámetros están estrictamente relacionados con las características fisiológicas de cada individuo.

Durante el siguiente análisis vamos a considerar, en primer lugar, los fenómenos relacionados con la audición al aire libre. De esta manera, percibimos solo aquellas señales que parten directamente de la fuente y se propagan sin obstáculos. Esto lo podemos referir a aquellas experiencias que se realizan en una cámara anecoica, en la cual las reflexiones son prácticamente anuladas. Seguidamente, especificaremos los parámetros relacionados con la percepción espacial en recintos, considerando algunas particularidades.

## 2. LOCALIZACIÓN DEL SONIDO

Cuando un sonido proviene de algún lugar del espacio, una persona es capaz de localizar su procedencia en azimut, elevación y distancia. A partir de los estudios realizados por Lord Rayleigh, en la

Teoría Duplex [1], la localización de las fuentes se veía en función de dos parámetros: diferencias interaurales de tiempo y amplitud, conocidas como ITD “Interaural Time Difference” e ILD “Interaural Level Difference”. Sin embargo, hace unos años atrás, se probó la importancia del pabellón auricular para reconocer fuentes moviéndose hacia arriba y abajo. Por medio de experimentos prácticos, se llega a la conclusión de que la respuesta en frecuencia del sonido percibido es individual.

### 2.1 Localización en el plano horizontal

Es necesario referirnos a un sistema de coordenadas, por medio del cual podremos especificar los parámetros que tiene en cuenta el sujeto para ubicar una fuente de sonido. Para ello se recurre al sistema de coordenadas esféricas en el que se identifican tres planos, como muestra la Figura 1.

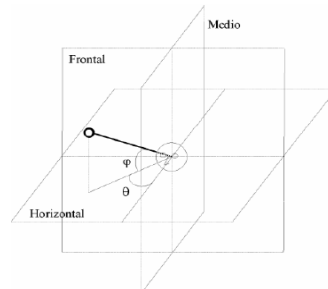


Figura 1: Planos relativos al oyente y ángulos de posicionamiento de la fuente.

En éste se define la posición de la fuente a través de: una distancia ( $r$ ) y dos ángulos, uno medido en el plano horizontal designado por  $\theta$  (azimut) y otro que se eleva sobre este plano y mide la pendiente del vector con origen en el centro de la cabeza del oyente y el extremo en la fuente que es  $\phi$  (elevación) [2].

#### -Diferencias interaurales de intensidad (ILD).

Las ILD 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 producida por la cabeza del individuo (difracción de la onda). Con lo cual es evidente que el ILD es dependiente de la frecuencia.

Una fuente sonora ubicada en una posición nodo, es decir, directamente al frente, atrás, arriba o abajo del oyente, será percibida con igual nivel de intensidad acústica por cada uno de los oídos. Si la fuente sonora es variada unos cuantos grados a la izquierda o derecha de esta posición inicial, la percepción de nivel se inclinará hacia el oído que se encuentre más cercano a la fuente sonora. Los oídos se encuentran simétricamente ubicados a los lados de la cabeza y están separados aproximadamente por 15 cm.

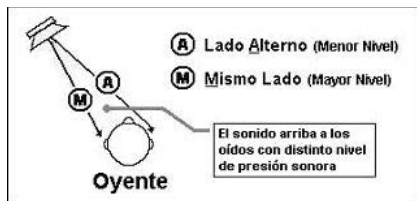


Figura 2: Diferencia de Intensidad Inter-Aural (IID).

Para frecuencias de 500 Hz la longitud de onda del sonido es de unos 69 cm, unas tres veces el diámetro promedio de una cabeza humana. La difracción es poca. Para frecuencias de 4 kHz (longitud de onda del orden de los 8,5 cm) la sombra acústica es importante.

Las ILD son prácticamente despreciables para frecuencias inferiores a los 500 Hz, pero pueden ser de hasta 20 dB para frecuencias mayores de 5 kHz, [3].

En la Figura 3 podemos observar cómo afecta el ángulo acimutal para diferentes bandas de frecuencia.

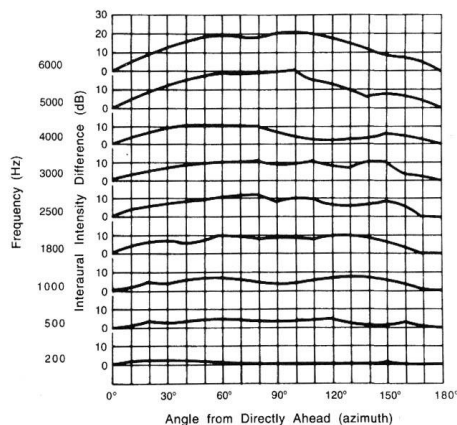


Figura 3: Variación del ILD en función del ángulo.

#### -Diferencias interaurales de tiempo (ITD).

Como es posible apreciar en la Figura 4, el sonido llega a los oídos en momentos diferentes debido a que este recorre diferentes caminos, esta diferencia de tiempos es el ITD. Es posible calcularlo de forma geométrica según la cual se llega a una expresión

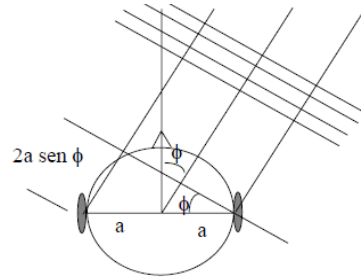


Figura 4: Diferencia de Tiempo Inter-Aural (ITD).

para las ITD:

$$ITD: \frac{a}{c} (\phi + \sin \phi), -90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \quad (1)$$

Según la ecuación (1) la diferencia es cero cuando la fuente está justo delante del sujeto y tiene un máximo cuando la fuente está en un lado. Lo cual para una cabeza humana típica el ITD es de 0,7 ms, [4]. Esta situación se explica en la Figura 5.

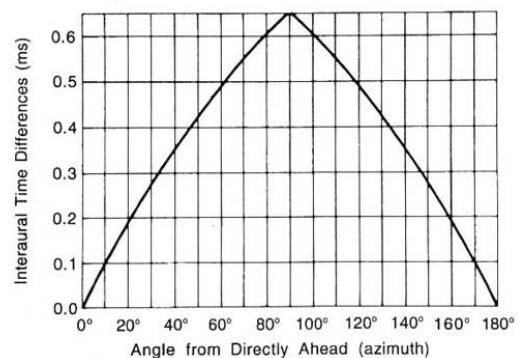


Figura 5: Retraso temporal en función del ángulo.

La diferencia de fase que se produce es consecuencia no solo de la distancia de los oídos y la orientación de la cabeza, sino que además, es función de la longitud de onda de los sonidos. A partir de frecuencias cuya mitad de longitud de onda sea la dimensión del diámetro de la cabeza, alrededor de 800Hz [5], se genera una situación ambigua en la que el sistema auditivo no es capaz de interpretar la información de fase en relación con el tiempo relativo de llegada a cada oído.



Figura 6: En alta frecuencia, la ITD pierde efectividad.

Por lo tanto, según la Teoría Dúplex, para frecuencias altas, la localización se debe fundamentalmente a la intensidad, mientras que para bajas frecuencias la localización que domina es la debida a la diferencia de fases y tiempos de retardos en el oído. Para frecuencias intermedias los seres humanos utilizan tanto la IID como la ITD en forma combinada.

## 2.2 Localización en el plano de elevación

En el plano medio las ondas sonoras llegan a los oídos al mismo tiempo y con la misma intensidad, por lo que no es posible localizar la fuente por medio del IID ni del ITD.

Experimentos en éste campo concluyeron que la cabeza y el pabellón auricular modifican el espectro de los sonidos en relación al ángulo de incidencia del sonido con respecto a la cabeza. Esto dio lugar a las HRTF (Head-Related Transfer Functions) o funciones de transferencia relativas a la cabeza. La HRTF describe las influencias que ejerce la anatomía humana en la percepción de la ubicación de la fuente sonora y la respuesta de amplitud y fase en función de la frecuencia al cruzar el sonido para llegar finalmente a ambos tímpanos [6].

## 2.3 Movimientos

En el análisis anterior se ha supuesto que el observador es incapaz de girar la cabeza con el fin de encontrar el azimut de la fuente. Sin embargo, este movimiento propio del individuo es una herramienta muy útil que ante una gran incertidumbre, el individuo mueve la cabeza y de esta manera se varía la posición de los oídos respecto al foco sonoro, obteniendo más datos para que el cerebro determine el origen del sonido.

## 3. SONIDOS RETARDADOS

En cualquier situación auditiva, el oído y el cerebro tienen la notable capacidad de reunir todas las reflexiones que llegan aproximadamente 50 milisegundos después que el sonido directo y combinándolas se obtiene la impresión de que todo este sonido es de la dirección de la fuente original, a pesar de que están involucradas reflexiones de otras direcciones. La energía de sonido integrada en este período también da una impresión de que se ha agregado sonoridad.

No debería ser una sorpresa que el oído humano fusiona todos los sonidos que llegan durante una ventana de tiempo determinado, ya que nuestros ojos fusionan una serie de imágenes fijas en el cine dándonos la impresión de continuo movimiento. La velocidad de presentación de las imágenes es importante: debe haber al menos 16 imágenes por segundo (intervalo de 62 milisegundos) para no ver una serie de imágenes fijas o un parpadeo. La fusión auditiva funciona mejor durante los primeros 20 o 30 milisegundos, por encima de 50 a 80 milisegundos dominan los ecos discretos.

### 3.1 Efecto de precedencia o efecto Haas

Helmut Haas, médico alemán, describió la siguiente experiencia para estudiar los efectos de la variación del retardo en la percepción del sonido, en su tesis de doctorado en 1949. Se ubicó a una persona a 3 metros de distancia de dos altavoces en línea, dispuestos de modo tal que forman un ángulo de 45 grados con la misma y con el centro del sistema, en condiciones aproximadamente anecoicas. Un altavoz reproducía un sonido único y el otro el mismo sonido retrasado en el tiempo. El oyente tenía la posibilidad de ajustar un atenuador hasta que el sonido “directo” iguale el sonido “reflejado”, es decir hasta que el sonido fuera percibido como saliendo del centro del sistema.

Investigaciones previas habían encontrado que retrasos muy cortos (menos de 1ms) confunden el discernimiento de la dirección de la fuente, creando la sensación de una fuente virtual que parece desplazarse desde el frente hacia el lado que no experimenta retardo [6]. Retrasos más grandes que estos no afectan a nuestro sentido de dirección. La Figura 7 ejemplifica este comportamiento para: dos señales sin retraso (a); la señal derecha retrasada 0.3ms, la fuente virtual se mueve a la izquierda (b); la señal derecha retrasada 0.6ms, la fuente virtual deja de moverse (c).

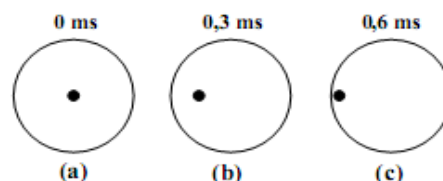


Figura 7: Desplazamiento de la fuente virtual de acuerdo al retraso.

Haas encontró que en retrasos de 5 a 35 ms el sonido será percibido saliendo del altavoz directo y el sonido del altavoz retrasado tiene que ser aumentado 10 dB por encima del directo antes de que suene como un eco [7]. Este es el **efecto de precedencia**, o **efecto Haas**.

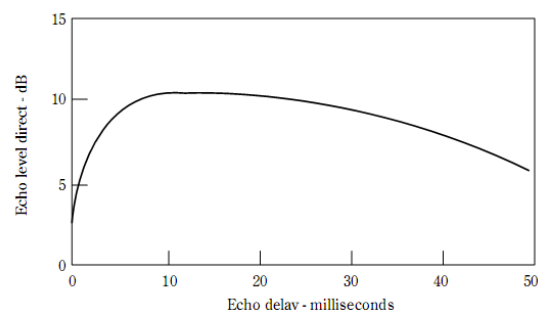


Figura 8: Nivel necesario del sonido retrasado para ser percibido como eco.

En una sala, la energía reflejada que llega al oído en el plazo de 35 ms se integra con el sonido directo y se percibe como parte del sonido directo en lugar de sonido reverberante. Estas primeras reflexiones aumentan la sonoridad del sonido y resultan en una

agradable modificación de la impresión del mismo, ampliando la fuente de sonido primaria.

La zona de transición entre la integración de los retrasos menores de 35 ms y la percepción del sonido retardado como eco discreto es gradual, y por lo tanto, algo indefinido. Algunos investigadores fijan la línea divisoria en 1/16 de segundo (62 ms), otros en 80 ms y otros en 100 ms, más allá del cual no hay duda acerca de la diferenciación del eco.

### 3.2 Ejemplo: Refuerzo de sonido de una sala

El refuerzo de sonido para salas de reunión, utilizado para amplificar la voz humana en discursos y conferencias, es preferiblemente diseñado como un sistema central (un solo altavoz o varios altavoces combinados muy cercanos entre sí). Esto produce una impresión auditiva natural ya que la dirección del altavoz se aparta poco de la fuente original. Su desventaja, en comparación con un sistema descentralizado, es que debe trabajar con mayor potencia de salida ya que ésta aumenta con el cuadrado de la distancia a recorrer. La Figura 9 representa el esquema de un sistema de altavoz central.

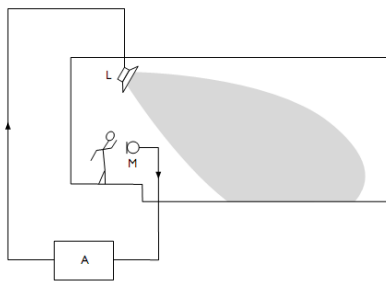


Figura 9: Sistema de refuerzo sonoro centralizado

En salas muy grandes o muy largas puede ser difícil cumplir la condición de distancia máxima de inteligibilidad del habla con un solo altavoz o grupo de altavoces. Entonces es más práctico subdividir la distancia total por el uso de varios altavoces, convenientemente distribuidos en varias secciones y cumpliendo la condición señalada. Según el efecto Haas, el nivel de la señal del altavoz más cercano puede superar el nivel de la fuente original en hasta 10dB sin destruir la ilusión de que todo el sonido recibido es producido por ésta. La condición para que esto suceda es que en la posición del oyente, la señal eléctrica que alimenta el altavoz más cercano debe ser retrasada un tiempo  $\tau$  de acuerdo con la diferencia de distancia a la fuente original.

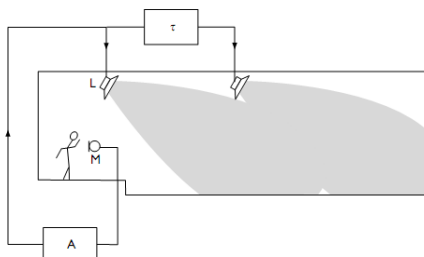


Figura 10: Sistema de refuerzo sonoro descentralizado, con aplicación de retardo electrónico

## 4. ESPACIALIDAD

La espacialidad es la característica del sonido que nos da información para ubicar la fuente que lo produce, y estimar por ejemplo las dimensiones de una habitación o una sala sin necesidad de recurrir a la vista [8]. También permite determinar la distancia a la cual se encuentra la fuente sonora.

La espacialidad del sonido depende de varios factores, que se enumeran a continuación.

### 4.1 Distancia entre la fuente y el sonido

La distancia que existe entre la fuente y el sonido está vinculada a la familiaridad que se tenga con una fuente sonora específica. A mayor distancia, la presión sonora es menor, lo que hace que si se conoce la fuente, se pueda tener una idea de la distancia. [6]

Por ejemplo, si escuchamos a alguien hablar normalmente, podemos saber si se encuentra cerca o lejos. Si se trata de una fuente desconocida, el cerebro la asociará inconscientemente con alguna fuente que resulte más familiar.

### 4.2 Reflexiones tempranas

En campo libre, la onda sonora generada por una fuente se aleja indefinidamente atenuándose hasta volverse inaudible, ver Figura 11.

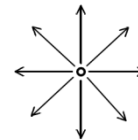


Figura 11: Una fuente sonora en campo abierto: el sonido se aleja indefinidamente de la fuente.

En un ambiente cerrado, la onda sonora se refleja en las paredes múltiples veces, ver Figura 12. Las primeras reflexiones se denominan reflexiones tempranas. Las reflexiones tempranas proveen al sistema auditivo una clave temporal que se relaciona con la distancia entre las paredes, lo cual a su vez se vincula al tamaño del ambiente. Esto crea la sensación de ambancia. [6]

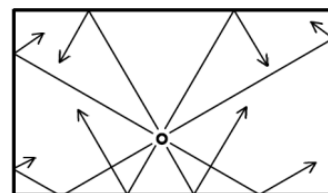


Figura 12: Una fuente sonora en un ambiente cerrado: el sonido se refleja una y otra vez en las superficies del recinto (paredes, techo y piso).

### 4.3 Reverberación

El fenómeno de la reverberación se produce como consecuencia de las numerosas reflexiones tardías del sonido. Mientras que las primeras reflexiones (las reflexiones tempranas) están distanciadas considera-

blemente, las subsiguientes comienzan a superponerse entre sí, debido a que aparecen las reflexiones de las reflexiones, y luego las reflexiones de las reflexiones de las reflexiones, y así sucesivamente. Esto lleva a que al cabo de unos pocos instantes se combinen miles de reflexiones que dan origen a la reverberación (Figura 13) [6].

El efecto más conocido de la reverberación es el hecho de que el sonido se prolonga aún después de interrumpida la fuente. Por ejemplo si golpeamos las manos, aunque el sonido generado es muy corto, permanece en el ambiente durante algunos instantes. El tiempo de permanencia, o tiempo de reverberación, depende de las características acústicas del ambiente, y nos da una clara sensación de espacialidad que puede y debe ser aprovechada en audiotécnica para evocar ambientes de gran realismo.

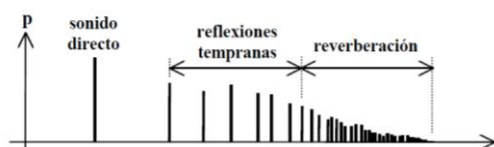


Figura 13: Reflexiones tempranas y reverberación en un ambiente cerrado.

#### 4.4 Movimiento de la Fuente

Muchas fuentes son fijas, pero otras son móviles, y la movilidad es percibida a través no solo del desplazamiento evocado por la dirección de procedencia del sonido, sino por el denominado efecto Doppler, por el cual la frecuencia de una fuente móvil parece cambiar. Así, cuando una ambulancia se acerca a nosotros, la altura (frecuencia) del sonido emitido por la sirena es mayor (más agudo) que cuando la ambulancia se detiene. Cuando, contrariamente, ésta se aleja, la altura baja, (más grave). Este efecto sólo rara vez se utiliza en música, ya que normalmente se supone que los instrumentos musicales se mantienen en una posición determinada, o los eventuales desplazamientos se producen con lentitud, siendo el cambio de frecuencia imperceptible [6].

Tiene aplicación, sin embargo, en las bandas de sonido de películas o videos, ya que permite simular con mayor realismo una fuente móvil (típicamente un vehículo).

#### 5. CONCLUSIONES

La capacidad del ser humano de localizar fuentes sonoras se basa en las diferencias interaurales de intensidad y tiempo, y en la función de transferencia del oído del individuo. Estos factores tienen distinta importancia de acuerdo a la frecuencia, intensidad y la distancia a la fuente sonora.

El entorno sonoro es igualmente importante ya que produce efectos que afectan la percepción notablemente, y deben ser tenidos en cuenta tanto como las características de la fuente. El conocimiento de fenómenos como la reverberación, el efecto Haas

y el efecto Doppler permite comprender en profundidad la percepción auditiva y su posible aplicación en sistemas sonoros.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] <http://www.conacyt.mx/comunicacion/revista/204/Articulos/Sonido3D/Popups/BiografiaRayleigh.htm>
- [2] Cetta Pablo, “*Localización Espacial del Sonido*”. Artes Multimediales- IUNA.
- [3] <http://audio3d.blogspot.es/>
- [4] [http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_on\\_d\\_1/trabajos\\_05\\_06/io5/public\\_html/2.2.htm#COMPLEJOS](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_on_d_1/trabajos_05_06/io5/public_html/2.2.htm#COMPLEJOS)
- [5] Begault D. R. “*3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*”. National Aeronautics and Space Administration. California, EEUU. Abril 2000.
- [6] Miyara F. “*Acústica y Sistemas de Sonido*”. UNR Editora. Argentina. 2004.
- [7] Everest F.A. “*The Master Handbook of Acoustics*”. McGraw-Hill. EE.UU. 2001.
- [8] Kuttruff H. “*Acoustics*”. Taylor & Francis. Alemania. 2006.
- [9] <http://www.iie.fing.edu.uy/ense/assign/dsp/proyectos/2002/localizacion/motiva.htm>

#### 7. DATOS BIOGRÁFICOS

**Nicolas A. Masera**, nacido en Villa del Rosario, Provincia de Córdoba, el 20/01/1988. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Sus intereses son: microcontroladores, electrónica del Automotor y Sistemas de Audio. E-mail: 51644@electrónica.frc.utn.edu.ar

**Juan I. Morales**, nacido en Chacabuco, Buenos Aires, el 12/07/1988. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Actualmente es becario de servicios en el Laboratorio de Comunicaciones del Dpto. de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Sus intereses son: electroacústica, procesadores de audio y sistemas de sonido. E-mail: 51836@electrónica.frc.utn.edu.ar

**Ana M. Moreno**, nacido en V. Ojo de Agua, Provincia de Santiago del Estero, el 31/08/1988. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Sus intereses son: electroacústica, bioelectrónica, electrónica digital. E-mail: 51718@electrónica.frc.utn.edu.ar