

# Desarrollo de un Sistema de Medición de Parámetros Acústicos Biaurales

## Development of a Measurement System of Binaural Acoustic Parameters

Nilda Vechiatti, Federico Iasi, Nicolás Tati, Alejandro Armas, Daniel Tomeo, Luis Cosentino

Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.  
Camino Centenario y 506 S/N, Gonnet, Argentina

ciclal@gba.gob.ar

Recibido: 25/04/19; Aceptado: 08/08/19

**Abstract**— This work is about the development of a system for the recording of holophonic sound and the obtaining of binaural acoustic parameters that characterize the spatial perception of sound. At the first part, the implementation of a prototype of a low cost acoustic mannequin, head and torso simulator (HATS), is presented, to which its anthropometric characteristics and frequency responses were analyzed. The second part describes the developed algorithms to process the data measured through the HATS. Finally, some results calculated with the developed system are shown, and compared with those obtained through a commercial software. The applications of the developed measurement system are several, among them can be mentioned: the recording of 3D sounds, the calculation of subjective parameters in room acoustics, or the measurement of noise doses to assess the hearing damage of people exposed to noise through headphones.

**Keywords:** HATS; acoustic mannequin; impulse response; binaural measurements.

**Resumen**— Este trabajo trata del desarrollo de un sistema destinado al registro de sonido holofónico y a la obtención de parámetros acústicos biaurales que caracterizan la percepción espacial del sonido. En la primera parte se presenta la implementación de un prototipo de maniquí acústico de bajo costo, simulador de cabeza y torso (HATS), al que se le analizaron sus características antropométricas y sus respuestas en frecuencia. En la segunda parte se describen los algoritmos desarrollados para procesar los datos medidos a través del HATS. Finalmente se muestran algunos resultados calculados con el sistema desarrollado y se los compara con los obtenidos mediante un software comercial. Las aplicaciones del sistema de medición desarrollado son varias, entre ellas pueden mencionarse: el registro de sonidos 3D, el cálculo de parámetros subjetivos en acústica de salas, o la medición de dosis de ruido para evaluar el daño auditivo de las personas expuestas a ruido a través de auriculares.

**Palabras clave:** HATS; maniquí acústico, respuesta impulsiva; mediciones biaurales.

### I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la línea de investigación de estudio de sonidos holofónicos, llevada a cabo en el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia LAL-CIC, se decidió implementar un sistema de medición de parámetros acústicos biaurales, conformado por las siguientes partes: un maniquí acústico (o simulador de cabeza y torso, que incluye micrófonos dentro de los canales auditivos), una placa de audio, y rutinas de adquisición y procesamiento de datos.

En este trabajo se presentan la metodología utilizada para el desarrollo y las pruebas de verificación del prototipo de maniquí acústico, la selección de micrófonos y placa de audio, y los aspectos más relevantes de las rutinas de software desarrolladas para el procesamiento de las señales de los micrófonos. A modo de ejemplo, también se muestran algunos resultados de parámetros medidos con el sistema desarrollado y su comparación con los obtenidos utilizando un software comercial profesional.

### II. IMPLEMENTACIÓN DEL MANIQUÍ ACÚSTICO

#### A. Verificación Antropométrica del maniquí

Para el simulador de cabeza y torso (también conocido por la sigla HATS, Head and Torso Simulator), se desarrolló un prototipo basado en la adecuación de un maniquí de los utilizados para exhibir prendas de vestir en tiendas comerciales, pues uno de los requisitos del proyecto era que fuese de bajo costo y, además, se disponía de un maniquí de ese tipo. Para ello, se tuvieron en cuenta las recomendaciones de la International Telecommunication Union (ITU): ITU-T P.58 [1] e ITU-T P.57 [2].

En una primera etapa se realizaron mediciones de las características antropométricas del torso y de la cabeza del maniquí comercial siguiendo los lineamientos de la Recomendación P.58. A continuación, y de acuerdo con lo establecido en la Recomendación P.57, se evaluaron orejas de silicona moldeadas con características similares a las de orejas humanas.

1) *Verificación antropométrica del torso y de la cabeza:* Para la realización de estas mediciones fue necesario diseñar un sistema basado en planos de referencia, compuesto por cinco placas de madera colocadas en

cuadratura, formando un cajón abierto lateralmente, donde se ubicó el maniquí. Su eje de rotación y su plano vertical de simetría se determinaron utilizando un sistema de hiloplomada. En la Fig. 1 puede apreciarse los ejes y planos de referencia de un HATS, y las dimensiones a obtener. En la Fig. 2 se presenta la metodología utilizada para la obtención de las dimensiones.

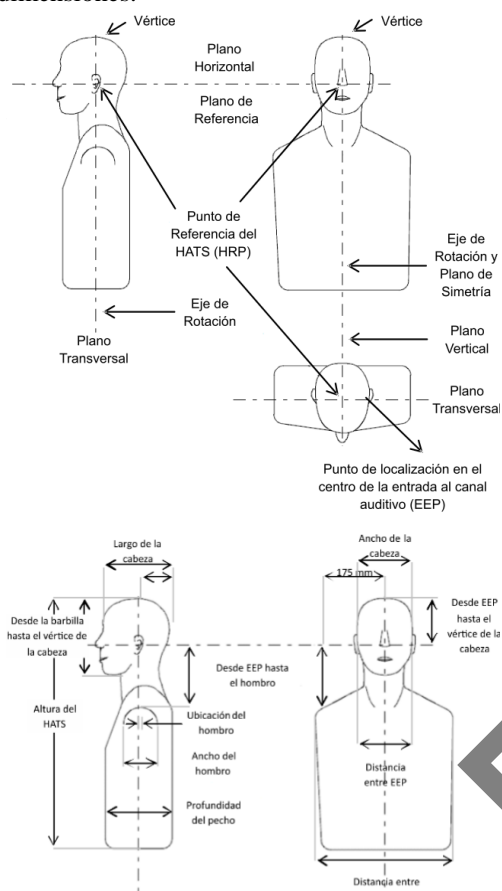


Fig. 1. Ejes, planos de referencia y dimensiones antropométricas de un HATS.



Fig. 2. Dimensiones antropométricas del HATS y medición con calibre antropométrico.

Las dimensiones se midieron con una herramienta que debió fabricarse específicamente para este proyecto, similar a un calibre, y con mordazas de tamaño acorde a las dimensiones del HATS. El instrumento se realizó con 2 escuadras metálicas sin diagonal, y se fabricó una pieza de acrílico que las sujetara y permitiera su desplazamiento relativo (ver Fig.2).

En la Tabla I se presentan las dimensiones requeridas por la Recomendación P.58, junto con las tolerancias, y las dimensiones obtenidas del maniquí acústico en desarrollo. Los valores de dicha tabla destacados con color rojo son aquellos en los que las dimensiones del maniquí no cumplieron con el rango propuesto en la Recomendación anteriormente mencionada.

Puede verse que el maniquí evaluado cumple con ocho de las doce dimensiones recomendadas. Analizando las dimensiones no conformes, se encontró que tres de ellas tienen un apartamiento máximo de 5% respecto de dichos límites. Sólo la posición del "eje vertical del hombro" presentó un apartamiento mayor. Dado que un corrimiento de 11 mm en la posición vertical del hombro no resulta relevante en cuanto a las reflexiones de onda sonora que produciría hacia las orejas del maniquí, se consideró que este apartamiento no representaría un inconveniente a la hora de utilizar el prototipo en desarrollo.

TABLA I  
DIMENSIONES DEL HATS (ITU-T P.58)

| Dimensión                                    | Mínimo [mm] | Nominal [mm] | Máximo [mm] | Medido [mm] |
|--|-------------|--------------|-------------|-------------|
| Ancho de la cabeza                           | 147         | 152          | 154         | 158         |
| Largo de la cabeza                           | 190         | 191          | 205         | 196         |
| De EEP a vértice de la cabeza <sup>(a)</sup> | 128         | 130          | 136         | 134         |
| Distancia entre EEPs                         | 130         | 132          | 133         | 125         |
| De EEP a la pared occipital                  | 92          | 94           | 100         | 97          |
| De EEP al hombro <sup>(b)</sup>              | 167         | 170          | 181         | 179         |
| De barbilla a vértice de la cabeza           | 216         | 224          | 225         | 237         |
| Distancia entre hombros                      | 400         | 420          | 455         | 450         |
| Profundidad del pecho                        | 178         | 235          | 272         | 207         |
| Ancho del hombro <sup>(c)</sup>              | 108         | 110          | 161         | 132         |
| Ubicación del hombro <sup>(d)</sup>          | -4          | 10           | 46          | 57          |
| Altura del HATS                              | 600         |              |             | 747         |

Notas:

- (a) EEP se refiere a la distancia entre dos puntos localizados en el centro de la entrada de cada canal auditivo.
- (b) Medido desde la superficie del hombro a 175 mm del plano vertical, hasta el plano de referencia del HATS.
- (c) Medido desde la parte delantera a la trasera del hombro, a 175 mm del plano vertical.
- (d) Medido desde el centro de la sección del hombro, a 175 mm del plano vertical, hasta el plano transversal (positivo detrás del plano transversal).

2) *Verificación antropométrica de las orejas y posición de las mismas:* Las orejas de silicona evaluadas se corresponden con el simulador de oído tipo 3.3 descrito en la Recomendación P.57, que es el que más se asemeja a la respuesta del oído humano en la banda de 100 Hz a 4.000 Hz. En la Fig. 3 puede apreciarse un esquema de las dimensiones verificadas de las orejas, de la inclinación que deben tener las mismas respecto del plano vertical, y la imagen de una de las orejas artificiales evaluadas.

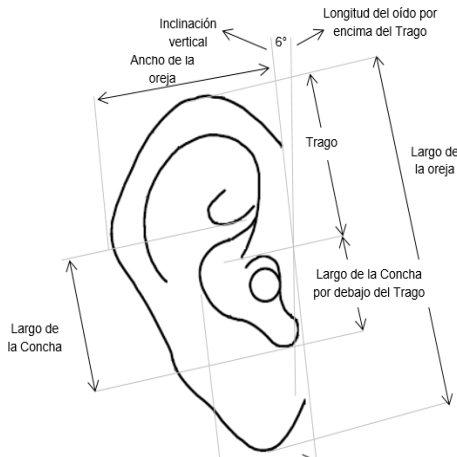


Fig. 3. Dimensiones de la oreja, e inclinación con respecto al plano vertical.

En la Tabla II se detallan los valores propuestos por esa recomendación, y las dimensiones tomadas de las orejas artificiales. Los valores destacados con color rojo en dicha tabla son las dimensiones que se apartan en más de 10% respecto del valor nominal, pero que no resultan relevantes.

TABLA II  
DIMENSIONES DE LAS OREJAS (ITU-T P.57)

| Dimensión                               | Nominal [mm] | Medido [mm] |
|---|--------------|-------------|
| Largo de la oreja                       | 66           | 60,1        |
| Ancho de la oreja                       | 37           | 36,6        |
| Trago                                   | 30           | 28,6        |
| Largo de la Concha por debajo del Trago | 20           | 18,0        |
| Largo de la Concha                      | 28           | 19,4        |
| Ancho de la Concha                      | 23           | 16,4        |
| Inclinación vertical                    | 6°           | 6°          |

**B. Selección de Micrófonos**

Para seleccionar los micrófonos que se colocaron en la entrada de cada canal auditivo del HATS, se tuvieron en cuenta las siguientes especificaciones:

- Respuesta plana en el rango de frecuencias audibles (20 Hz – 20.000 Hz).
- Nivel de ruido equivalente menor a 30 dB para estar dentro de los márgenes de un instrumento de medición acústica clase 2.
- Patrón polar omnidireccional o cardiode.
- Diámetro menor o igual que 7 mm para poder insertarlos en el canal auditivo de las orejas.
- Longitud del micrófono con su respectivo pre amplificador menor que 60 mm, para que los mismos se pudieran colocar dentro de cada canal auditivo.
- Principio de funcionamiento a capacitor (por su reducido tamaño y estabilidad).
- Precio (debido a que se necesitaba implementar un HATS de bajo costo y se contaba con un presupuesto limitado).

Se evaluaron micrófonos desarrollados exclusivamente para grabaciones biáurales, micrófonos de instrumentación y micrófonos orientados a la grabación de música en estudios de grabación. A modo de resumen, en la Tabla III se comparan las características que determinaron la selección del micrófono adecuado.

TABLA III  
MICRÓFONOS EVALUADOS

| Marca y modelo            | Respuesta plana en frecuencia | Nivel de ruido equivalente      | Diámetro y largo          |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Brüel & Kjaer TYPE 4101-B | 20 Hz a 20 kHz                | 23 dB(A)<br>Ref. 20 µPa         | ---                       |
| Brüel & Kjaer TYPE 4189   | 20 Hz a 20 kHz                | 16,5 dB(A)<br>Ref. 20 µPa       | 12,7 mm<br>---            |
| PCB 376B02                | 4 Hz a 20 kHz                 | 16,5 dB(A)<br>Ref. 20 µPa       | 12,7 mm<br>46 mm          |
| Audio Technica U853A      | 30 Hz a 20 kHz                | 23 dB(A)<br>Ref. 20 µPa         | 12,2 mm<br>34 mm          |
| DPA SMK-SC4060            | <b>20 Hz a 20 kHz</b>         | <b>23 dB(A)<br/>Ref. 20 µPa</b> | <b>5,4 mm<br/>12,7 mm</b> |
| DPA 4006ER                | 10 Hz a 20 kHz                | 15 dB(A)<br>Ref. 20 µPa         | 19 mm<br>35 mm            |

Si bien se tomaron en cuenta todas las características mencionadas anteriormente, las que determinaron la selección de los micrófonos fueron el diámetro y el precio, ya que las otras eran cumplidas en todos los casos. Se optó por los micrófonos DPA SMK-SC4060, por tener un diámetro y un largo adecuados para ser insertados en los canales auditivos del maniquí, y por su precio adecuado al presupuesto con que se contaba. Otra ventaja a favor de estos micrófonos es que se comercializan en un kit de dos unidades apareadas, el que también incluye un par de adaptadores para unir el conector de salida de cada micrófono (tipo MicroDot) y el de las entradas de la placa de audio (tipo XLR3). Esto puede apreciarse en la Fig. 4.



Fig. 4. Microfono DPA SC4060 y adaptador MicroDot-a-XLR3.

### C. Selección de la Placa de Audio

Para la interconexión de los micrófonos con la computadora en la que se ejecuten los programas del sistema de medición desarrollado, se decidió utilizar una placa de audio externa, para asegurar que fuera de mejor calidad que las internas de las PC.

Las especificaciones requeridas para la placa de audio a utilizar eran las siguientes:

- Tener respuesta plana en el rango de frecuencias audibles (20 Hz – 20 kHz).
- Contar con 2 entradas de micrófono con conector balanceado XLR-3 para registrar señales binaurales.
- Proveer alimentación “Phantom” para polarizar los micrófonos.

En las especificaciones enumeradas no se tuvo en cuenta la distorsión armónica total (THD), ni el ruido propio de la placa de audio, debido a que actualmente las placas comerciales tienen una THD y un ruido propio por debajo de los valores requeridos por el sistema implementado.

En el Laboratorio LAL-CIC se contaba con dos placas de audio, una Tascam US-322 y una M-Audio Audiophile USB.

De las dos, se seleccionó la placa de audio Tascam US-322, por ser la que cumplía con todas las especificaciones requeridas.

### D. Armado de HATS

Se reemplazaron las orejas plásticas del maniquí por las orejas de silicona evaluadas. Los conductos auditivos se construyeron con un tubo de PVC, de 7 mm de diámetro interno. A su vez, cada oreja y su conducto auditivo fueron montados sobre una base cilíndrica hecha con poliuretano expandido, que permitió la inserción de las mismas en la cabeza del maniquí y darles la inclinación vertical de 6° recomendada en la ITU-T P.57.

Por otra parte, la Recomendación P.58 especifica que el material de construcción del HATS debe ser una superficie no porosa, tener una impedancia acústica más grande que la del aire y debe asegurar estabilidad dimensional, por lo que se acondicionó la estética del maniquí aplicándole una capa de masilla plástica para sellar los poros de su superficie y se lo pintó con esmalte sintético.

Los micrófonos se montaron en las orejas artificiales teniendo en cuenta que quedarán firmemente sujetos al canal auditivo y que, si fuese necesario, se pudieran quitar de los mismos sin dificultad.

En la Fig. 5 puede apreciarse el maniquí acústico terminado, así como también su conexión con la computadora a través de la placa de sonido.



Fig. 5. Conexión entre HATS, placa de sonido y computadora.

### E. Verificación Acústica del HATS

Para verificar las especificaciones acústicas del HATS, la ITU-T P.58 indica que deben realizarse mediciones de su respuesta en frecuencia, tanto para condiciones de campo libre como de campo difuso.

Estas respuestas se obtienen como la relación entre la respuesta registrada con el micrófono colocado en el punto de referencia del tímpano del HATS y la respuesta registrada con el micrófono ubicado en el punto de referencia del propio maniquí (HRP), sin el HATS. Como los micrófonos no se ubicaron en la posición del tímpano sino en la entrada del canal auditivo (posición normal de uso), para completar esta tarea se debió utilizar la curva de transferencia entre el tímpano y el punto de entrada del canal proporcionada por la citada recomendación.

Las mediciones para obtener la respuesta en frecuencia en campo libre, se realizaron en la cámara anecoica del Laboratorio, y las mediciones para obtener la respuesta en frecuencia en campo difuso, se realizaron en la cámara reverberante.

Para la medición de ambas respuestas en frecuencia, fue necesario desarrollar una rutina en un software de entorno matemático para registrar y procesar los datos de manera de obtener el nivel de presión sonora equivalente en tercios de octavas de las transferencias del HATS (ver III. RUTINAS DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS). Para generar la señal sonora, se utilizó una fuente de ruido pseudo-aleatorio, en el rango de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz.

En las Fig. 6 y Fig. 7 se pueden apreciar curvas obtenidas mediante mediciones en condiciones de campo libre y campo difuso respectivamente.

En ambas figuras se presenta el análisis espectral realizado en bandas de tercios de octavas para las frecuencias centrales comprendidas entre 50 Hz y 10 kHz. Se incluyen también los valores límite sugeridos por la Recomendación P.58 para cada caso (curvas de trazo punteado color rojo). Puede notarse una gran superposición debido a la repetibilidad de los valores medidos. En esas figuras se incluyen imágenes con ampliaciones de sectores para mostrar detalles de la coincidencia de las curvas.

Si bien en 6 de las 24 bandas estudiadas existen incumplimientos de los límites recomendados, con un apartamiento más acentuado en las bandas superiores, se considera que la envolvente de la transferencia sigue de manera aceptable lo establecido en dicha recomendación.

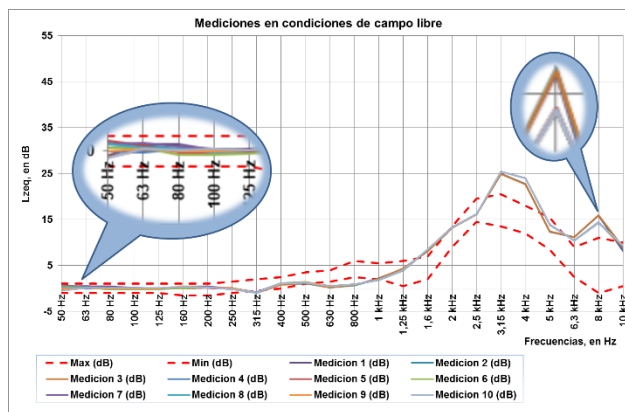


Fig. 6. Transferencia del HATS en campo libre.

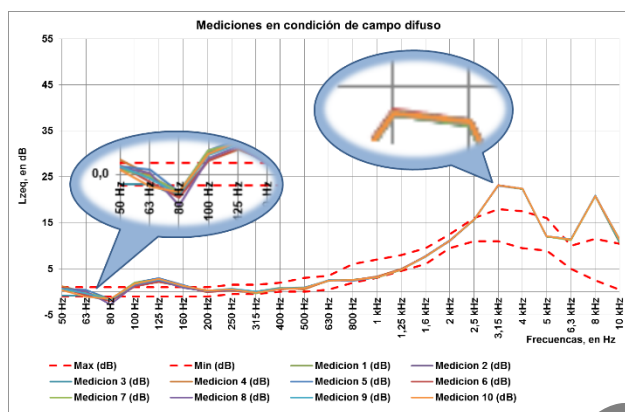


Fig. 7. Transferencia del HATS en campo difuso.

### F. Conclusiones sobre el prototipo de maniquí acústico

Considerando los resultados obtenidos a partir de las evaluaciones antropométricas y acústicas del maniquí, se considera que el mismo puede ser utilizado como simulador de cabeza y torso en el sistema de medición en desarrollo.

### III. RUTINAS DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez evaluado el HATS, se procedió al desarrollo de programas para completar el sistema de medición. Los mismos debían tener la capacidad de registrar de forma binaural:

- El nivel de presión sonora continuo equivalente (parámetros globales y análisis en tercios de octavas), con diferentes ponderaciones en frecuencia (Z, A o C).
- La respuesta impulsiva de un recinto y sus parámetros acústicos binaurales.

#### A. Medición Binaural de Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente (Leq, en dB)

La medición de nivel de presión sonora con un sistema de medición binaural es de aplicación para el caso de personas expuestas a ruido a través de auriculares, como por ejemplo la obtención de la dosis de ruido en ambiente laboral que reciben los operadores de un call center.

1) *Rutina para medición binaural de Leq:* Para la medición binaural de nivel de presión sonora continuo equivalente se desarrolló una rutina de software que permitiera:

- registrar las señales a medir,
- registrar señales de referencia para calibrar el sistema,
- calcular los niveles equivalentes globales, y realizar el análisis espectral en bandas de tercios de octava, de la señales registradas [5],
- exportar los resultados a una planilla de cálculo.

En cuanto a la calibración del sistema, no pudo utilizarse una fuente acústica de referencia debido a que el diámetro de los micrófonos instalados en el maniquí no coincide exactamente con valores normalizados (1/4" ó 1/2"). Por este motivo, se decidió realizar la calibración del sistema por contrastación con un instrumento de medición tomado como de referencia, eligiéndose para ello un sonómetro marca Brüel & Kjaer, modelo 2250. El procedimiento de calibración consistió en generar en la cámara anecoica un tono de 1 kHz, al que se le midió su nivel de presión sonora equivalente global con el instrumento de referencia. Al mismo tiempo, esa señal fue registrada mediante la rutina diseñada (habiéndose colocado el micrófono del sistema de medición en una posición muy cercana a la del micrófono del sonómetro). De este modo se obtuvo una señal de calibración para el sistema de medición (ver Fig. 8).

Por otra parte, para hacer el análisis espectral en bandas de tercios de octava de las señales registradas, en la rutina de software desarrollada se implementaron filtros Butterworth pasabanda de cuarto orden [5]. Esto permite cumplir con la más exigente de las clases de filtros (clase 0), descrita en la norma UNE-EN 61260 [6].

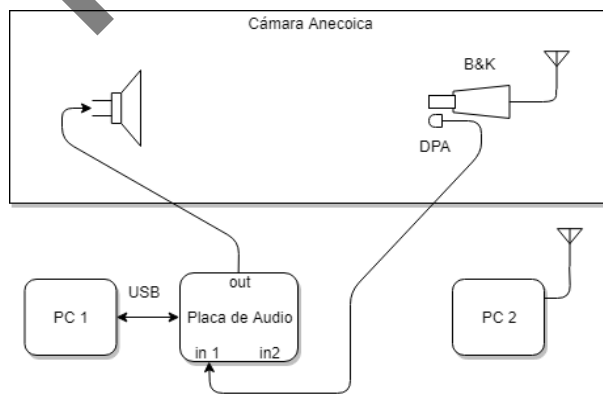


Fig. 8. Calibración por contrastación de mediciones de nivel sonoro.

2) *Verificación de la rutina de medición binaural de Leq:* Con el objeto de verificar el desempeño del software desarrollado, se realizaron mediciones de nivel sonoro continuo equivalente en cámara anecoica, excitando el recinto con ruido de banda ancha. Cada uno de los micrófonos pertenecientes al sistema en desarrollo fue colocado muy cerca del micrófono del instrumento de referencia, ambos a una distancia de 2 m de la fuente sonora, medida sobre el eje de emisión de la misma (ver Fig. 9).

Una vez calibrado el sistema, y con el objeto de obtener su rango dinámico y evaluar la repetibilidad, se realizaron 12 mediciones de análisis espectral a 3 diferentes niveles de presión sonora. A su vez, el menor de estos niveles permitió conocer el límite inferior de medición del sistema. En la Fig.

10, las curvas de color rojo presentan los 12 espectros medidos con los micrófonos del sistema en desarrollo (sin el maniquí acústico), y las curvas de color azul muestran los 12 espectros medidos simultáneamente con el instrumento de referencia.



Fig. 9. Verificación de la rutina de medición de presión sonora y calibración del sistema.

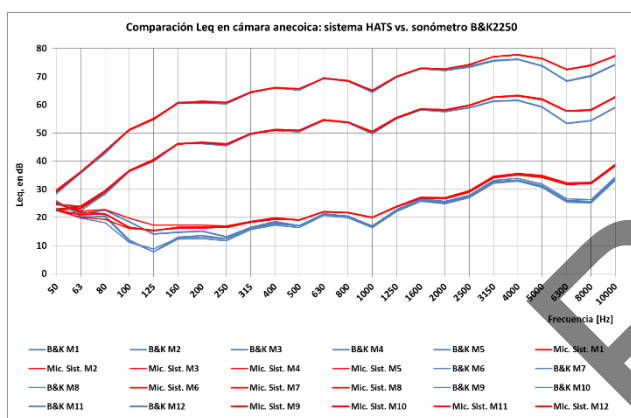


Fig. 10. Medición en cámara anecoica del Leq con los micrófonos del sistema y con el B&K 2250.

3) *Análisis de resultados y problemáticas:* En la Fig. 10, a partir de la superposición de las curvas obtenidas, puede apreciarse la repetibilidad de las mediciones para cada uno de los niveles generados.

De la misma figura se desprende que a partir de los 3150 Hz las curvas de nivel sonoro del HATS y del instrumento de referencia comienzan a apartarse entre sí, ubicándose la del HATS por encima de la referencia hasta unos 4 dB. También puede observarse que a niveles sonoros por debajo de los 30 dB el sistema HATS no responde correctamente.

Se supuso que la respuesta del sistema para niveles inferiores a los 30 dB podía deberse a que este es su piso de ruido. Para confirmarlo se midió el ruido de fondo de un recinto protegido del ruido, para poder medir bajos niveles sonoros. La medición se llevó a cabo dentro de la cámara anecoica del laboratorio, simultáneamente con el sistema desarrollado y con el instrumento de referencia. Los resultados permitieron inferir que el límite de medición mínimo del sistema es de 30 dB (ver Fig. 11).

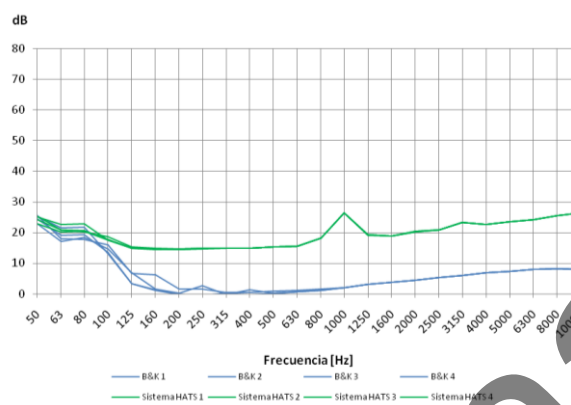


Fig. 11. Ruido de fondo de la cámara anecoica medido tanto con el HATS como con el medidor de referencia.

Se supuso que el apartamiento del HATS en altas frecuencias podía deberse a la respuesta en frecuencia del micrófono por lo que se analizó la respuesta en frecuencia comparándola con la del instrumento de referencia.

El fabricante del micrófono informa que a partir de los 8.000 Hz la respuesta en frecuencias puede verse aumentada hasta 3 dB por efecto de la grilla de protección. Por este motivo, se realizaron mediciones de nivel sonoro, conjuntamente con el instrumento de referencia, utilizando el micrófono del sistema en desarrollo con y sin grilla. Los resultados de la comparativa pueden verse en las Fig. 12 a 14.

Se realizaron 3 mediciones de cada condición (con y sin grilla), y 3 mediciones con el instrumento de referencia (B&K). En la Fig. 12 se presentan los espectros medidos. Nuevamente, los 3 perfiles obtenidos para cada grupo de mediciones, aparecen totalmente superpuestos, motivo por el cual no pueden diferenciarse entre sí (buena repetibilidad).

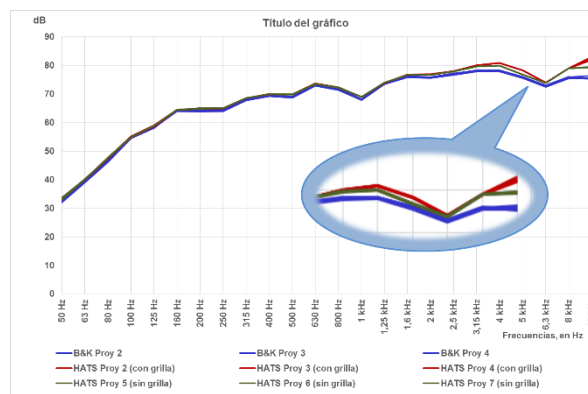


Fig. 12. Medición en cámara anecoica del Leq en tercios de octava con el instrumento de referencia y con el sistema del HATS usando micrófono con grilla y sin grilla. Detalle: pequeñas diferencias en altas frecuencias.

En las figuras 13 y 14 se presentan gráficamente los valores globales medidos. En todos los casos los valores globales obtenidos con el sistema en desarrollo resultaron superiores al valor global medido con el instrumento B&K, independientemente de si la grilla del micrófono estaba colocada o no.

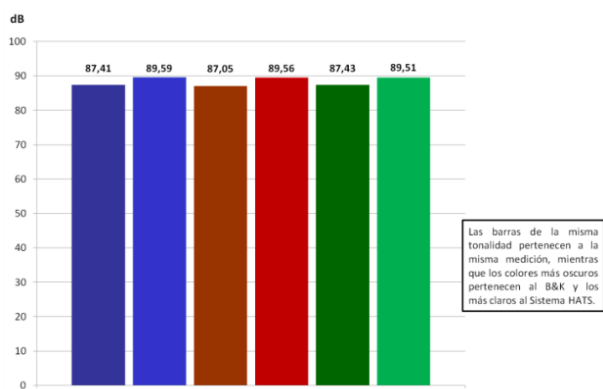


Fig. 13. Medición en cámara anecoica del Leq Global con el instrumento de referencia y con el HATS usando micrófono con grilla.

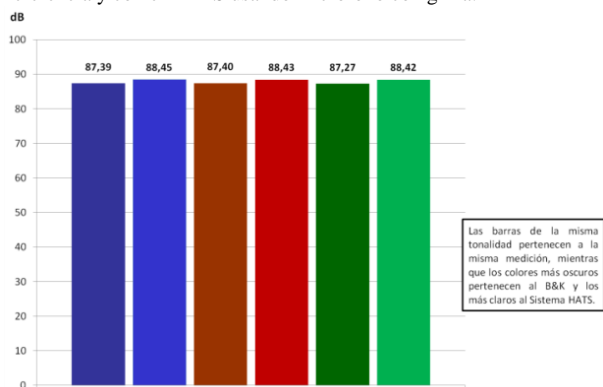


Fig. 14. Medición en cámara anecoica del Leq Global con el instrumento de referencia y con el HATS usando micrófono sin grilla.

4) *Conclusiones sobre las rutinas desarrolladas de medición binaural de Leq:* A partir de la realización de estas mediciones y del análisis del comportamiento de los componentes del sistema, se pudo comprobar que las diferencias de medición en altas frecuencias no son debidas a alinealidades causadas por la grilla del micrófono ni por la placa de audio, interpretándose que las mismas están asociadas con la transferencia del sistema completo, incluyendo el desempeño del maniquí acústico y su canal auditivo. Debido a estas diferencias, el sistema de medición requiere que se le realice una compensación en frecuencias hecha por software.

*B. Programa para Obtención de Respuesta Impulsiva y de Parámetros Binaurales de un Recinto*

La medición de respuesta impulsiva de un recinto es el primer paso para la obtención de sus parámetros acústicos. Cuando esos parámetros son binaurales, se requiere previamente la obtención de la respuesta impulsiva binaural. Se trata de una medición indirecta, es decir, que se obtiene la respuesta impulsiva a través del procesamiento de las señales capturadas por los micrófonos. Lo particular de la medición de la respuesta impulsiva a través de un sistema binaural, es que se obtiene simultáneamente la respuesta impulsiva del canal derecho y la respuesta impulsiva del canal izquierdo.

Los parámetros acústicos binaurales que se pueden obtener a partir de la utilización de un maniquí acústico registrando las señales que llegan a cada uno de sus micrófonos, proporcionan una cuantificación de la espacialidad del recinto. Dichos parámetros son: el Coeficiente de

Intercorrelación Interaural (IACC), el Coeficiente de Intercorrelación Interaural Temprano (IACC Temprano): y el Coeficiente de Intercorrelación Interaural Tardío (IACC Tardío).

1) *Cálculo de las respuestas impulsivas:* Para obtener la respuesta impulsiva de un recinto se optó por el método indirecto utilizando un barrido sinusoidal exponencial como señal de excitación [7]. En la Fig. 15 se presenta un diagrama en bloques que sintetiza el procedimiento efectuado para obtener la respuesta impulsiva.

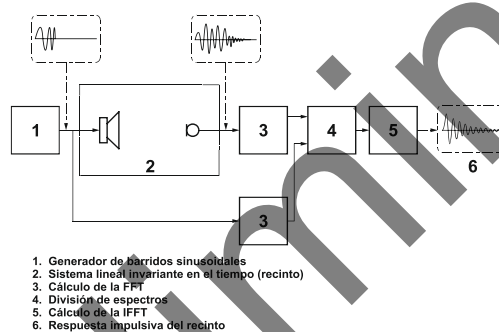


Fig. 15. Diagrama en bloques de la medición y el procesamiento involucrado para obtener la respuesta impulsiva.

En la Fig. 16, a modo de ejemplo, se pueden observar las respuestas impulsivas obtenidas con el HATS, utilizando un barrido sinusoidal exponencial de 3 segundos de duración.

Para calcular las respuestas impulsivas se desarrolló una rutina que permitiera: generar y emitir un barrido sinusoidal de acuerdo con los parámetros seleccionados por el operador, registrar mediante los micrófonos del HATS el barrido sinusoidal emitido (teniendo en cuenta que en caso de realizar varias repeticiones del proceso de emisión, se promediaran los registros obtenidos), realizar la deconvolución en forma lineal de la señal de excitación y de las señales registradas, obtener las respuestas impulsivas, y exportar los resultados a una planilla de cálculo.

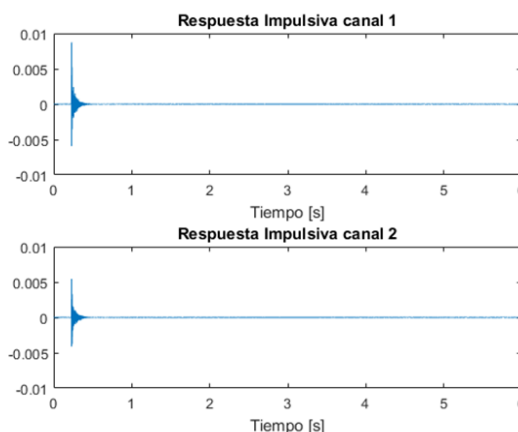


Fig. 16. Respuesta impulsiva de un recinto, obtenida a partir del HATS, utilizando un barrido exponencial sinusoidal.

2) *Cálculo de parámetros binaurales:* Para la calcular los parámetros binaurales se desarrolló una rutina que permitiera filtrar las respuestas impulsivas obtenidas en

bandas de octava, de acuerdo con lo especificado en la norma IRAM 4081 [4], con frecuencias centrales comprendidas entre 63 Hz y 8.000 Hz, y obtener de este filtrado los parámetros IACC, IACC Temprano e IACC Tardío.

3) *Verificación de las rutinas de cálculo de las respuestas impulsivas y de parámetros biaurales:* En la Fig. 17 se presenta un diagrama en bloques, correspondiente al esquema utilizado en las mediciones de los parámetros biaurales de un recinto.

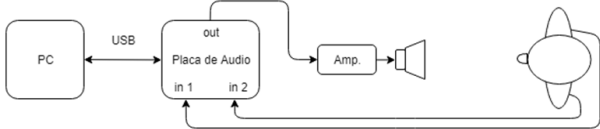


Fig. 17. Esquema de una medición de los parámetros biaurales de un recinto.

Para la validación de los algoritmos empleados para el cálculo de los parámetros acústicos biaurales de una sala, se midió la respuesta impulsiva de la misma y se calcularon dichos parámetros empleando las rutinas desarrolladas y la versión 3.0 del programa "DIRAC Room Acoustics Software" utilizado como software de referencia.

Para la obtención de la respuesta impulsiva de la sala, y con el objeto de evaluar su influencia en los resultados, se probaron dos tipos de señales de excitación: 4 barridos en frecuencia, de corta duración (3 s), y 1 barrido de larga duración (12 s), sin repetición [3]. Los resultados obtenidos se presentan en las Fig. 18, 19 y 20.

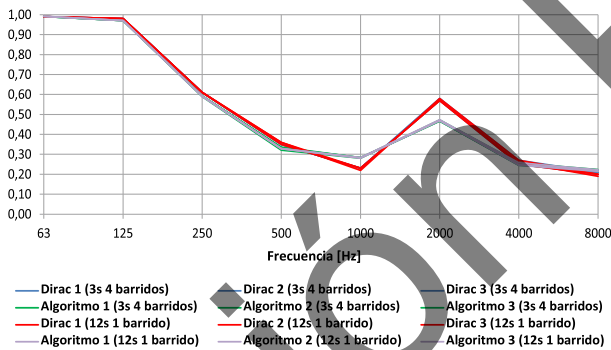


Fig. 18. Comparación de los valores obtenidos de IACC con el software de referencia y con la rutina desarrollada.

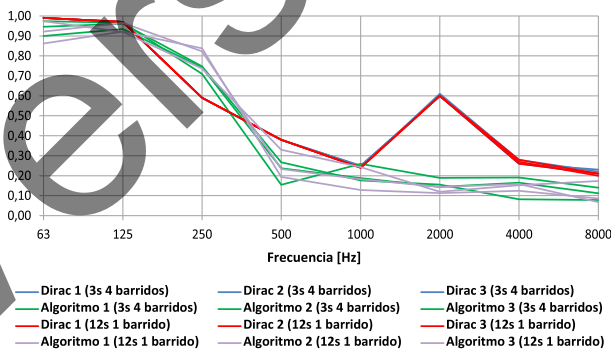


Fig. 19. Comparación de los valores obtenidos de IACC Temprano con el software de referencia y con la rutina desarrollada.

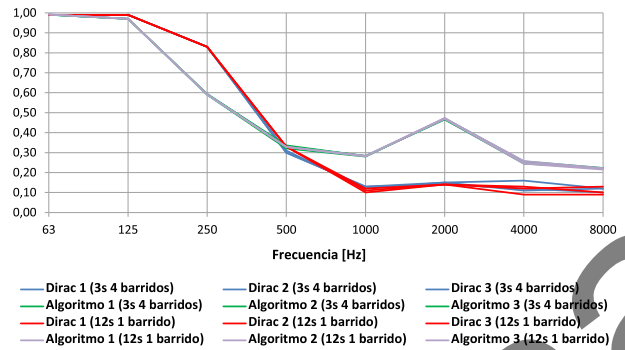


Fig. 19. Comparación de los valores obtenidos de IACC Tardío con el software de referencia y con la rutina desarrollada.

4) *Análisis de resultados y problemáticas:* De estas mediciones se desprende que el parámetro IACC global tiene un error despreciable, dándose un error relativo máximo de 10% en la octava de 2.000 Hz. En el caso de los parámetros IACC Temprano e IACC Tardío, los errores son mayores y tienen un punto en común entre ambos: dependen del arribo de energía en un determinado lapso de tiempo. Por lo que el desplazamiento temporal de la respuesta impulsiva obtenida afecta directamente el cálculo de estos parámetros. Esto derivó en la necesidad de tener en cuenta la latencia de la placa de audio para el cálculo de los parámetros IACC.

5) *Medición de latencia de audio:* Se midió la latencia del sistema a través de dos métodos:

- Utilizando un bucle IN/OUT en la placa de audio
- Utilizando el indicador de latencia del software comercial "Reaper"

Los resultados al utilizar el bucle IN/OUT pueden verse en la Tabla IV. El retardo calculado es, en promedio, de 204 ms, un tiempo mayor al tiempo de integración de los parámetros IACC Temprano y Tardío.

En la utilización del indicador de latencia de audio del software comercial "Reaper", se configuró como interface de audio de dicho programa el controlador "Windows DirectSound". En la Fig. 21 se muestra una captura de pantalla donde en la parte superior derecha se observa que la latencia es de 213 ms.

TABLA IV  
LATENCIA DE AUDIO

| Duración del barrido | Medición N° | Retardo [ms] |
|----------------------|-------------|--------------|
| 3 s                  | 1           | 205,9        |
|                      | 2           | 205,9        |
|                      | 3           | 205,9        |
|                      | 4           | 205,9        |
|                      | 5           | 205,9        |
|                      | 6           | 211,7        |
|                      | 7           | 200,1        |
| 12 s                 | 1           | 200,1        |
|                      | 2           | 205,9        |
|                      | 3           | 205,9        |
|                      | 4           | 200,1        |
|                      | 5           | 205,9        |
|                      | 6           | 188,8        |
|                      | 7           | 205,9        |
| Retardo promedio     |             | 204,0        |



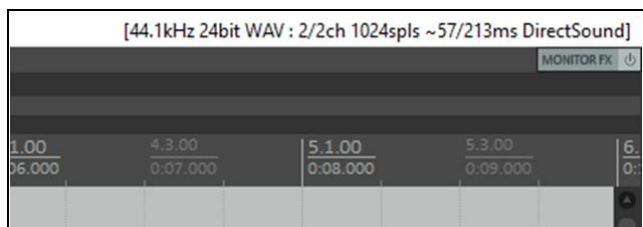


Fig. 20. Visualización de la latencia indicada por el programa Reaper.

6) *Verificaciones y correcciones planteadas:* En primer lugar, como la capacidad de almacenamiento de la planilla de cálculo utilizada es limitada, siendo 23,7 s el máximo tiempo que se puede registrar una señal para una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz, se optó por usar señales de duración máxima de 23 s.

En cuanto a la sincronización de las señales involucradas en el cálculo de la respuesta impulsiva, a partir de los 2 métodos empleados, se concluyó que existe un desfase promedio de 208 ms, valor que se tomó para la corrección de la rutina de cálculo de los parámetros IACC.

Luego de la implementación de la corrección mencionada en el párrafo anterior, se realizaron nuevas mediciones para verificar el correcto funcionamiento de la rutina de cálculo de los parámetros IACC Temprano y Tardío. En las Fig. 22 y 23 se muestran los resultados.

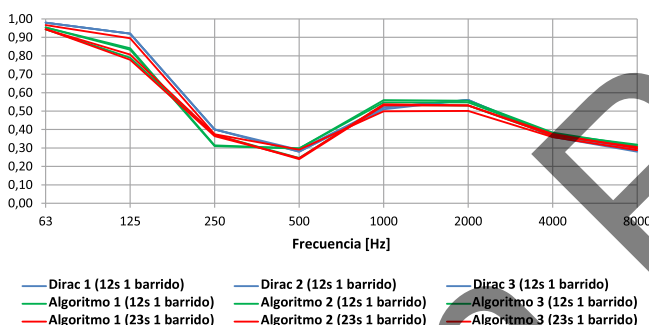


Fig. 21. Comparación de los valores obtenidos de IACC Temprano con el software de referencia y la rutina desarrollada corregida.

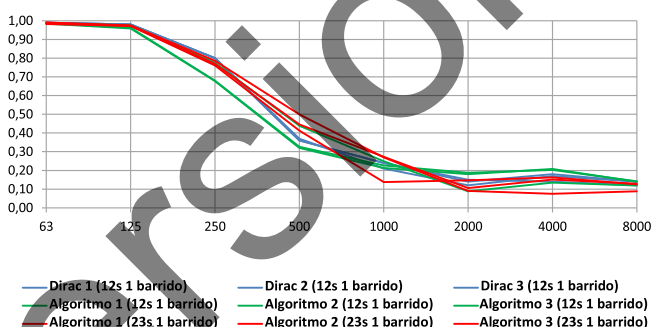


Fig. 22. Comparación de los valores obtenidos de IACC Tardío con el software de referencia y la rutina desarrollada corregida.

7) *Conclusiones sobre la obtención de parámetros biaurales:* Se puede apreciar que los valores del parámetro IACC obtenidos con el sistema desarrollado o con el programa comercial tomado como referencia, son similares, a pesar de las diferentes señales de excitación utilizadas para obtener la respuesta impulsiva de la sala.

En cuanto a la obtención de los parámetros IACC Temprano y Tardío, es imprescindible tener en cuenta el desfase que se produce entre las señales convolucionadas en la rutina implementada para obtener la respuesta impulsiva.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Y formó parte del plan de tareas de la Beca de Entrenamiento de un alumno de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de La Plata.

#### REFERENCIAS

- [1] Recommendation ITU-T P.58 (2013). "Head and torso simulator for telephony".
- [2] Recommendation ITU-T P. 57 (2011). "Artificial ears".
- [3] A. Farina, "Advancements in impulse response measurements by sine sweeps", Audio Engineering Society 122nd Convention, Vienna, Austria, 2007.
- [4] IRAM 4081. (1977). Filtros de banda de octava, de media octava y de tercio de octava destinados al análisis de sonidos y vibraciones.
- [5] F. Miyara, Mediciones acústicas basadas en software, Ed. Asociación de Acústicos Argentinos, 2013.
- [6] UNE-EN 61260-1:2014 - Electroacústica. Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava. Especificaciones.
- [7] M. Swen y P. Massarani, "Transfer-Function Measurement with Sweeps", Journal AES, pg. 443-471, Jun. 2001.