

Experimental Study of the Transfer Function of Replicas of Pinnae of Individuals Manufactured with Alginate

S. Fingerhuth, J. Bravo, M. Bustamante, and F. Pizarro

Abstract—The goal of this work is to compare the quality of replicas of ears (pinnae) for acoustic purposes. We present a method that creates replicas of ears used in acoustic instrumentation, from dummy heads, based on a process of negative molds of alginate and plaster positive molds. The quality of the process is verified by two methods; i) physical and ii) acoustic, the first consisting of visual inspection and comparison of distances and lengths of the original and the replicas and the second in comparative acoustic measurements. The results show that the mold methods deliver results of very good quality and that it allows to use it for acoustic applications.

Index Terms—Acoustics, Physiological acoustics, Acoustic transfer function, Pinna, HRTF.

I. INTRODUCCIÓN

HOY en día existen diversas aplicaciones que requieren tener modelos detallados de las características acústicas del torso, cabeza y oreja (p.ej. sistemas de reproducción binaural, realidad virtual, robótica, etc.) [1]-3]. Estas partes del cuerpo modifican la magnitud y fase de una onda acústica hasta llegar al canal auditivo debido a fenómenos de difracción, reflexión y resonancias en el pabellón de la oreja, llamada pinna [5]. Estas características acústicas son diferentes para cada persona ya que dependen de las dimensiones y formas del cuerpo de cada individuo. Las características de esa modificación dependen, además, de la posición relativa entre la fuente de sonido y el oído y es llamada *Head Related Transfer Function* (HRTF), concepto que será definido más adelante.

El sonido que llega desde una fuente en el espacio desde una cierta dirección llega a nuestros oídos con una diferencia interaural de tiempo y de nivel (*interaural time differences*, ITD and *interaural level differences*, ILD), ambos dependientes de la frecuencia y de la dirección. Ésto, además de la forma de la pinna, da origen a lo que se conoce como audición binaural [12]. La audición binaural es una rama de la psicoacústica. Ésta ofrece importantes ventajas en comparación con la audición monoaural [6] porque, por

ejemplo, permite la ubicación de fuentes sonoras en el espacio, minimiza los efectos de coloración (*binaural decoloration*) [7] y reverberación (*binaural dereverberation*) [8] en una sala y produce segregación del flujo auditivo (*auditory stream segregation*) [9] lo cual permite la separación de las fuentes sonoras y concentrarse solo en una. La tecnología de reproducción de sonido binaural puede proporcionar al oyente una impresión tridimensional completa, es decir, una impresión lateral de posición, altura y distancia, con un número reducido de transductores (altavoces o auriculares) a diferencia de otras técnicas de reproducción de sonido [10][11].

Dentro de las alternativas existentes para replicar modelos de la pinna humana, se usará acá indistintamente el término pinna, pabellón de la oreja u oreja, está es el uso imágenes de resonancia magnética [12], o bien de tomografía computacional [13]. En base a esas imágenes 2D o 3D se pueden generar modelos CAD que permitirían una posterior construcción de una réplica de ésta [18] por algún método de CNC (*Computer Numerical Construction*) como fresas o impresoras 3D. La resonancia magnética es un método costoso y complejo de usar. Por otra parte, la tomografía computacional puede presentar problemas de precisión.

También se puede caracterizar, con una finalidad acústica, la cabeza de una persona. Esto se logra mediante la HRTF que es un set (base de datos) de filtros acústicos para distintas posiciones de fuente, para cada uno de los dos oídos. Uno de los usos que se le da a la HRTF es la personificación de audífonos para personas con problemas de audición, grabaciones, reproducciones 3D de sonido y teleconferencias para darle más realidad a estas, comunicación, navegación en cabinas de pilotaje y videojuegos, entre otros, además del uso en investigaciones médicas. Varios estudios destacan la importancia de contar con la información individual para muchas de las aplicaciones antes mencionadas [14]-17].

En el mercado existen cabezas artificiales o maniquí acústico (*dummy head*) para la investigación con diversas características y aplicaciones [18]. Algunas de estas son construidas de modelos de personas específicas y otras de medidas antropométricas promedio de un grupo de personas o simplemente por estimaciones de la forma. Todas estas réplicas y moldes tienen micrófonos en los oídos que permiten realizar mediciones de las modificaciones del sonido desde la fuente hasta el oído humano, cuando la intensidad y la posición de ésta cambian. Por ser equipos de medición altamente especializados y muchos de ellos certificados,

S. Fingerhuth, J.L. Bravo and F. Pizarro are with Escuela de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2147, Valparaíso, Chile (e-mail: sebastian.fingerhuth@pucv.cl). M. Bustamante is with Carrera de Fonoaudiología, Universidad Autónoma de Chile - Sede Talca.

típicamente son costos, incluso en sus versiones sin micrófonos o al comprar solo partes individuales, como la pinna. Se propone encontrar un método de bajo coste de moldeado individualizado de orejas que en conjunto con los materiales particulares logre obtener una función de transferencia de la réplica similar a la función del original de la oreja humana. El objetivo es estudiar la calidad de modelos de la pinna para en el futuro usarlas en modelos individualizados completos, incluyendo la cabeza y el torso.

La literatura habla de modelos y construcción de modelos individualizados, pero no presenta detalles de la metodología ni resultados en términos acústicos. En este artículo se presentará la creación de orejas individualizadas a base de un método de construcción de bajo coste en términos de materiales y de tiempo de construcción. Además, se caracterizarán con su función de transferencia (*Pinna-Related Transfer Function* o PRTF) y serán comparadas con orejas estándar usadas para caracterización acústica.

II. PROCESO DE MOLDEADO Y GENERACIÓN DE RÉPLICAS DE OREJAS (PINNA)

En esta sección se presentará el proceso de moldeado y generación de las réplicas, los materiales, especificaciones de mezcla y fraguado de los insumos utilizados, el detalle dimensional y las respectivas comparaciones entre las réplicas.

A. Materiales

Los materiales utilizados son el alginato (utilizado por ortodontistas para moldes dentales) para lo que llamamos molde negativo. Este molde es el inverso a la estructura final a replicar por un molde positivo. Para el molde positivo o réplicas se utilizará yeso extra duro (utilizado para moldes dentales por su fácil manipulación y bajo costo) y silicona dental (utilizada para moldes dentales con más durabilidad y flexibilidad que el yeso). Es importante notar que todos los materiales a utilizar para la fabricación de los moldes son de fácil acceso y de bajo costo.

B. Proceso de Moldeado

Para la realización de las réplicas se utilizará como oreja original (o referencia) para la posterior comparación los modelos KB90 (pinna derecha tamaño grande) y KB91 (pinna izquierda tamaño grande) de la empresa GRAS [19]. El proceso de moldeado comienza con la creación del negativo de la oreja, tal como lo muestra la Fig. 1. Primero se usa la preparación de alginato en las proporciones indicadas por el proveedor: 8 gramos de polvo de alginato y 20,5 ml de agua. Estos se mezclan por 45 segundos para luego verter la preparación sobre el elemento a moldear. Para lograr que la sustancia cubra un 100% el original o referencia, se crea un soporte de cartón (Fig. 1). El tiempo de fraguado es de aproximadamente tres minutos.

Luego de la obtención del molde negativo de alginato se puede proceder a la preparación de la mezcla para la obtención del molde positivo. Para el positivo, se usaron distintas mezclas: yeso extra duro y silicona dental. La Fig. 2 muestra

el proceso de vertido de mezcla de yeso sobre el negativo de la oreja de referencia.



Fig. 1. Proceso de creación de negativo de la oreja de referencia.

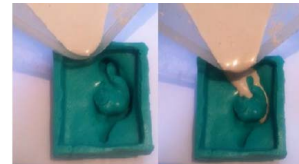


Fig. 2. Proceso de creación de negativo de la oreja de referencia.

C. Resultado de Moldes

Los resultados del proceso de moldeado en yeso se pueden apreciar en Fig. 3. Las réplicas están identificadas con los códigos KB90 y KB91 al igual que las orejas GRAS pero se le agrega la serie 0X, siendo X un número correlativo. Se realiza una inspección visual para calificar la calidad del proceso y el resultado de la réplica para descartar réplicas con fallas o imperfecciones evidentes. De la misma forma, la Fig. 4 muestra una réplica obtenida con silicona.

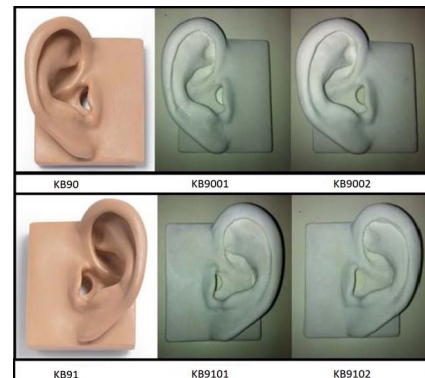


Fig. 3. Orejas modelo (KB90 y KB91) y copias de yeso de estas mismas.



Fig. 4. Oreja modelo (KB90) y su réplica en silicona.

El criterio de calidad a la inspección visual se definió como: imperfecciones reconocibles y detectables por inspección visual y que tengan un tamaño igual o superior a 1 mm hacen que se descarte la réplica. Este criterio sigue lo típicamente aceptado [20] en relación a que i) que se debe comparar el tamaño de los objetos con la longitud de onda de la señal y ii) las frecuencias más importantes, (i.e. para la voz están en el rango entre 100 Hz y 7 kHz aproximadamente).

Una onda de 7 kHz tiene una longitud de onda de aproximadamente 5 mm. Por ejemplo, en caso de querer generar una malla CAD discretizada, para simulación acústica con BEM (*Boundary Element Method*), se recomienda usar una malla con distancias entre nodos de 1/6 de la esta longitud de onda más pequeña [18]. Por eso, para este trabajo, se definió un criterio de 1 mm como límite de aceptación en las réplicas.

De manera similar, se definió como un criterio para clasificar las variaciones en las mediciones acústicas en pequeñas, medianas y grandes; variaciones en el nivel de presión sonora de 2 a 3 dB recién son audibles y detectables bajo condiciones normales. Variaciones entre 3 a 10 dB se perciben con claridad. En ese sentido, las variaciones se pueden clasificar en mínimas o no audibles (< 3 dB), audibles (3 dB a 10 dB) e importantes (> 10 dB).

A partir de una inspección visual, se puede observar que las réplicas de yeso son bastante similares al original de la oreja. La silicona se acerca a la precisión del yeso, pero no logra replicar la oreja exactamente, ya que tiene una textura parecida a plastilina por lo que la entrada a presión en el molde negativo produce imperfecciones notorias. Se puede apreciar en la Fig. 4 una de las imperfecciones en la parte superior externa (*helix* de la oreja).

Finalmente se realiza una comparación cuantitativa de las medidas de las orejas tanto de los moldes originales como de sus réplicas en yeso y silicona. Para obtener las dimensiones de las orejas se utiliza un pie de metro digital. Para estas comparaciones se usarán las variables de la oreja descritas en la Fig. 5.

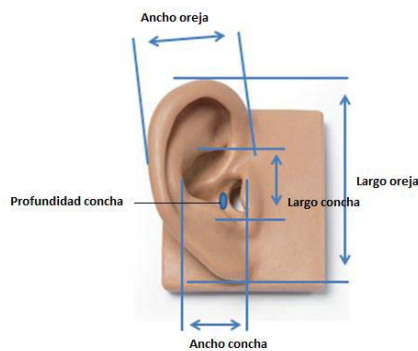


Fig. 5. Medidas consideradas para comparación entre orejas originales y copias de yeso y silicona.

Los resultados de las dimensiones de las réplicas de yeso y la original se pueden apreciar en la Tabla I y Tabla II, mientras que la comparación de las réplicas de silicona se puede encontrar en la Tabla III. Se hicieron varias repeticiones del procedimiento para conocer qué tan estables y repetitivos son los resultados.

En ese sentido se realizaron cuatro réplicas de yeso (Serie 01 a 04) para cada KB90 y KB91 y dos de silicona (Serie 04 a 05) para KB91. Las réplicas 01 y 02 son más simples, porque no tienen un volumen en la parte inferior, que ayuda a fijar la pinna en la base. Ese volumen sí se mantuvo para 03 y 04, como lo tiene el original.

TABLA I
DIMENSIONES RÉPLICAS DE YESO MODELO KB0090. (SE INDICA CON *LA DIMENSIÓN QUE SOBREPASA EL UMBRAL LÍMITE PROPUESTO)

ID	Ancho oreja (mm)	Largo oreja (mm)	Ancho concha (mm)	Largo concha (mm)	Profundidad concha (mm)
KB90	34,72	65,05	22,06	26,02	22,04
KB9001	34,67	66,08*	21,81	26,01	22,60
KB9002	34,71	66,40	21,40	26,06	23,01
KB9003	34,81	66,10	21,97	26,08	22,01
KB9004	34,75	66,05	22,03	26,45	22,00

TABLA II
DIMENSIONES RÉPLICAS DE YESO MODELO KB91

ID	Ancho oreja (mm)	Largo oreja (mm)	Ancho concha (mm)	Largo concha (mm)	Profundidad concha (mm)
KB91	34,95	65,10	21,60	26,60	23,04
KB9101	34,85	65,89	21,50	26,57	22,89
KB9102	34,65	65,50	21,57	26,63	22,56
KB9103	34,94	65,63	21,49	26,54	22,94
KB9104	34,67	65,93	21,34	26,84	23,01

TABLA III
DIMENSIONES RÉPLICAS DE SILICONA MODELO KB91

ID	Ancho oreja (mm)	Largo oreja (mm)	Ancho concha (mm)	Largo concha (mm)	Profundidad concha (mm)
KB91	34,95	65,10	21,60	26,60	23,04
KB9105	36,65	67,89	19,58	23,58	20,03
KB9106	36,55	67,50	19,09	23,98	20,08

De la Tabla I podemos observar que las dimensiones de las réplicas no varían en más de 1 mm al comparar con el modelo original, excepto para un caso en que es 1,03 mm. En base a esta comparación y sumado a la evaluación visual, las réplicas son catalogadas de buena calidad. Finalmente, a partir de la Tabla II, podemos observar que al igual que las réplicas del modelo KB90, las réplicas de KB91 tienen variaciones en las dimensiones menores a 1 mm, por lo que también cumplen con el criterio establecido.

Respecto a las réplicas en silicona, estas tuvieron problemas con la finalización completa de cada una de ellas. Esto es debido al mismo proceso de secado que genera imperfecciones, lo que en consecuencia produce cambios en la forma de la pinna. Las dimensiones de las réplicas de silicona se presentan en la Tabla III, donde se aprecia un aumento en las dimensiones exteriores (ancho y largo de la pinna) y se contraen las dimensiones interiores (anchura y largo de la concha). La profundidad de la concha también disminuye en mayor proporción que en las réplicas de yeso. En conclusión, las medidas obtenidas de las orejas de silicona presentan diferencias con la oreja original (GRAS). Además, al no tener un terminado parejo en sus bordes, las pinnae no se pueden utilizar para ensamblarla en la estructura para las posteriores mediciones acústicas de la PRTF.

Un factor adicional respecto a las pruebas acústicas se relaciona con los distintos materiales y sus características acústicas. La materialidad puede influir en los resultados de las mediciones. Las comparaciones que se realizan son entre muestras de orejas de principalmente dos materiales

diferentes: está la original (GRAS) que es de silicona, y las réplicas de yeso. Además, hay una réplica de silicona, pero que fue descartada (Fig. 4). La silicona tiene una densidad similar a la del agua y el yeso una densidad de más del doble que el agua. Por lo tanto, la impedancia acústica de ambos puede ser considerada mucho mayor que la del aire; por lo tanto, ambos materiales tienen un factor de reflexión cercano a 1 y son comparables directamente. La misma conclusión se puede ver en las tablas de coeficientes de absorción [5].

III. SISTEMA DE MEDICIÓN ACÚSTICA

Para la caracterización acústica que se presenta en este trabajo no se va a trabajar con la cabeza y torso, sino que solamente la oreja será montada y fijada en el centro de una superficie circular, de madera, plana de grandes dimensiones (diámetro 188 cm), en comparación con el tamaño de la pinna. Dentro de la oreja, en lo que corresponde a la entrada del canal auditivo, está ubicado un micrófono (Fig. 6).

La PRTF es una función que se obtiene de una medición que normalmente se realiza como medición relativa. Esto es; existe una medición de referencia inicial, que se usa como base para corregir o compensar las mediciones comparativas y que consiste en ubicar el micrófono en el centro de la superficie plana circular, pero sin la oreja. En reemplazo de la oreja se pone una pieza sólida rectangular plana de las mismas dimensiones que la base de la pinna GRAS, que forma una superficie plana continua de la misma altura que el plano de madera. Todas las mediciones posteriores, con las pinnae, son compensadas o corregidas en base a la referencia. Así, se compensan todas las características acústicas del altavoz y del micrófono quedando solo la información del objeto a caracterizar. El resultado que se obtiene es llamado PRTF de campo libre, presentado en la ecuación (1).

$$PRTF_{\text{campo libre}}(\theta, \varphi, r, f) = \frac{H(\theta, \varphi, r, f)}{H_{\text{ref}}(\theta, \varphi, r, f)} \quad (1)$$

Donde $PRTF_{\text{campo libre}}$ es la función de transferencia de la oreja que depende la posición relativa entre la fuente y el micrófono dada acá en coordenadas polares (θ , φ y r) y de la frecuencia f de la onda. Cada $PRTF_{\text{campo libre}}$ se obtiene realizando dos mediciones: la recién mencionada medición de referencia H_{ref} y H que es con la pinna en el centro de la madera (Fig. 6 y Fig. 7b). Las diferencias que aparecen entre las mediciones se deben a la oreja, específicamente a los cambios que la oreja hace al campo acústico.

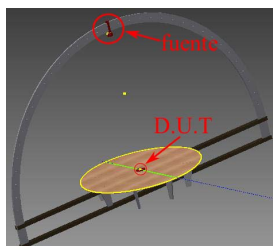


Fig. 6. Estructura de medición acústica modelo digital con fuente (altavoz) y dispositivo de prueba (D.U.T.).

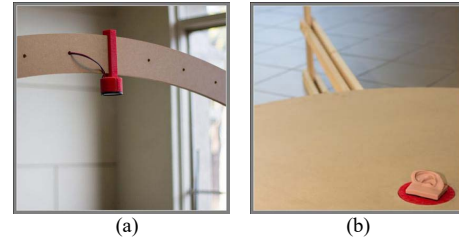


Fig. 7. Elementos en la estructura usada para caracterización acústica: a) altavoz, b) pinna o dispositivo de prueba (D.U.T.).

Para facilitar la medición, se construyó un arco que sujeta la fuente sonora (altavoz) y que permite cambiar su posición a distintos ángulos, que se muestra en la Fig. 6. En todas las mediciones el radio r se mantuvo constante y corresponde a 150 cm. El soporte que recibe y fija la pinna en el centro de la estructura es también circular (Fig. 7b, soporte circular rojo) para permitir la rotación de ésta, de tal forma de poder girarla y realizar mediciones desde distintos puntos (ángulo de azimut) y también permite cambiar la posición de la fuente, lo que es un cambio de ángulo de elevación. Con respecto a las señales de medición para obtener las respuestas al impulso o equivalentemente las PRTF, se usarán señales de barrido de frecuencias tales como *sweep*, *chirp* o *swept cosine* [20].

La comparación cualitativa de las PRTF se realizará utilizando gráficos de respuesta en frecuencia, para distintas posiciones relativas entre fuente y receptor. De esta forma se pueden identificar las desviaciones y diferencias entre las distintas réplicas en función de los distintos ángulos. El software utilizado en la medición es Matlab, junto a la librería ITA-Toolbox [22]. Esta librería es una herramienta especializada para la grabación, medición, manipulación, procesamiento y presentación de señales acústicas.

Las mediciones acústicas de este tipo idealmente se realizan en una cámara anecoica ya que son principalmente dos aspectos a considerar para lograr una medición de calidad y que existen en una cámara anecoica: 1) Aislación de fuentes de ruido externo y 2) eliminar reflexiones acústicas de paredes y/o objetos. En las mediciones realizadas por nosotros no utilizamos cámara anecoica, pero tomamos las precauciones necesarias para cumplir con ambos criterios. Respecto a 1): La aislación desde el ruido externo es para lograr una buena relación de señal a ruido, por ejemplo, de al menos 50 dB. Esto lo logramos haciendo las mediciones en las afueras del laboratorio en horarios en los que el ruido de fondo es de aproximadamente 40 dB(A) y utilizando señales con gran energía. Esto último se logra con señales *sweep* de larga duración o la repetición y promediación de varias señales más cortas y utilizando el altavoz a niveles altos antes de potencia, sin que trabaje en zona no lineal. Con esto se lograron relaciones de señal a ruido > 50 dB. Respecto a 2) el método propuesto en [20] y que está incluido en ITA-Toolbox genera un como resultado de la medición una señal del tipo *impulse response* (respuesta al impulso), que contiene inicialmente, en los primeros milisegundos, las características del D.U.T. (*Device Under Test*, D.U.T) como también, algunos milisegundos más tarde, reflexiones en las paredes y objetos cercanos.

Las dimensiones de la superficie circular de madera (188 cm), la distancia entre micrófono y fuente (150 cm) y la distancia de objetos y paredes cercanas permite, sin problema, identificar y separar temporalmente en la señal, los impulsos del D.U.T. de las reflexiones posteriores en paredes o la difracción en el borde de la superficie circular de madera. Al eliminar todas las reflexiones indeseadas, manteniendo solamente el primer impulso, se permite generar condiciones equivalentes a una sala anecoica. Todo lo anteriormente mencionado supone la existencia de condiciones de linealidad e invariancia en el tiempo para todo el sistema.

Por otra parte, la estructura para la medición está construida para evitar que la fuente sufra cambios entre mediciones (específicamente oscilaciones), y también para dejar fija la oreja y el micrófono evitando cambios en las posiciones de las réplicas a comparar. La Fig. 6 muestra un modelo digital de la estructura construida con el dispositivo de prueba D.U.T. mientras que en la Fig. 7 se muestra la fuente de audio (altavoz) y la pinna ubicada al centro de la plataforma circular.

Los equipos acústicos usados en la medición son los siguientes: Amplificador Dayton DTA-1 de dos canales de salida con un rango dinámico de los 102 dB; tarjeta de sonido PreSonus FireBox con una rango dinámico de 110 dB y 24 bits/96 kHz de frecuencia de muestreo; altavoz marca BB 2.01 Omnes Audio de 2”, de rango de funcionamiento entre los 200-20000 Hz; micrófono MM1 Beyerdynamic con una respuesta de frecuencia lineal, omnidireccional y construcción tubular estrecha para reducir al mínimo la influencia sobre el campo de sonido. La Fig. 8 muestra el diagrama de interconexión de los dispositivos. Los equipos deben ir conectados a un computador (PC) por medio de la tarjeta de sonido la cual es conectada por un puerto FireWire a este. La tarjeta de sonido funciona como convertidor Digital/Análogo (DAC) y Análogo/Digital (ADC). La salida DAC es conectada al amplificador y la entrada ADC es conectada al micrófono.

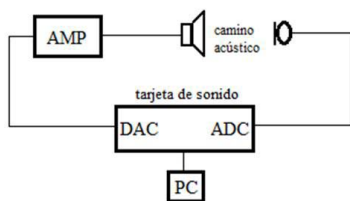


Fig. 8. Diagrama de conexión del sistema de medición.

En la Fig. 8, lo que aparece como camino acústico es lo que se representa como función de transferencia en este trabajo y es el bloque central de los esquemas de la Fig. 9.

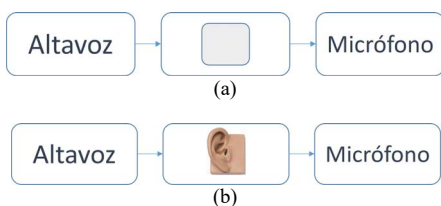


Fig. 9. Esquemas que muestran las dos condiciones de medición del camino acústico de la Fig. 8. a) Esquema de medición de referencia Href. b) Esquema de medición de pinna H.

Para esta medición, se procede al envío de una señal tipo barrido de frecuencia con un rango de frecuencia de 400 a 22050 Hz. Este rango es donde se optimiza el funcionamiento del altavoz, según fue establecido previamente en mediciones preliminares. El análisis de las señales de respuesta al impulso, se realiza mediante la librería ITA-Toolbox para Matlab que genera gráficos de espectro de las PRTF, donde se comparan en un rango de tiempo (*window*) de 45,283-47,506 ms para eliminar otro tipo de distorsiones no referentes a la medición, como por ejemplo por reflexiones producto del borde de la plancha circular y de las paredes de la sala entre otras. La Fig. 10 muestra el resultado de la medición de referencia H_{ref} . El gráfico fue normalizado para tener 0 dB en 400 Hz.

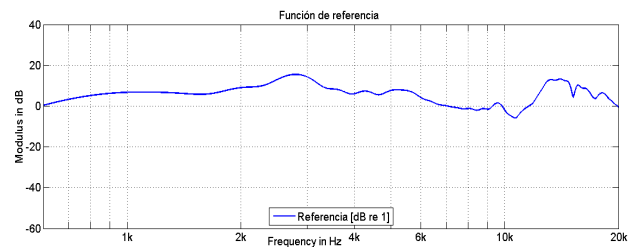


Fig. 10. Diagrama de medición sin pinna para obtención de señal de referencia. Esta medición contiene las características espectrales del altavoz y del micrófono.

IV. RESULTADOS

A continuación, se presentarán los resultados de las distintas mediciones. Los parámetros modificados entre las distintas mediciones fueron el uso de las distintas réplicas y la posición relativa entre fuente (altavoz) y receptor (micrófono en la pinna), específicamente los ángulos θ y ϕ ; esto último se hizo para la KB90 y para la réplica KB9003. Los resultados se presentan de manera gráfica como funciones de transferencia (en magnitud). Primero, se obtuvo la PRTF de las pinnae originales (GRAS KB90 y KB91) que corresponden a dos modelos distintos; pinna derecha e izquierda. Las medidas antropométricas principales de ambos modelos presentados en las Tablas I y II, siendo cuasi idénticas. Sin embargo, generan cambios en la forma de la función de transferencia. El resultado de la medición acústica se muestra en la Fig. 11. Se puede apreciar que las gráficas son similares en su forma y con variaciones de amplitud de 2 a 3 dB, que pueden ser catalogadas como mínimas. Esto permite suponer que ambos modelos, izquierdo y derecho pueden ser usados indistintamente, al menos para esa posición angular.

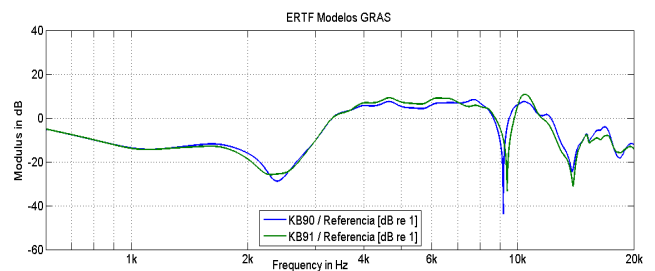


Fig. 11. PRTF modelo KB90 y KB91.

Luego se procedió a medir las cuatro réplicas de yeso obtenidas (series 01, 02 y 03, 04) para poder efectuar comparaciones a la señal de respuesta de cada pinna original y réplica. La Fig. 12 muestra las réplicas en comparación con la PRTF de la KB90 y la Fig. 13 la comparación de las réplicas con la PRTF de la pinna KB91.

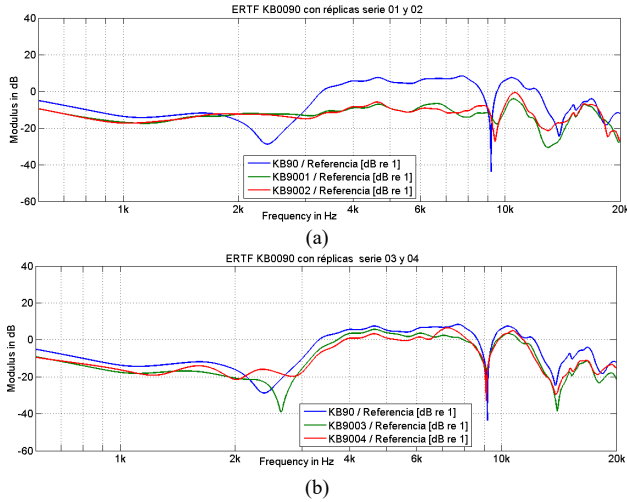


Fig. 12. PRTF de réplicas en comparación con original GRAS KB90. a) Réplicas de serie terminadas en 01 y 02, b) Réplicas de serie terminadas en 03 y 04.

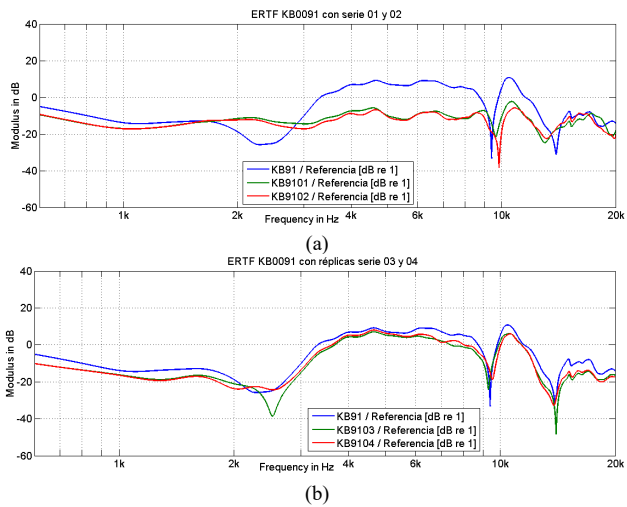


Fig. 13. PRTF de réplicas en comparación con original GRAS KB91. a) Réplicas de serie terminadas en 01 y 02, b) Réplicas de serie terminadas en 03 y 04.

La Fig. 12a y la Fig. 13a compara el original con la réplica que tiene la diferencia constructiva presentada anteriormente en la parte posterior (cavidad de aire adicional). Esta diferencia produce una diferencia en magnitud, a partir de 2 kHz que va de 5 a 15 dB. Esto demuestra cómo la diferencia en la fijación de la pinna en la base y de la cavidad influye de manera considerable en los resultados de la medición. Por otra parte, las réplicas serie 03 y 04 (Fig. 12b y Fig. 13b) responden de muy buena manera con la modificación de la base incluida a la réplica, logrando gran similitud a las PRTF de las GRAS, (i.e. variaciones menores a 5 dB).

El segundo grupo de mediciones comparativas consistió en modificar la posición relativa entre fuente y receptor (Fig. 14 a Fig. 16). Se realizaron estas mediciones con ángulos azimut desde 0° a 150° en pasos de 30° y una elevación de la fuente entre 90° y 5° con pasos de 30° (excepto el último que es de 25° para no quedar en el borde de la estructura). Para estas mediciones de posición se usaron la pinna original KB90 (Fig. 14) y su réplica KB9003 (Fig. 15) que fue la réplica que presentó mayor similitud en la medición previa.

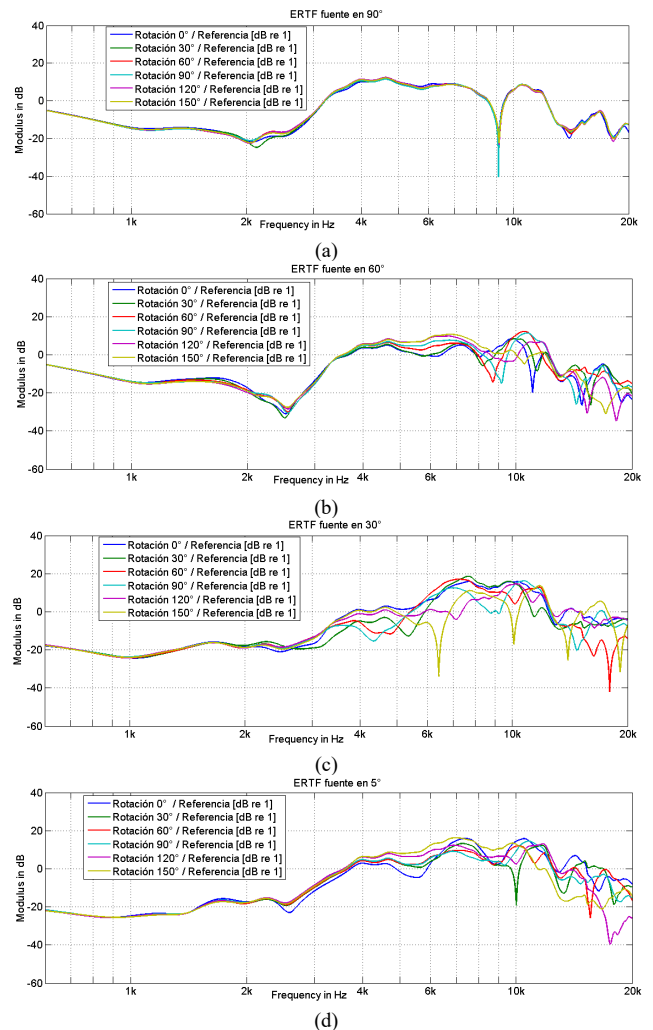


Fig. 14. PRTF de pinna original GRAS KB90 para distintos ángulos de rotación de fuente y de elevación de pinna. a) fuente en 90°, b) fuente en 60°, c) fuente en 30°, d) fuente en 5°.

La Fig. 14 muestra la PRTF del modelo original KB90, para distintas elevaciones de fuente (90°, 60°, 30° y 5°) y para distintos casos de rotación azimutal de la pinna. Podemos apreciar que las funciones generadas con el ángulo de 90° (Fig. 14a) casi no muestran cambios en los seis casos. Esto es esperable, porque la fuente está perfectamente encima de la pinna y una rotación de ésta no cambia la PTRF. En la Fig. 14b, Fig. 14c y Fig. 14d, que representan las mediciones para los demás ángulos de elevación de la fuente, se aprecian cambios en amplitudes y en la ubicación de algunas resonancias. Esto se debe a la posición relativa en la que se

envía la señal, la forma de la pinna y también porque al estar la fuente más cerca de la superficie de madera sufre más cambios por las refracciones y reflexiones producidas por esta.

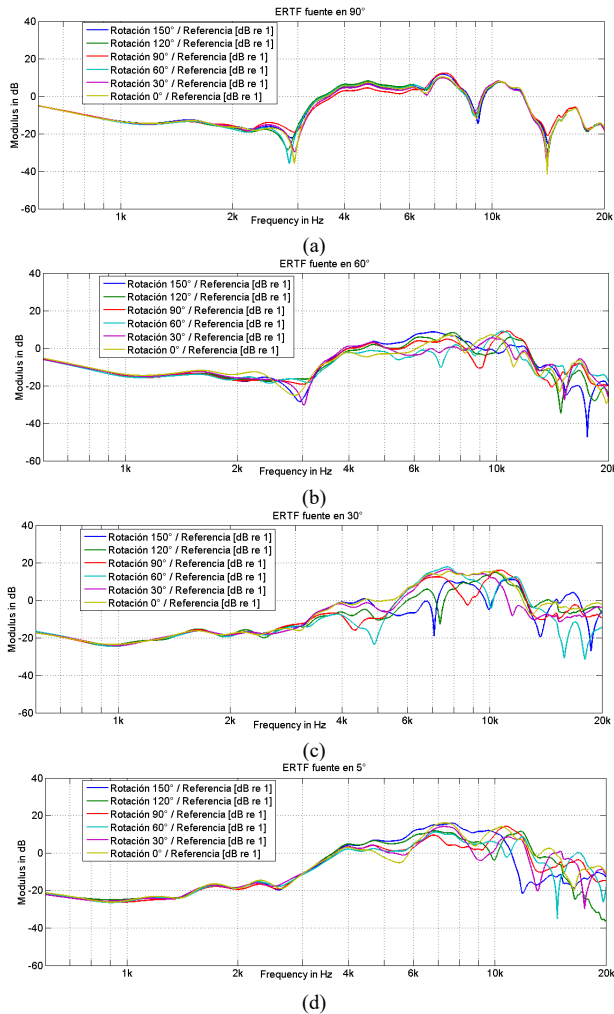


Fig. 15. PRTF de pinna KB9003 para distintos ángulos de rotación de fuente y de elevación de pinna. a) fuente en 90° , b) fuente en 60° , c) fuente en 30° , d) fuente en 5° .

Un último caso de análisis es comparar directamente los modelos KB90 y KB9003, para los casos de elevación de fuente de 60° , 30° y 5° , manteniendo fijo el ángulo de rotación de la pinna en una posición arbitraria, en este caso de 90° . La Fig. 16 muestra dicha comparación. Se puede ver que en la Fig. 16a ambas curvas siguen una forma similar con una diferencia importante en los 2.5 kHz, discutida anteriormente. En el resto del rango de frecuencias, las diferencias son menores a 5 dB. Para los otros dos ángulos de elevación las diferencias entre las señales son aún menores; el cambio de posición de fuente y pinna no altera las diferencias entre la PRTF original GRAS y la PRTF de la réplica.

V. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

En este artículo se presentó un estudio que compara los cambios en la función de transferencia acústica de pinnae del tipo que se usan en maniquí acústicos, con réplicas de éstas,

creadas con un método de moldes negativos y positivos de alginato y yeso. Los resultados muestran que la metodología para crear moldes negativos y positivos de yeso, genera réplicas que presentan diferencias en tamaño y distancias antropométricas menores a 1 mm.

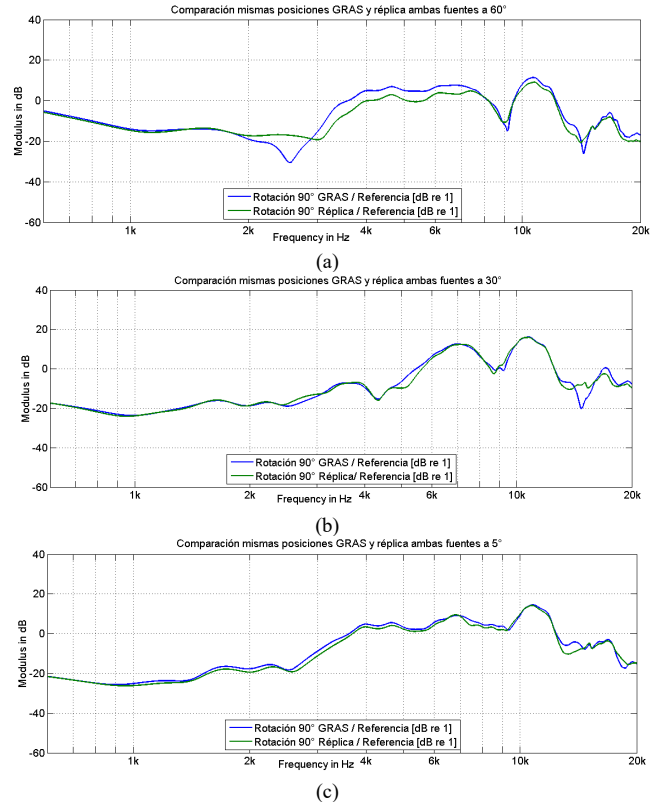


Fig. 16. PRTF comparación mismas posiciones de la pinna GRAS y réplica ambas fuentes a 60° , b) fuente en 30° , c) fuente en 5° .

Una réplica de silicona genera diferencias significativamente mayores por lo que no se utiliza en los análisis posteriores. Respecto las mediciones acústicas y comparación de funciones de transferencia acústicas de las réplicas con respecto al original se ven diferencias de menos de 3 dB en gran parte del rango y diferencias mayores a 3 dB solamente en frecuencias muy específicas y para algunos ángulos. Los resultados del trabajo presentado permiten obtener las siguientes conclusiones:

1. La metodología de dos pasos (negativo y positivo) de alginato y yeso de pinnae es efectiva para lograr réplicas de buena calidad, según los criterios de calidad establecidos inicialmente, de manera simple, limpia, económica y rápida. Esto permite pensar en usar esta metodología para hacer réplicas de orejas humanas.
2. El criterio de buena calidad se definió como una inspección visual inicial que detecte imperfecciones y luego una medición de estas. Dado que el rango de frecuencias al que se le presta más atención es el de la voz (100 Hz a 7 kHz) se propone un límite de tamaño de imperfecciones de 1 mm. Para las mediciones acústicas se define un criterio de calidad en tres niveles, siendo el límite imperceptible, de 3 dB.

3. El que existan desajustes en la posición exacta de los objetos a medir o volúmenes o cavidades distintos genera un importante cambio en las PRTF.

Es posible concluir que a través de la metodología presentada se puede genera réplicas de pinnae que, por un lado, presentan diferencias físicas muy pequeñas y que por otro tienen una respuesta acústica muy similar a la original. Esto se ve porque las diferencias entre réplicas son pequeñas y las diferencias entre original y réplicas también son pequeñas.

Finalmente, el que las mediciones sean robustas, en otras palabras, que haya diferencias pequeñas entre mediciones con condiciones similares o equivalentes, permiten sacar otra conclusión: el sistema de medición que incluye el hardware y software de medición, la estructura y soporte de medición y la metodología de procesamiento de los datos, permite trabajar con una condición equivalente a estar en una cámara anecoica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto FONDECYT 11150388.

REFERENCIAS

- [1] Gierlich, H. W. (1992). The application of binaural technology. *Applied Acoustics*, 36(3–4), 219–243.
- [2] Kumon, M., & Noda, Y. (2011). Active soft pinnae for robots. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 112–117.
- [3] Lentz, T., Schröder, D., Vorländer, M., & Assenmach, I. (2007). Virtual reality system with integrated sound field simulation and reproduction. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2007.
- [4] Fels, J., & Paprotny, J. (2013). Ear canal properties of children: Dimensions of ear canals and simulation of the input-impedance. *Acta Acustica United with Acustica*, 99(4), 582–589.
- [5] Vorländer, M., (2008). *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality*. Book (Vol. 123). Springer.
- [6] Kohlrausch, A., Braasch, J., Kolossa, D., & Blauert, J. (2013). An introduction to binaural processing. In *The Technology of Binaural Listening* (pp. 1–32). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [7] M. Brüggén. *Klangverfärbungen durch Rückwürfe und ihre auditive und instrumentelle Kompensation [Sound coloration due to reflections and its auditory and instrumental compensation]*. dissertation.de-Verlag im Internet, Berlin, 2001.
- [8] A. Tsilfidis, A. Westermann, J. Buchholz, E. Georganti, and J. Mourjopoulos. Binaural dereverberation. In J. Blauert, editor, *The technology of binaural listening*, chapter 14. Springer, Berlin-Heidelberg-New York NY, 2013.
- [9] A. Bregman. *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. MIT Press, 1990.
- [10] Masiero, B. (2012). *Individualized binaural technology: measurement, equalization and perceptual evaluation*. Phd thesis, RWTH Aachen University, Aachen.
- [11] Møller, H. (1992). “Fundamentals of binaural technology”. In: *Applied Acoustics* 36.3-4, pp. 171–218 (cit. on pp. 1, 3, 67–69).
- [12] Blauert, J. (1997). *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 2nd edition.
- [13] Ziegelwanger, H., Kreuzer, W., & Majdak, P. (2016). A priori mesh grading for the numerical calculation of the head-related transfer functions. *Applied Acoustics*, 114, 99–110.
- [14] F. Wightman and D. Kistler. Headphone simulation of free-field listening I: Stimulus synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.*, 85:858–867, 1989.
- [15] F. Wightman and D. Kistler. Headphone simulation of free-field listening II: Psychophysical validation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 85:868–878, 1989.
- [16] E. Wenzel, M. Arruda, D. Kistler, and F. Wightman. Localization using non-individualized head-related transfer functions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 94:111–123, 1993.
- [17] Katz, B. F. (1996). New approach for obtaining individualized head-related transfer functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(4), 2609–2609.
- [18] Fels, J. (2008). “From children to adults: How binaural cues and ear canal impedances grow”. Ph.D. RWTH Aachen University
- [19] https://www.gras.dk/products/product/ss_export/pdf2?product_id=502.
- [20] Kuttruff, H. (2007). *Acoustics. An Introduction*, Taylor and Francis, London and New York, 1st Edition.
- [21] Massarani, P., & Müller, S. (2010). *Transfer-Function Measurement with Sweeps*. Acoustical Engineering Society, 443–471.
- [22] <http://publications.rwth-aachen.de/record/687308>

Sebastián Fingerhuth received his Ph.D. degree (2010) from RWTH Aachen University, Aachen, Germany. He studied Electrical Engineering at Pontificia Universidad Católica de Chile. He is Professor at the School of Electrical Engineering at Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Chile. His research interests are in acoustics, vibration and sensors.

José Luis Bravo received the Electronic Engineer title from the Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Valparaíso, Chile in 2010. Currently he is working in a communication engineering company.

Marcelo Bustamante received his Dr. Eng. degree (2015) in Univerdisade Federal de Santa Catarina UFSC, Brazil. He studied Acoustical Engineering at Universidad Austral de Chile. He is a researcher at Carrera Fonoaudiología at Universidad Autónoma de Chile – Sede Talca. His areas of interests are vibroacoustics, audio technology and auralization.

Francisco Pizarro (M’19) received the degree in electronics engineering from the Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Chile, in 2010, the M.Sc. degree in communication engineering from the Politecnico di Torino, Italy (2010) and the Ph.D. degree in electromagnetics and high frequency systems, plasma engineering from the Institut Supérieur de l’Aéronautique et de l’Espace, Toulouse, France, in 2014. Since 2014, he has been an Associate Professor with the School of Electrical Engineering, PUCV. His research interests include reconfigurable antennas, metamaterials, and plasma/microwave interaction.