



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DUMMY HEAD DESTINADA A LA  
RECREACIÓN DE ENTORNOS VIRTUALES

DOCUMENTO

Aitor Lebrón Ruiz

Ricardo San Martín Murugarren

Pamplona, 9 septiembre de 2016



*A mi buen amigo Aritz, sin su paciencia y destreza esto no hubiera salido; a mi madre, que siempre ha sido un ejemplo de trabajo, superación, orden y templanza y a todos aquellos que con sus palabras, búsquedas, llamadas, ideas (reflexionadas o locuras espontáneas), sugerencias y ánimos me han acompañado durante este último trabajo.*

*Muchas gracias a todos, si de algo puedo presumir en esta vida, es de tener muy buenos AMIGOS.*

# Tabla de contenidos

## 1. Introducción y propósito del proyecto

## 2. Antecedentes y objetivos

- 2.1 Anatomía y fisiología del oído
  - 2.1.1 Oído externo
  - 2.1.2 Oído medio
  - 2.1.3 Oído interno
- 2.2 Percepción sonora / psicoacústica
  - 2.2.1 Percepción sonora
  - 2.2.2 Localización del sonido
  - 2.2.3 Localización en un sistema de coordenadas
- 2.3 Parámetros involucrados en la escucha binaural
  - 2.3.1 Lateralización
    - 2.3.1.1 Diferencia interaural en tiempo (DIT/ITD)
    - 2.3.1.2 Diferencia interaural en intensidad (DII/IID)
  - 2.3.2 Elevación
    - 2.3.2.1 Función de transferencia HRTF
  - 2.3.3 Distancia
  - 2.3.4 Efecto de precedencia (efecto Haas)
  - 2.3.5 Conos de confusión
  - 2.3.6 Respuesta del cráneo (HSR)
  - 2.3.7 Factores externos a la fisiología humana que interfieren en la escucha binaural

## 3. Estado del arte. Modelos comerciales tomados como referencia

- 3.1 Ringo (Patente de Zuccarelli)
- 3.2 Neumann KU-Series (KU-100)
- 3.3 HeadAcoustics HSU-III

## 4. Desarrollo del trabajo

- 4.1 Materiales utilizados
- 4.2 Modelado
- 4.3 Inyección del molde
- 4.4 Elementos de captación (transductores)
  - 4.4.1 Modelos de micrófonos propuestos
- 4.5 Electrónica
- 4.6 Esquema de montaje para las salidas de audio

## 5. Recopilación y presentación de datos

- 5.1 Medición de la sensibilidad de los micrófonos
- 5.2 Respuesta en frecuencias (experimento en la cámara audiométrica)
- 5.3 Análisis físico acústico espacial (BRIR) de una sala de laboratorio
  - 5.3.1 Calibración
  - 5.3.2 Respuesta en frecuencias
  - 5.3.3 Respuesta al impulso
  - 5.3.4 Estudio IACC

## **6. Otros parámetros medidos durante el experimento**

### 6.1 Criterio temporal

6.1.1 Early Decay Time (EDT)

6.1.2 Tiempo de reverberación T30

### 6.2 Criterio energético

#### 6.2.1 Claridad

6.2.1.1 Claridad de la voz (C50)

6.2.1.2 Claridad musical (C80)

6.2.1.3 Definición (D50)

## **7. Estudio económico**

## **8. Conclusiones**

## **9. Problemas técnicos encontrados**

## **10. Bibliografía**

## **11. Referencias externas**

## **12. Figuras**

## **13. Gráficos**

## **14. Anexos**

ANEXO I: Patente US4680856. Hugo Zuccarelli, 1987. Monleale (AL), Italia.

ANEXO II: FlexFoam IT! Series. Product Overview. Smooth On. [Http://www.smooth-on.com/](http://www.smooth-on.com/)

ANEXO III: DragonSkin FX-Pro. Product Overview. Smooth On. [Http://www.smooth-on.com/](http://www.smooth-on.com/)

ANEXO IV: DragonSkin FX-Pro. Material Safety Datasheet. Smooth On. [Http://www.smooth-on.com](http://www.smooth-on.com)

ANEXO V: Projects Unlimited. POM-5238-LR. Projects Unlimited Inc. 2006

ANEXO VI: Kingstate KEEG1538WB-100LB. Kingstate Electronics Corp.

ANEXO VII: Prosignal ABM-715-RC. Specifications. Element14. [Http://www.farnell.com/](http://www.farnell.com/)

## 1. Introducción y propósito del proyecto.

En los últimos años hemos visto como la industria audiovisual ha ido sufriendo una continua expansión con la finalidad de ofertar nuevas experiencias al consumidor. Conceptos que hace un par de décadas eran más propios de la ciencia ficción, a día de hoy cuentan con dispositivos que revolucionan el mercado y la manera en que disfrutamos de la parrilla de ocio, convirtiendo ésta en algo cada vez más inmersivo.

Ciertamente, la implementación de tridimensionalidad a las producciones cinematográficas o el desarrollo de nuevos sistemas de grabación que permiten una experiencia de 360° dentro de una escena rodada en cualquier parte del mundo atiende, sin duda alguna, al deseo de recrear la realidad y transportar al espectador a entornos realistas, sumergir al espectador en un mundo real o ficticio, es la próxima meta.

Viendo que la industria está tendiendo a la recreación de la realidad, no podemos obviar uno de los sentidos más importantes en la percepción espacial, el oído. Una herramienta fisiológica muy potente que proporciona mucha información y que es capaz de evocar sensaciones y emociones.

Este proyecto pretende estudiar la viabilidad de la construcción de un dispositivo de captación binaural, la construcción de dicho modelo y la evaluación de los resultados frente a un modelo comercial con características técnicas acomodadas a estándares de medición en entornos profesionales y de laboratorio.

## 2. Antecedentes y objetivos.

El Ser Humano, mediante una combinación de órganos interconectados con el cerebro, es capaz de percibir información de su entorno gracias a lo que conocemos como sentidos. Esta capacidad ha sido fundamental en el desarrollo y supervivencia de la especie ya que gracias a esta información ha podido estar alerta y prevenido de posibles amenazas, ha sido capaz de identificar y evaluar todo el abanico de alimentos, presas, herramientas y la pérdida de tan sólo uno de estos sentidos es considerado, en todo caso, como un mermo a su condición de autosuficiencia, si bien la no sensibilidad ante algún tipo de estímulo no supone un problema letal, si se puede considerar como una gran tara que complicará la existencia de cualquier individuo.

### 2.1. Anatomía y fisiología del oído

El fenómeno de la audición se da gracias a la captación de pequeñas variaciones en la presión del aire causadas por las ondas sonoras, el aparato encargado de la recepción de dichas ondas de presión es el oído el cuál transforma dichas variaciones de presión en vibraciones mecánicas que posteriormente excitarán terminaciones nerviosas suspendidas en un fluido, la excitación de dichas células nerviosas generan una serie de impulsos eléctricos que son enviados al cerebro para que procese y reinterprete la información adquirida, de esta manera, se podría asegurar que el órgano que escucha es el cerebro gracias a la mediación del oído.

#### 2.1.1. Oído externo.

Constituye la parte más visible del órgano auditivo ya que es la parte que se encuentra en la parte externa del cráneo, dentro de esta sección del oído se diferencian dos partes: la pinna o aurícula y el conducto auditivo externo.

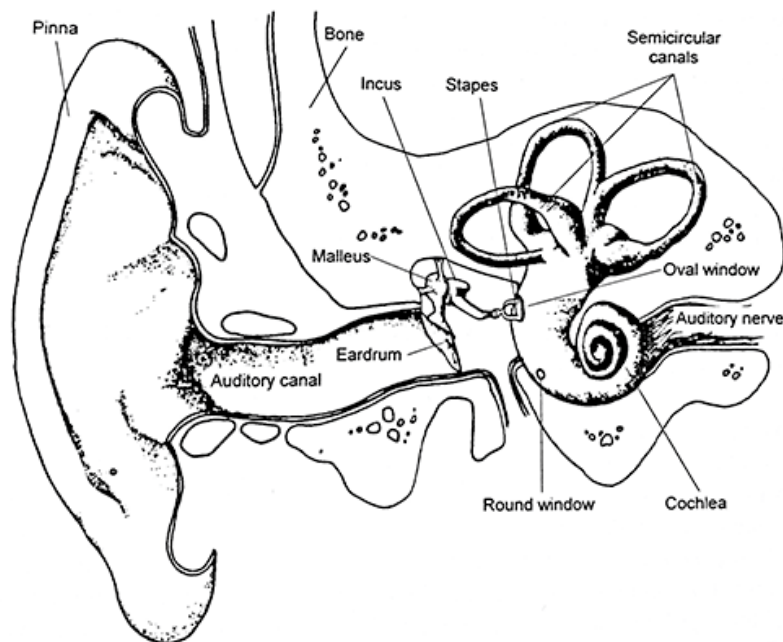


Figura 1. Detalle del oído externo y medio

La pinna o *aurícula* es el elemento encargado de la captación de las vibraciones sonoras, está constituido por cartílago y piel. No es un elemento indispensable en la recepción del sonido, pero sí maximiza la cantidad de información sonora que llega al cerebro. Esto se

debe a su combinación de formas, el efecto embudo redirige las ondas al *conducto auditivo externo*, un tubo de unos 25mm de largo y 7mm de ancho [1] mediante el fenómeno físico de la difracción.

### 2.1.2. Oído medio.

El oído externo acaba en el punto donde comienza el oído medio, tras atravesar el conducto auditivo externo, las ondas sonoras inciden sobre una membrana de aproximadamente 7 milímetros de diámetro al final del canal, el *tímpano*.

El tímpano es capaz de aumentar hasta en 15dB la energía recibida en un ancho de banda comprendido entre los 3 y los 5Khz aunque el oído medio, en sí mismo, actúa como un filtro paso bajo con atenuaciones variables dependiendo del nivel de presión sonora (NPS) incidente y la frecuencia del sonido, así pues, podemos observar un pico de resonancia en torno a los 3KHz para adultos y un desplome a partir de los 12KHz. [2]

El tímpano además protege el sistema auditivo gracias al reflejo timpánico, que en conjunción con un cambio de movimiento en el estribo permite que no se generen daños mayores en el oído ante niveles excesivos de presión.

La vibración del tímpano excita una cadena ósea compuesta por tres pequeños huesos unidos entre sí gracias a una serie de ligamentos, el *martillo*, el *yunque* y el *estribo*.

### 2.1.3. Oído interno.

En el oído interno es el punto donde se reinterpreta la vibración mecánica en impulsos eléctricos y está comunicado con el oído medio mediante la *venta oval*.

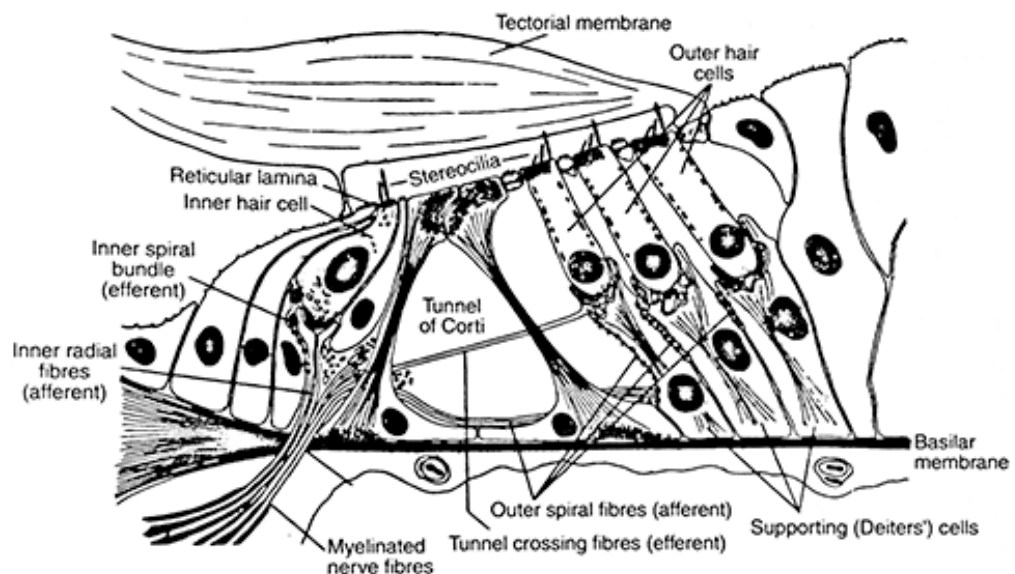


Figura 2. Detalle del oído interno

El oído interno es una cavidad de paredes óseas llenas de líquido que desemboca en el conocido como *vestíbulo*, este conduce a la *cóclea* o caracol, un hueso perforado



(helicotrema) con forma de espiral de dos o tres vueltas y dividido en dos secciones por la *membrana basilar*.

La membrana basilar es el punto sobre el cual se posa el *órgano de Corti*, compuesto por miles de células nerviosas dispuestas en filas y suspendidas en una solución líquida. Estas filas de células no son sino las terminaciones del *nervio auditivo* que se conecta con el cerebro

La oscilación del líquido en el que están sumergidas se da gracias a la vibración entre la ventana oval (provocada por el movimiento del estribo) y la ventana redonda, el movimiento de la solución hace que las células del órgano de Corti se muevan de manera longitudinal a través de toda la extensión de la membrana basilar, siendo los cilios más alejados dentro del caracol los que mayor número de ciclos por segundo son capaces de captar. [3]

## 2.2. Percepción sonora / psicoacústica

### 2.2.1. Percepción sonora

Si definimos el sonido como la *percepción* de una variación en la presión atmosférica deberemos ser capaces de acotar dentro de qué valores se mueve el oído humano estándar y así poder definir un umbral de audición humano.

Así pues, el oyente medio responde a variaciones de presión comprendidas entre los 20mPa y los 20Pa para un rango de frecuencias entre los 20Hz y los 20Khz teniendo un máximo de sensibilidad entre 1KHz y 5 KHZ si bien, el deterioro del oído es una condición humana e irremediablemente, con el paso de los años, las células pilosas del órgano de Corti se van destruyendo provocando una pérdida de sensibilidad gradual de las frecuencias más altas, correspondientes a los sonidos más agudos.

Para representar la sensibilidad del oído frente a sonidos de una determinada intensidad en función de la frecuencia se utiliza la curva del umbral de audición, tomada como referencia ante sonidos que se propagan en forma de ondas planas que inciden frontalmente sobre la membrana timpánica (en campo libre) si bien, la recepción del sonido comúnmente viene más acorde al llamado campo difuso ya que las ondas anteriormente descritas tan sólo pueden alcanzarse en entornos controlados como cámaras anecóicas libres de reflexiones y aportes externos, además, la morfología del ser humano hace que estas mismas ondas incidentes en el sujeto se difracten alrededor de la cabeza (efecto de la sombra provocada por el cráneo), aurículas y hombros del oyente.

No cabe duda de que una de las mayores cualidades del sentido del oído es la capacidad del cerebro para localizar la fuente sonora. Este proceso de interpretación de la información acústica es al que denominamos *escucha binaural* y no es sino consecuencia directa de la diferencia de niveles de presión sonora y fases entre los tímpanos, esta diferencia en las señales eléctricas enviadas al cerebro indica a éste que la fuente sonora está posicionada a un lado u otro de la cabeza, a una altura determinada.

Debido a la separación entre los oídos y la velocidad aproximada de propagación del sonido (unos 340m/s) se asume que podemos percibir retardos de hasta 600us.

En el proceso de la escucha binaural, además de intervenir factores físicos, como el retardo temporal que se produce por la distancia entre los oídos, intervienen factores psicológicos como el enmascaramiento de sonidos de diferente intensidad que suenan al mismo tiempo y que el cerebro discrimina escuchando exclusivamente el sonido fuerte, o el *efecto Haas*, descubierto por el alemán Helmut Haas y según éste, el cerebro que integra en un único sonido aquellos sonidos que se registran en intervalos menores a los 50 milisegundos ya que entiende los sonidos muy próximos en tiempo como ecos del sonido inicial.

No son pocos los parámetros a tener en cuenta cuando se plantea reconstruir un sistema humano, cuestiones como el *Human Skull Response* (HSR) que mide la cantidad de sonido y ultrasonido que es capaz de viajar a través del hueso humano y que, presumiblemente puede alterar a la interpretación del sonido aunque este tipo de parámetros, según estudios, son prácticamente desestimables en nuestro caso, al igual que el posible aporte por reflexión en los hombros y pecho del oyente quedando como elementos a tener en cuenta entonces, la difracción de los frentes sonoros en torno a la cabeza y las aurículas. [5]

### 2.2.2. Localización del sonido

La capacidad de un individuo para ser capaz de ubicar un objeto o una fuente sonora en el espacio es lo que entenderemos como la habilidad de este sujeto para localizar dicha fuente.

Por norma general dicha información es un compendio de las diferentes señales que los sentidos reciben, así pues, la suma de todas estas y la interpretación correcta en el cerebro hace que un sujeto sea capaz de ubicar en un plano de coordenadas la fuente en cuestión.

Además, la teoría matemática determina que la intensidad acústica disminuye en relación a la distancia de la fuente, lo que en teoría, debiera darnos mayor capacidad para percibir cómo de lejos nos encontramos del emisor, sin embargo, el proceso de integración y asimilación del cerebro es complejo y no se nutre únicamente de variables matemáticas, como ya veremos más adelante.

Una de las grandes virtudes del sentido del oído es que ayuda al sujeto espectador a relacionar la proveniencia de los sonidos emitidos por las fuentes y además, gracias a las reflexiones y los aportes la estructura en cada caso, también da información del entorno en el que se encuentra, si es un habitáculo pequeño, una sala grande y cubierta de superficies reflexivas o si hay ausencia de dichos aportes y pudiera considerarse un campo abierto, estos son pequeños matices, que el sentido del oído, por sí mismo puede diferenciar.

### 2.2.3. Localización en un sistema de coordenadas

Puesto que el sonido tiene esa capacidad de recrear el entorno y sus propiedades, deberemos utilizar un sistema capaz de medir la posición desde la que el sonido proviene, por ello, para ser capaces de especificar correctamente la localización de una fuente sonora deberemos hacer uso de las coordenadas polares.

Así pues obtenemos un sistema de coordenadas que divide tres planos que nos servirán de referencia; el plano medio, el plano frontal y el plano horizontal tal y como se muestra en la siguiente figura.

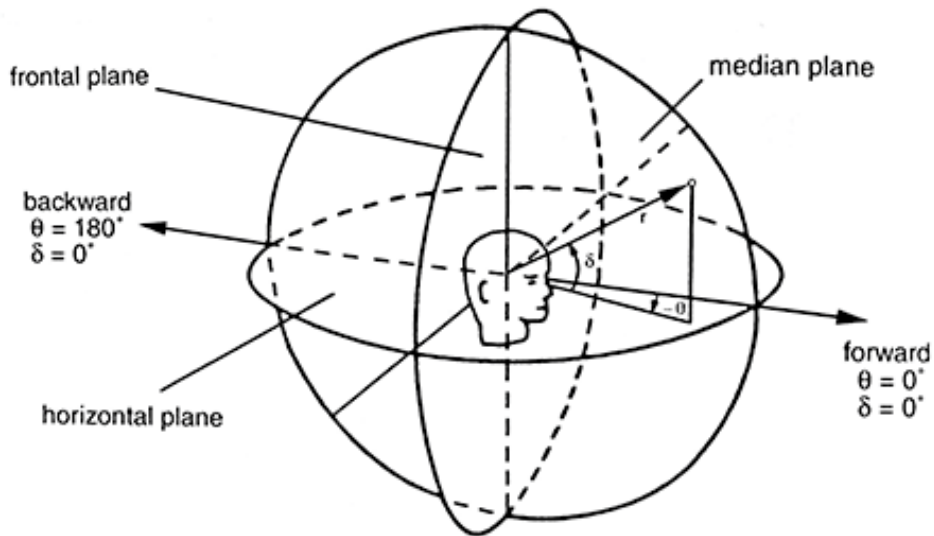


Figura 3. Planos de referencia para localizar una fuente en un sistema de coordenadas.

Así pues, y tomando como referencia que cada uno de los planos cruza por el centro de la cabeza del oyente, podemos ver como el plano frontal determina si los sonidos provienen de delante o atrás, en el plano medio tenemos la discriminación entre los sonidos de izquierda o derecha (Diferencias Interaurales de Intensidad y Diferencias Interaurales de Tiempo) y en el plano horizontal se percibirá si la fuente está ubicada abajo o arriba del punto de referencia (Head Related Transfer Function). Con estos tres planos definidos ya podemos ubicar y señalar la procedencia de un sonido en un entorno tridimensional.

### 2.3. Parámetros involucrados en la escucha binaural.

Como ya se ha mencionado, la información acústica que llega al oyente se procesa en el cerebro, siendo éste el que le otorga un valor real para la localización de las fuentes sonoras, la dificultad en el experimento radica en ser capaz de ver qué clase de parámetros evalúa el cerebro y posteriormente, habrá que ser capaz de medir dichos parámetros para poder confrontar los resultados de este proyecto, con un modelo comercial.

En esencia, el cerebro evalúa las diferencias entre las dos señales que recibe en los oídos, actuando, el cerebro, de igual manera en el sistema visual, donde es capaz de recrear el volumen y la distancia en base a la diferencia de imágenes que obtiene en cada uno de los ojos.

Vemos así que, en realidad, es el cerebro el elemento fuerte de la cadena sensorial, el que actúa como un gran procesador de la información que llega a los sensores y el que le otorga un sentido a ésta, también será éste mismo quien se encargue de realizar aquellos ajustes derivados de las diferencias fisiológicas entre el oyente y el dispositivo de grabación.

#### 2.3.1. Lateralización

Es un fenómeno psicológico relacionado con la sensación de percibir un sonido de un lado u otro dentro de un eje imaginario que cruce los oídos.

Así pues, ante un estímulo diótico (la estimulación de ambos oídos con el mismo sonido y al mismo tiempo) la fuente sonora es ubicada en el centro de los planos de referencia.

Ante una estimulación auditiva igual en ambos oídos, con sonidos monoaurales, podemos recrear este efecto de lateralización introduciendo un pequeño retardo a una de las dos señales, así pues, la señal retardada quedará simulando la sombra acústica de la cabeza y el retardo en tiempo entre oídos, dando la sensación de que el individuo está orientado de una forma u otra con respecto a la fuente, más concretamente, dará la sensación de que la fuente se desplace hacia el lado contrario al que se ha aplicado el retardo.

### 2.3.1.1. Diferencia Interaural en Tiempo (DIT/ITD)

Es el retardo, en tiempo, existente entre la señal de un oído y el otro dentro del mismo sujeto; Esta diferencia de tiempo en la llegada a cada tímpano se traduce en una diferencia de fases entre los sonidos recogidos.

Este parámetro es especialmente interesante para la localización de fuentes sonoras de baja frecuencia (entre los 200 y los 800 Hz) ya que en este caso, la diferencia también se verá afectada por la frecuencia del sonido y no únicamente por la distancia entre los oídos o la orientación del sujeto respecto de la fuente.

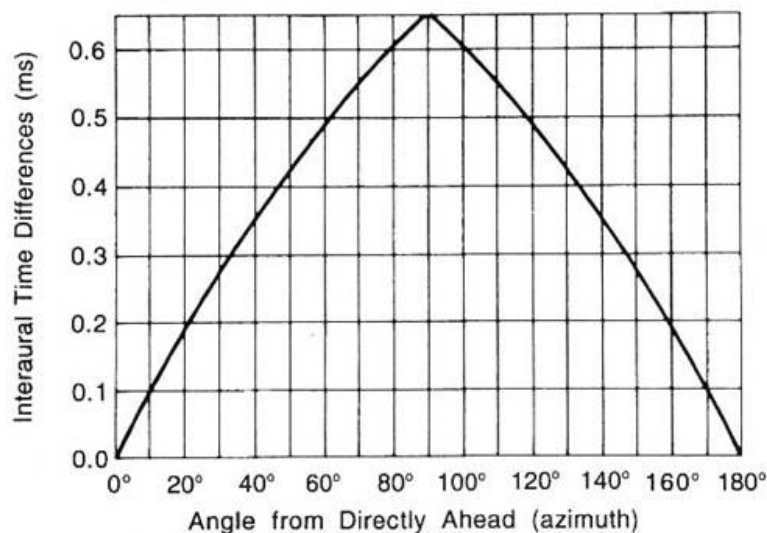


Figura 4. Diferencia Interaural de Tiempo, la diferencia entre oídos aumenta según aumenta el ángulo hasta los 90°, después desciende hasta 0.

Esta relación con la frecuencia, viene dada por los fenómenos de difracción entorno a la cabeza del sujeto, ya que los sonidos con longitudes de onda excesivamente largas o muy por debajo de un  $\lambda/2 <$  distancia entre orejas (muy bajas frecuencias o altas frecuencias) no se verán difractados dando una DIT despreciable.

Las DIT van de los 0s para fuentes que están localizadas a 0° del oyente hasta los 0,69ms para sonidos perpendiculares al eje frontal del sujeto.

### 2.3.1.2. Diferencia Interaural en Intensidad (DII/IID)

En el proceso de difracción alrededor de la cabeza, la onda sonora no sólo pierde algo de tiempo en llegar de un oído al otro, sino que, en ese espacio de tiempo también pierde algo de intensidad, de manera que el oído que recibe primero el frente de ondas recibirá también el sonido más alto que el otro debido a esta diferencia en la distancia recorrida por una onda u otra; además, la sombra acústica de la cabeza acentúa esta diferencia de niveles de intensidad entre los oídos.

Así pues, como es un fenómeno derivado de la difracción del sonido en torno a la cabeza, podemos presuponer que, será un fenómeno que variará en base a la frecuencia del sonido; así pues, para sonidos de muy baja frecuencia, con una longitud de onda muy superior a la distancia entre oídos, este fenómeno pasará más bien imperceptible.

Así pues, para frecuencias de 500 Hz la longitud de onda del sonido es de unos 69cm, unas tres veces el diámetro promedio de la cabeza humana. La difracción es poca. Para frecuencias de 4 KHz (la longitud de onda del orden de los 8.5 cm) la sombra acústica es importante.

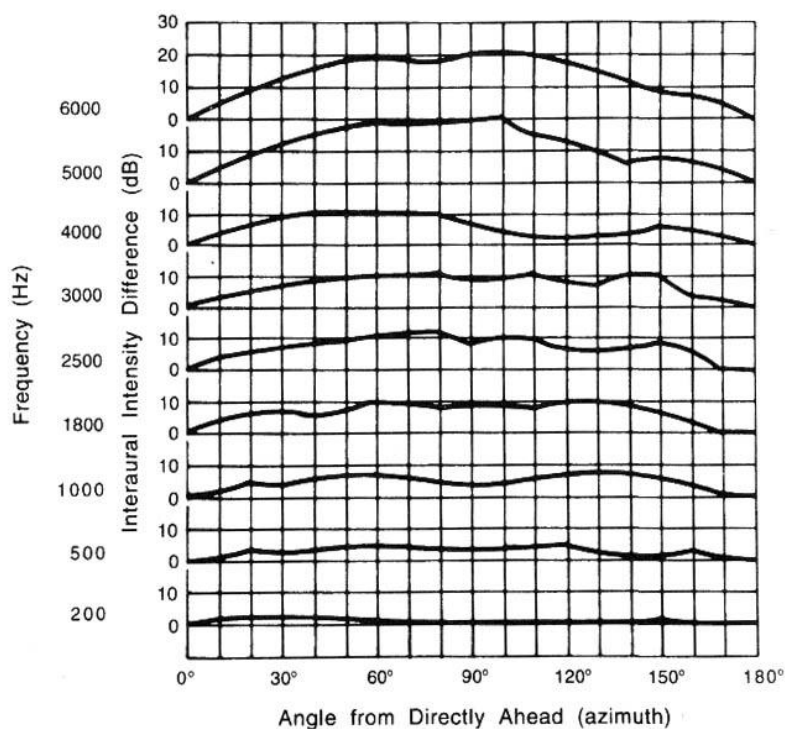


Figura 5. Diferencia Interaural de Intensidad (en función de la frecuencia)

Las DII son prácticamente despreciables para frecuencias inferiores a los 500Hz, pero pueden ser de hasta 20 dB para frecuencias mayores de 5Khz.

### 2.3.2. Elevación.

En el proceso de identificar la procedencia de los sonidos en el plano medio se utiliza la binauralidad, sin embargo, para identificar la posición de la fuente en el plano horizontal, el cerebro se vale de la información característica de la pinna.

El pabellón auditivo actúa como una antena que recoge la señal acústica, pero sus pliegues y formas, además refuerzan unas frecuencias y filtran otras. Debido a esta condición de dependencia geométrica, la respuesta en frecuencia de cada oreja depende del ángulo de incidencia.

Esta efectividad para recoger sonidos es mayor cuando los sonidos provienen del frente que de la parte superior, en la siguiente figura se observa la diferencia de distancias hasta el conducto auditivo entre el sonido directo y el rebotado en el pabellón auricular.

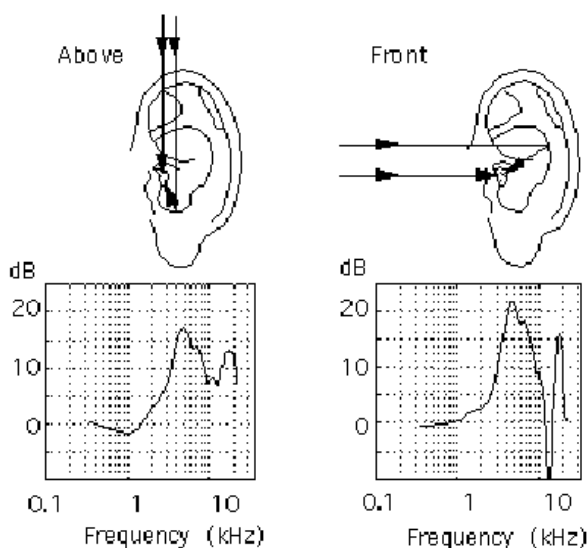


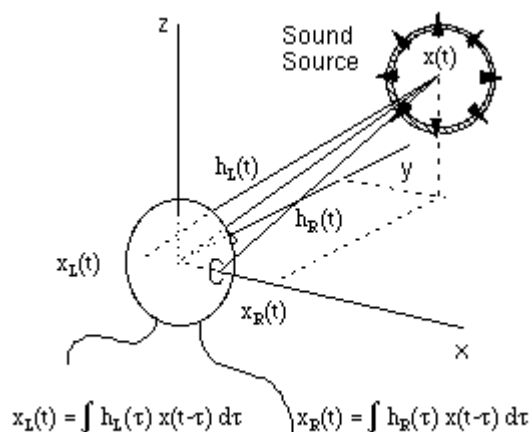
Figura 6. Respuesta en frecuencia del oído en función del ángulo de inclinación.

En las gráficas se presenta la respuesta en frecuencia para un mismo sonido ante diferentes ángulo de incidencia como podemos observar, la gráfica correspondiente marca una caída en una rama de frecuencias mucho más acentuada, lo que indica que el oído es capaz de distinguir mejor los sonidos frontales que los que provienen de la parte superior.

### 2.3.2.1. Función de transferencia HRTF

Es el análisis espectral de la señal recogida en cada uno de los oídos. *La Función de Transferencia Relativa a la Cabeza* o HRTF es una compleja fórmula matemática que pretende identificar la respuesta al impulso de un oído frente a una fuente. Esta función que trabaja en el dominio transformado, depende de variables espaciales y de la frecuencia.

Para encontrar la presión sonora que una fuente ejerce sobre uno de los oídos, deberemos saber la respuesta al impulso del mismo oído ante esa fuente que lo excita, esta relación es la conocida como *Relación-Cabeza* (HR) con una Respuesta al Impulso (HRIR). La transformada de Fourier  $H(f)$  de esta relación, es la HRTF.



*Figura 7. Head Related Transfer Function (HRTF)*

Para distancias mayores a un metro, se considera que la fuente está en campo lejano y reduce la HRTF a factores de frecuencia, azimut y elevación.

La HRTF tiene cuatro parámetros: Intensidad, tono, timbre y frecuencia, que son los parámetros que nos permitirán realizar las pruebas de audición binaural, lateralización o auralización.

Existen proyectos que parten de la información obtenida en una HRTF para cada oído, esta información se acabará procesando mediante código creando una especie de filtro para cada uno de los canales, así pues, al reproducir la señal relacionada a cada oído usando unos auriculares el oyente percibe dicho sonido recreando la sensación de espacialidad en la que fue recogida dicha HRTF.

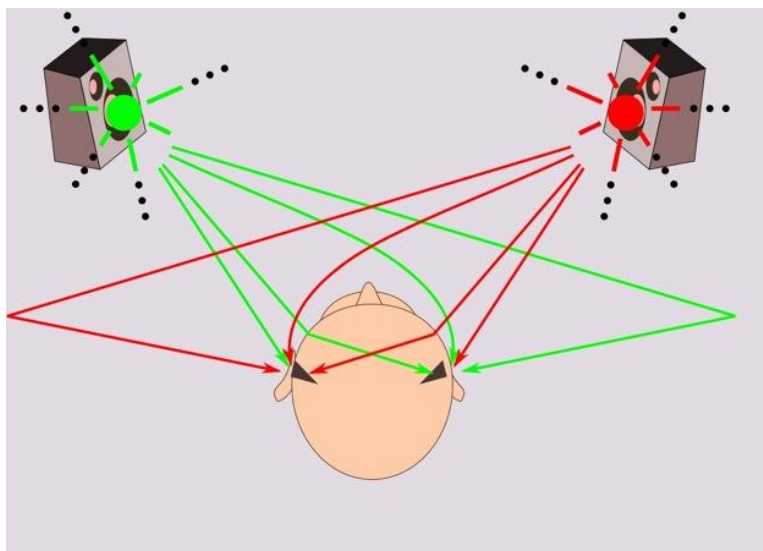
La HRTF, al igual que con el azimut o la elevación, también varía en base a la distancia. Así pues, las DII no son especialmente críticas en casos en los que la distancia sea muy elevada pero sí pueden suponer una diferencia en cortas distancias. Aplicando la transformación podemos observar que, además de la evidente diferencia de nivel, también existe una consecuencia frecuencial. Las bajas frecuencias son más perceptibles a menores distancias.

Como se ha explicado anteriormente, las orejas y las dimensiones de la cabeza, además del ángulo en el que el oyente enfrenta a la fuente determinan la respuesta en frecuencia y por tanto la HRTF, por eso es importante que las condiciones a la hora sean las correctas y se considere la fuente en campo lejano.

### 2.3.3. Distancia.

Si bien nuestro cerebro es muy capaz y especialmente habilidoso para identificar la dirección desde la que proviene la fuente, no lo es tanto para identificar la distancia a la que ésta se encuentra. [6]

Así pues, para determinar este factor, generalmente, se utiliza un compendio de herramientas: Intensidad, movimiento paralelo, exceso en las DII y se busca una razón entre el sonido directo y el sonido reverberante.



*Figura 8. El sonido llega a los oídos difractándose alrededor de la cabeza y con aportes por las reflexiones en el entorno, esto ayuda a ubicar la posición de la fuente. Pero no la distancia*

Sabemos que la energía acústica recibida en un punto descende en función a la distancia a la que la fuente se encuentre, resulta evidente que si la fuente se acerca al oyente, el nivel de intensidad aumentará.

El problema ocurre cuando no conocemos las características de la fuente.

El movimiento paralelo se refiere al hecho de que si el oyente mueve su cabeza, el cambio de azimut puede depender de la distancia. Para fuentes muy próximas, un movimiento pequeño puede provocar un gran cambio en el ángulo lateral, mientras que para fuentes lejanas esencialmente no hay cambios de azimut.

Cuando una fuente se aproxima mucho a la cabeza, la DII puede aumentar. Este aumento se hace patente para distancias por debajo de un metro, aproximadamente. Por lo general, los sonidos que se reciben en un sólo oído y provenientes de una fuente muy cercana resultan incómodos (como el zumbido de una mosca cercano a una oreja)

Las condiciones de escucha son muy condicionadas por las reflexiones de la sala, el sonido reverberante que acompaña a los sonidos. Éste será otro de los sistemas que se utilizan para identificar la distancia a la que se encuentra la fuente. Dentro de una sala común, el frente de ondas se ve reflejado en las superficies en multitud de ocasiones, esta relación entre el sonido directo y la energía reverberante da sensación de espacialidad y ayuda a identificar la procedencia de fuentes en pequeñas distancias.

En habitaciones cerradas, la energía de una densa reverberación será más o menos constante, mientras que en distancias largas la energía que un sonido directo (seco, sin reverberación) caerá con la distancia.

Del mismo modo, las habitaciones actúan como filtros, modificando el espectro de las señales acústicas y pueden colorear los sonidos debido a la arquitectura o el material de las superficies, normalmente las frecuencias altas caen más rápidamente lo que el cerebro interpretará con una sensación de mayor lejanía.



#### 2.3.4. Efecto de precedencia (efecto Haas)

El *efecto Haas*, descubierto por Helmut Haas evalúa la respuesta psicológica de la información acústica en el humano, es también conocido como *Ley del primer frente de onda*. Es un recurso que utiliza el cerebro del oyente para evitar la confusión en espacios altamente reverberantes. Ocurre cuando el mismo sonido es emitido desde dos fuentes sonoras separadas en espacio y en tiempo, al igual que ocurre con los ecos en habitáculos muy espaciados y con superficies reflectantes.

El efecto Haas consiste en la fusión de los sonidos que lleguen en una ventana de tiempo de 50 ms donde la percepción de la dirección del sonido es la indicada por el sonido inicial.

##### *EXPERIENCIA DE HAAS Y MAYER:*

Un oyente “ve” dos altavoces situados a la misma distancia bajo un ángulo de 45°. Percibe dos emisiones idénticas, una de cada altavoz, que no se diferencian más que por el intervalo que separa su llegada al oído. Los resultados del experimento se catalogan en cuatro categorías:

- Intervalo de tiempo inferior a 5 ms: el cerebro localiza al sonido en función de la dirección que tuviera el primer estímulo, aunque los otros provengan de direcciones diametralmente opuestas.
- Intervalo de tiempo entre 5 y 35 ms: el oyente sigue oyendo un único sonido de intensidad doble, pero esta vez el sonido parece venir del primer altavoz.
- Intervalo de tiempo entre 35 y 50 ms: audición separada de los dos altavoces, pero en la dirección del primero el eco parece menos intenso que el sonido inicial.
- Intervalo de tiempo superior a 50 ms: audición separada de los dos altavoces y en sus direcciones respectivas.

*Suponiendo una velocidad del sonido  $c = 340$  m/s, a estos cuatro casos les corresponden las diferencias de trayecto comprendidas entre 1,7 y más de 17m [7].*

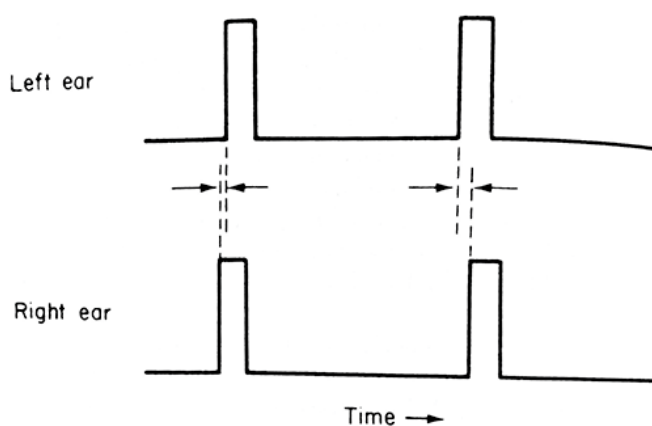


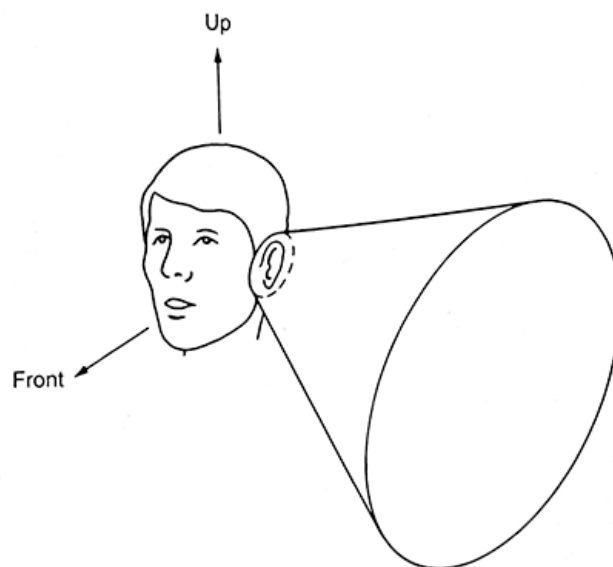
Figura 9. Efecto de precedencia.

El efecto de precedencia se produce también aun cuando el primer y segundo sonido tiene marcadas diferencias espectrales y siempre que la envolvente temporal sea similar.

Los experimentos han llevado a sugerir que el efecto de precedencia tiene su explicación en procesos cognitivos que se desarrollan en niveles relativamente altos.

### 2.3.5. Conos de confusión.

Si la cabeza permaneciera estática, la diferencia interaural en tiempo no sería un parámetro suficiente para determinar la procedencia del sonido, esto es porque existe una región localizada como en forma de cono naciendo de cada uno de los oídos llamada cono de confusión. La razón es que en esa zona nuestra propia cabeza impide que parte de las frecuencias de las señales propagadas desde el emisor alcancen el oído contrario a la fuente sonora, por ello el oyente tiende a mover la cabeza para orientarse de manera más apropiada ante el sonido que desea resaltar, ya que estos cambios de postura consiguen un cambio en las frecuencias percibidas por los oídos. [8]



*Figura 10. Cono de confusión en torno a un oído, los sonidos que se emitan en la superficie del cono podrían generar esa confusión sobre su procedencia.*

### 2.3.6. Respuesta del cráneo (HSR)

La Human Skull Response, es el parámetro que se obtiene de la respuesta en frecuencia de la anatomía de la estructura ósea del cráneo humano, es decir, la cantidad de vibración que se transmite a través del hueso del cráneo a diferentes frecuencias; se han realizado multitud de ensayos y experimentos y los valores muestran diferencias significativas entre sí, no es la misma la capacidad de transmisión de un frente de ondas en una calavera vacía y seca que en una con fluidos internos que traten de recrear el contenido de la cabeza o en la de un cadáver, algunos estudios incluso determinan que existen diferencias entre la densidad de materia blanca y gris de sujetos que han aprendido a leer o no.[9]

Según estos estudios, el Departamento de Ingeniería Biomédica de la Cuarta Universidad Médica Militar de Xi'an ha conseguido determinar que la frecuencia característica del cráneo humano debe estar en torno a los 10Khz. [10]

Este parámetro se tiene en cuenta especialmente en el desarrollo de implantes de ayuda a la audición intracraneales.

En el caso de la Dummy-head, este tipo de transmisión de audio no es realmente relevante puesto que la idea del modelo no es captar y transformar toda la actividad fisiológica que se produce en el cuerpo sino aprovechar los factores más decisivos para que, posteriormente, sea el cerebro del oyente el que recreé la sensación de tridimensionalidad, puesto que para ello usaremos micrófonos en el lugar donde deben estar posicionados los tímpanos, el aporte acústico que registramos es exclusivamente el proveniente de la excitación del aire y no el transmitido a través del hueso por su vibración.

### 2.3.7. Factores externos a la fisiología humana que interfieren en la escucha binaural

El recinto en el que se lleva a cabo la escucha, como ya hemos insinuado anteriormente, también es relevante para la escucha pues en él aparecen multitud de variables que a la larga acabarán modificando la información sonora. Tras las experiencias de Haas se puede acordar que existe un umbral para el cuál la inteligibilidad de la palabra es bajo, cuando las reflexiones en el entorno coinciden con un tiempo determinado (y variable en función a la velocidad del diálogo, el tono del locutor y otros parámetros).

Los transitorios también son factores a tener en cuenta, son aportes en a determinadas frecuencias de los sonidos y pueden ser relevantes a la hora de identificar la localización de un radiante acústico como demuestra el efecto Fransenn

*El efecto Fransen se obtiene a partir de la alimentación de un canal (el izquierdo, en este caso) con un transitorio que desaparece en un tiempo  $t_0$  (menor o igual que 30 ms) y otro (el derecho, en este caso) con un sonido que alcanza una fase estacionaria al cabo de  $t_0$ . A partir del momento  $t_0$  sólo emite señal el canal con el sonido estacionario (canal derecho). No obstante, el sujeto percibe el sonido como proveniente del canal que emitió el sonido transitorio (es decir, canal izquierdo). El retardo entre el sonido directo y las primeras reflexiones sería relevante en la percepción, dado que el efecto Franssen no se produce en condiciones de audición anecóicas (es decir, en situaciones en las que el único sonido percibido es el sonido directo y no existe campo sonoro difuso). [11]*

### 3. Estado del arte. Modelos comerciales tomados como referencia.

La holofonía es una técnica de captación relativamente nueva, fue desarrollada en 1980 por el argentino Hugo Zuccarelli, quien desarrolló un sistema que fuera capaz de explotar las características necesarias para la escucha biaural. Con el paso del tiempo, los modelos que han ido apareciendo en el mercado desde la creación de “Ringo”, el primer prototipo de grabación holofónica, han sido numerosos y para la elaboración de este proyecto, alguno se ha tomado como referencia.

En esencia, los dispositivos para la captación biaural, no son sino intentos por recrear la morfología humana, algo ciertamente complejo y dificultoso, lleno de variables.

#### 3.1.Ringo (Patente de Zuccarelli)

Basta más bien poco rato navegando a través del archivo estadounidense de patentes para ver que la idea de realizar un elemento captador de sonido biaural; no es algo nuevo o innovador, son cientos los modelos propuestos aunque una gran multitud de ellos están obsoletos o su correcto funcionamiento no es fácil de comprobar.

La patente registrada US4680856 (patente abierta) es aquella que en 1980 presentó Zuccarelli de su cabeza capaz de grabar y reconstruir la espacialidad acústica.

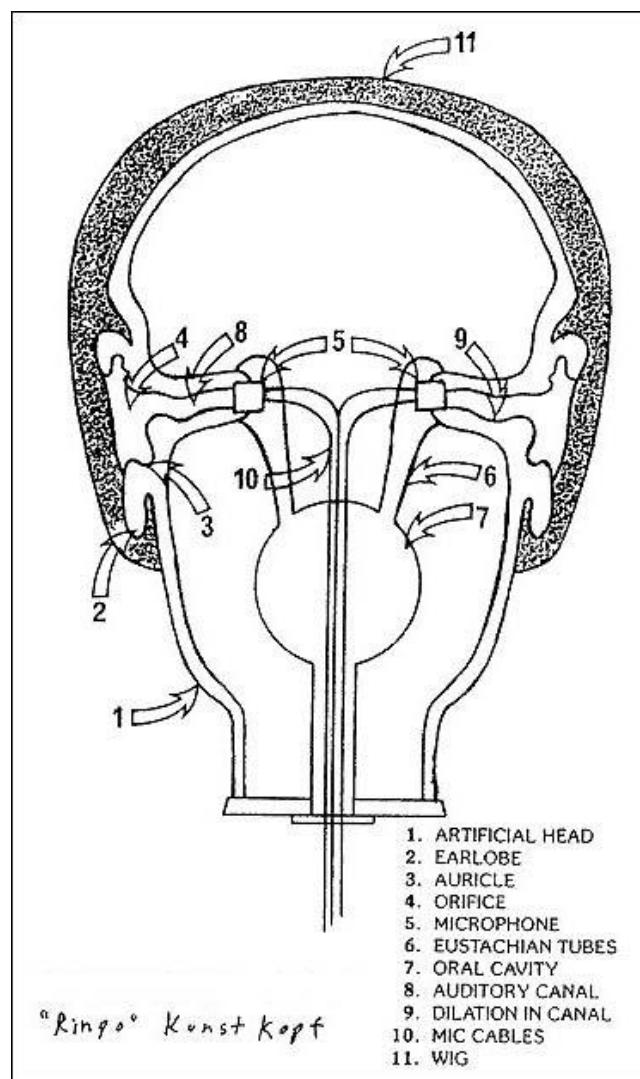


Figura 11. Detalle del interior de “Ringo”.

La idea de Zuccarelli fue la de construir un dispositivo capaz de captar y reproducir los sonidos, procurando que este dispositivo fuera lo suficientemente eficiente como para poder simular la captación del sonido de igual manera a la que lo hace el sistema auditivo humano. Para ello construyó un soporte con forma de cabeza humana, unas aurículas, el meato y las trompas de Eustaquio además de incorporar las cavidades de resonancia propias del cráneo (si bien no incluyó todas, sí las dos más importantes correspondientes a la cavidad nasal y la oral) además, para ganar en realismo, decidió incluir un elemento que simulase la materia gris dentro de su Ringo.

Las membranas captadoras del sonido (preferentemente micrófonos cardioides de membrana no inferior a 7 mm) se colocan en el punto exacto donde los tímpanos deben estar colocados.

Todo el conjunto fue recubierto con una capa de silicona y a lo largo de su patente, defiende que elementos como el pelo, también tienen su aporte a la acústica y el resultado final de la grabación.

Para la reconstrucción de las trompas de Eustaquio, Zuccarelli prevé longitudes entre los 24mm y los 40mm y recomienda que se construya con un material denso, pero flexible para recrear la fibra cartilaginosa propia del cuerpo.

El principal problema del modelo de Zuccarelli, es que la grabación sí da sensación de espacialidad y recrea acústicamente el entorno en el que fue grabada, sin embargo, estos efectos son únicamente apreciables en el caso de que la escucha se haga mediante auriculares.

Una de las características propias de la holofonía registrada mediante dispositivos derivados de la patente de Zuccarelli es la condición de escucha, la que debe hacerse mediante audífonos estereofónicos para conseguir que el cerebro reinterprete las señales de cada oído y así logre recrear la sensación de tridimensionalidad acústica.

### 3.2. Neumann KU Series (KU-100)

La casa alemana Neumann tiene en el mercado la gama KU, destinada a elementos, dummies de captación holofónica siendo su modelo KU-100, el modelo estrella de la gama.



Figura 12. Neumann KU-100.

En verdad, el modelo de Neumann, no es sino una versión mejorada de la versión original de la patente de Zuccarelli, un busto que reconstruye la morfología de la cabeza humana y que incluye una pareja de micrófonos de alta calidad en su interior, de manera que el sonido registrado, una vez se reproduce mediante auriculares de alta definición, reproduce una imagen acústica prácticamente idéntica a la escena en la que fue grabado; en el caso de reproducir el sonido mediante altavoces, proporciona un sonido estereofónico con mucha mejor calidad [12] y profundidad espacial que los sonidos recogidos de manera estándar.

La KU-100, tiene un sistema de circuitería complejo que puede ser alimentado eléctricamente por una fuente Phantom P48, baterías AA o directamente desde la red. Además, la empresa alemana ha introducido un filtro paso alto en la banda con tres posiciones a elegir por el usuario entre los 8Hz, 40Hz y los 150Hz para conseguir que la respuesta en frecuencia sea lo más plana posible y de esta forma evitar posibles coloraciones y un atenuador de 10dB por si pudiera hacer falta.

El micrófono de grabación holofónica de Neumann ofrece la salida del audio mediante dos cables XLR balanceados de 3 pines cada uno o mediante salidas no balanceadas con conectores BNC hembra. [13]

A continuación se añade la tabla de características propias del modelo KU-100.

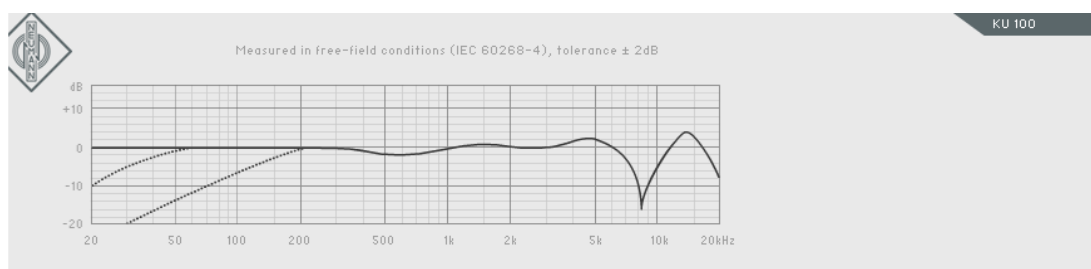


Figura 13. Sensibilidad del modelo KU-100, en función de la frecuencia (Hz).

### 3.3.Head Acoustics HSU-III

La Universidad Pública de Navarra tiene a su disposición una 'dummy head' destinada a la grabación binaural para la captación precisa de entornos binaurales.



Figura 14. HeadAcoustics HSU-III.

La empresa alemana *HEAD acoustics* integra en su modelo micrófonos de condensador y recrea todas las partes relevantes del cuerpo humano en cuanto a la percepción acústica se refiere, de esta manera, procura reproducir un modelo estándar de oído tanto interno como externo. Este modelo además incluye una serie de opciones para la ecualización.

La empresa recomienda conectar la cabeza a un módulo de entrada de 6 canales preparado para la entrada de micrófonos de condensador y pasar la señal por un ecualizador digital de 24 bits.

Este modelo es especialmente importante en el desarrollo de esta memoria, ya que la Universidad Pública de Navarra accedió a realizar una serie de pruebas para comprobar la calidad de la cabeza proyectada utilizando la HSU-III de su propiedad como elemento de referencia. Este será el análisis que más adelante se evaluará.

## 4. Desarrollo del trabajo.

Para la construcción de este proyecto, se ha tenido como referencia principal el modelo propuesto por Zuccarelli, ya que, el resto de modelos del mercado han seguido las mismas pautas de diseño, si bien, por motivos de complejidad y presupuesto hay ciertos elementos que se han obviado.

### 4.1. Materiales utilizados

Los modelos comerciales para la captación de sonido holofónico tienen una serie de características estudiadas y bien cuidadas, además de grupos de diseño que hacen que el modelo sea atractivo visualmente.

La rigidez de los modelos y el uso de materiales como el plástico hacen que estos elementos sean resistentes y ligeros, sin embargo, estos materiales suponen una complicación para crearlos y además, en caso de caídas o golpes fuertes pueden llegar a romperse. Por eso, este proyecto pretende realizar un modelo flexible, igualmente ligero y resistente al agua.

La principal ventaja de la flexibilidad en el modelo es que, en caso de realizar grabaciones en movimiento en entornos no controlados o secuencias de acción, los posibles golpes que pudiera llevarse el dispositivo no lo dañarían definitivamente, sino que éste, tras recibir el impacto, vuelve a su estado normal.

En esencia, las características de la reconstrucción de la cabeza deben recrear las del cráneo humano, y la elección de los materiales deberá ser acorde con ello.

Así pues para la creación del apantallamiento acústico creado por el cráneo y los tejidos habrá que tener en cuenta una serie de cualidades.

Por similitud de material, en nuestro caso espuma de poliestireno, se ha tomado el valor de densidad para la espuma acústica, un material absorbente acústico de esqueleto flexible, por norma general poliuretano de celda abierta con densidades que oscilan entre los 20 Kg/m<sup>3</sup> y los 30 Kg/m<sup>3</sup>. [14]

En este caso, para asegurar que el frente de ondas no se transmite por el interior de la cabeza, se ha trabajado con una espuma de poliestireno con una densidad de 80 Kg/m<sup>3</sup>.

Si bien es cierto que la densidad de la materia gris sumada la del líquido encefalorraquídeo y la densidad propia del cráneo da valores muy superiores a los de la espuma, damos por válido

que si a densidades superiores a  $30 \text{ Kg/m}^3$  el frente de ondas ya no es capaz de atravesar el material, con menos intensidad podrá hacerlo a mayores densidades.

Realizando así el dummy se pierde la fidelidad de parámetros como el Human Skull Response [15] ya que desestimamos la idea de introducir un falso cráneo dentro del modelo y así ya no existe ningún tipo de transferencia de vibración a través del elemento óseo, sencillamente se consigue una barrera acústica que evita que los sonidos incidan en las membranas de los micrófonos por frentes diferentes a los determinados por los conductos auditivos.

La pérdida de este factor podría considerarse una tara en sí misma, sin embargo, el efecto de las cavidades de resonancia y las mucosas y líquidos alojados en el interior del cráneo no influyen a la escucha timpánica sino a la percepción del sonido, así pues, aunque sí suponen una pérdida de fidelidad, la psicoacústica se encargará de reinterpretar la señal y dotará de profundidad y realismo a la escucha.

Para la recreación de las aurículas, los parámetros propios del cuerpo humano a tener en cuenta son aquellos como elasticidad y elongación de la piel, para evitar problemas de compatibilidad se ha optado por construirlas gracias al látex, en concreto un látex industrial empleado en la construcción de prótesis artificiales y robots animatrónicos para la industria del cine, de manera que las cualidades de este material son prácticamente las mismas que las del tejido humano.

Así pues, tras un exhaustivo proceso de búsqueda de materiales, se acabó realizando el pedido a una distribuidora afincada en Barcelona, esta empresa se encarga de la venta, tanto a mayoristas como a minoristas de productos químicos especializados en el ámbito industrial, la escultura, el teatro y el modelismo.

FormX es parte de la red de distribución de la empresa Smooth-On, empresa de origen norteamericano que se ha convertido en un referente en la industria del modelado profesional.

Para el acabado de la cabeza se proponen varias soluciones, como una capa de pintura plástica o la aplicación de una capa relativamente gruesa de látex a modo de piel que proteja la espuma de poliuretano de los agentes externos y que permita limpiarla en caso de que se ensucie.

## **4.2.Modelado.**

Esta es una de las partes más críticas del proyecto, pues la recreación perfecta de un modelo humano es algo complicado de hacer. Zuccarelli, propone hacer moldes a base de cabezas humanas reales y recrear el interior del cráneo usando radiografías del modelo, pero por cuestiones evidentes, eso no ha podido ser realizado de esta manera, en su lugar, se ha tomado un maniquí de dimensiones similares a la de un hombre de 1.80m (tamaño estándar para el varón caucásico)

El maniquí fue recubierto con varias capas de escayola para sacar un molde exactamente igual al maniquí, este molde, se separa en dos partes y se refuerza mediante una mezcla de papel de periódico y látex tapaporos que le confiere resistencia y cierta flexibilidad además de terminar de sellar las posibles fallas que hubiera en el molde por cuestión de mala aplicación de las capas de escayola. Una vez las dos partes del molde han secado y han adquirido la rigidez deseada, se vuelven a unir en un único elemento.

Para la reconstrucción de las aurículas, hay que tener en cuenta, que cada oreja es diferente para cada persona e incluso son diferentes entre sí para el mismo humano, de manera que



ante la imposibilidad de comprar dos modelos protésicos, se optó por la solución propuesta por Zuccarelli, la obtención de moldes para orejas humanas gracias al alginato.

El alginato es un material utilizado en la industria odonto-protésica, son unos polvos que disueltos en una relación de agua/alginato correcta van sedimentándose y conformando una pasta capaz de recrear hasta el más ínfimo detalle de aquello que esté rodeando. Su uso habitual es el hacer moldes exactos de la impresión dental de un sujeto para poder reconstruir las piezas dentales que no estén o que haya que sustituir, de manera que el grado de precisión que se puede alcanzar con este material es ideal para la reproducción de una oreja (donde, el detalle del molde es tal que se pueden apreciar incluso las perforaciones de los pendientes)

El principal problema del alginato es su tiempo de vida, ya que aún en condiciones idóneas para el almacenamiento del molde, este va perdiendo elasticidad a medida que el material se va secando. Una vez ha perdido toda la humedad almacenada, el molde de alginato se vuelve duro y fácilmente desquebrajable.



*Figura 15. El procedimiento por el cual se extrajeron diversos moldes de orejas hasta conseguir un resultado aceptable.*

El proceso de obtención del molde de las aurículas requiere de paciencia y cuidado, ya que además de ser relativamente complejo obtener un buen molde, existe el riesgo de causar daños irreparables en el oído del modelo, por eso es imperativo utilizar algún elemento que haga de tapón para evitar que el alginato penetre en el conducto auditivo, preferiblemente tapones de látex ya que, dispuestos correctamente, cierran por completo el orificio y reducen al mínimo las posibles consecuencias.

El alginato utilizado durante la creación de este proyecto se consiguió en un distribuidor de material para la higiene y salud buco-dental situado en Pamplona [16]

### 4.3. Inyección del molde.

El molde correspondiente a la cabeza deberá rellenarse con espuma flexible de poliestireno, el poliestireno empleado en este proyecto consiste en dos agentes químicos que deberán mezclarse en proporción 1 es a 1, al juntar las dos partes se da comienzo a una reacción exotérmica que consigue que la mezcla se vaya dilatando a medida que los gases van dando volumen a la masa que se va endureciendo a medida que su temperatura va descendiendo.



Figura 16. Diferentes gamas del FlexFoamIT y su poder de expansión.

En este caso se ha recurrido al producto de *Smooth-On: FlexFoamIT V*, se escogió este modelo de la gama de productos químicos, por su relación entre la densidad ( $80 \text{ Kg/m}^3$ ) que oferta y su flexibilidad, además, como el tamaño del molde a completar era de un volumen considerable, su poder de expansión (10x) preveía un menor coste del producto que con espumas de mayor densidad (y por tanto, menor expansión) así que el conjunto de estos compromisos fue el determinante para la elección de este material.

Es especialmente crítico el control de temperatura ambiente y del molde, ya que una temperatura incorrecta hará que la reacción sea más lenta o que se enfríe más rápido, de manera que el resultado a obtener no será el deseado, ni en consistencia de la espuma, ni en sus cualidades de densidad, así pues se recomienda calentar la estancia en la que se va a trabajar a unos  $22^\circ \text{C}$ , temperatura recomendada por el fabricante y aplicar un poco de aire caliente al molde antes de comenzar.

Para la correcta obtención de la cabeza de poliestireno, se deberá mezclar una cantidad significativa de químicos, en torno a 4 libras (2 Kg) de mezcla y es altamente recomendable realizar el vertido con un procedimiento previamente estudiado o al menos, habiéndose concedido unos minutos a la previsión de posibles contratiempos, sin dejar nada a improvisación, ya que el margen de tiempo para posibles correcciones es relativamente bajo.

Así pues, se recomienda realizar el vertido de la mezcla en el interior del molde estando esta boca abajo, dejando la abertura correspondiente al tronco del maniquí hacia arriba, extender la mezcla por todos los rincones del molde, haciendo especial hincapié en las regiones más conflictivas, como pueden ser los detalles de la cara, nariz, frente, boca.

Durante el proceso de expansión, la reacción química libera gases que no deben ser inhalados, por lo que realizar esta tarea en un lugar ventilado es muy necesario.

Existe el riesgo de que la espuma de poliestireno se quede adherida al molde, para evitar esto, se puede aplicar algún tipo de material desmoldante en las paredes del molde, existen una gran variedad de materiales para ello, si bien, siempre hay que tener en cuenta que la capa de

material desmoldante debe ser uniforme y sin abultamientos, ya que estas podrían quedar como hundimientos en el resultado final.

Aún con estas medidas de protección se puede dar el caso de que parte de la cabeza se quede pegada al molde, estos posibles defectos se pueden corregir *a posteriori*, bien con más espuma de poliestireno o con látex, dependiendo de la zona y tamaño del fallo.

Se adjunta, en el ANEXO II, la tabla de características técnicas para el FlexFoamIt V

Los moldes de las aurículas deberán rellenarse con el material elegido para recrear las cualidades de la piel y cartílago humanos, en este caso se ha recurrido a un látex especial para la creación de animatrónicos y prótesis.

Al igual que la espuma de poliestireno, el látex se consigue mediante la mezcla de dos agentes químicos, si bien, la reacción consecuente no es tan vistosa o potencialmente tóxica, requiere de mayor nivel de control ya que las proporciones a mezclar deben ser las correctas para que el resultado sea óptimo.

En este caso también la temperatura de la sala de trabajo es importante siendo 23°C la temperatura propuesta por el fabricante.

El material seleccionado pertenece a la serie *DragonSkin* de la compañía *Smooth-On*, más concretamente, el producto empleado es el *DragonSkin FX-Pro*. Una silicona de platino. La silicona de platino se suele usar para la creación de moldes, dando unos resultados duros, duraderos y altamente fidedignos. Además, la silicona de platino también es usada en la industria de la prótesis gracias a su similitud con la densidad y viscosidad humana.

El *DragonSkin* ofrece, además de un alto grado de parecido con la textura de la carne humana, una recreación (en este caso de las aurículas) muy resistente a torsión, elongación y fácilmente limpiable.



Figura 17. *Dragon Skin FX-PRO*. Los dos componentes, A y B, se mezclan en la proporción indicada por el fabricante.

Por su parte, la gama FX-Pro de *DragonSkin*, está especialmente diseñado para la creación de prótesis y efectos de maquillaje para la piel, el grado de dureza A2 (ASTM D-2240) proporciona prótesis más suaves y con menos efecto plástico.

Gracias a su largo período de trabajo, el tiempo que da de margen la mezcla de químicos antes de que comience a curarse la mezcla, facilita que los vertidos sean mucho más fáciles y precisos, tras este estado en el que la mezcla se comporta como un líquido muy viscoso,

hay que dejar reposar la mezcla dentro del molde durante unos 40 minutos, tiempo durante el cual, el látex se va endureciendo y tras se puede extraer del molde.

Los dos agentes químicos deben mezclarse enérgicamente durante unos segundos y posteriormente debe realizarse el vertido de la mezcla dentro del molde, este proceso debe realizarse con calma y paciencia ya que un vertido excesivamente rápido o de una manera incorrecta puede dejar burbujas de aire dentro del molde lo que conllevará a obtener reproducciones incompletas.

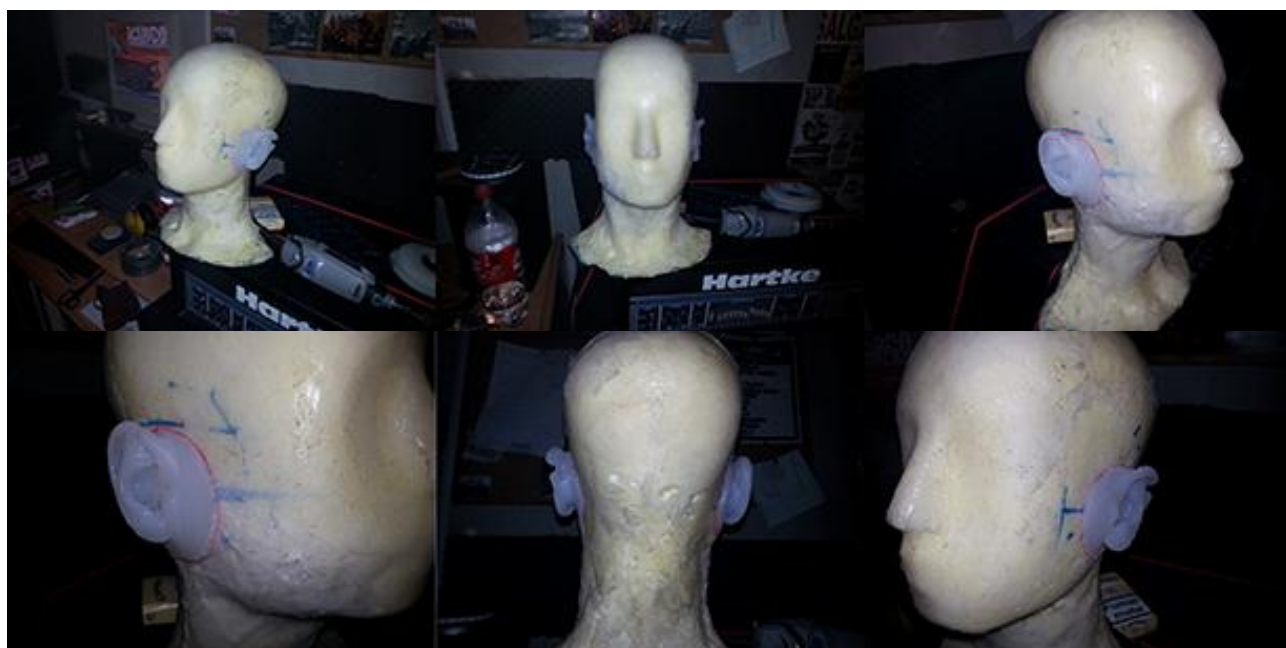
Para realizar correctamente el vertido se recomienda hacerlo desde una altura pequeña y continua y no directamente al fondo del molde, sino desde su exterior y sin mover el punto de vertido, así la caída de material dentro del molde irá extrayendo posibles burbujas de aire.

Para optimizar el resultado y afianzar que la reproducción será eficiente, la utilización de una campana de vacío se prevé como la manera más eficiente de eliminar burbujas de aire, tanto dentro del molde, como en la mezcla en sí misma, ya que al batirla para mezclar homogéneamente los dos componentes, pequeñas burbujas de aire se quedan atrapadas dentro de la mezcla, una vez se ha secado, estas burbujas quedan atrapadas dentro del látex y en consecuencia, variarán las cualidades de la reproducción.

Para facilitar el acoplamiento de las orejas a la cabeza del maniquí, se rellena el molde con 1 cm más de látex, así que se obtendrá, la aurícula y una base redonda de 1 cm de grosor, que facilitará el acople de la aurícula dentro del busto del maniquí.

Gracias a las cualidades propias del alginato, el desmolde de las aurículas será fácil e incluso, podría llegar a guardarse el molde para poder realizar nuevas inyecciones de látex, aunque almacenar moldes de alginato requiere de condiciones muy especiales y aún en estas condiciones, estos moldes son perecederos.

Se adjunta, en el documento adjunto ANEXO III, la tabla de características técnicas para el DragonSkin Fx-PRO y en ANEXO IV las medidas de seguridad y responsabilidad biológica del mismo material.



*Figura 18. Detalle de la cabeza prototipada con las aurículas posicionadas en su lugar*

#### 4.4.Elementos de captación (transductores)

Como ya se ha explicado anteriormente, el proceso de grabación y reproducción de sonidos binaurales está fundamentado en un falso estímulo que cree una señal acústica a los oídos del oyente y sea el cerebro de éste el que se encargue de interpretar la señal de cada canal para recrear el espacio acústico en el que, originariamente, fue grabada la señal.

Existen múltiples maneras de conseguir este efecto, actualmente en el mercado se puede encontrar sets de micrófonos destinados específicamente para la adquisición de sonidos de estas características, suelen ser micrófonos enlazados entre sí y con características idénticas para los dos canales, micrófonos omnidireccionales que se insertan dentro de los oídos del operario que se encarga de grabar, de este modo el ensombrecimiento acústico que genera la propia cabeza del técnico recrea, de manera aproximada, los parámetros necesarios para que el sonido registrado sea el deseado.

La otra opción para la recreación de sonido binaural es la inclusión de los micrófonos en el interior de la cabeza de un maniquí, evidentemente al estar dentro de la cabeza, que los micrófonos recojan de manera omnidireccional, es irrelevante, por eso se recomienda el uso de micrófonos cardiodes. Estos micrófonos son muy direccionales, de manera que se asemejan más al comportamiento del tímpano, si bien, en situaciones en las que exista mucho ruido o haya mucho viento y no se desee utilizar apantallamientos acústicos excesivamente complejos o demasiado grandes serán más útiles los micrófonos omnidireccionales.

Otro de los puntos fuertes de los micrófonos omnidireccionales frente a los de patrón cardiode, es el precio, ya que los omnidireccionales suelen ser sensiblemente más baratos.

De todas formas, el parámetro a tener en cuenta a la hora de elegir correctamente el tipo de microfonomía a emplear será la distancia respecto de la fuente, a mayor distancia, el frente de ondas será más plano y necesitaremos micrófonos más direccionales, por este motivo, se podría considerar la mejor elección el micrófono cardiode, por su versatilidad y mayor campo de aplicación, aunque como ya se ha explicado, para según qué tipo de grabación y según qué tipo de entorno serán mejor unos u otros.

El micrófono de condensador tiene como principio de funcionamiento la diferencia de potencial existente entre las dos placas de un condensador al ser, la que actúa como diafragma, empujada por la acción de la onda de presión acústica, esta oscilación entre las dos placas genera un voltaje a la salida del circuito.

Este tipo de transductor requiere una alimentación eléctrica externa, algo que pudiera ser un inconveniente pero que se ve altamente solventado gracias a las óptimas características que presentan. Algunas de las opciones que se presentan para alimentar estos micrófonos son: alimentación AB y alimentación Phantom.

Los micrófonos de condensador son algunos en los que mejor respuesta en frecuencia se pueden encontrar, su diafragma apenas colorea la señal y además de ser componentes que pueden tener un tamaño muy pequeño también suelen tener un coste relativamente bajo.

#### 4.4.1. Modelos de micrófonos propuestos

Los micrófonos que se exponen a continuación son algunos de los modelos que se han sopesado, comprado y probado montados dentro de la cabeza durante el ensamblaje del dummy, finalmente se optó por utilizar un par de micrófonos POM-5238L-R ya que, mediante apreciación subjetiva en las escuchas realizadas en las pruebas, parecieron ofrecer los mejores resultados.

Todos los micrófonos propuestos a continuación son modelos de condensador, lo que significa que deben ser alimentados de manera externa, en nuestro caso, la alimentación se conseguirá con una batería química de 9v que suministrará el voltaje a las dos cápsulas alojadas en los oídos del dummy.

Durante el montaje de diferentes modelos de circuito para el previo que alimenta a las cápsulas se destruyeron varias de éstas debido a sobretensiones, de manera que es crítico que el esquema a montar sea correcto.

##### 4.4.1.1. PROJECTS UNLIMITED POM-5238L-R MICRÓFONO, CABLES OMNI, 6 MM

Es el modelo de micrófono empleado en el montaje final de la cabeza proyectada, la respuesta en frecuencias suministrada por el fabricante y sus dimensiones, sumado a una serie de pruebas subjetivas en las que se probaron diferentes cápsulas fueron los factores a tener en cuenta para la elección del modelo.

En el ANEXO V, se expone la ficha de características técnicas provista por el fabricante.

Otros modelos adquiridos y testeados son: Pro Signal ABM-715-RC (ANEXO VI) y Kingstate KEEG1538WB-100LB (ANEXO VII)

#### 4.5. Electrónica

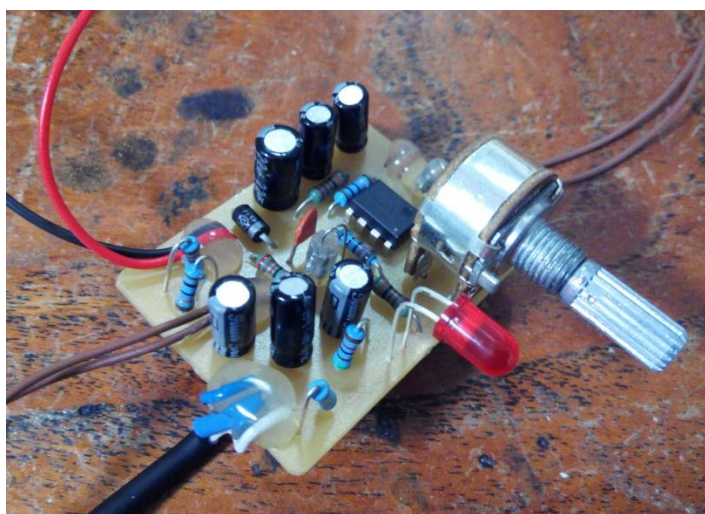


Figura 19. Circuito del proyecto OpenBinaural una vez montado.

La elección de los micrófonos de condensador viene dada por su buena respuesta en frecuencia, su bajo coste y la facilidad de encontrar estos componentes, pero requieren de un montaje y un circuito electrónico que los alimente y sirva de salida. Inicialmente se optó por

utilizar una alimentación Phantom de 48v y se realizó una búsqueda intensiva, construcción y prueba de diferentes montajes, finalmente resultó que ninguno de los esquemas utilizados funcionó correctamente, de manera que son muchos los circuitos propuestos en la red para la alimentación de cápsulas y finalmente se ha optado por la construcción de un modelo basado en un proyecto OpenSource de captación binaural. (openbinaural), ideado y proyectado por Carlos García Saura (Madrid, 2015) [17] a este modelo se le hicieron algunas modificaciones para adecuarlo a los propósitos del proyecto, como un cambio en las salidas de audio para orientarlas a dos XLR (uno para cada oído) a diferencia del modelo original, que incluye una única salida de línea; Esta variación en el circuito tuvo por consecuencia una impedancia ( $Z$ ) dividida para cada uno de los canales, así tenemos unas impedancias medidas en el laboratorio utilizando un osciloscopio:

$$\begin{aligned}Z_t &= 200 \Omega \\Z_l &= 100 \Omega \pm 10\Omega \\Z_r &= 100\Omega \pm 10\Omega\end{aligned}$$

$Z_t$ : Impedancia total, teórica, en el modelo original.

$Z_l$ : Impedancia en la variante para el oído *izquierdo*.

$Z_r$ : Impedancia en la variante para el oído *derecho*.

El proceso de creación de circuitos electrónicos va más allá de su diseño, montaje y soldadura y aunque no siendo de una complejidad abrumadora, sí es un proceso delicado y durante el cual, si existe algún tipo de fallo o problema, por norma general no hay un punto seguro al que volver, cada prueba y cada error suelen ser destructivos con el material y conllevan mucho tiempo y dinero.

En este caso, una vez elegidos diferentes modelos de circuito a alimentar, se optó por realizar una transferencia de tóner a la superficie de cobre, esto se realiza imprimiendo el esquema electrónico previamente diseñado en una suite de diseño (*PCB Express*) sobre una superficie de papel con una impresora láser (las de tinta no valen, pues es el tóner de la impresión el componente químico que queremos extraer mediante calor y esto no ocurriría con tinta de impresora estándar) Durante esta experiencia hemos comprobado diferentes tipos de papel y diferentes temperaturas, en algunos recursos aseguran que las impresiones sobre papel brillante y ligeramente plastificado son mejores y en efecto, la experiencia de construcción obvia este hecho.

La idea es que, una fuente de calor seca (como una plancha para material textil) aplicada en la parte posterior de la impresión hará un efecto contrario al de la impresión en tóner, conseguirá que la figura impresa en el papel se transfiera al material sobre el que apoye, en nuestro caso, la placa de cobre.

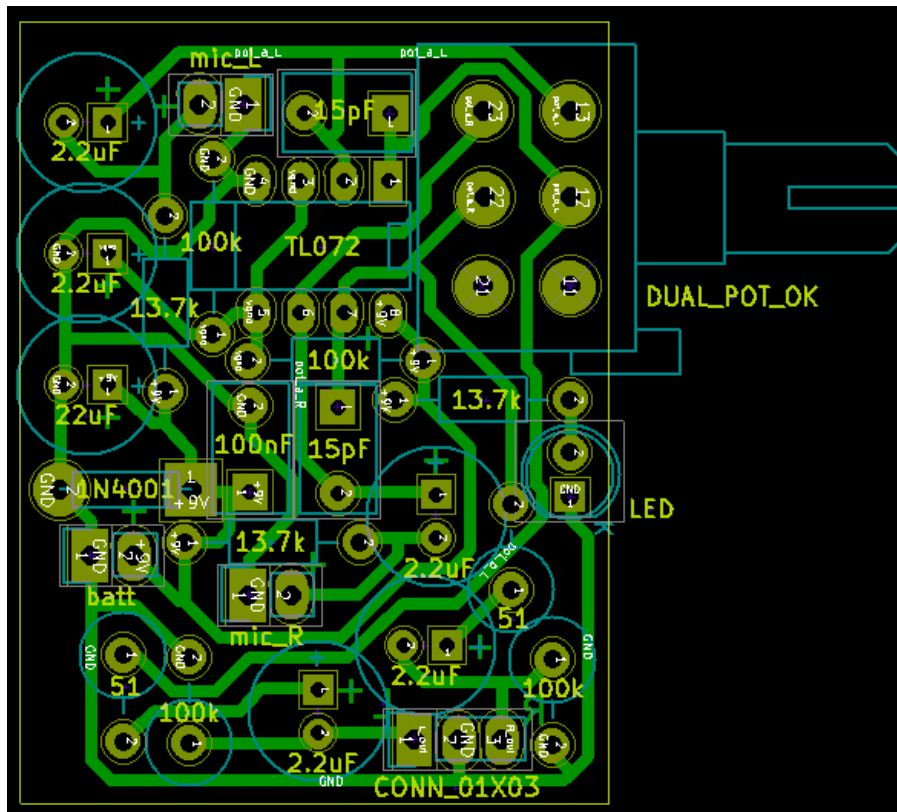


Figura 20. Circuito a montar, de este sólo hay que extraer las pistas y los topes.

El dibujo, en tóner, adherido a la placa de cobre será el positivo del circuito funcional.

La transferencia del tóner es complicada cuando se realiza de una manera tan artesanal, ya que si la temperatura es demasiado elevada, el tóner tiende a volverse líquido y termina por emborronar las líneas, mientras que si el calor no es suficiente, nunca llegará a transferirse. Además, una vez el dibujo ha sido transferido al cobre, es altamente recomendable que no se arranque el papel de la superficie debido al riesgo de rotura o de arrancar el dibujo transferido. También es recomendable imprimir los circuitos con un margen amplio de papel a los lados, de manera que después podamos plegar este exceso de lienzo para que haga las veces de seguro para evitar deslizamientos del papel sobre el cobre al ir aplicando el calor.

Para eliminar la sección descubierta de cobre se utiliza una mezcla de Ácido clorhídrico (el cuál es extremadamente agresivo con la piel y por lo tanto hay que tener especial cuidado con él) y Persulfato de sodio (tóxico e irritante), estos químicos junto con el cobre de la placa reaccionan exotérmicamente disolviendo el cobre en el cóctel químico, liberando una serie de vapores tóxicos y dejando color verdoso en el ácido. Debido a estos vapores tóxicos es imprescindible realizar este tipo de actividad al aire libre o en entornos muy ventilados, en caso de no disponer de un sitio en condiciones, una máscara con filtros de carbono y unas gafas de seguridad ayudarán a evitar la irritación de las vías respiratorias y las mucosas oculares.

Pasado un tiempo, el cobre que esté descubierta y en contacto directo con el ácido se diluirá, este es el momento en el que debemos limpiar concienzudamente el circuito, con agua y ayudándonos de un cepillo o lo dedos, habrá que ir frotando la superficie hasta que el tóner se desprenda completamente, cuando lo consigamos, tendremos nuestro circuito terminado.

Después de todo, sólo quedará realizar los agujeros pertinentes con una broca de 1mm y mucho tiento para evitar desgarrar los “topos” de la placa y finalmente, soldar los



componentes en su sitio, respetando polaridades y espacios. Es especialmente crítico el momento de soldar las cápsulas, pues hay que ser muy rápido y preciso, su pequeño tamaño (no más de 8mm), lo frágil de su estructura (no se puede apretar en el eje donde se encuentra el diafragma porque se rompe) y la temperatura máxima de operación, son factores que hacen de esta fase de construcción un momento altamente sensible.

## 4.6. Esquema de montaje para las salidas de audio

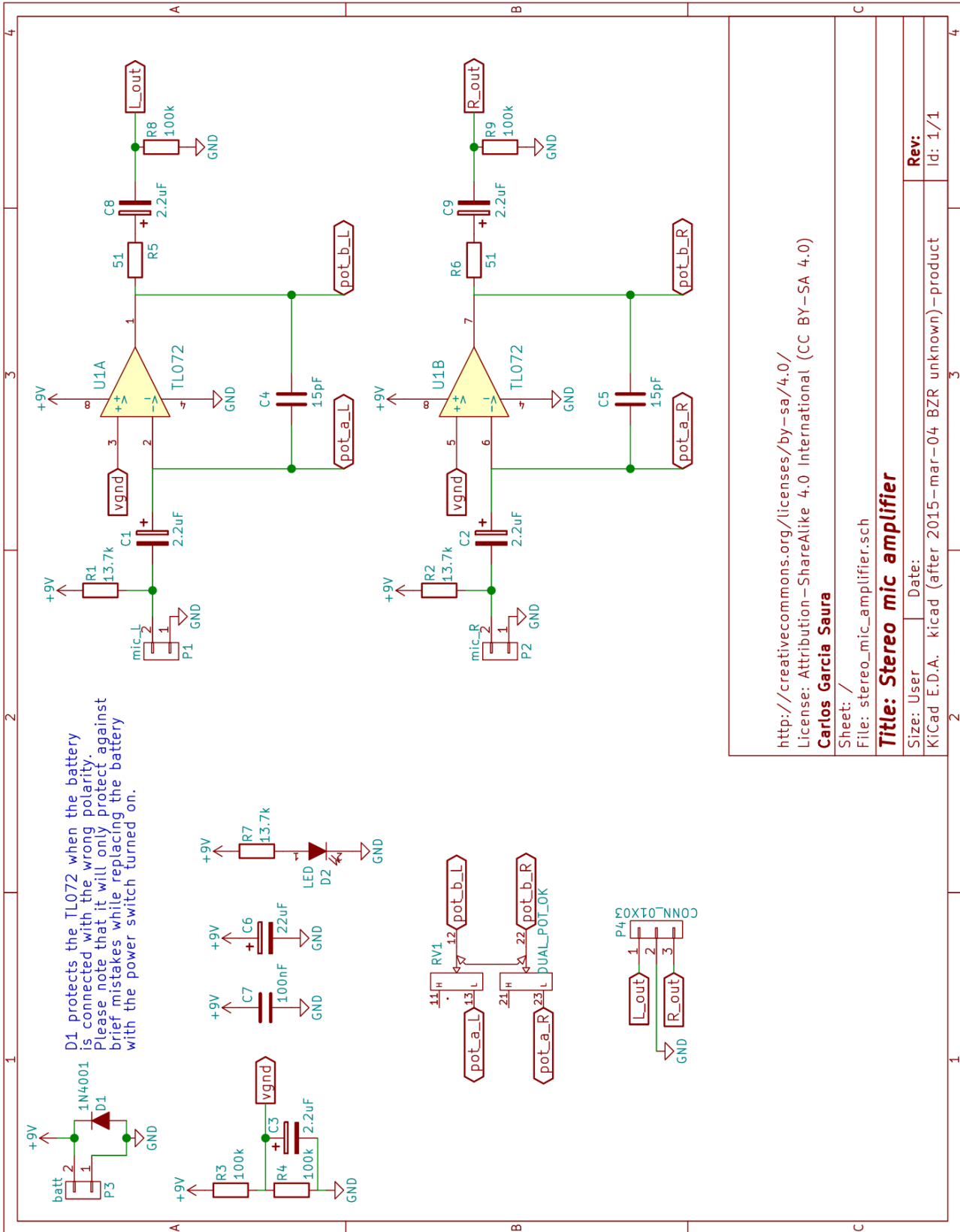


Figura 21. Planos del esquema electrónico a montar.

## 5. Recopilación y presentación de datos

Las siguientes mediciones y pruebas se realizaron en el ambiente y bajo las condiciones más óptimas que se pudieron recrear en el laboratorio de acústica de la Universidad Pública de Navarra, bajo la supervisión de Asier Beunza, responsable del laboratorio y con la ayuda de Ricardo San Martín, tutor del presente proyecto.

Los resultados fueron obtenidos con un ordenador y visualizados en pantalla con el software Visual Analyser.

Estas pruebas pretenden ser una referencia objetiva del funcionamiento del dispositivo y pese a los errores cometidos en su desarrollo, se pueden aceptar como válidas para un dispositivo de construcción casera. Una forma de dejar de lado la psicoacústica y la subjetividad sobre la tonalidad agradable de los sonidos.

Para realizar la prueba de calibración de la dummy debemos tener en cuenta que lo que deseamos, en realidad, es que nuestros transductores reciban la respuesta lo más plana posible (por eso se ha hecho especial hincapié en la elección del tipo de micrófono) de manera que con un posterior procesado en una suite informática destinada a la manipulación de audio se pueda 'colorear' la región del espectro audible a nuestro gusto para recrear una respuesta plana del equipo, si posteriormente se deseara utilizar este dispositivo para analizar matemáticamente cómo es una escucha humana estándar dentro de un entorno deberíamos corregir esta curva para adecuarla a la curva de isófonas promedio.

La primera parte de las experiencias expuestas se realizó en el interior de la cámara audiométrica del laboratorio de la Universidad Pública de Navarra ubicado en el edificio de El Sario. Tanto los micrófonos de los dispositivos de captación binaural a estudiar, como el sonómetro utilizado se posicionaron en el interior a 49cm +/- 1cm a una distancia de 182cm +/- 1cm y fueron excitados utilizando dos cajas acústicas Undertone mini 5L de 20 Vatios, situados a una altura de 1.86m respecto a los transductores.

### 5.1. Medición de la sensibilidad de los micrófonos

La sensibilidad de un micrófono es la presión sonora que hay que ejercer sobre el diafragma para que el transductor nos devuelva una señal eléctrica y se mide en milivoltios por Pascal (mV/Pa) [18]

$$S = \frac{V}{P} \left[ \frac{mV}{Pa} \right]$$

Donde, S: Sensibilidad. En milivoltios por Pascal  $\left( \frac{mV}{Pa} \right)$ .

V: Voltaje de salida. En milivoltios (mV)

P: Presión acústica sobre la membrana. En pascales (Pa).

Habitualmente la sensibilidad también se expresa en decibelios ante una referencia de un tono puro a 1KHz y 1Pa de presión (1dB), se halla el nivel de sensibilidad en decibelios usando la fórmula:

$$S = 20 * \log\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$$

Donde,

S: Sensibilidad. En decibelios (dB).

E<sub>1</sub>: Voltaje a la salida de un circuito mientras el micrófono está siendo excitado con el calibrador. En milivoltios.

E<sub>2</sub>: Factor de referencia 1mV/1Pa.

La medición de la sensibilidad en los micrófonos se realizó con un calibrador de micrófonos, marca CESVA configurado a 1KHz y emitiendo 94dB (1Pa).

Si bien se procuró en todo momento realizar la medición intentando reducir el número de errores en la medición, debe tenerse en cuenta que, al no ser las cápsulas de la cabeza desmontables, el simple hecho de posicionar correctamente el dispositivo calibrador sobre el micrófono es algo complejo debido a que este se encuentra alojado en el interior de la aurícula y esta supone un obstáculo para la correcta colocación, de manera que presumiblemente se obtendrá un valor ligeramente inferior a los 94dB marcados por el calibrador.

Los resultados obtenidos tras repetir la medición varias veces y con la ganancia del dispositivo al máximo, se obtuvo una medición final aceptada como 110mV +/- 1mV para el oído izquierdo y 95mV +/- 1mV para el oído derecho.

De manera que, atendiendo a la fórmula de conversión, obtenemos una sensibilidad de: -19,7dB para el oído izquierdo y -20,4dB para el derecho.

Podemos observar que la sensibilidad del micrófono “al aire” o conectado al previo es sensiblemente diferente, casi la mitad.

## 5.2.Respuesta en frecuencias (experimento en la cámara audiométrica)

La fidelidad indica la variación de la sensibilidad del micrófono en función de la frecuencia, un dispositivo que no distorsiona la señal es aquél cuya curva de fidelidad es lo más plana posible para todas las frecuencias dentro del espectro audible. [19]

Los altavoces fueron responsables de emitir sonido rosa y sonido blanco, emitida por una fuente de sonido programable CESVA FPA-456 y amplificado a través de una etapa amplificadora estero NAD modelo 314, se comprobaron los niveles de sonido dentro de la cámara con un sonómetro Cesva SC-310 estableciendo éstos en 65dBA.

Bajo las mismas condiciones se sometió a la prueba a la cabeza HeadAcosutics HSU-III y a la dummy proyectada con el fin de comprobar la diferencia existente entre las señales recibidas por ambos dispositivos, esto nos dará una idea aproximada de la calidad registrada en nuestro dispositivo.

La prueba requiere de una sala de ensayo sin aportes (anecóica) y que la fuente esté lo suficientemente alejada del micrófono como para considerar que el frente de ondas es plano (proviene de campo abierto). De esta forma, el proceso de calibración, para obtener la respuesta plana que deseamos, consistirá en la colocación de una fuente de sonido, elevada del suelo a, por lo menos 1 m. de altura y separada del frente del dummy 1m; esta fuente reproducirá ruido rosa (excitación aleatoria y al mismo nivel de todas las frecuencias dentro del espectro audible) y los micrófonos recogerán este sonido.

Asumiendo que las fuentes de sonido tuvieran una respuesta plana real y desechando la transmisión estructural de la cámara audiométrica, y la previsible, reflexión del sonido en el cristal que sirve de ventana en la misma y obviando la incapacidad de haber podido reconstruir unas condiciones ideales de campo abierto debido a las dimensiones de la cámara, obtendremos la señal recogida por el dispositivo. Las diferencias encontradas entre la señal original teórica (un espectro representado como una línea continua de nivel en todas las frecuencias) y la recogida podremos ver la coloración característica de la cabeza; corrigiendo esta curva característica, adecuando los niveles superiores e inferiores a un nivel medio entre el nivel máximo registrado y el mínimo, tendremos una respuesta plana en frecuencia en nuestro dispositivo.

Como tenemos el análisis representado en 1/3 de octava, la corrección pertinente para este modelo en particular será:



Gráfico 1. Respuesta en frecuencias ante el ruido rosa dentro de la cámara audiométrica

Si observamos la misma gráfica para el modelo comercial, vemos que la curva descrita en ambos casos es similar en prácticamente todo el ancho del espectro, aunque sí se percibe que en la cabeza proyectada existe una mayor diferencia de niveles recogidos entre oídos. Esto pudiera ser consecuencia de las reflexiones y aportes de la cámara o muy probablemente, por

algún defecto en la electrónica de la cabeza proyectada, posteriores pruebas determinarán esta anomalía.

Observamos que la diferencia no es (tan) acusada y sugiere que la cabeza no tiene fallas sensibles en la forma o su estructura.

### **5.3. Análisis físico acústico espacial (BRIR) de una sala de laboratorio.**

Esta segunda parte de las experiencias realizadas en laboratorio con fin último, medir, de manera objetiva y cuantificada, la calidad del sonido registrado por la *dummy* proyectada se realizó en el interior de uno de los laboratorios del departamento de física en el campus de la Universidad Pública de Navarra.

La prueba consiste en la excitación del volumen de aire de la sala mediante el uso de un radiante omnidireccional, esta excitación se ejecutará gracias a un programa informático, *WinMLS*.

Con la respuesta obtenida por los dispositivos se pueden calcular una buena cantidad de parámetros referentes a la sala, esto nos servirá para comprender cómo de buena o mala es la construcción del proyecto ya que las mismas condiciones se conservan celosamente para las dos cabezas binaurales.

Estas experiencias pretenden confrontar diferentes parámetros relacionados con la escucha binaural recogidos, tanto por la cabeza HeadAcoustics HSU-III propiedad del laboratorio, como con la cabeza proyectada.

La idea del análisis no es otra sino enfrentar dichos resultados para ambas y ver qué grado de similitud o diferencia existe entre un modelo construido de manera artesanal y uno capacitado para realizar mediciones en laboratorio.

Las mediciones se realizaron de igual manera y bajo las mismas condiciones para ambas cabezas.

### 5.3.1. Calibración de los micrófonos.

Previo a la realización de diferentes mediciones y experiencias, se volvió a calibrar la sensibilidad de los micrófonos, a continuación se presenta en gráficas los resultados obtenidos tanto para el oído izquierdo como para el oído derecho. Nótese el pico en la banda de frecuencia relativa a 1KHz y cómo los niveles para ambos micrófonos están en torno a los 94dB de referencia provistos por el calibrador CESVA.

Al igual que se explicó en el apartado anterior, el proceso de excitación de los micrófonos es una tarea compleja y que reviste errores en su desarrollo debido a la posición en la que se encuentran las cápsulas y la forma intrínseca de las aurículas.

El mismo proceso se realizó para la cabeza de HEAD acoustics, en los resultados podemos observar que la medida difiere del tono emitido por el calibrador, por lo mismo motivos que antes.

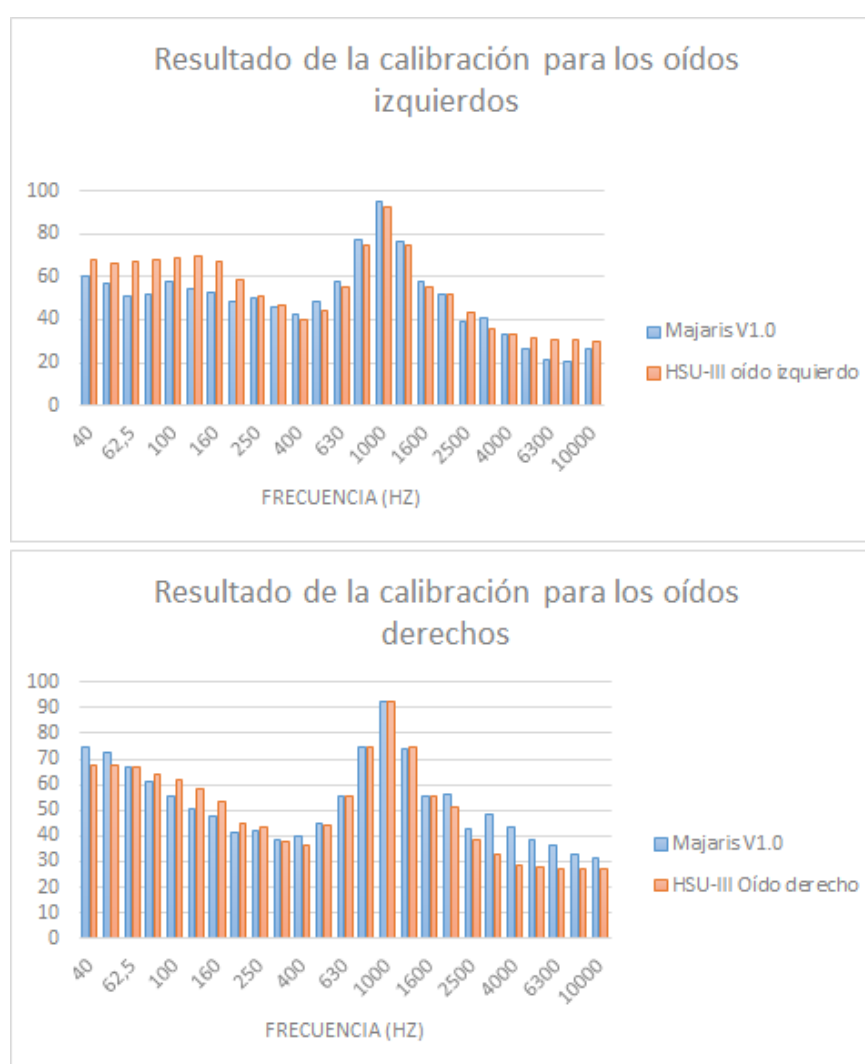


Gráfico 2. Resultados de la calibración para ambas cabezas, se aprecia el pico en la banda de 1000Hz y cómo los valores rondan los 94dB de referencia.

Confrontando los resultados de la calibración podemos observar que ambas cabezas fueron configuradas para responder de manera similar en igualdad de condiciones, resulta interesante de mencionar que los valores medidos durante la calibración oscilaron en +/-4dB los 94dB marcados por el calibrador, estas diferencias entre los micrófonos y con el nivel de referencia vienen dadas como consecuencia de una medición realizada

de la manera más correcta teniendo en cuenta la dificultad intrínseca que conlleva intentar introducir una cápsula de 8mm en un calibrador cuando ésta se aloja en el interior de una aurícula.

### 5.3.2. Respuesta en frecuencias

Se estudió también la respuesta frecuencias de la sala, realizando el procedimiento de medición de igual manera para ambos modelos y con un sonómetro CESVA SC-310 como elemento de referencia se excitó la sala con el radiante acústico omnidireccional emitiendo una señal de ruido rosa.

A continuación se muestran los gráficos y tablas adquiridos para ambos modelos.

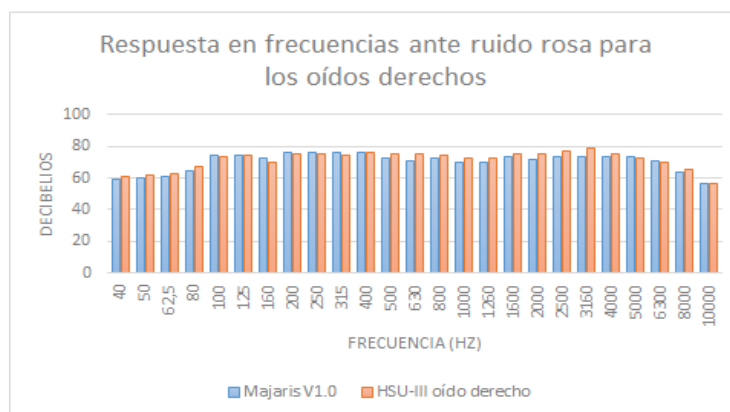
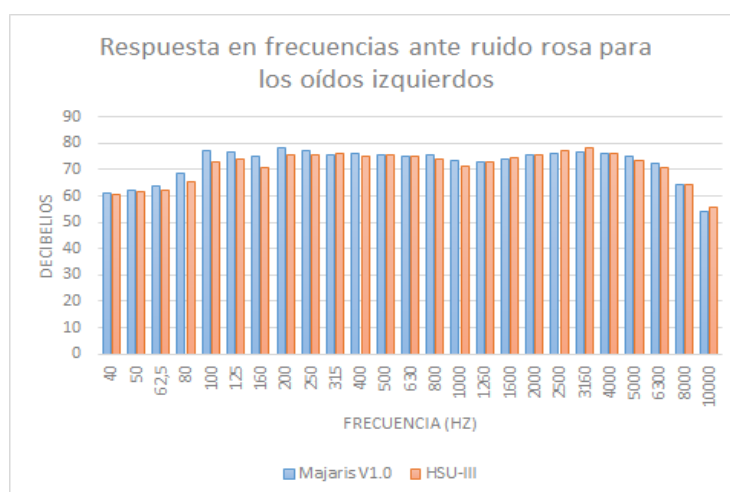


Gráfico 3. Respuesta en frecuencia para ambas cabezas ante ruido rosa.

En los gráficos podemos observar cómo, si bien la respuesta en frecuencia no es plana del todo, sí se mantiene bastante estable durante casi todo el espectro audible. La caída de la curva en las bajas frecuencias se debe al tamaño del diafragma del micrófono. También se puede observar una cierta coloración del espectro en las altas frecuencias, que si bien no es algo crítico, si pudiera ser algo a tener en cuenta a la hora de post-procesar algún clip de audio, ya que pudiera no querer que se recogieran esas altas frecuencias amplificadas.



Otra de las características observables en esta confrontación de gráficos es que la diferencia de niveles en todas las frecuencias medidos con la cabeza proyectada, realmente no difiere en exceso de las tomadas con el modelo comercial. En las tablas adjuntas en el formato digital de la memoria se puede ver que esta diferencias apenas superan los 2dB en algún caso aislado y por norma general se mantienen en el orden de las décimas de decibelio.

### 5.3.3. Respuesta al impulso.

La respuesta al impulso se realizó con la misma fuente radiante omnidireccional excitada con una señal *sweep* de 20 segundos proveniente de un ordenador con el software *WinMLS*, que será el encargado de analizar los resultados obtenidos y plasmar las gráficas pertinentes.

El procedimiento de análisis RIR mide la calidad acústica de un espacio y atiende a la transmisión de ondas sonoras entre una fuente y un receptor, esta transmisión será diferente para cada recinto y en cada posición diferente en la que se haga la medición, siempre y cuando, asumamos que el sistema es lineal. [20].

Las pruebas para la realización del estudio de la sala se realizaron utilizando respuestas impulsivas biaurales (BRIR) dentro del campo reverberante propio de la sala a estudiar utilizando el método indirecto.

Durante este procedimiento, es importante que la fuente muestre una respuesta lineal en frecuencias y que tengan la capacidad de emitir las señales sin distorsión alguna, de esa forma podremos considerar únicamente las distorsiones y cambios provocador por la sala a excitar.

Posteriormente, el software de análisis de audio *WinMLS*, procesa los resultados y muestra en pantalla los mismos. Estos resultados a mostrar son configurables y responden a la necesidad de medición de diversos parámetros involucrados en la acústica arquitectónica.

La señal emitida, conocida por el software es comparada con la señal registrada en los dispositivos de captación y analizada en consecuencia.

A continuación podemos observar las diferentes respuestas en ambos oídos para los dos modelos diferentes enfrentados.

En nuestro experimento se atendió más a los tiempos de reverberación  $t_{20}$  (entre -5 y -25dB),  $T_{30}$  (entre -5 y -35dB) y el *Early Decay Time* (EDT). Tanto el  $T_{20}$  como el  $T_{30}$  están relacionados con el recinto y sus características de construcción mientras que el EDT es un parámetro relacionado con la percepción subjetiva de dicha reverberación.

Finalmente, se adquirieron otros parámetros acústicos como la claridad ( $C_t$  <<relación entre la fracción de energía de los primeros 50ms para el habla o los 80 ms para la música) y la definición D50 (relación existente entre los dos parámetros anteriores)

### 5.3.4. Estudio IACC

En la normativa ISO 3382:1997 se hace referencia al coeficiente de correlación interaural cruzada (IACC) este parámetro es propio de la acústica binaural, este

coeficiente es resultado de la relación existente entre las respuestas impulsivas de ambos oídos.

Para la medición del IACC se pueden tomar diferentes límites de integración de manera que se puede estudiar por separado la respuesta rápida y la cola de la reverberación para la sala.

$$IACF_{t_1,t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t+\tau)dt}{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t)dt}$$

$$IACC_{t_1,t_2} = \max | IACF_{t_1,t_2}(\tau) | \quad -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}$$

IACC<sub>total</sub>: t1=0 t2=infinito

IACC<sub>0,80</sub>: t1=0ms t2=80ms

IACC<sub>80,inf</sub>: t1=80ms t2=Infinito.

La correlación cruzada interaural mide la similitud entre las dos señales recibidas por los oídos, es el resultado de la relación entre las integrales inversas de la cantidad de energías de los impulsos en un período de tiempo t1 y t2, que vendrán más tarde definidos, de este modo si las señales fueran las mismas para el oído izquierdo que para el derecho, la IACC<sub>A</sub> (desde t=0 hasta t=infinito) sería igual a 1 e igual a 0 si estas señales fueran independientes.

Existen dos áreas significativamente diferenciadas en la IACC<sub>A</sub> que responden al tiempo de acción de la reverberación de la sala, el IACC<sub>E</sub> y el IACC<sub>L</sub> de manera que el primero se corresponde con la llegada del sonido directo y comprende el período de tiempo desde t=0ms hasta t=80ms (el subíndice E proviene del inglés "Early"); El IACC<sub>L</sub> se refiere a las reflexiones tardías (el subíndice L hace referencia a la palabra inglesa "Late").

Así pues, en las fórmulas para el cálculo de la IACC<sub>x</sub> los límites de las integrales vienen determinados por estos períodos de tiempo.

Las bandas más representativas de este parámetro son las de 500Hz, 1000Hz y 2000Hz por ello se suele dar un valor promedio de estas bandas. [21]

El análisis BRIR se realizó con señales de barrido frecuencial exponenciales (esw) de 20 segundos.

La respuesta del sistema es, entonces, una correlación cruzada entre la señal original y la obtenida.

Para la realización de estas pruebas se utilizó una fuente sonora omnidireccional con caja acústica dodecaédrica, propiedad de la Universidad Pública de Navarra y esta fue alimentada por una etapa de potencia, amplificador conectado a un pequeño ordenador portátil con el software WinMLS de análisis de audio instalado en su memoria.

El software de audio WinMLS será el encargado tanto de generar la señal a emitir en la sala como de recoger los datos, analizarlos y representarlos en pantalla.

El motivo por el cuál en este caso el ordenador es el encargado de generar el sonido es porque, así él sabe la señal que está emitiendo, la compara con la señal que recibe a través de la tarjeta de sonido y realiza los cálculos pertinentes pues la diferencia existente entre la señal recogida y la generada es (teniendo calibrado el dummy) la generada por las características acústicas de la sala, los materiales presentes en ella, la arquitectura propia de la misma, etc.

El software se configura para la emisión de ruido rosa (para hallar la respuesta en frecuencia de la sala) y con un único *sweep* (un barrido frecuencial a lo largo de todo el espectro audible) de 20 segundos de duración. El aumento de la duración en los sweeps hace que la medición sea más fiable en los tiempos de reverberación.

Las pruebas se realizaron de igual manera y en igualdad de condiciones, tanto la distancia, la orientación, como la altura de las cabezas binaurales como los niveles en la fuente.

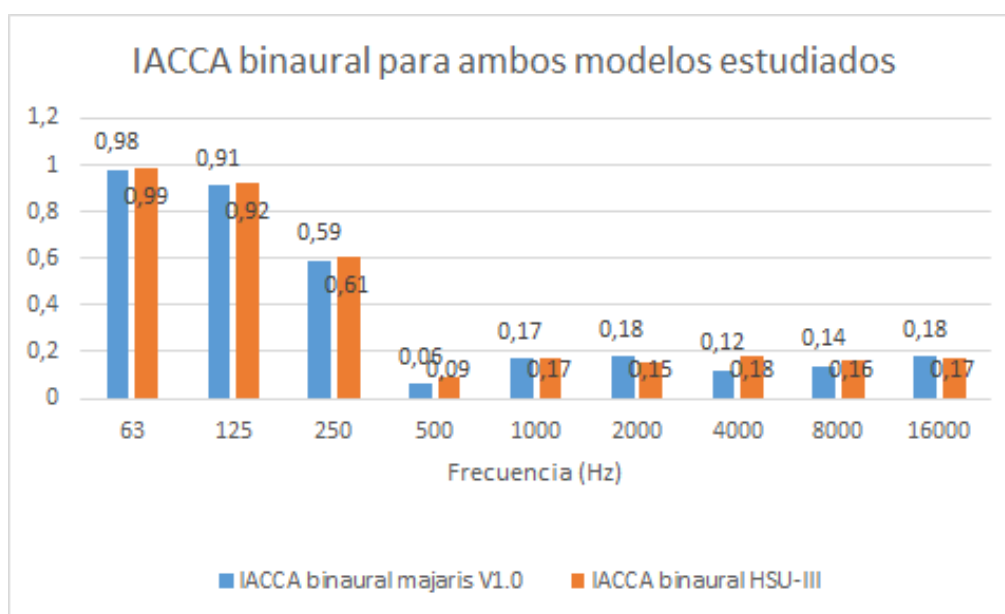


Gráfico 4. IACCTotal medida para ambas cabezas en la misma sala y bajo las mismas condiciones.

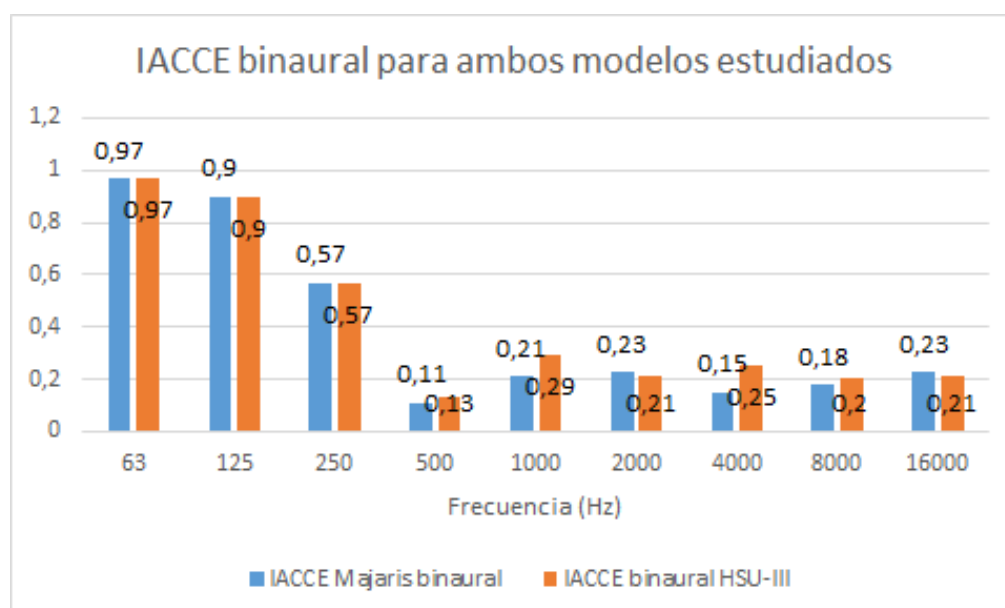


Gráfico 5. IACCE medida para ambas cabezas, en la misma sala y bajo las mismas condiciones.

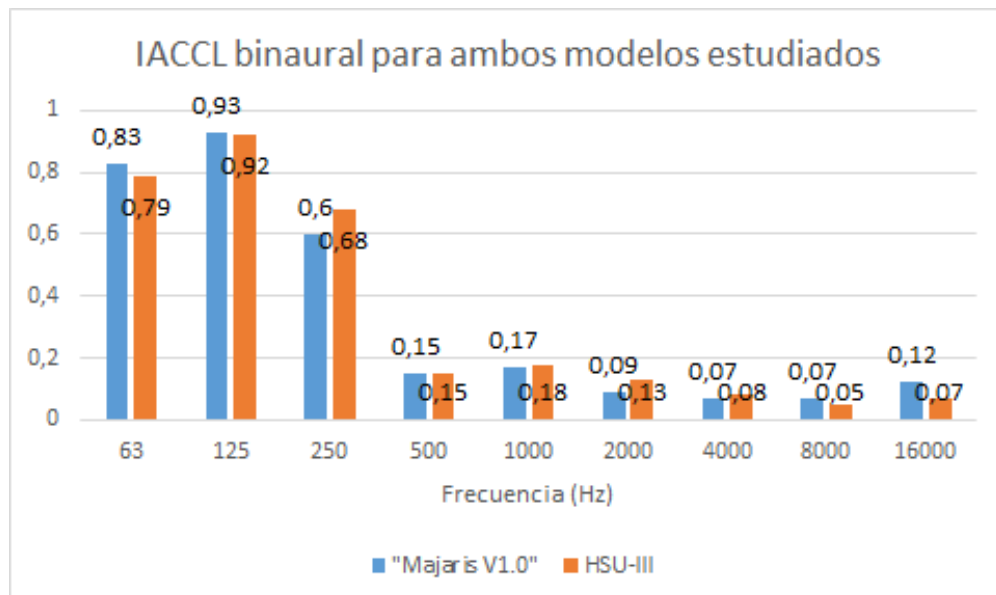


Gráfico 6. IACCL medida para ambas cabezas, en la misma sala y en igualdad de condiciones.

En este caso vemos que la diferencia existente entre los resultados es realmente baja, las dos cabezas se comportaron de manera similar ante las mismas condiciones, esto comienza a indicar que la cabeza proyectada tiene un resultado bastante aceptable, casi todas las gráficas revisadas hasta el momento han mostrado esta tendencia.

## 6. Otros parámetros medidos durante el experimento.

Si bien la idea del proyecto no era la de realizar estudios acústicos de recintos con el maniquí, sí se realizaron diversas pruebas para confrontar los resultados obtenidos por un modelo comercial y de calidad suficiente como para realizar mediciones válidas para estudios frente a uno de construcción casera.

El proyecto no pretende profundizar en el estudio de la acústica arquitectónica ni es un estudio sobre una sala en particular, por lo que los conceptos teóricos relativos a la acústica de entornos se tratarán superficialmente.

Así pues, se podría haber hecho un estudio mucho más extenso sobre la acústica de la sala en la que se realizó la prueba y haber obtenido parámetros relativos a la inteligibilidad, tales como el *STI*, el *brillo* (Br) o la *calidez acústica* (BR), pero se han obviado estos datos ya que la idea de la experiencia era la de realizar una comparativa que sirviera de alguna manera como medida objetiva entre los modelos.

## 6.1. Criterio Temporal

### 6.1.1. Early Decay Time (EDT)

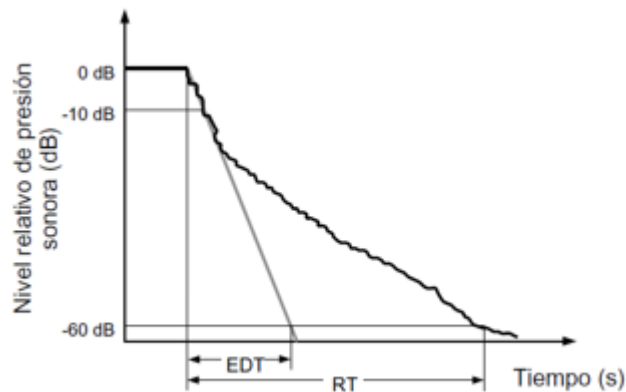


Figura 22. Early Decay Time (EDT).

Se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que la fuente emisora deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora decae 10dB. Está relacionado con la sensación subjetiva de la viveza del local.

Mide la diferencia entre el tiempo de reverberación teórico (que debe seguir una forma exponencial para salas donde la difusión es perfecta, tanto por geometría como por construcción de materiales) y el percibido en realidad.

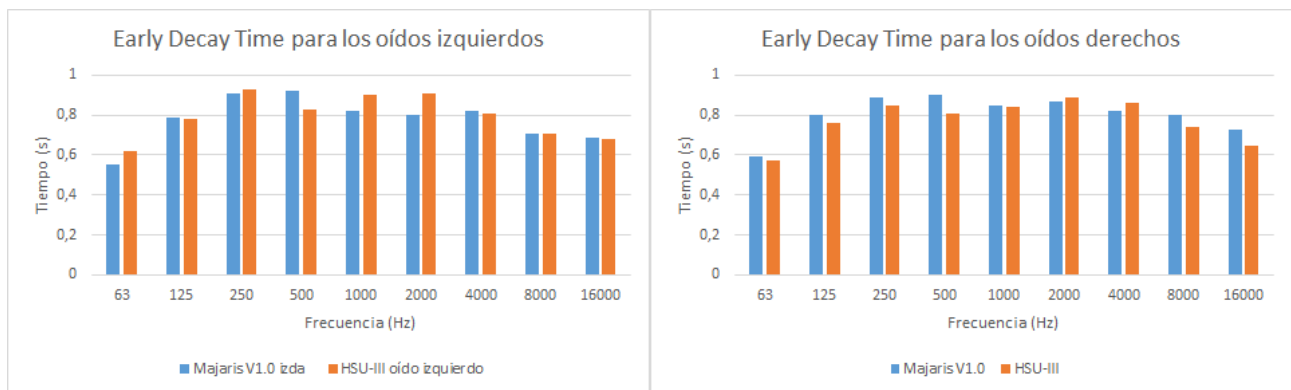


Gráfico 7. EDT medido para ambos oídos en ambas cabezas

### 6.1.2. Tiempo de reverberación (T30)

En las mediciones también se optó por medir el parámetro característico del tiempo de reverberación.

La reverberación se entiende como la persistencia de un sonido en una sala debida a las múltiples reflexiones sobre las paredes y elementos de ésta.

$$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{A\omega t} [s]$$

Donde  $V$ : es el volumen del recinto (en  $m^3$ )  
 $A\omega t$  es la absorción total del recinto, en *Sabines*.

Mide la calidad acústica de un recinto en base a si el espacio acústico es "vivo", aquellos en los que el tiempo de reverberación (RT) es elevado o "apagado" para aquellos en los que T es menor.

Se decidió medir el tiempo de reverberación necesario para que el sonido decaiga 60dB, este parámetro se registra en el valor T30.

El tiempo de reverberación se puede medir como un valor único o por bandas, ya que este tiende a ser mayor para frecuencias más altas ante otros sonidos de menor frecuencia. La medida se realizó para ambas cabezas en igualdad de condiciones y orientación, los datos fueron recogidos con el software descrito con anterioridad.

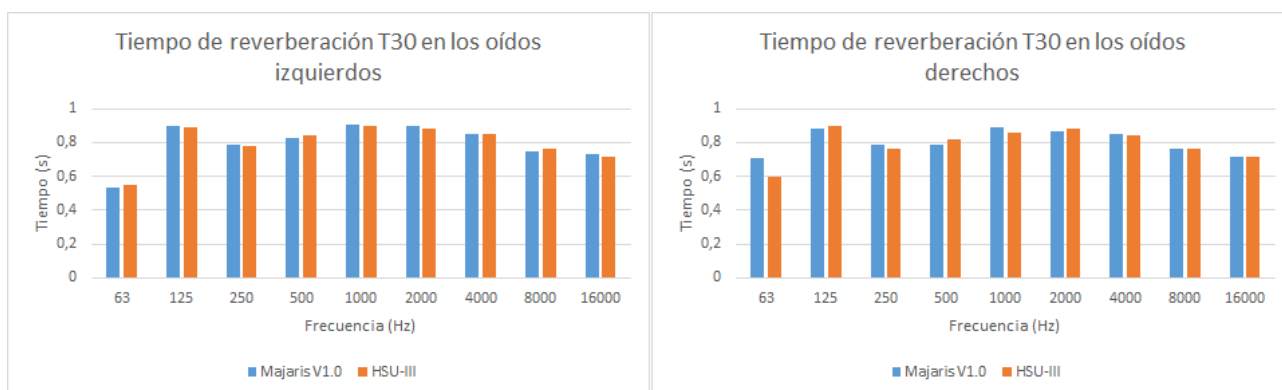


Gráfico 8. T30 medido para ambas cabezas en ambos oídos.

Como podemos ver, la cabeza construida de manera artesanal sigue la estela de los parámetros medidos por la cabeza de fabricación industrial.

## 6.2.Criterio Energético.

### 6.2.1. Claridad (Ct)

Se define como diez veces el logaritmo decimal de la relación entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros "t" segundos desde la llegada del sonido directo y la energía recibida con posterioridad.

$$Ct = \frac{Et}{E_{\infty}}$$

En virtud de este tiempo "t" se obtienen varios parámetros, siendo objeto de este estudio el  $t=50ms$  y el  $t=80ms$  relativos a la claridad para mensaje de voz y para escucha musical relativamente.

#### 6.2.1.1. Claridad de la voz ( $C_{50}$ )

Muestra el grado de separación entre los sonidos individuales de un mensaje oral. Es el resultado de la relación existente entre la energía del sonido que llega al oyente durante los primeros 50ms desde la llegada del sonido directo y las primeras reflexiones), es decir, confronta la energía recibida durante los primeros 50ms con

la energía recibida posteriormente, se calcula para las bandas de octava en las que la voz es más probable de encontrarse (desde 125Hz hasta 4KHz)

$$C50 = \frac{Epre_{50ms}}{Epost_{50ms}} [dB]$$

*Speech average* es como se conoce el valor medio de la claridad para las bandas críticas en las que se suele situar la voz humana (500Hz, 1000Hz, 2000Hz y 4000Hz). Este parámetro que tiene por finalidad cuantificar la calidad de un recinto para el discurso hablado se atiene a la fórmula:

$$C50speech_{av} = 0.15 * C50(500Hz) + 0.25 * C50(1000Hz) + 0.35 * C50(2KHz) + 0.25 * C50(4KHz) [dB]$$

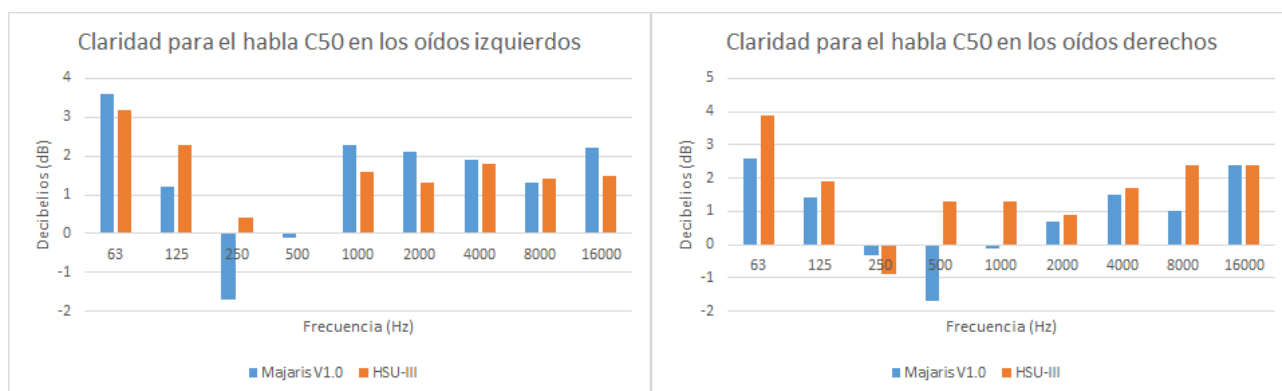


Gráfico 9. C50 en ambos oídos de los dos modelos a estudiar

En este momento es el único caso en el que se ve una diferencia sensible en los gráficos y es tan sólo en dos bandas de frecuencia, si bien en esta prueba el oído derecho parece salir peor parado, esto podría indicar algún tipo de forma en la experiencia o algún detalle del modelo construido que difiere con la cabeza comercial.

#### 6.2.1.2. Claridad Musical ( $C_{80}$ )

De igual manera que el  $C50$  está caracterizado para medir la adecuación de un entorno a la comprensión del mensaje hablado, el mensaje musical tiene un parámetro de medición para la calidad de un entorno. Se define como la cantidad de energía recibida durante los primeros 80ms frente a la cantidad de energía recibida con posterioridad y se mide en decibelios.

$$C80 = \frac{Epre_{80ms}}{Epost_{80ms}} [dB]$$

Indica el grado de separación entre los sonidos individuales de una pieza musical. Habitualmente se utiliza el valor medio relativo a las bandas de 500Hz, 1000Hz y 2000Hz, denominado "*music average*"

$$C80music_{av} = \frac{[C80(500Hz) + C80(1000Hz) + C80(2000Hz)]}{3} [dB]$$

Los valores altos de este parámetro indican una "viveza" del local provocada por las reflexiones en las superficies del entorno.

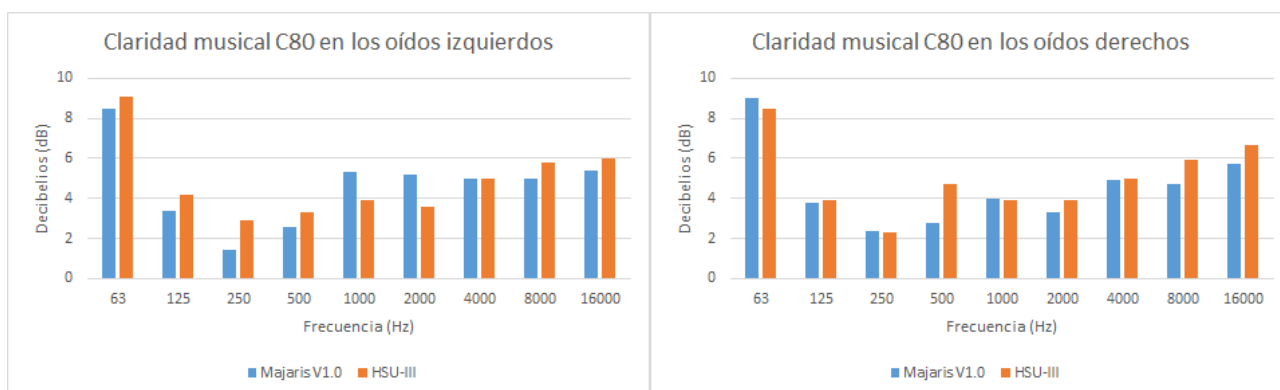


Gráfico 10. C80 medido en ambos oídos, para ambos modelos.

En este caso, el parámetro C80, a diferencia del C50 no presenta esa diferencia en las bandas de 250Hz y de 500Hz, en estas gráficas podemos observar una ligera caída en la medida del oído izquierdo para la banda de 250Hz y marcas por encima del valor recogido en la HSU-III en la banda de 1KHz.

A excepción de estas diferencias, que a priori parecen nimias, la respuesta mostrada en los tercios de banda nos indica que el funcionamiento de una cabeza y la otra son muy similares.

### 6.2.2. Definición ( $D_{50}$ )

La definición es la relación entre la energía recibida por el oyente durante los primeros 50ms desde la llegada del sonido directo (incluye dicho sonido) y la energía total recibida. Cuanto mayor sea el valor D, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en ese punto de medición.

$$D = \frac{E_{pre50ms}}{E_{total}} [dB]$$

Del mismo modo que los parámetros anterior, la definición varía en base al recinto, el posicionamiento del oyente con respecto de la fuente sonora y la orientación de la misma, así que esta será mejor si el dummy se orienta de frente a la fuente radiante. Los espacios acústicos en los que los sonidos no se pierden en reflexiones y aquellos sonidos que llegan inmediatamente después del sonido directo harán que la definición del local sea mejor.



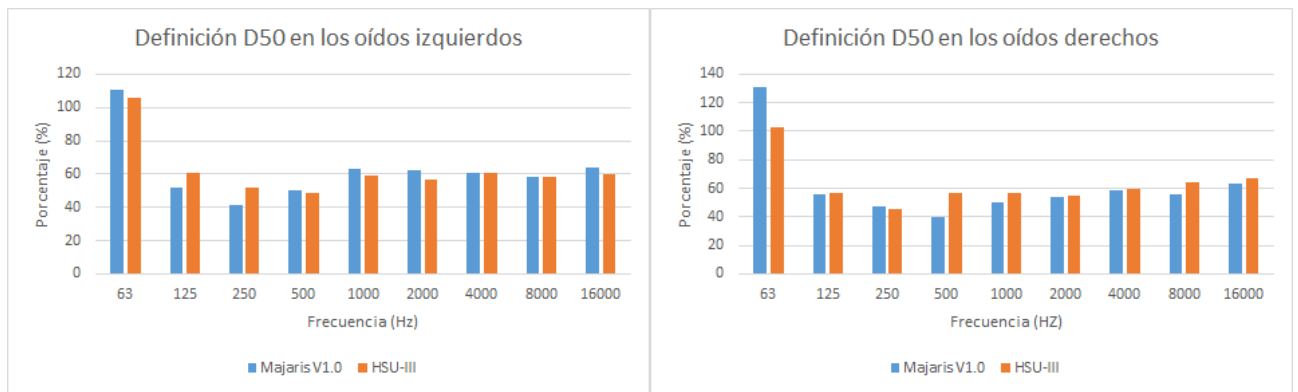


Gráfico 11. D50 medido para las dos cabezas en los dos oídos

Seguimos evidenciando esa similitud en la apariencia de los gráficos confrontados, tras tantas pruebas parece evidente que ambas cabezas se comportan de manera similar y donde una parece que pierde en alguna banda resulta que después lo compensa con refuerzo en otra zona del espectro.

Además de estas mediciones también se obtuvo la información relativa a la relación señal-ruido (SNR) y un análisis del ruido de fondo existente en la sala de laboratorio en la que se realizó la prueba, a continuación se muestran los resultados para ambos modelos (Majaris V1.0 y HSU-III) y podemos observar que las diferencias siguen estando por debajo de los 2dB, valor que se considera el mínimo perceptible, así que podemos asegurar que, aunque existen diferencias entre las grabaciones de una cabeza y otra, la respuesta del modelo proyectado es bastante buena, sobre todo teniendo en cuenta que todo, incluso la placa de cobre en la que está impreso el circuito, es de fabricación casera.

## 7. Estudio económico.

Concepto- referencia	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total (€)
<b>FlexFoamIt V</b>	1Kg	36,00	36,00
<b>DragonSkin FX-PRO</b>	0,5Kg	30,31	15,15
<b>Diodo N4001</b>	1	0,30	0,30
<b>Resistencia eléctrica</b>	9	0,02	0,18
<b>Condensador microlítico 100nF</b>	1	0,20	0,20
<b>Condensador cerámico 2,2 uF – 15 pF</b>	6	0,10	0,60
<b>Diodo LED 5mm.</b>	1	0,07	0,07
<b>Operacional TL052</b>	1	0,30	0,30
<b>Potenciómetro dual 100K</b>	1	2,10	2,10
<b>Conector XLR hembra</b>	2	3,00	6,00
<b>Cápsula condensador POM 5338 L-R</b>	2	2,75	5,5
<b>Base de madera</b>	1	4,00	4,00
<b>Rosca para trípode</b>	1	0,15	0,15
<b>Mano de obra profesional capacitado</b>	28h	20	560,00

Total. Base imponible 630,55 €

21% I.V.A. 132,42 €

**TOTAL: 762,96 €**

El total del presupuesto, por unidad, asciende a la cantidad de **Setecientos sesenta y tres** euros.

Pamplona a, 1 de septiembre de 2016.

## 8. Conclusiones.

Puesto que tiene una buena respuesta, en líneas generales, la cabeza se presenta como un buen instrumento para la captación y reproducción de entornos acústicos, con un procesado adecuado tras la adquisición de las muestras de audio, el sonido envolvente tiene una calidad suficiente como para registrar grabaciones de cierta calidad, aunque sea a modo de aficionado. Las diferentes grabaciones que se realizaron dan una buena impresión subjetiva espacial y sí recrean aproximadamente la procedencia de las fuentes sonoras y su distancia relativa.

El relativo bajo coste económico, frente a las cabezas binaurales que se pueden encontrar en el mercado, del modelo lo convierte en una alternativa a la adquisición o alquiler de instrumental de características profesionales, siempre y cuando se esté dispuesto a asumir cierto trabajo extra en la edición del audio registrado.

Sus cualidades y la relación calidad-precio de las grabaciones obtenidas lo convierten en un dispositivo ideal para la estimulación del efecto *ASMR*, un concepto aprendido durante el desarrollo de este proyecto y que está en auge en las redes sociales, existen multitud de audios y vídeos en YouTube que pretenden despertar esta sensación en los oyentes.

Del mismo modo, la calidad y sensibilidad del proyecto es aceptable, teniendo en cuenta la comparativa con el maniquí propiedad de la Universidad Pública de Navarra, evidentemente, no registrará los parámetros con la calidad y fiabilidad que ésta puede hacerlo, pero para el estudio aproximado y configuración en consecuencia de pequeñas salas, bares o recintos en los que se den conciertos, sin mucho propósito de grandeza, pudiera ayudar a la decisión de la realización de un diseño más correcto que como habitualmente suelen encontrarse.

No deja de ser sorprendente que algo de construcción casera y con (relativo) bajo coste tenga una respuesta tan aceptable, sobre todo teniendo en cuenta que incluso la circuitería es de construcción manual. Ese era uno de los mayores miedos a la hora de realizar el proyecto, se sabía cuál era el procedimiento y la teoría sobre la creación de placas para circuitos integrados, pero nunca habíamos fabricado uno; temíamos que la calidad del modelo se viera muy perjudicado por nuestra falta de experiencia en ese campo o por la falta de material y equipo competente para realizar esa fase del proyecto de manera correcta.

Originariamente, la cabeza estaba proyectada para recrear íntegramente el sistema audiovisual humano, esto implicaba la inserción de un módulo de cámaras emparejadas y separadas entre sí la distancia equivalente a la separación media de los ojos, este dispositivo hubiera sido capaz de capturar la tridimensionalidad acústica y la tridimensionalidad visual y con un set de reproducción correcto hubiera posicionado, virtualmente, al espectador en el medio de una escena. Desgraciadamente esta parte del proyecto suponía en sí mismo un reto técnico válido para otro proyecto de final de carrera, la construcción de dicho montaje debía tener en cuenta los movimientos de las cámaras para el correcto enfoque a diferentes distancias y aunque con el uso de *Arduinos* y software dedicado hubiera solventado este problema, el proyecto se hubiera dilatado, aún más, en el tiempo.

De todas formas se presenta la alternativa a este problema de construcción y no es otra que el uso de un sistema pre-construido montado sobre la cabeza, en el mercado existen diferentes montajes y dispositivos de grabación de vídeo en 3D, el autor del proyecto ve como la opción más viable y cómoda (por los sistemas existentes de anclaje) el uso de un módulo para grabación tridimensional propiedad de *GoPro*, consiste en una carcasa en cuyo interior se alojan dos cámaras de la misma marca y configuradas de igual manera, la carcasa sincroniza los vídeos y estos se pueden editar posteriormente en cualquier suite informática.

Durante el estudio y realización de este proyecto, ha sido mucha la información y los ejemplos que he ido analizando y revisando, una de las cosas más desconcertantes durante la reproducción de audios binaurales, es que ante los movimientos de la cabeza (tras un sobresalto o para intentar enfocar correctamente un elemento en la escena acústica) la fuente de audio no varía en la forma en la que se escucha y desorienta al oyente; quizás el reto de conseguir una inmersión mejor en la escena esté en ser capaces de obtener los matices en la orientación, quizás añadiendo otro par de oídos en cuadratura con estos (utilizando el mismo principio que los sistemas de vídeo 360° tan comunes y populares actualmente) y posteriormente modificando por software las señales registradas para llegar a cubrir los 360° de la escena acústica y de manera realista y tridimensional.

Sin duda, la reflexión a la que llego es que, merece la pena intentar construir una idea que surja de la investigación, actualmente y gracias a la tecnología y la difusión de contenidos a través de la red cualquier proyecto imaginable está al alcance de la mano. Siempre sin aires de grandeza y desde la total humildad, creo que he demostrado que si se busca correctamente, si se tiene la idea y se razona antes de dar cada paso el resultado puede ser sorprendente y a un coste económico no muy elevado, algo que no se puede decir del coste anímico, pues la incursión en una de estas gestas requiere de paciencia y la predisposición a tener que repetir los pasos hasta el hastío.

El conocimiento es libre y de todos, al compartir su circuito bajo licencia libre, Carlos García Saura hizo dos cosas, me ayudó inestimablemente con el desarrollo de mi proyecto y colaboró con el desarrollo de una idea que, igual un día, se hace grande.

## 9. Problemas técnicos encontrados.

Debido a la cantidad de etapas diferentes que hay que seguir para la obtención de un modelo como este, se realizó una especie de “diario de incidencias”, un resumen de los fallos y problemas encontrados durante la construcción del dummy, para tener en cuenta si se llegase a intentar reproducir un modelo como este. A continuación se presentan algunas de las notas tomadas durante el proceso de construcción que pueden servir para evitar pérdidas de tiempo y errores quien se embarque en esta tarea o, en el mejor de los casos, como inspiración para la mejora del modelo.

Correcto orden de inyección, primero el látex y después el poliestireno, ahora sí sabemos que se juntan, mejora de la presentación del producto final, textura.

Correcto moldeado de las orejas, para conseguir una buena resolución en el látex es imperativo disponer de una campana de vacío, al agitar los químicos del látex se introducen, en el interior de la mezcla, pequeñas burbujas de aire que posteriormente y con el asentamiento de la pasta química acaban en las partes superiores de los moldes, dando por resultado reproducciones con taras o incompletas, lo que conlleva a tener que volver a empezar el procedimiento.

Alimentación Phantom, error en los circuitos, sobretensión; es más complicado de lo que parece alimentar el circuito con 48v, la idea es buena, así se solventa el problema de la alimentación y no hay que permanecer atento al nivel de la batería que alimenta a los micrófonos, la misma grabadora oferta la tensión de salida, pero si el diseño es incorrecto no hará más que destruir las cápsulas.

Circuitos, recomendaciones para la transferencia del tóner, cuidado con los tiempos de ácido.

Ruido que se cuele dentro de las grabaciones, viento y zumbido eléctrico al subir la ganancia.

El potenciómetro de doble canal no hace falta que sea logarítmico, aunque sí es recomendable para poder tener más “tiento” a la hora de ajustar los niveles durante las grabaciones.

A la hora de hacer grabaciones es importante no modificar los niveles “durante” la grabación, si hay que repetir la toma. Se repite.

Sonido excesivamente brillante, presumiblemente por el tamaño del diafragma.

Alimentación, tenemos pilas y un interruptor de 3 vías de manera que podríamos soldar en paralelo una entrada de alimentación para alimentar el dummy con un transformador de corriente alterna a continua.

Parece ser que los roedores salvajes disfrutan del látex, es imperativo almacenar bien todo el material, pero especialmente aquellos elementos creados con látex si se trabaja en entornos

Por motivos de comodidad a la hora de trabajar con la circuitería se acabó por añadir una base de madera al maniquí, esta base se abre, liberando el cierre frontal, abatiendo la cabeza hacia atrás y deja al descubierto y con fácil acceso la circuitería interna, si bien, la idea inicial del proyecto era la de obtener un molde exclusivamente con forma de cabeza en el que hubiera un espacio estanco alojado en el interior del cuello, ahí estaría alojada la circuitería.

Que la circuitería esté alojada en una base es una buena idea si se va a manipular de manera continua, si no, la base es molesta de transportar y pesada, algo que resta movilidad al técnico que esté capturando los sonidos.

Se recomienda la construcción o adquisición de diversos accesorios:

Trípode (para evitar tener que estar cargando con la cabeza, además de que el hecho de estar frente o tras la cabeza realiza cierto apantallamiento e interfiere en la grabación).

Orejas (debido a la sensibilidad extrema del dispositivo, el ruido ocasionado por el viento, aun siendo éste ligero, es algo muy molesto. Se sugiere la construcción de unas orejas con alambre y cubrirlas como el típico paraviento).

Al trabajar de noche, grabando en entornos aislados y a oscuras, se recomienda también tener un punto de luz o lámpara frontal para facilitar el acceso y evitar caídas.

Una de las cosas que más curiosidad me daba era la de si se podría construir una escena acústica nada más que mediante la adición de sonidos recogidos en diferentes entornos, tras unas pocas pruebas confirmé el hecho.

Las prisas no son buenas, no por correr más y llegar antes a una localización resultará que esta saldrá mejor, nada lo asegura y la carretera es peligrosa (o traicionera, una sanción me he llevado por las prisas para ir a grabar sonidos para la exposición).

Hubiera sido interesante haber hecho pruebas con sistemas de grabación microfónica estéreo y haber comprobado la validez de estos.

Ahí donde la gente ve que es una cabeza fea, yo veo muchas horas de trabajo y muchas horas de búsqueda de información y materiales, quizás los resultados obtenidos no sean de calidad como para poder comercializar el producto como un dispositivo de calidad, pero para la grabación de audios a modo de recreación de escenas acústicas a nivel de aficionado es aceptable.

Relación calidad precio bastante razonable, resultados mejores de los esperados y eso que no hemos tenido acceso a buenas herramientas o entornos de trabajo, andábamos calentando los moldes con aire, sin ventilación, sin buenas condiciones para hacer mediciones y proporciones en los químicos y en condiciones de seguridad más bien precarias, aún con todo, el resultado es relativamente bueno.

La más importante de todas: Antes de hacer algo, piensa. Aún más si lo que vas a hacer es destructivo con el material.

## 10. Bibliografía.

- [1] [Schiffman, Harvey (2001). «4». La Percepción Sensorial. Limusa Wiley. p. 81. ISBN 968-18-5307-5. ]
- [2] [tratado de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello Tomo 2 Otolología, Varios autores : ISBN 978-84-9835-076-0]
- [3] [La fisiología del oído Dr. Jorge Caro Letelier y Dr. José San Martín : <http://escuela.med.puc.cl/paginas/publicaciones/otorrino/apuntes-2013/Anatomia-fisiologia-oido.pdf>]
- [4] [ Fisiología del sistema auditivo : <http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza//acustica/apuntes/SistemaAuditivo.pdf> ]tímpanos
- [5] [Vibratory response of dry human skulls, Carmen L. McKnight 2012 : <http://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/14618/McKnight, Carmen, MASc, MECH, March 2012.pdf> ]
- [6][https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_05\\_06/io5/public\\_html/](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io5/public_html/)
- [7]Experiencia de Haas y Mayer
- [8] An indtroduction to the Psychology of Hearing, Brian C. J. Moore, ISBN: 978-0-12-505628-1
- [9] [ Una investigación descubre que la densidad cerebral de materia gris y de materia blanca es superior en las personas que aprenden a leer <http://www.consumer.es/web/es/salud/2009/10/16/188610.php>].
- [10] [[The impedance frequency response of the human skull]. [Article in Chinese] Dong X1, Wu X, Qin M, Fu F, You F, Liu R, Shi X, Xiang H, Liu F. :<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12561345>]
- [11] Efecto Franssen
- [12] [wiki: holofonía “se produce un efecto estéreo aún sin estar posicionado en el centro de la habitación”]
- [13] [<http://soundcheck.com.mx/?p=3962>]
- [14][wikipedia – espuma acústica]
- [15] [Vibratory response of dry human skulls, Carmen L. McKnight 2012 : <http://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/14618/McKnight, Carmen, MASc, MECH, March 2012.pdf> ]
- [16] [Depósito dental Correa - <http://www.dentalcorrea.es/>]
- [17] OpenBinaural, Carlos García Saura, Madrid 2015. Proyecto OpenSource presentado en el OSHWDem – A Coruña 2015
- [18][Tecnología básica del sonido I – Eduard Gómez, Juan y Ignasi Cuenca, David]
- [19][Tecnología básica del sonido I – Eduard Gómez, Juan y Ignasi Cuenca, David]
- [20] (Kuttruff, H., 1991; Rindel, J.,2004)
- [21][Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía, volumen 27 de Arquitectura (Universidad de Sevilla), Ángel Luis León Rodríguez, 2007. ISBN: 8480954515, 9788480954518

## 11. Referencias externas

Wikipedia Escucha binaural: [http://es.wikipedia.org/wiki/Escucha\\_binaural](http://es.wikipedia.org/wiki/Escucha_binaural)  
Wikipedia: Holofonía: <http://es.wikipedia.org/wiki/Holofonia>  
Soundcheck.com [<http://soundcheck.com.mx/?p=3962>]  
Wikipedia: Espuma acústica: [Http://es.wikipedia.org/wiki/Espuma\\_Acustica](Http://es.wikipedia.org/wiki/Espuma_Acustica) wikipedia – espuma acústica  
FormX: <http://www.formx.es/> (info@formx.es)  
Depósito dental Correa: <http://www.dentalcorrea.es/>  
[http://interface.cipic.ucdavis.edu/CIL\\_tutorial/3D\\_psych/elev.htm](http://interface.cipic.ucdavis.edu/CIL_tutorial/3D_psych/elev.htm)  
[http://www.soundprofessionals.com/binaural\\_microphone.html](http://www.soundprofessionals.com/binaural_microphone.html)  
<http://www.gearslutz.com/board/remote-possibilities-acoustic-music-location-recording/143551-please-recommend-good-binaural-mic-set.html>  
<https://www.musicworks.ca/diy/how-make-binaural-microphones>  
Wikipedia: Head Related Transfer Function  
Escuela 3D y holofonía, Ingeniería de las Ondas I. Carlos de la Parra García y Javier Royuela del Val. Universidad de Valladolid  
Material de referencia de Juan Rivas. [JuanRivasSonido.com](http://JuanRivasSonido.com)  
OpenBinaural por Carlos García Saura, Madrid 2015. Proyecto OpenSource presentado en el OSHWDem – A Coruña 2015 (Open Source Hardware Demonstration) y en la MFB and Maker Faire Bilbao 2015. Primera aparición en Hackaday y actualmente alojado para consulta en GitHub  
Diseño y construcción de una cabeza binaural, Lorena Armenta Flores. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica. México D.F. (2011)

## 12. Figuras

- Figura 1. Detalle del oído externo y medio - An introduction to the Psychology of Hearing. Brian C. J. Moore – Emerald – ISBN: 978-0-12-505628-1.
- Figura 2. Detalle del oído interno - An introduction to the Psychology of Hearing. Brian C. J. Moore – Emerald – ISBN: 978-0-12-505628-1.
- Figura 3. Planos de referencia para localizar una fuente en un sistema de coordenadas. - An introduction to the Psychology of Hearing. Brian C. J. Moore – Emerald – ISBN: 978-0-12-505628-1.
- Figura 4. Diferencia Interaural de Tiempo - An introduction to the Psychology of Hearing. Brian C. J. Moore – Emerald – ISBN: 978-0-12-505628-1.
- Figura 5. Diferencia Interaural de Intensidad - An introduction to the Psychology of Hearing. Brian C. J. Moore – Emerald – ISBN: 978-0-12-505628-1.
- Figura 6. Respuesta en frecuencia del oído en función del ángulo de inclinación. - An introduction to the Psychology of Hearing. Brian C. J. Moore – Emerald – ISBN: 978-0-12-505628-1.
- Figura 7. Head Related Transfer Function (HRTF)
- Figura 8. El sonido llega a los oídos difractándose. Propia, basada en infografía hallada en Internet.
- Figura 9. Efecto de precedencia. – An introduction to the Psychology of Hearing. Brian C. J. Moore – Emerald – ISBN: 978-0-12-505628-1.
- Figura 10. Cono de confusión en torno a un oído, los sonidos que se emitan en la superficie del cono podrían generar esa confusión sobre su procedencia.
- Figura 11. Detalle del interior de “Ringo”. - Patente US4680856, de Hugo Zuccarelli.
- Figura 12. Neumann KU-100. - [Http://www.neumann.com/](http://www.neumann.com/)
- Figura 13. Sensibilidad del modelo KU-100, en función de la frecuencia (Hz). - [Http://www.neumann.com/](http://www.neumann.com/)
- Figura 14. HeadAcoustics HSU-III. - [Http://www.Headacoustics.com/](http://www.Headacoustics.com/)
- Figura 15. El procedimiento por el cual se extrajeron diversos moldes de orejas hasta conseguir un resultado aceptable.
- Figura 16. Diferentes gamas del FlexFoamIT y su poder de expansión. - [Http://www.smooth-on.com/](http://www.smooth-on.com/)
- Figura 17. Dragon Skin FX-PRO. - [Http://www.smooth-on.com/](http://www.smooth-on.com/)
- Figura 18. Detalle de la cabeza prototipada. - Propia.
- Figura 19. Circuito del proyecto OpenBinaural una vez montado. - Carlos García Saura ([Http://www.github.org/](http://www.github.org/))
- Figura 20. Circuito a montar, de este sólo hay que extraer las pistas y los topes. - Carlos García Saura ([Http://www.github.org/](http://www.github.org/))
- Figura 21. Planos del esquema electrónico a montar. - Carlos García Saura ([Http://www.github.org/](http://www.github.org/))
- Figura 22. Early Decay Time (EDT) - Laura Ruiz Domínguez.

## 13. Gráficos

Todos los gráficos mostrados a continuación han sido realizados tras las experiencias realizadas en el laboratorio. El gráfico 1 fue exportado de la suite informática de análisis de señales Visual Analyser para MS-Windows y editado con Photoshop CS para aislar las zonas relevantes de las imágenes. El resto de gráficos fueron exportados directamente desde el software con el que se trataron los datos, la base de cálculo MS-Excel 2013.

- Gráfico 1. Respuesta en frecuencias ante el ruido rosa dentro de la cámara audiométrica.
- Gráfico 2. Resultados de la calibración para ambas cabezas.
- Gráfico 3. Respuesta en frecuencia para ambas cabezas ante ruido rosa.
- Gráfico 4. IACCtotal medida para ambas cabezas, en la misma sala y bajo las mismas condiciones.
- Gráfico 5. IACCe medida para ambas cabezas, en la misma sala y bajo las mismas condiciones.
- Gráfico 6. IACCi medida para ambas cabezas, en la misma sala y bajo las mismas condiciones.
- Gráfico 7. EDT medido para ambos oídos en ambas cabezas.
- Gráfico 8. T30 medido para ambas cabezas en ambos oídos.
- Gráfico 9. C50 en ambos oídos de los dos modelos a estudiar.
- Gráfico 10. C80 en ambos oídos de los dos modelos a estudiar.

## 14. Anexos