

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio de la dependencia frecuencial del umbral de percepción del eco”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:
Patricia Guarque Edo

Tutor/a:
Dr. Javier Redondo Pastor
Ivan Felis Enguix

GANDIA, 2016

RESUMEN

Este documento refleja el estudio realizado a diferentes personas para la obtención del umbral de percepción de eco y la comprobación de su dependencia con la frecuencia. Durante la elaboración del estudio se realizan tres test a los sujetos del estudio. El primero, un test en el que se informa del sexo, edad, experiencia musical y grado, si tocan algún instrumento y si están relacionados con el mundo del audio, en cada uno de los sujetos en estudio. Posteriormente se realiza una audiometría para poder determinar sus niveles de audición y, finalmente, un test psicoacústico mediante un programa de Matlab (GUI) en el que se escucha un evento sonoro (ruido) repetido (eco) con siete retardos diferentes (10, 15, 25, 35, 45, 55 y 60 ms) y en tres frecuencias diferentes (125, 100 y 4000 Hz). Una vez finalizado el estudio se ha realizado un análisis estadístico de los resultados, con el fin de comprobar si este umbral depende de la frecuencia y de qué manera. Además, se ha estudiado cómo influyen los parámetros sexo, experiencia musical, instrumento que tocan, y relación con el mundo del audio, en los resultados.

PALABRAS CLAVE

Umbral de audición, percepción acústica, eco, frecuencia.

ABSTRACT

This document describes the study carried out on different people to obtain their echo threshold perception and the verification of its reliance on frequency. During the survey, three tests were performed on the study subjects. The first test gathers information related to gender, age, musical experience and degree of that musical experience, if they play an instrument and if they are related to the world of audio for each subject under study. The second test was an audiometry, performed to determine the subject's hearing level and, finally, a psychoacoustic test was conducted using a Matlab program (GUI) in which a repeated noise (echo) is heard with seven different delays (10, 15, 25, 35, 45, 55 and 60 ms) and three different frequencies (125, 100 and 4000 Hz). At the end of the study, a statistical analysis of the results was obtained, to verify if this threshold depends on the frequency and in what way. In addition, a study was carried out on how the parameters (gender, musical experience, instrument played and relation to the world of audio) influence the results.

KEYWORDS

Hearing threshold, acoustic perception, echo, frequency

Contenido

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo principal.....	1
1.3 Objetivos secundarios	1
Capítulo 2 INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	2
2.1 Psicofísica	2
2.2 Fisiología humana.....	2
2.2.1 El sistema auditivo humano.....	2
2.2.2 El oído externo.....	3
2.2.3 El oído medio	3
2.2.4 El oído interno.....	3
2.3 Umbrales de audición.....	4
2.3.1 Umbrales absolutos.....	4
2.3.2 Umbrales diferenciales	4
2.4 Fundamentos de Psicoacústica.....	5
2.4.1 Métodos de medida.....	5
2.4.2 Enmascaramiento sonoro	7
2.4.3 Bandas críticas	10
2.4.4 La escucha binaural.....	11
Capítulo 3 DESARROLLO DEL ESTUDIO	12
3.1 Estudio de las señales (simulación del eco)	12
3.1.1 Suma de señales senoidales	13
3.1.2 Suma de ruidos.....	14
3.2 Descripción del estudio	15
3.2.1 Test 1: test personal	17
3.2.2 Test 2: audiometría	18
3.2.3 Test 3: Percepción de eco	20
Capítulo 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	23
4.1 Medidas	23
4.2 Discriminación de resultados incorrectos.....	24
4.3 Conceptos de estadística	25
4.4 Análisis sin discriminación por parámetros	26

4.5 Análisis con discriminación por parámetros	27
4.4.1 Discriminación por sexo.....	27
4.4.2 Discriminación por formación musical y grado de la misma.....	27
4.4.3 Discriminación según el instrumento.....	28
4.7 Discriminación por niveles de audición.....	30
4.8 Resumen estadístico de los resultados.....	31
Capítulo 5 CONCLUSIONES.....	32
REFERENCIAS	33

Tabla de ilustraciones

Figura 1: El oído humano.	3
Figura 2: Umbral de audición.....	4
Figura 3: Método de rastreo de Bekesy.....	6
Figura 4: Método de la escalera simple.....	6
Figura 5: Método PEST.....	7
Figura 6: Diagrama explicativo del enmascaramiento sonoro.	7
Figura 7: Enmascaramiento de sonidos senoidales por banda ancha.....	8
Figura 8: Enmascaramiento de sonidos senoidales por banda igual a la banda crítica en las frecuencias centrales de 250, 1000 y 4000 Hz (izquierda); y con frecuencia central 1 kHz con niveles variables (derecha).....	8
Figura 9: Enmascaramiento de sonidos senoidales por sonidos senoidales.....	9
Figura 10: Enmascaramiento de sonidos senoidales por sonidos complejos.	9
Figura 11: Diagrama para explicar las bandas críticas.	10
Figura 12: Diagrama para explicar la escucha binaural.....	11
Figura 13: Diagrama para explicar la simulación del eco.....	12
Figura 14: Resultado de suma coherente de señales senoidales con diferentes retardos.....	13
Figura 15: Resultado de suma de ruidos con envolvente con diferentes retardos.	14
Figura 16: Sujeto del estudio realizando el test.	16
Figura 17: Test personal.	17
Figura 18: Apariencia de la página web en la que se ha realizado la audiometría.....	18
Figura 19: Aspecto de la audiometría antes de empezar.....	19
Figura 20: Ejemplo de audiometría.	19
Figura 21: Esquema para explicar el test a los sujetos de estudio.....	20
Figura 22: Diagrama de flujo del programa.....	21
Figura 23: Apariencia del GUI.	22
Figura 24: Gráfica representando los datos de todos los sujetos.	23
Figura 25: A la izquierda, un ejemplo de respuestas correctas. A la derecha, un ejemplo de respuestas incorrectas por no cumplir con que el primer retardo no tiene eco mientras que el último si lo tiene.....	24
Figura 26: A la izquierda, una respuesta que a pesar de parecer incorrecta a primera vista, es correcta. A la derecha, una respuesta totalmente incoherente.....	24

Figura 27: A la derecha, función de densidad de probabilidad. A la derecha, función de distribución de probabilidad.....	25
Figura 28: A la izquierda, gráfica con todos los datos de las respuestas correctas. A la derecha, un ajuste de los resultados correctos haciendo uso de la función de distribución acumulada normal.....	26
Figura 29: A la izquierda, respuestas de los sujetos de sexo masculino. A la derecha, respuestas de los sujetos de sexo femenino.	27
Figura 30: A la izquierda, respuestas de los sujetos con formación musical. A la derecha sujetos sin formación musical.....	28
Figura 31: Respuestas de los sujetos que no tocan ningún instrumento respecto a los que sí tocan alguno.....	28
Figura 32: A la izquierda, respuestas de los sujetos que tocan la guitarra o el bajo. En el centro, respuestas de los sujetos que tocan instrumentos clásicos de viento. A la derecha, respuestas de los sujetos que tocan instrumentos clásicos de cuerda.....	29
Figura 33: A la izquierda, respuestas de los sujetos con relación con el mundo del audio. A la derecha, respuestas de los sujetos que no tienen relación con el mundo del audio.	29
Figura 34: Gráfica de niveles de presión de Fletcher.	30
Figura 35: A la izquierda, respuestas de los sujetos con buenos niveles de audición. A la derecha, resultados de los sujetos con hipoacusia bilateral.	30
Figura 36: Diagramas de MacAdam.....	32

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En el presente trabajo se ha estudiado el umbral de percepción de eco con la intención de comprobar su dependencia frecuencial. El estudio se ha realizado a un grupo de sujetos mediante un programa de Matlab en el que se escuchaban dos señales a tres frecuencias diferentes (250, 1000, y 4000 Hz) con siete retardos, entre estas señales, diferentes (10, 15, 25, 35, 45, 55, y 60 ms).

1.2 Objetivo principal

El objetivo principal del estudio consiste en determinar el umbral de percepción de eco y su dependencia frecuencial, es decir, si el umbral de percepción de eco es diferente a bajas, medias y altas frecuencias. Así mismo se comprobará si existe dependencia de los resultados obtenidos con otros factores, tales como el sexo, la edad o la experiencia musical de los sujetos. Las bandas frecuenciales elegidas para el trabajo son 250 Hz (bajas), 1000 Hz (medias) y 4000 Hz (altas), y los retardos elegidos son: 10, 15, 25, 35, 45, 55 y 60 ms.

1.3 Objetivos secundarios

Como objetivos secundarios del estudio podríamos destacar la mejora del aprendizaje en el uso de las diferentes herramientas utilizadas durante el estudio, como Matlab, con el que se ha realizado el programa que se ha proporcionado a los sujetos para la realización del estudio. Además, se ha utilizado esta herramienta para la realización del análisis estadístico de los resultados reforzando, así, los conocimientos de estadística aprendidos en el Grado.

Por otra parte se considera también objetivo secundario el hecho de haber aprendido a trabajar en grupo, ya que he realizado una parte de mi estudio junto a Manuel Jesús Parrilla Navarro, por tener en común un Trabajo de Final de Grado relacionado con la psicoacústica. Además, la sinergia continua que he tenido con los tutores de este proyecto a lo largo de la realización del mismo, me ha introducido a la metodología de investigación. Con todo, la realización de mediciones, el análisis de los datos y la toma de decisiones también forman parte de las aptitudes desarrolladas en este trabajo.

Capítulo 2 INTRODUCCIÓN TEÓRICA

2.1 Psicofísica

La psicofísica ha sido definida como una parte de la psicología experimental que investiga la relación entre la intensidad y calidad de un estímulo, y la percepción y juicios acerca de esta; es decir, estudia la relación del hombre con su medio físico y los juicios que forma acerca de esas percepciones.

El problema central de la psicofísica es el de establecer las relaciones cuantitativas existentes entre la presentación del estímulo y la magnitud de la reacción por parte del organismo afectado.

Los métodos psicofísicos representan un vehículo de investigación que permite cuantificar cuatro tipos de comportamientos perceptivos: la detección, la discriminación, el reconocimiento y la estimación [1]. En la actualidad, la psicofísica tiene como objetivo estudiar los procesos que median de lo objetivo a lo subjetivo, de lo físico a lo psíquico. En otras palabras, el objetivo de la psicofísica es el estudio de las relaciones entre los estímulos físicos y las sensaciones psicológicas que suscitan.

2.2 Fisiología humana

La fisiología es la ciencia que estudia las funciones de los seres multicelulares, es decir, los seres vivos. La fisiología humana es, por tanto, la ciencia que estudia las funciones de los seres humanos [2].

2.2.1 El sistema auditivo humano

La función de nuestro sistema auditivo no es otra que la de transformar las variaciones de presión originadas por la propagación de las ondas sonoras en el aire en impulsos eléctricos. Esta información es transmitida a través de los nervios acústicos al cerebro para la posterior asignación de significados.

Se puede dividir el sistema auditivo en sistema auditivo periférico y sistema auditivo central. Para este trabajo interesan conocimientos acerca del sistema auditivo periférico, por tanto es el que se va a proceder a explicar en detalle a continuación.

El sistema auditivo periférico, es decir el oído (figura 1), está compuesto por el oído externo, el oído medio y el oído interno. Cada una de estas partes realiza un procesamiento diferente de los sonidos que llegan al sistema auditivo [3]. El sistema auditivo periférico cumple funciones en la percepción del sonido, como es la transformación de las variaciones de presión sonora que llegan al tímpano en impulsos eléctricos pero también tiene un papel importante en nuestro sentido de equilibrio.

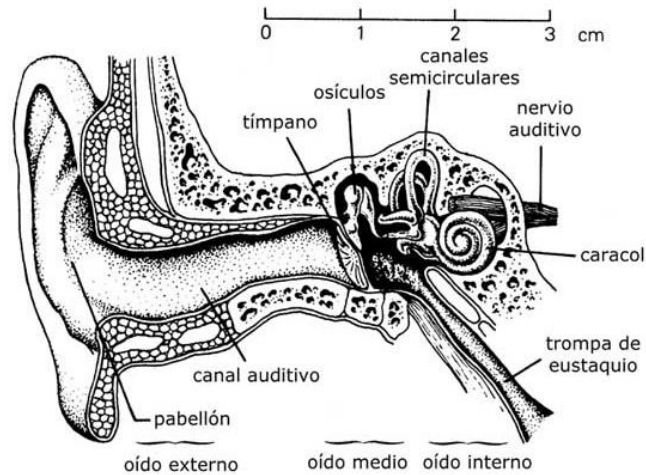


Figura 1: El oído humano.

2.2.2 El oído externo

El oído externo es la parte visible del sistema auditivo formado por el pabellón y el canal auditivo. Las ondas sonoras son recogidas por el pabellón auricular y dirigidas al conducto auditivo, el cual las canaliza a la membrana timpánica (oído medio).

Desde el punto de vista acústico, el canal auditivo tiene una frecuencia de resonancia cercana a 4 kHz, lo que provoca una ganancia en la señal en este rango de frecuencias, siendo la causa de la alta sensibilidad del oído en esta banda y del mínimo del umbral absoluto de audición [3, 4].

2.2.3 El oído medio

El oído medio está lleno de aire y compuesto por el tímpano, los osículos (martillo, yunque y estribo, nombrados así a partir de sus formas) y la trompa de Eustaquio.

La energía acústica recibida del oído externo en el tímpano, se transforma en energía mecánica y se transmite hasta la entrada del caracol (oído interno). De esta transmisión se encargan los osículos, que también amplifican el sonido y acoplan impedancias (aire-líquido), a través de una membrana conocida como ventana oval. La trompa de Eustaquio sirve para igualar la presión a ambos lados del tímpano ya que está comunicada con la parte superior de la faringe y por tanto, con el aire exterior [3, 4].

2.2.4 El oído interno

El oído interno es la parte más importante del sistema auditivo desde el punto de vista psicoacústico. Está formado por la cóclea o caracol (donde se encuentra la membrana basilar, la cual transforma las vibraciones mecánicas en impulsos eléctricos), los canales semicirculares y el nervio auditivo. El fluido de la cóclea es excitado por el pie de estribo al empujar la ventana oval, y estas ondas se propagan hasta llegar a las células ciliares (también llamadas células capilares) del órgano de Corti que, al ser estimuladas, generan los impulsos eléctricos que las fibras nerviosas (nervio auditivo) transmiten al cerebro para su procesamiento [3, 4].

2.3 Umbrales de audición

Los umbrales de audición corresponden al mínimo nivel que un determinado estímulo debe tener para provocar una reacción en el sujeto al cual se le está realizando el estudio. Por lo general, son fáciles de medir y son una de las características más importantes del sistema auditivo. Existen dos tipos de umbrales diferentes, como son el umbral absoluto y el umbral diferencial [5].

2.3.1 Umbrales absolutos

Los umbrales absolutos de la audición son aquellos valores de uno de los parámetros del estímulo físico a partir del cual la sensación comienza a o deja de producirse. Este umbral determina la mínima intensidad de un estímulo para la cual un 50% de los intentos el sujeto considera que el estímulo está presente.

Dentro de este tipo de umbral está el umbral auditivo (figura 2), el cual está definido por el valor mínimo o la presión mínima para que un sonido pueda ser percibido. Además, el umbral de audibilidad es dependiente de la frecuencia [5, 6, 7].

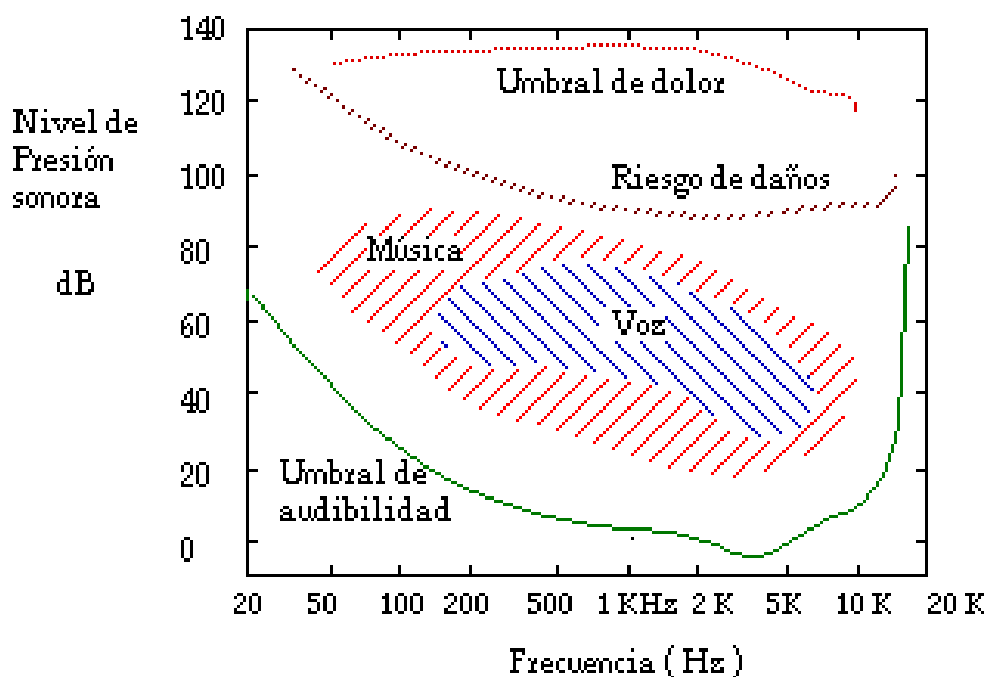


Figura 2: Umbral de audición.

2.3.2 Umbrales diferenciales

Los umbrales diferenciales de la audición señalan las mínimas variaciones de uno de los parámetros del estímulo físico, necesarias para que se produzca un cambio en la sensación. En otras palabras, es la mínima intensidad con que un estímulo debe exceder a otro para que el sujeto los reconozca como diferentes en un 50% de las pruebas [5, 7].

2.4 Fundamentos de Psicoacústica

La psicoacústica es una rama de la psicofísica que estudia la relación existente entre el estímulo de carácter físico y la respuesta de carácter psicológico que el mismo provoca, es decir, estudia la relación entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que hace de ellas el cerebro [8].

Los objetivos generales de la psicoacústica pueden resumirse en determinar:

- La característica de respuesta de nuestro sistema auditivo, es decir, cómo se relaciona la magnitud de la sensación producida por el estímulo con la magnitud física del estímulo
- El umbral (absoluto) de la sensación
- El umbral diferencial de determinado parámetro del estímulo (mínima variación y mínima diferencia perceptibles)
- La resolución o capacidad de resolución del sistema para separar estímulos simultáneos o la forma en que estímulos simultáneos provocan una sensación compuesta
- La variación en el tiempo de la sensación del estímulo.

2.4.1 Métodos de medida

La psicoacústica es una disciplina empírica, es decir, que está basada en la experiencia y en la observación de los hechos. Los resultados de los estudios se obtienen de manera estadística a partir de las respuestas de cada uno de los sujetos de los estudios. Si éstos resultados son muy diferentes no será posible sacar conclusiones [8, 9].

Métodos clásicos

Gustav Theodor Fechner elaboró unos procedimientos experimentales conocidos como métodos de psicofísicos clásicos, con la idea de determinar los umbrales absoluto y diferencial, y verificar así sus hipótesis. Estos métodos son tres:

- Método de los límites, también conocido como ‘Método de los cambios mínimos’. En este método un experimentador manipula la intensidad del estímulo a estudiar de forma sistemática mientras que los sujetos se limitan a indicar si perciben o no el estímulo y además indicar si perciben el estímulo de comparación de manera igual mayor o superior al estímulo estándar.
- Método de ajuste, también conocido como ‘Método de error promedio’ es uno de los más antiguos y fundamental de la Psicoacústica. Éste método recibe su nombre por la manera en que se realiza el estudio, es decir, el sujeto es quien debe ajustar la intensidad del estímulo hasta llegar al punto de percibirlo o ser capaz de igualarlo a un estímulo de comparación.
- Método de los estímulos constantes, conocido también como ‘Método de los casos verdaderos y falsos’. Al igual que sucedía en el método de los límites, el sujeto debe informar de cuando el estímulo de comparación es igual, mayor o menor al estímulo estándar pero con la diferencia de que esta vez los estímulos se presentan de manera aleatoria y no en orden secuencial como ocurría en el método anterior. Al presentar los estímulos de manera aleatoria, se evitan errores de habituación (error dado por la

tendencia del sujeto a responder de la misma manera durante un periodo de tiempo, es decir, responder por inercia) y anticipación (error dado por la prevención de la ubicación del umbral por parte del sujeto lo que provoca un cambio anticipado de sus respuestas por su expectativa al cambio) que aparecen en el método de los límites.

Métodos adaptativos

En los métodos adaptativos, como su nombre bien indica, la manera de presentar el estímulo se adapta dependiendo de las respuestas anteriores del sujeto. Es decir, el nivel puede ser superior o inferior en cualquier momento. Algunos métodos clásicos, como son el método de los límites y el método de ajuste, pueden concordar con esta afirmación pero el termino adaptativo debe entenderse como la convergencia de los métodos hacia un umbral de la curva psicométrica (50 % u otro punto de la misma). De este modo utilizamos menos estímulos fuera de la zona de interés [10].

- El método de rastreo de Bekesy es un método controlado por el sujeto del estudio y consiste en emitir un estímulo de manera continua que va cambiando de manera fija el nivel. El nivel sube o baja en función de si el sujeto presiona un botón o no, como se puede ver en la figura 3. A partir de este método resulta muy sencillo obtener la función psicométrica.

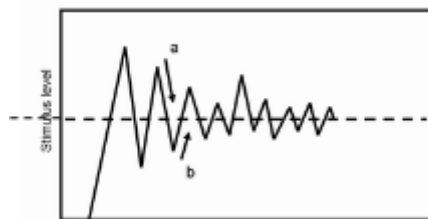


Figura 3: Método de rastreo de Bekesy.

- El método de la escalera simple up-down consiste en una serie de intentos ascendentes y descendentes con puntos de retorno que se producen cuando ocurre un cambio de respuesta. Es muy similar al método de los límites con la diferencia de que cada vez que el sujeto realiza un cambio de frecuencia, solo habría un cambio de subida a bajada o viceversa, como se puede apreciar en la figura 4. Una vez hemos obtenido de 6 a 8 cambios de respuesta, se desestima el primer valor y a partir del punto medio de los demás cambios se estima el umbral.

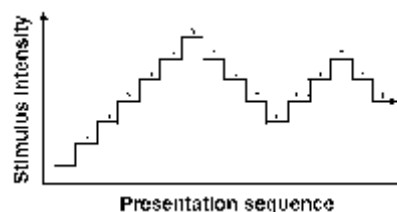


Figura 4: Método de la escalera simple.

- El método PEST¹. Este método es una variante del método anterior en el que los incrementos dependen de las respuestas anteriores del sujeto, con la peculiaridad de que los pasos se dividen por dos tras cada retorno, este fenómeno se puede apreciar en la figura 5. Además, tras un número determinado de respuestas del mismo tipo, el paso se aumenta (normalmente se duplica).

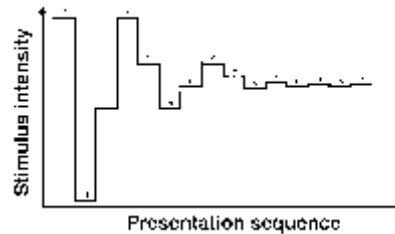


Figura 5: Método PEST.

2.4.2 Enmascaramiento sonoro

El enmascaramiento forma parte de los estudios psicoacústicos que buscan determinar de qué modo afecta la presencia de un sonido a la percepción de otro. Hablamos de enmascaramiento cuando el umbral de audibilidad correspondiente a un sonido se eleva a causa de la presencia de otro sonido. Es decir, el enmascaramiento ocurre cuando un sonido impide la percepción de otro.

Existen dos tipos de enmascaramiento: el enmascaramiento simultáneo y el no simultáneo (se pueden ver gráficamente representados en la figura 6). El enmascaramiento simultáneo, en el que el sonido de prueba y el enmascarante coinciden temporalmente. Por otra parte en el no simultáneo, el sonido de prueba puede ser anterior (pre-enmascaramiento) o posterior (post-enmascaramiento) al sonido enmascarante. Puede darse el caso de que el sonido de prueba continúe a pesar de haberse apagado el enmascarante, en ese caso también recibe el nombre de post-enmascaramiento [11].

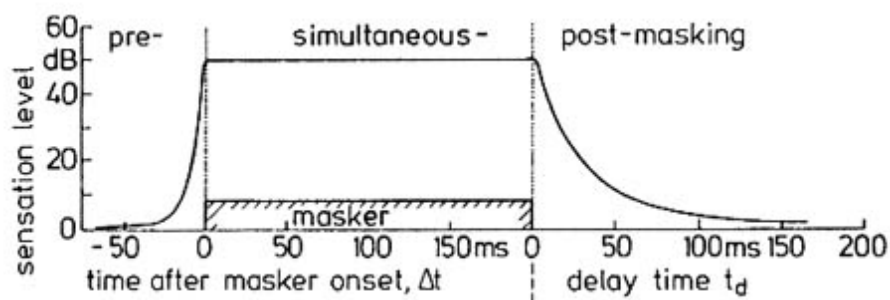


Figura 6: Diagrama explicativo del enmascaramiento sonoro.

PEST¹: Parameter Estimation by Sequential Testing (Estimación de Parámetros mediante Evaluación Secuencial)

Enmascaramiento simultaneo

Este tipo de enmascaramiento se presenta cuando el sonido de prueba y el enmascarante coinciden temporalmente, es decir, cuando dos estímulos sonoros llegan a nuestro oído, cercanos en el tiempo. El sonido enmascarante hará que el sonido de prueba sea inaudible ya que el tono más intenso tiende a enmascarar al tono más débil.

Se estudian diferentes tipos de enmascaramiento, como vienen a ser:

- Enmascaramiento de sonidos senoidales por banda ancha. En la figura 7 se muestra el umbral de audibilidad para un sonido senoidal en función de su frecuencia enmascarado por ruido blanco (ruido de banda ancha).

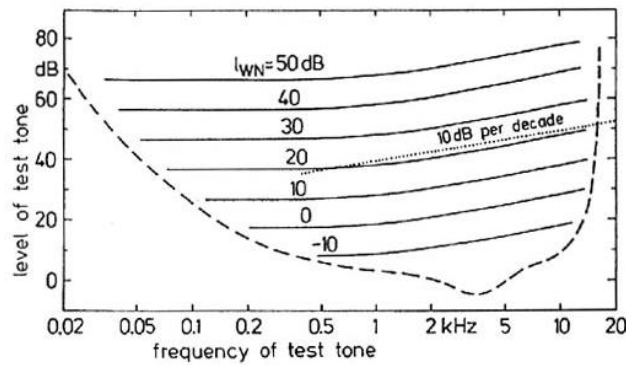


Figura 7: Enmascaramiento de sonidos senoidales por banda ancha.

- Enmascaramiento de sonidos senoidales por banda angosta. La figura 8 (izquierda) muestra los umbrales de sonidos senoidales enmascarados por ruidos con ancho de banda igual a la banda crítica, con frecuencias centrales de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz con la misma intensidad de ruido. En la parte derecha de la misma figura 8 se muestra el umbral de un sonido senoidal enmascarado por un ruido de banda angosta con ancho igual a la banda crítica con frecuencia central 1 kHz con niveles variables.

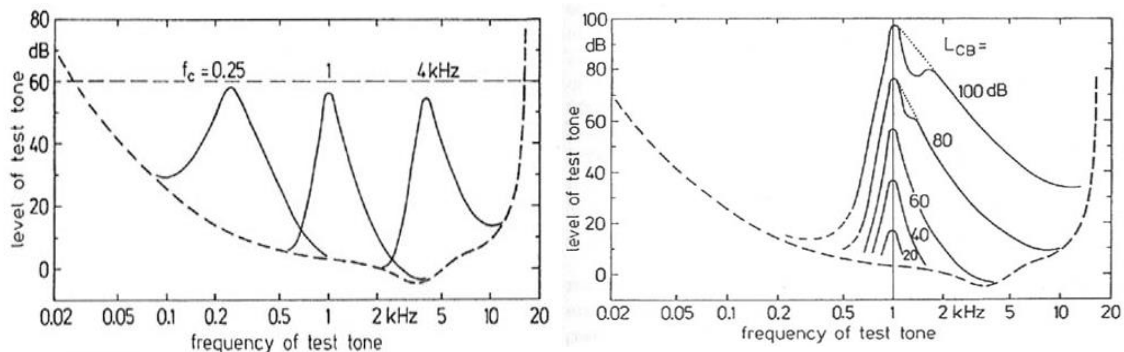


Figura 8: Enmascaramiento de sonidos senoidales por banda igual a la banda crítica en las frecuencias centrales de 250, 1000 y 4000 Hz (izquierda); y con frecuencia central 1 kHz con niveles variables (derecha)

- Enmascaramiento de sonidos senoidales por sonidos senoidales. La figura 9 muestra el umbral de sonidos senoidales enmascarados por otro sonido senoidal con una frecuencia de 1kHz para diferentes niveles del sonido senoidal enmascarante.

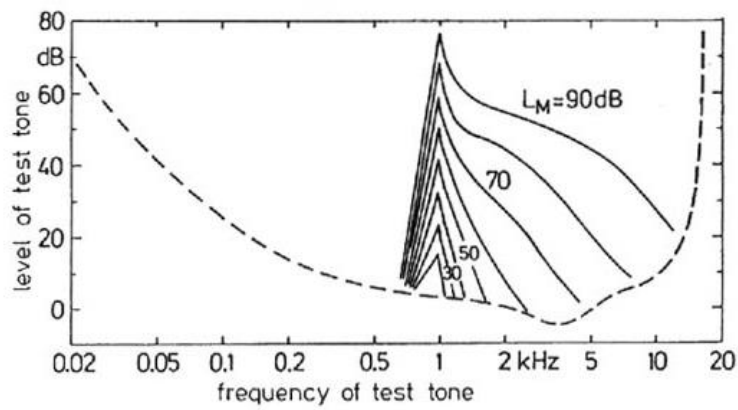


Figura 9: Enmascaramiento de sonidos senoidales por sonidos senoidales.

- Enmascaramiento de sonidos senoidales por sonidos complejos. En la figura 10 se muestra el umbral de sonidos senoidales enmascarados por un sonido armónico complejo con una frecuencia fundamental de 200Hz y otros 9 parciales, todos con la misma amplitud y con fases aleatorias.

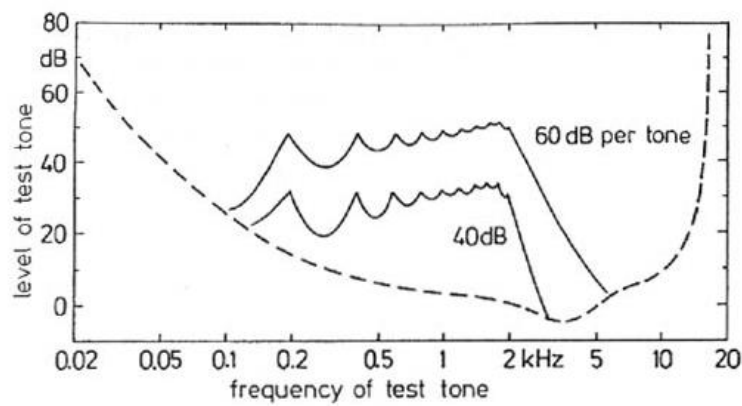


Figura 10: Enmascaramiento de sonidos senoidales por sonidos complejos.

Enmascaramiento no simultáneo

Se pueden distinguir dos tipos de enmascaramiento no simultáneo. Pre-enmascaramiento, en el que el sonido de referencia precede al enmascarante. Post-enmascaramiento, en donde el sonido de referencia sucede al enmascarante o incluso subsiste al haberse apagado el sonido enmascarante [11].

- Pre-enmascaramiento. Aunque difícilmente imaginable, sonidos que aún no existen pueden enmascarar sonidos ya existentes. En otras palabras, produciéndose primero un estímulo débil y posteriormente un tono intenso, este último enmascarará igualmente al primero (de menor amplitud), si éstos están separados en tiempo por una diferencia menor de entre 5 y 10ms.
- Post-enmascaramiento. Este fenómeno ocurre cuando el tono de mayor amplitud aparece antes del tono de menor amplitud, percibiendo de este modo únicamente el primer estímulo. Esto sucede cuando ambos sonidos están separados temporalmente por una distancia mínima entre 30 y 60 ms. Se debe a que una vez se ha percibido el tomo con mayor amplitud, el oído necesita un cierto tiempo de adaptación para poder

2.4.3 Bandas críticas

El ancho de banda crítico puede interpretarse como una medida de la selectividad frecuencial del oído. El ancho de banda crítico explica porque dado un tono de una frecuencia, una banda de ruido centrada en dicha frecuencia es capaz de producir la misma cantidad de enmascaramiento sobre el tono que una banda ancha de ruido. Incluso cuando el nivel de densidad espectral de ambos ruidos sea igual y la energía del ruido de banda estrecha sea menor. Si el ancho de la banda de ruido varía, para enmascarar al tono será necesario que la energía del ruido contenida en un intervalo de frecuencias alrededor del tono sea constante.

La energía efectiva de la señal enmascarante es la que está confinada en un intervalo, mientras que el resto no contribuye al enmascaramiento del tono. El ancho de este intervalo crítico se ha denominado como ancho de banda crítico [12].

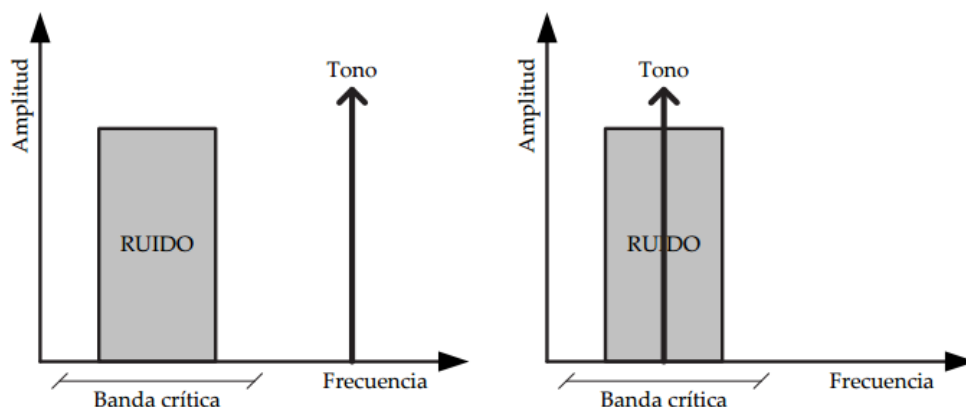


Figura 11: Diagrama para explicar las bandas críticas.

2.4.4 La escucha binaural

Los seres humanos disponemos de dos oídos para escuchar los sonidos. La audición binaural nos permite determinar la posición de la fuente sonora gracias a la diferencia del tiempo de llegada de la señal de un oído a otro.

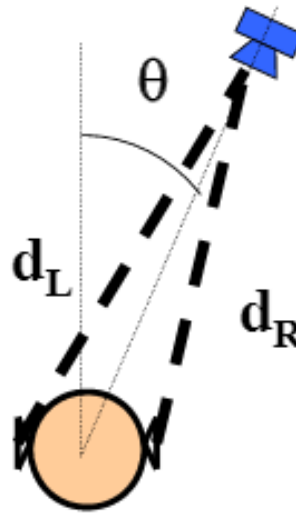


Figura 12: Diagrama para explicar la escucha binaural.

Nuestros oídos forman dos canales receptores que son independientes entre sí, sin interferencias ni combinaciones de las frecuencias recibidas en cada uno. Las señales se reciben independientemente por cada oído y se crean distintos efectos en diferentes partes del cerebro. Solo en el caso de que el nivel de la señal recibida sea muy elevado, pequeñas partes de energía sonora se transfieren de un oído a otro, a causa de la conducción de los huesos del cráneo. El cerebro procesa la información recibida por ambos oídos y comparando los impulsos nerviosos que produce cada señal, se pueden interpretar todos los aspectos de la onda sonora [13].

Capítulo 3 DESARROLLO DEL ESTUDIO

3.1 Estudio de las señales (simulación del eco)

En este trabajo se quiere estudiar el umbral del eco en diferentes frecuencias. Por tanto, es necesario simular el eco resultante de la señal de una de las frecuencia de interés, es decir, la interposición de dos señales de la misma fuente pero retrasadas una respecto de otra, con un retardo temporal. La siguiente imagen (figura 13) muestra el esquema conceptual de la señal directa y retardada al recorrer diferentes distancias d_1 y d_2 , respectivamente, desde la fuente hasta el receptor. La diferencia de caminos de ambas señales será, pues, la distancia $\Delta d = d_2 - d_1$, a partir de la cual se puede obtener la diferencia temporal o retardo $\Delta t = \Delta d/c$, donde c es la velocidad de propagación en el aire.

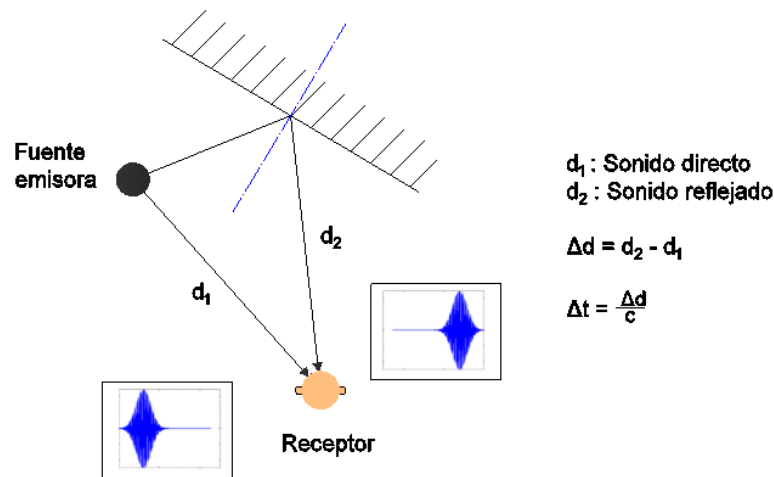


Figura 13: Diagrama para explicar la simulación del eco.

En nuestro caso, la simulación de la señal resultante (directa + retardada) se realizará mediante la suma de las dos señales de interés, convenientemente recortadas mediante una envolvente gaussiana para delimitar su duración. Para ello, como se mostrará a continuación, la señal directa y reflejada deben presentar cierta descoherencia dado que, aunque ambas señales provienen de la misma fuente, cualquier reflexión real romperá parte de su coherencia. Aun así, para estudiar este fenómeno, inicialmente se simuló la suma de dos señales senoidales puras, en la que se vio que la coherencia entre ambas daba lugar a la interferencia entre señales, con una modulación adicional, que no ocurre en el mundo físico real. Posteriormente, para corregir este efecto, se trabajó con señales de interés que consistían en ruidos blancos filtrados en ciertas bandas de interés (centradas en 250, 1000 y 4000 Hz, con un ancho de una octava). A continuación, se va a proceder a explicar ambos métodos de simulación de eco.

3.1.1 Suma de señales senoidales

Como se ha comentado, inicialmente se ha partido de la idea de simular el eco sumando dos tonos puros de una frecuencia concreta f , con una diferencia de fase que refleje la distinta distancia recorrida o retardo. Para poder delimitar de alguna manera la señal, se realiza una envolvente de tipo gaussiana a cada uno de los tonos. Entonces, la señal resultante x tiene la siguiente expresión:

$$x(t) = 0.5(e^{-d(t-t_0)^2} \cdot \text{sen}(2\pi f(t - t_0)) + e^{-d(t-(t_0+\Delta t))^2} \cdot \text{sen}(2\pi f(t - (t_0 + \Delta t)))) \quad (1)$$

Donde t es el tiempo, t_0 es un retardo inicial de las señales (para que la señal empiece en silencio), Δt es el retardo de la segunda señal respecto de la primera, y d es un parámetro inversamente proporcional a la duración característica de la señal (ancho de la envolvente gaussiana).

Como se puede comprobar en las imágenes siguientes (sacadas del programa *Suma_señales_senoidales.m*, adjunto en el Anexo) (figura 14), la suma da lugar a una variación de la amplitud de la envolvente, es decir, a la aparición de unos máximos y mínimos en la señal resultante. Esto se debe a que, dado que las señales son tonos puros y presentan de fase constante, existe una gran coherencia entre ellas, por lo que son de esperar fenómenos de interferencia constructiva y destructiva.

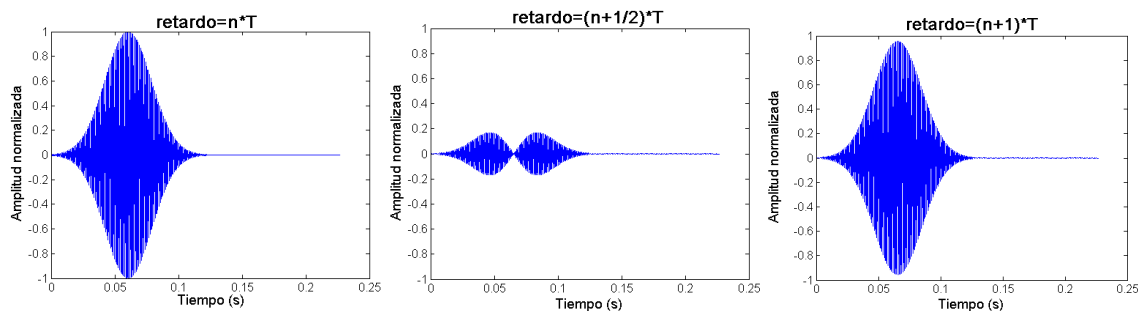


Figura 14: Resultado de suma coherente de señales senoidales con diferentes retardos.

Ya que esto no ocurre en la realidad porque la reflexión de las paredes hace que la coherencia de las señales disminuya, se opta por otra forma de obtener la simulación de la suma de dos señales que no tengan tanta coherencia. Para ello, se utiliza un ruido blanco con la misma envolvente que la comentada anteriormente al que posteriormente se realizará un filtro en cada una de las bandas de interés.

3.1.2 Suma de ruidos

En este caso, se simula un ruido blancos filtrados a las bandas de interés (centradas en 250, 1000 y 4000 Hz, con un ancho de una octava) y sumado a otro de las mismas características, ambos con una envolvente gaussiana que delimita su duración, y con un retardo entre ellos. Entonces, la señal resultante x para cada una de los ruidos filtrados toma la siguiente forma:

$$x(t) = 0.5(e^{-d(t-t_0)^2} + e^{-d(t-(t_0+\Delta t))^2}) \cdot R \quad (2)$$

Donde t es el tiempo, t_0 es un retardo inicial de las señales (para que la señal empiece en silencio), Δt es el retardo de la segunda señal respecto de la primera, d es un parámetro inversamente proporcional a la duración característica de la señal (ancho de la envolvente gaussiana) y R es el ruido filtrado previamente en cada una de las bandas de interés.

Como se puede observar en las siguientes imágenes (figura 15) (sacadas del programa `Suma_ruido.m`, adjunto en el Anexo), a pesar de aplicar varios retados a diferentes frecuencias, la suma no tiene tanta coherencia por lo que la amplitud de la envolvente se mantiene más o menos constante. Esto viene dado por tener una fase aleatoria que varía constantemente, por lo que es mucho más difícil encontrar en el tiempo otro lugar donde tengan exactamente la misma fase.

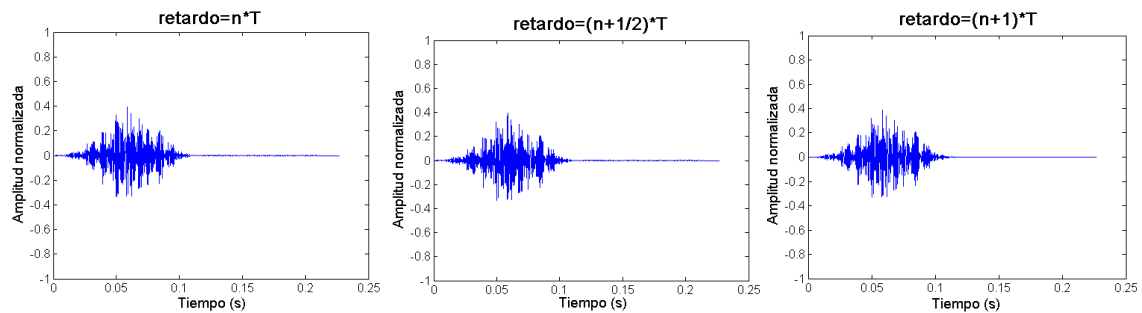


Figura 15: Resultado de suma de ruidos con envolvente con diferentes retardos.

Esta técnica es la que se ha utilizado en el test que han realizado los sujetos en estudio, con las tres bandas de frecuencias ya comentadas, y con siete retardos diferentes de $\Delta t = 10, 15, 25, 35, 45, 55, 60 \text{ ms}$.

3.2 Descripción del estudio

Durante el proceso de selección de sujetos no se ha realizado ningún tipo de discriminación previa, es decir, se ha instado a participar a todo aquel que quisiera realizar el estudio. Con ello, se les ha proporcionado un test a cerca de sus sexo, edad, formación musical, si tocan algún instrumento, y relación con el mundo del audio. Posteriormente, a partir de los resultados de este test, se ha podido determinar hasta qué punto influyen estos parámetros en cada uno de los datos registrados.

Debido a la demanda y los horarios de los laboratorios de física de la EPSG², se ha decidido realizar el estudio en dos días diferentes ya que la cantidad de sujetos que se quería utilizar para el estudio no podían realizar los tests en un solo día. Por tanto a partir de ahora se va a hacer referencia a los sujetos diferenciándolos en sujetos del día 1 y sujetos del día 2.

<i>Parámetro</i>	<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>
<i>Sexo</i>	Mujeres	9
	Hombres	21
<i>Formación musical</i>	Sin formación	9
	Con formación	21
<i>Grado de formación musical</i>	Amateur	15
	Grado Elemental	5
	Grado Medio	1
	Grado Superior	1
<i>Instrumento</i>	Guitarra/Bajo	6
	Percusión	4
	Clásico viento	5
	Clásico cuerda	4
	Cantante/otro	3
	Ninguno	8
<i>Relación con el mundo del sonido</i>	Sin relación	26
	Con relación	4
<i>Número total de sujetos</i>	30	22

Tabla 1: Tabla de los sujetos encuestados.

La edad en ambos días no se ha tenido en cuenta finalmente ya que todos los sujetos están en un rango de edades entre 20 y 35 años.

Por unos problemas en la tarjeta de sonido utilizada en las medidas del día 1, se han tenido que desestimar los resultados de los sujetos del día 1. Por tanto, los sujetos que se van a utilizar para el análisis de resultados del estudio son los sujetos del día 2.

² EPSG: Escuela Politécnica Superior de Gandía

El estudio se ha realizado en el laboratorio de física (LAB009) del edificio B de la EPSG. Para el estudio se han utilizado los ordenadores 7 y 8 del laboratorio de física, pero tras pasar el test a los primeros sujetos se ha decidido cambiar el ordenador 8 por el 10 ya que el ventilador de la torre del primero emitía un ruido que podía interferir en los resultados del estudio, sobre todo en bajas frecuencias. También se ha utilizado una tarjeta de sonido marca M-AUDIO modelo Fast Pro para que todos los individuos tengan el mismo hardware y unos auriculares de la marca AKG modelo K 44 para conseguir aislar al sujeto de posibles interferencias externas.

Después de una primera toma de datos, es decir, después de tomar datos de los sujetos del día 1 (30 sujetos) se ha procedido a realizar una comprobación de los resultados obtenidos. Se han detectado unos resultados poco coherentes en general, debido a que la ganancia de las tarjetas no estaba controlada. Por esta razón, se decide repetir el estudio, esta vez utilizando una ganancia igual en las dos tarjetas de audio

Previo a la realización del estudio se ha explicado el proceso a seguir en cada uno de los tests para evitar interrupciones posteriores. Se ha explicado cómo realizar una audiometría, además de cómo funciona el software de medición de la percepción de eco y cómo debían contestar a las preguntas del estudio acerca del eco. Asimismo se ha proporcionado previamente un ejemplo de qué debían entender como eco y qué no.

A continuación, se va a proceder a explicar con detenimiento cada uno de los tres tests que se han suministrado a los sujetos del estudio.



Figura 16: Sujeto del estudio realizando el test.

3.2.1 Test 1: test personal

Primero de todo se les ha pasado un test personal, que podemos observar en la figura 17, en el que debían contestar a cerca de: su sexo (hombre o mujer); su edad (respuesta abierta); si tienen formación musical (si o no) y, en caso afirmativo, qué grado de formación (amateur, grado elemental, grado medio, grado superior); si la respuesta a la formación musical es negativa, esta última pregunta no sería necesario contestarla, pasarían directamente a contestar si tocan algún instrumento (guitarra/bajo, percusión, instrumentos clásicos de viento, instrumentos clásicos de cuerda, cantante/otros o ninguno); y, por último, si se dedican a algo relacionado con el sonido (si o no). Este test se ha realizado para, posteriormente, cuando se analicen los resultados, comprobar cómo afectan cada uno de estos parámetros y poder discriminar así entre hombres y mujeres, entre si tocan o no algún instrumento, incluso discriminar entre el tipo de instrumento que tocan, además de discriminar entre sujetos que tienen relación con el audio y sujetos que no.

1. Sexo: *	5. Toca algún instrumento? *
<input type="radio"/> Hombre	<input type="radio"/> Guitarra/bajo
<input type="radio"/> Mujer	<input type="radio"/> Percusión
2. Edad: *	<input type="radio"/> Instrumentos clásicos viento
Tu respuesta _____	<input type="radio"/> Instrumentos clásicos cuerda
3. ¿Tiene usted alguna formación musical? *	<input type="radio"/> Cantante/otros
<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
<input type="radio"/> No (Saltar a la pregunta 5)	6. ¿Se dedica a algo relacionado con el sonido (acústica/live/estudio) ? *
4. ¿Qué grado de formación?	<input type="radio"/> Sí
<input type="radio"/> Amateur	<input type="radio"/> No
<input type="radio"/> Grado Elemental	
<input type="radio"/> Grado Medio	
<input type="radio"/> Grado Superior	

*Obligatorio

Figura 17: Test personal.

3.2.2 Test 2: audiometría

Una vez finalizado el primer test, se procede a realizar una audiometría.

Una audiometría es un estudio del nivel de audición con medios electrónicos. Existen dos tipos de audiometrías: tonal o vocal. En este estudio se ha empleado una audiometría tonal en la cual se utilizan tonos puros. Cabe destacar también que dentro del grupo de la audiometría tonal existe una subdivisión teniendo en cuenta las técnicas empleadas para realizarla. Durante la realización de este estudio se ha empleado la audiometría tonal liminar ya que es la técnica que explora el umbral de audición de las diferentes frecuencias. Además de esta técnica existen otras como son: audiometría tonal supraliminar, audiometría automática de Békésy, audiometría infantil, audiometría por respuestas evocadas [10].

Se ha direccionado a los sujetos a una página web donde debían realizar una audiometría (<http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/hearing.html>). En la imagen siguiente (figura 18) se observa el aspecto de dicha página web, donde se proporcionan una breve explicación introductoria y un panel en el que se puede observar una serie de frecuencias y unos niveles de audición (figura 19).

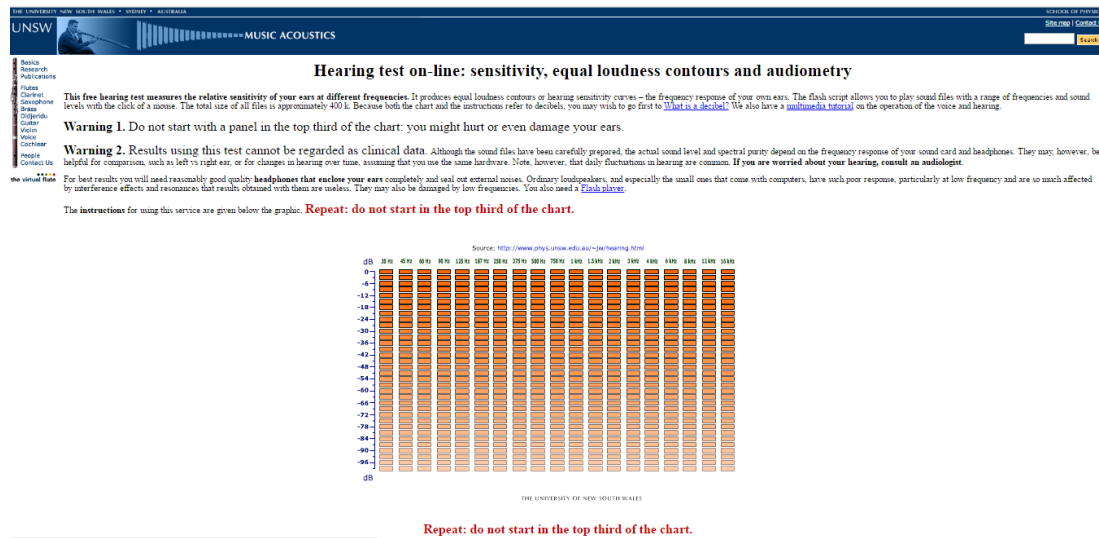


Figura 18: Apariencia de la página web en la que se ha realizado la audiometría.

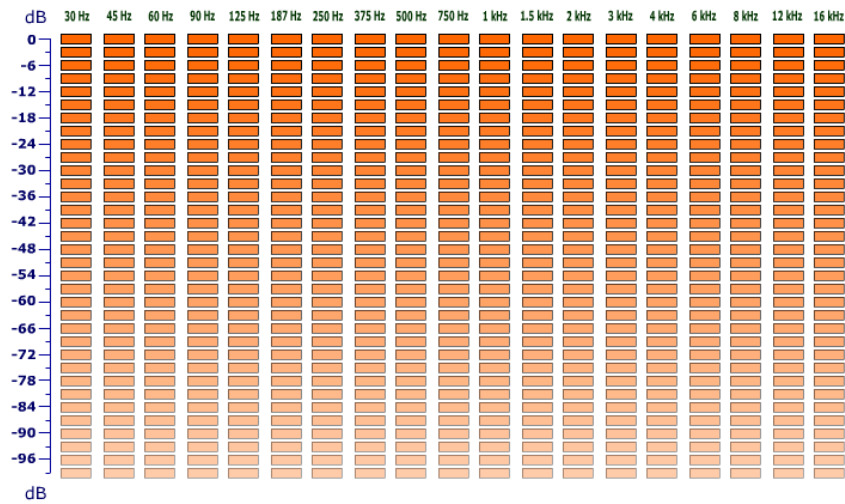


Figura 19: Aspecto de la audiometría antes de empezar.

Los sujetos debían realizar la audiometría para las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz (es decir en las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz). Se les ha explicado previamente lo que escucharían y como debían realizar la audiometría, informándoles de que escucharían un tono en cada frecuencia del cual debían ir disminuyendo el nivel (en pasos de 3 dB respecto al nivel de referencia), siempre que siguieran escuchándolo. En caso de dejar de escuchar el tono deben dejar el último nivel audible.

A continuación, en la figura 20, se muestra un ejemplo de la audiometría de uno de los sujetos.

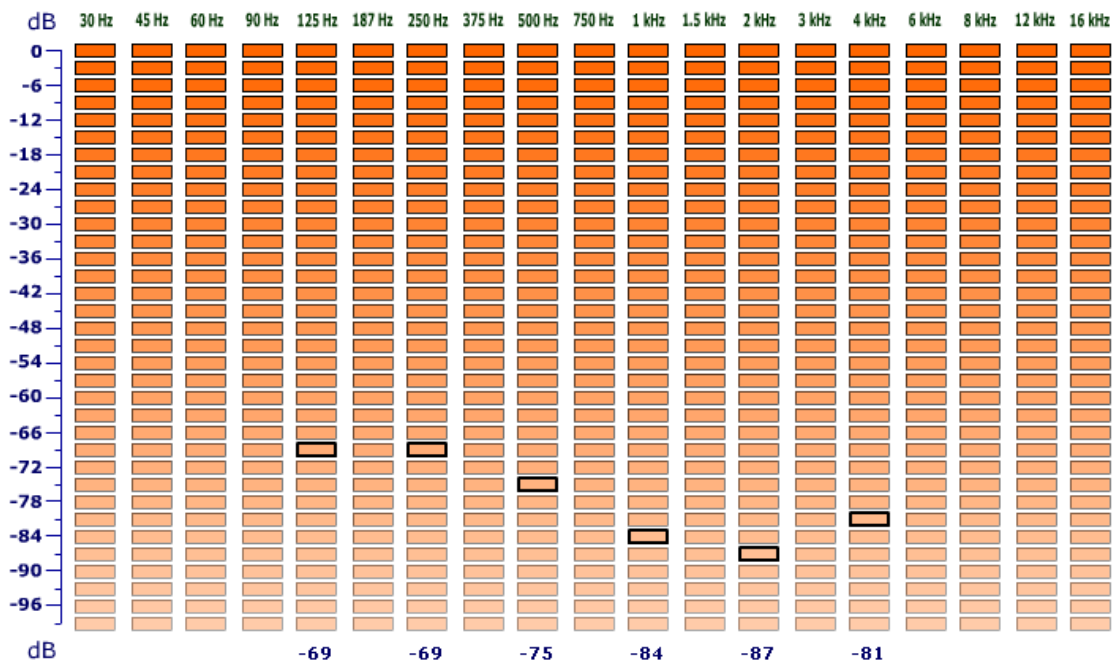


Figura 20: Ejemplo de audiometría.

3.2.3 Test 3: Percepción de eco

El tercer y último test que se ha proporcionado a los sujetos es el software (programado con la herramienta Matlab) de medición de la percepción de eco. Se ha procedido previamente a explicar cómo funciona el programa y que iban a ir encontrando a lo largo del test. Se ha realizado un esquema explicativo (figura 21) en una pizarra del laboratorio para que además de la explicación previa tuvieran por escrito el proceso a seguir por si acaso en algún momento del estudio se perdían.

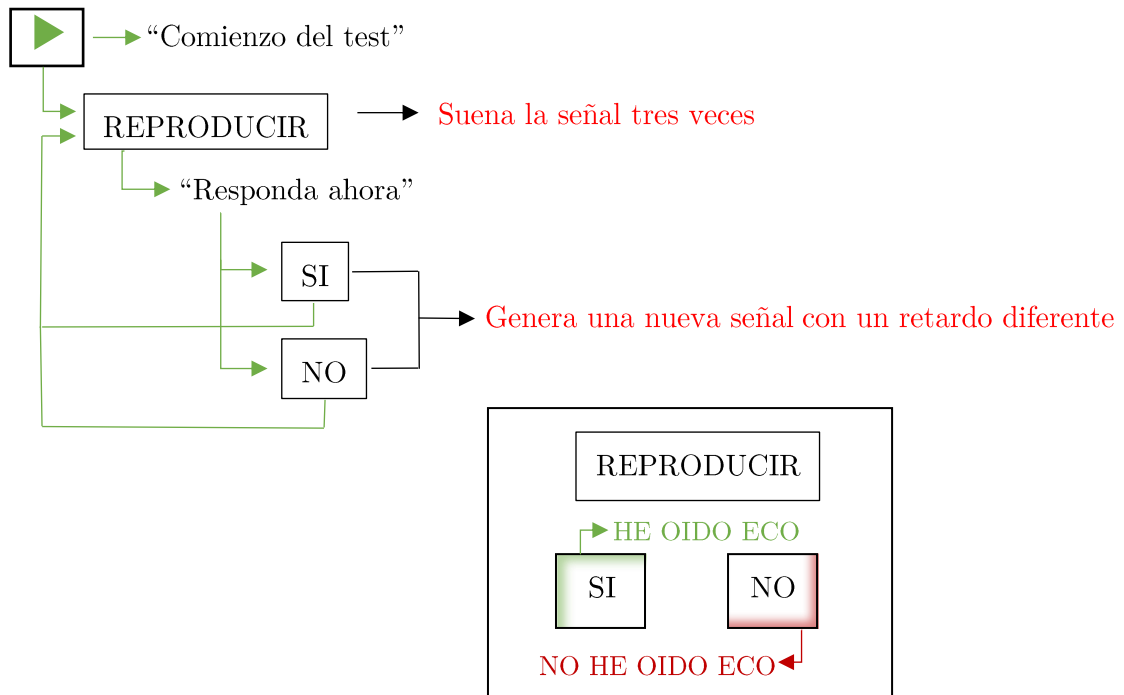


Figura 21: Esquema para explicar el test a los sujetos de estudio.

Al darle al botón Run del editor de Matlab, el sujeto escucha “Comienzo del test” y el programa le proporciona una interfaz gráfica de usuario (una ventana) donde encuentra tres botones: REPRODUCIR, SI y NO. El sujeto debe darle al botón REPRODUCIR y escucha un ruido tres veces con un retardo y una frecuencia determinados. Acto seguido el sujeto escucha “Responda ahora” y debe responder a si ha oído eco o no (presionando el botón SI, en caso de haber escuchado eco o el botón NO, si no lo ha escuchado). Independientemente de si el sujeto responde SI o responde NO, el programa genera una nueva señal, es decir, un nuevo ruido con un retardo diferente. Cuando se han reproducido los siete retardos que incluye el programa, al darle al botón SI o NO, el sujeto escucha “Cambio de frecuencia” y los retardos vuelven a iniciarse. Este proceso se repite para las tres frecuencias que incluye el programa. Cuando el sujeto ha escuchado los siete retardos de las tres frecuencias, el programa se cierra automáticamente guardando los datos.

Cuando el sujeto da al botón SI o al botón NO la señal cambia, pero si el sujeto necesitara escuchar la misma señal de nuevo, porque no le ha quedado claro si ha escuchado eco o no, puede hacerlo tantas veces como quiera dándole al botón REPRODUCIR.

Para facilitar a los sujetos la comprensión acerca de lo que es eco y lo que no, se les proporciona un ejemplo de lo que deben entender como eco y lo que no.

Diagrama de flujo

Como se puede observar en el siguiente diagrama (figura 22) cuando el sujeto inicia el programa, escucha “Comienzo del test”. Cuando presiona el botón REPRODUCIR, suena la señal tres veces. Posterior a esto, escucha “Responde ahora” y, respondiendo a la pregunta: ¿Has oído eco?, debe responder SI o NO. Si el sujeto responde SI, en la variable dato se acumula un 1. Si el sujeto responde NO, en la variable dato se acumula un 0. Independientemente de la respuesta, el programa comprueba si la variable retardos es menor a siete. En caso afirmativo, la variable retardos incrementa en uno su valor y vuelve a reproducir la señal. En caso negativo, el programa comprueba si la variable frecuencias es menor a tres. En caso afirmativo, la variable frecuencias incrementa en uno su valor, la variable retardos se inicializa de nuevo y se vuelve a reproducir la señal. En caso negativo, finaliza el programa. Cuando esto ocurre, el programa guarda una matriz 7x3 de datos con los valores 1 y 0 dependiendo de las respuestas de los sujetos.

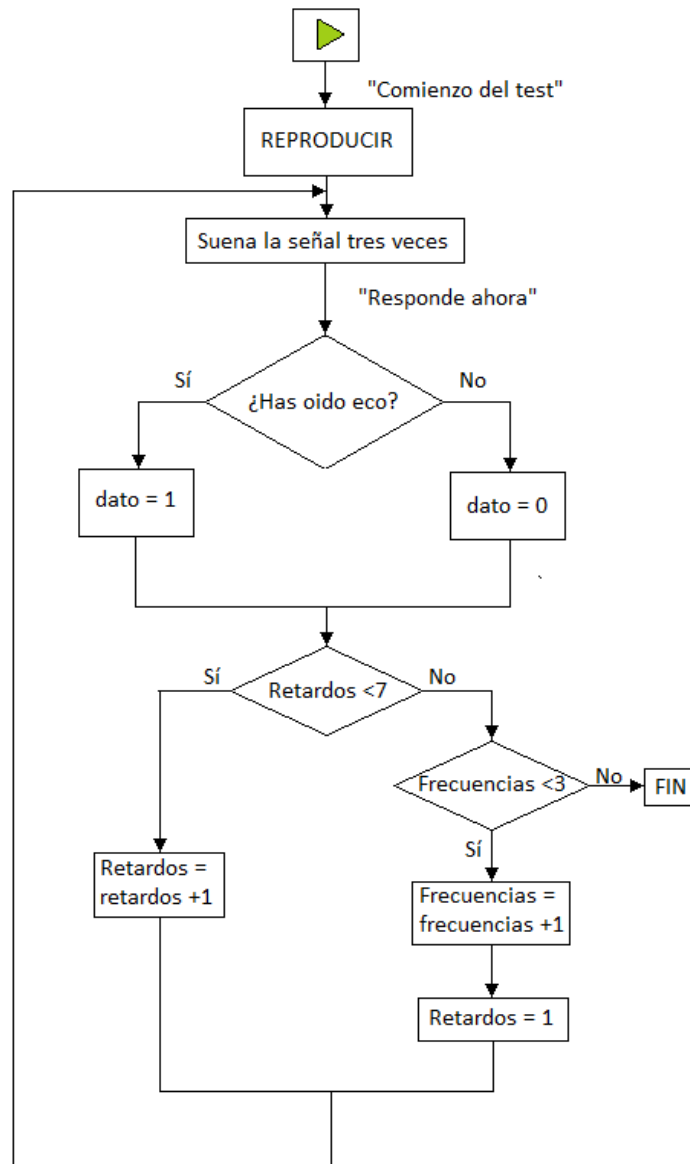


Figura 22: Diagrama de flujo del programa.

Código de Matlab

En este trabajo se han implementado diferentes códigos hasta llegar al definitivo. Siguiendo lo comentado en el apartado *3.1 Análisis de señales*, inicialmente se ha partido de un programa de Matlab (*umbral_eco.m*, adjunto en el Anexo), en el que se había pensado en reproducir un eco sumando dos tonos puros de una frecuencia dada, con una diferencia de fase dada por un retardo. Como allí se dijo, al realizar el programa de esta manera, se observó una variación de la amplitud de la señal debido a que ambas señales, directa y retardada, presentaban una gran coherencia.

Ya que este fenómeno no ocurre en la realidad, se tuvo que realizar el programa con un ruido sumado a otro ruido con un retardo, ambos previamente filtrados a las bandas de frecuencia de interés (*umbral_eco_ruido.m*, adjunto en Anexo). Al realizar el programa con esta señal, ya no se tenía esa variación de amplitud que ocurría en el caso de la señal con tonos puros.

En tercer lugar, para poder realizar el estudio a los sujetos se ha creado, a partir de este último script, un GUI³ (figura 23), adjunto en Anexo (*Umbral_Eco_GUI.m*). Se han creado tres botones a los que se les ha indicado la función que debían realizar. El botón REPRODUCIR reproduce la señal. El botón SI, guarda en la variable datos el valor 1, cambia al siguiente retardo o si fuese necesario a la siguiente frecuencia y genera una nueva señal. El botón NO, guarda en la variable datos el valor 0, cambia al siguiente retardo o si fuese necesario a la siguiente frecuencia y genera una nueva señal. Cuando se han escuchado los siete retardos de las tres frecuencias tanto el botón SI cómo el botón NO, cierran el programa.



Figura 23: Apariencia del GUI.

GUI³: Graphical User Interface (Interfaz Gráfica de Usuario)

Capítulo 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Medidas

Se ha realizado el estudio a un total de 52 sujetos (en dos días diferentes, 30 el primer día y 22 el segundo) de los cuales, como se ha explicado anteriormente se han descartado a los sujetos del primer día contando únicamente con los sujetos del segundo día.

De las matrices resultantes del estudio, guardadas cada vez que un sujeto finaliza el mismo, se ha pasado a unas gráficas mediante un programa de Matlab (ver adjunto en Anexo). Este programa carga las matrices de datos y mediante el comando *plot*⁴ las muestra, una a una, gráficamente. Además el programa ofrece al final una imagen con todos los datos juntos (figura 24).

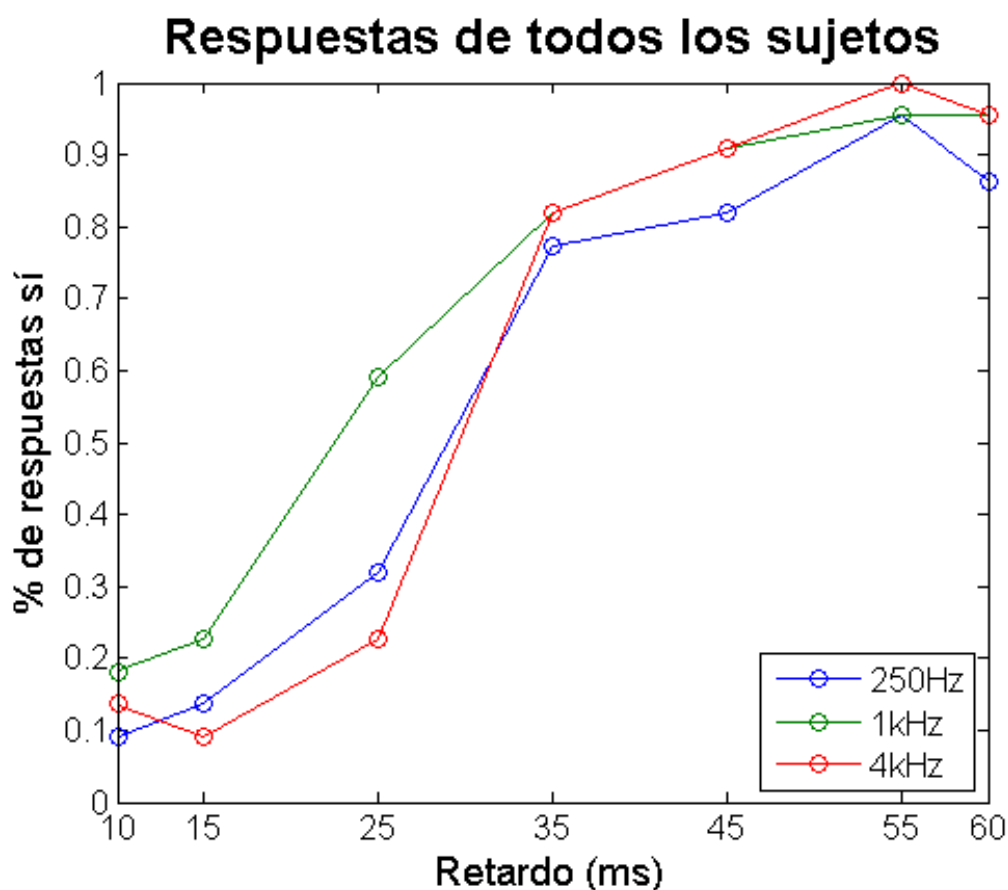


Figura 24: Gráfica representando los datos de todos los sujetos.

⁴ Plot: es un comando que utiliza Matlab para realizar representaciones gráficas.

4.2 Discriminación de resultados incorrectos

De los datos obtenidos el segundo día se ha realizado una discriminación de resultados incorrectos, teniendo en cuenta:

- Que se supone que cada sujeto ha entendido, gracias al ejemplo que se ofrece previo al estudio, que en el primer retardo no debe escuchar eco y en el último retardo si debe hacerlo. En la figura 25, se muestra un ejemplo de unos resultados válidos y unos que se han desechado por esta premisa (estos errores se indican con una flecha roja).

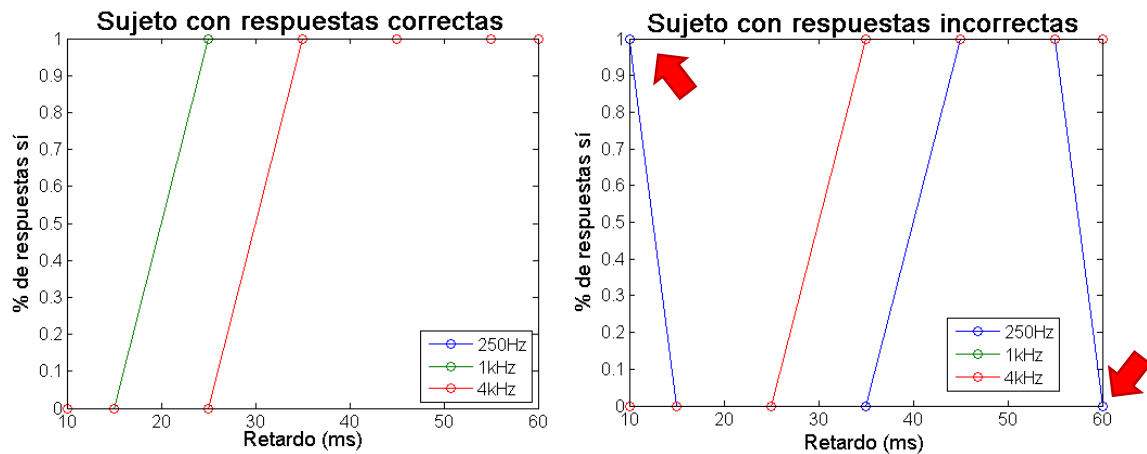


Figura 25: A la izquierda, un ejemplo de respuestas correctas. A la derecha, un ejemplo de respuestas incorrectas por no cumplir con que el primer retardo no tiene eco mientras que el último si lo tiene.

- Que los sujetos deben contestar coherentemente, es decir, es entendible que un sujeto escuche eco mucho antes del umbral esperado si luego es consecuente con sus respuestas. Lo que no es entendible, ni lógico, es que el mismo sujeto que dice escuchar eco a, por ejemplo, 15 ms no lo escuche a 20 y 25 ms y luego vuelva escucharlo a 30 ms. Estas medidas también serán desechadas. En la figura 26, se muestra un ejemplo de unos resultados válidos y unos que se han desechado por esta premisa. A la izquierda, a pesar de que inicialmente podría considerarse desechable, al ser el sujeto consecuente con sus respuestas, se cuenta como resultado válida, cosa que no ocurre en la imagen de la derecha.

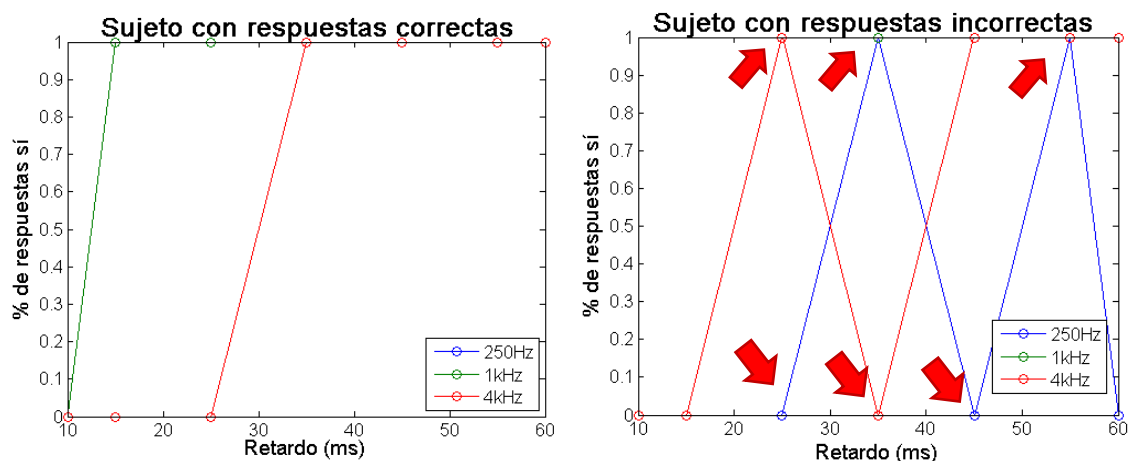


Figura 26: A la izquierda, una respuesta que a pesar de parecer incorrecta a primera vista, es correcta. A la derecha, una respuesta totalmente incoherente.

4.3 Conceptos de estadística

Media: Se define media como el promedio de los valores de una variable [14].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Desviación típica o estándar: es una medida de dispersión para variables de razón y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Es la más utilizada de las medidas de dispersión [15].

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4)$$

Varianza: Cuantifica la dispersión de los datos con respecto a la media. Se obtiene como la media de las desviaciones cuadráticas de cada dato con respecto a la media [16].

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

Función de densidad de probabilidad: Caracteriza el comportamiento probable de una población en tanto especifica la posibilidad relativa de que una variable aleatoria continua X tome un valor cercano a x [17].

$$pdf = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6)$$

Función de distribución acumulada: Expresa la probabilidad acumulada asociada con una distribución. Expresa el área por debajo de la función de densidad de probabilidad, hasta el valor que se especifique [17].

$$cdf = \int_{-\infty}^x pdf(x) dx = \frac{1}{2} \left[1 + erf\left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \quad (7)$$

En el presente trabajo se trabaja con la función de densidad de probabilidad normal, es decir, función de distribución gaussiana, y la derivada de la misma, es decir, la función de distribución acumulada normal (figura 27).

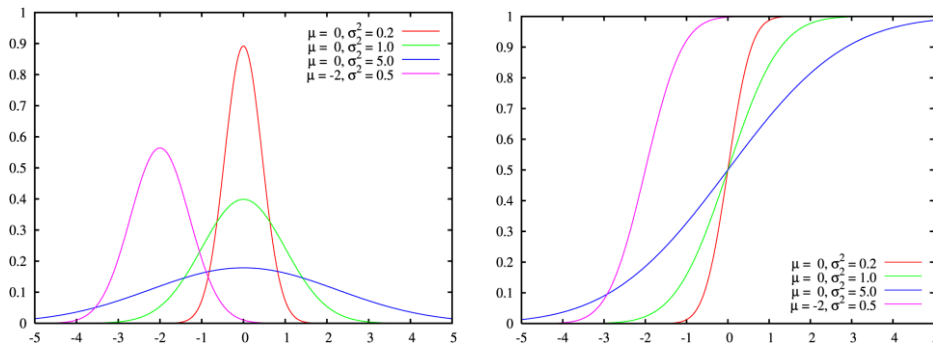


Figura 27: A la derecha, función de densidad de probabilidad. A la derecha, función de distribución de probabilidad.

4.4 Análisis sin discriminación por parámetros

Una vez cargados todos los datos obtenidos con el test, mediante un programa en Matlab (*Seleccionar_datos.m*, adjunto en el Anexo) se representan gráficamente uno a uno y se pregunta qué se quiere hacer con ellos: quedárselos como buenos o descartarlos. Una vez se ha decidido qué datos son los correctos, se representa el conjunto de datos correctos (figura X, izquierda). Además, dicho script encuentra la *cdf* (ec. 7), proveniente de una *pdf* normal (ec. 6), que mejor se ajusta a los datos seleccionados. Para ello, se realiza un barrido con medias de 20 a 40 ms, y de desviaciones de 0 a 20, ambas en pasos de 1 ms. De cada una de las curvas se obtiene el parámetro de correlación R^2 entre ellas y los datos, seleccionando la que presenta un valor mayor (en todos los casos, mayor a 0.99). A la derecha, se solapan las curvas de distribución de probabilidad acumulada obtenidas.

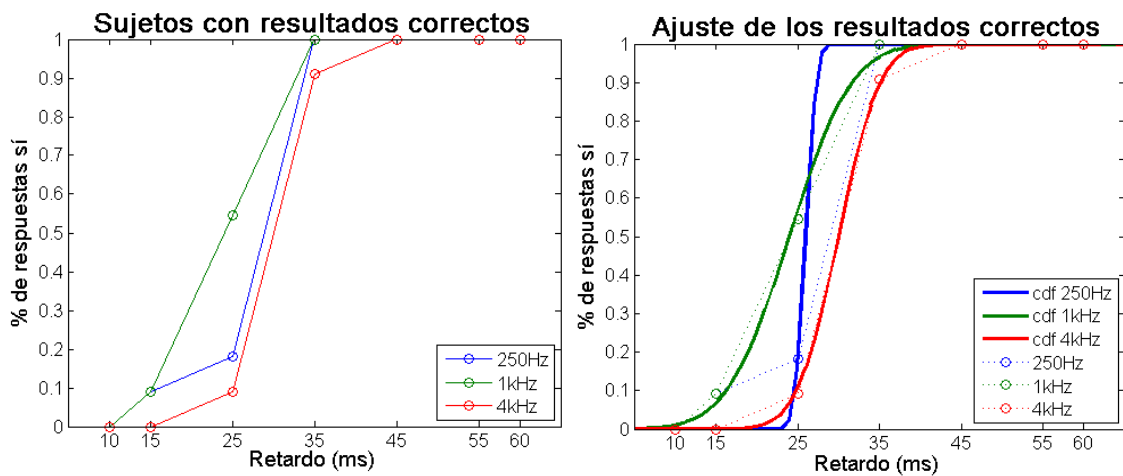


Figura 28: A la izquierda, gráfica con todos los datos de las respuestas correctas. A la derecha, un ajuste de los resultados correctos haciendo uso de la función de distribución acumulada normal.

Como se puede observar en la siguiente tabla (Tabla 2), la pendiente de la función de distribución acumulada tan abrupta a 250 Hz es debido al hecho de que tiene muchos valores en 1, como ocurre en 1 kHz, pero en esta frecuencia el paso no es tan abrupto (pasa de 0 a 1 en pasos pequeños), mientras que en 250 Hz el salto de 0 a 1 es muy grande. Con ello, se puede también concluir que, en esta frecuencia, los datos no se ajustan correctamente a una función de distribución acumulada que provenga de una función de densidad de probabilidad normal, mientras que los resultados obtenidos con las demás frecuencias sí se ajustan con bastante precisión.

<i>Retardo (ms)</i>	<i>Frecuencia (Hz)</i>		
	250	1000	4000
10	0	0	0
15	0.0909	0.0909	0
25	0.1818	0.5455	0.0909
35	1	1	0.9091
45	1	1	1
55	1	1	1
60	1	1	1

Tabla 2: Valor de las respuestas por retardos y frecuencias.

4.5 Análisis con discriminación por parámetros

En este apartado se va a comparar los resultados según varios parámetros, como son: el sexo, la formación musical, el instrumento que tocan los sujetos y la relación que estos tienen con el mundo del audio.

4.4.1 Discriminación por sexo

Como se puede observar en las imágenes comparativas de a continuación (figura 29), los hombres detectan el umbral de eco, a una frecuencia de 1 kHz, a los 25 ms mientras que, a las frecuencias de 250 Hz y 4 kHz, lo detectan a 30 ms. Por otra parte las mujeres detectan el umbral de eco a 30 ms para las frecuencias de 250 Hz y 1 kHz y a 35 ms para la frecuencia de 4 kHz. Se podría decir que los hombres perciben antes el eco en 1000 Hz y 4000 Hz que las mujeres, mientras que no existe diferencia a 250 Hz.

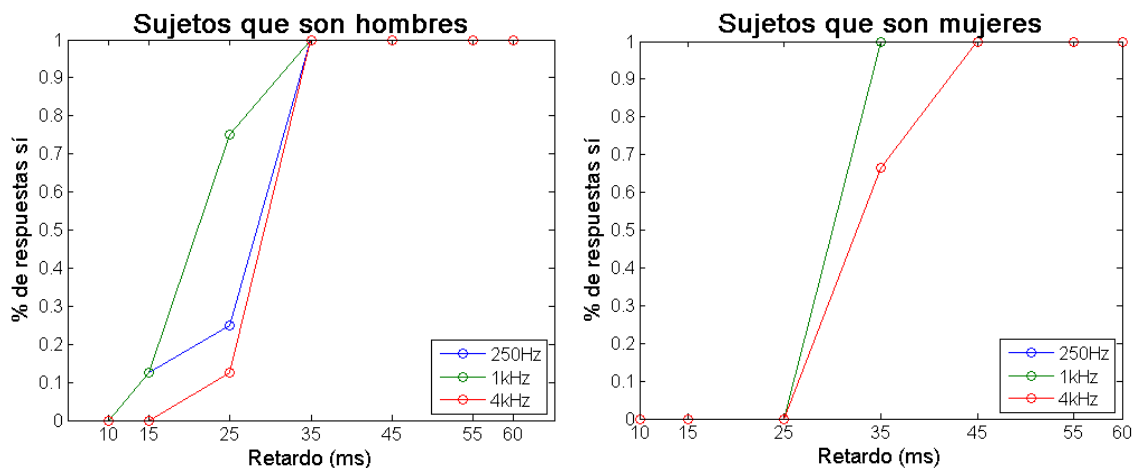


Figura 29: A la izquierda, respuestas de los sujetos de sexo masculino. A la derecha, respuestas de los sujetos de sexo femenino.

4.4.2 Discriminación por formación musical y grado de la misma

Se podría llegar a pensar que aquí se encontraría un cambio muy significativo entre los sujetos con formación musical y los sujetos que no han recibido esta formación. Pero para sorpresa de todos, como se puede observar en las imágenes siguientes (figura 30), los sujetos que han recibido formación musical detectan el eco a 25 ms para la frecuencia de 1 kHz y a 30 ms para las frecuencias de 250 Hz y 4 kHz. Resultados que podemos observar se repiten en los sujetos que no han recibido formación musical, 25 ms a 1 kHz y 30 ms a 250 Hz y 4 kHz.

Dado que se ha demostrado que la formación musical no es un parámetro del que depende la percepción del umbral de eco, se desestimará la discriminación por grado de formación musical.

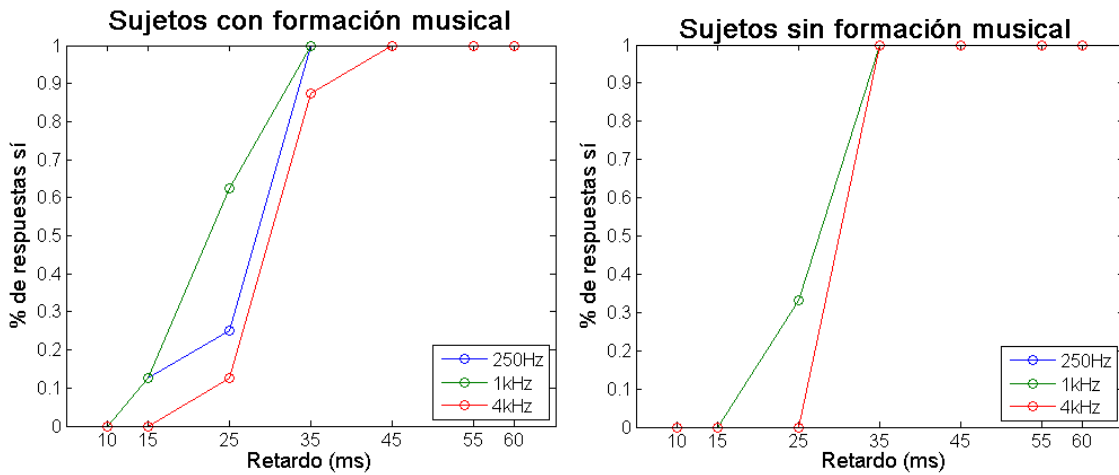


Figura 30: A la izquierda, respuestas de los sujetos con formación musical. A la derecha sujetos sin formación musical.

4.4.3 Discriminación según el instrumento

A pesar de no haber diferencia entre los sujetos que habían recibido formación musical y los que no, sí que la hay entre los sujetos que no tocan ningún instrumento y los que si tocan y además, también existe distinción dentro de los que si tocan instrumento, dependiendo del instrumento que toquen. En las imágenes que se muestran a continuación (figura 31) se puede observar como los sujetos que no tocan ningún instrumento perciben el eco a 25 ms en la frecuencia de 1 kHz y a 30 ms en las de 250 Hz y 4 kHz. Los sujetos que tocan la guitarra o el bajo, perciben el umbral en torno a 30 ms independientemente de la frecuencia. Los sujetos que tocan instrumentos clásicos de viento, detectan el umbral de eco a 25 ms a 1kHz, a 30 ms en la frecuencia de 250 Hz y a 35 ms en la frecuencia de 4 kHz. Y por último, os sujetos que tocan instrumentos clásicos de cuerda, perciben el umbral a 20 ms para la frecuencia de 1 kHz y a 25 ms para las de 250 Hz y 4kHz.

Por un lado, se puede decir que los sujetos que mejor perciben el eco son los que tocan instrumentos clásicos de cuerda. Por otro lado, resulta curioso obtener que los que no tocan ningún instrumento perciben antes el eco a 4 kHz que los que tocan instrumentos clásicos de vientos.

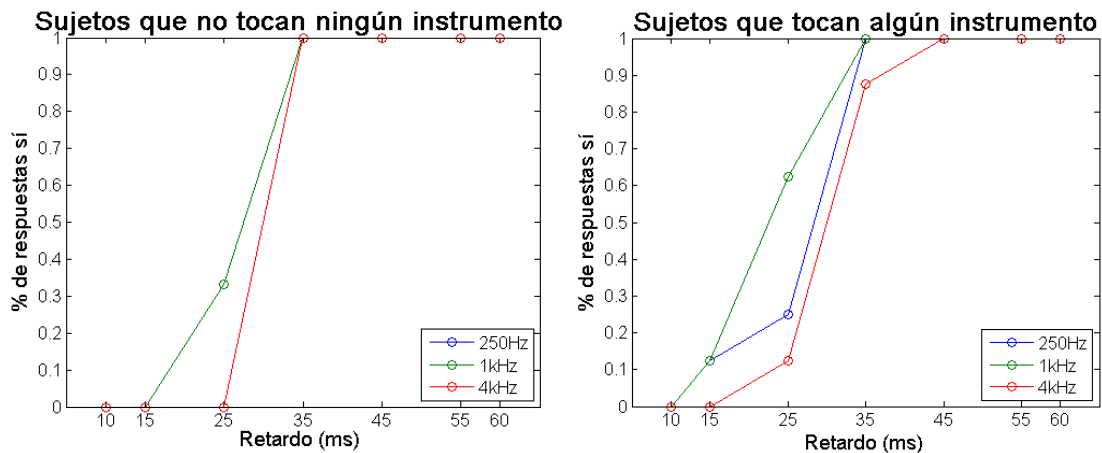


Figura 31: Respuestas de los sujetos que no tocan ningún instrumento respecto a los que sí tocan alguno.

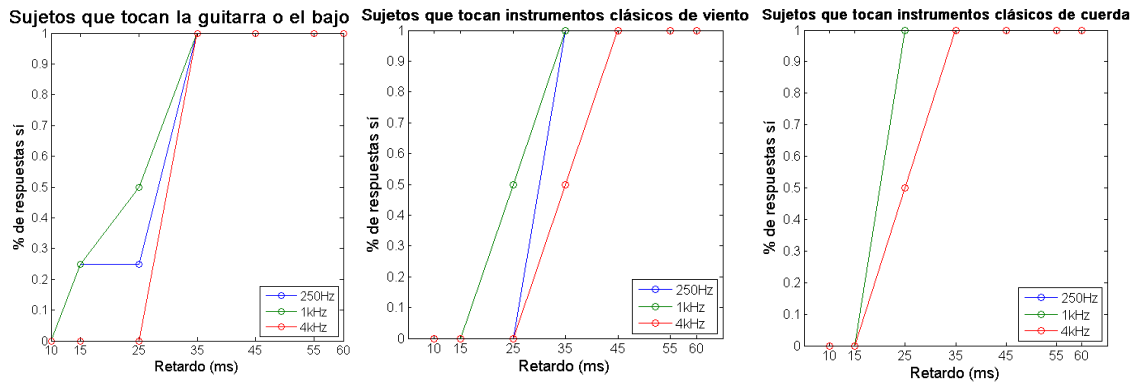


Figura 32: A la izquierda, respuestas de los sujetos que tocan la guitarra o el bajo. En el centro, respuestas de los sujetos que tocan instrumentos clásicos de viento. A la derecha, respuestas de los sujetos que tocan instrumentos clásicos de cuerda.

4.4.4 Discriminación por tener relación con el mundo del audio

Según si los sujetos tienen relación o no con el mundo del audio también se ha apreciado una distinción en los resultados. Como se puede ver en las siguientes imágenes (figura 33), los sujetos que tienen relación con el mundo del audio, detectan el eco con un retardo de unos 20 ms a 1 kHz y con un retardo de 30 ms a las frecuencias de 250 y 4 kHz. Mientras que los sujetos que no tienen relación con el mundo del audio perciben el umbral de eco a 25 ms a la frecuencia de 1 kHz y a 30 ms en las frecuencias de 250 Hz y 4 kHz. A raíz de estos resultados puede decirse que los sujetos con relación con el mundo del audio perciben ligeramente antes el eco que los sujetos que no tienen relación con el mundo del audio.

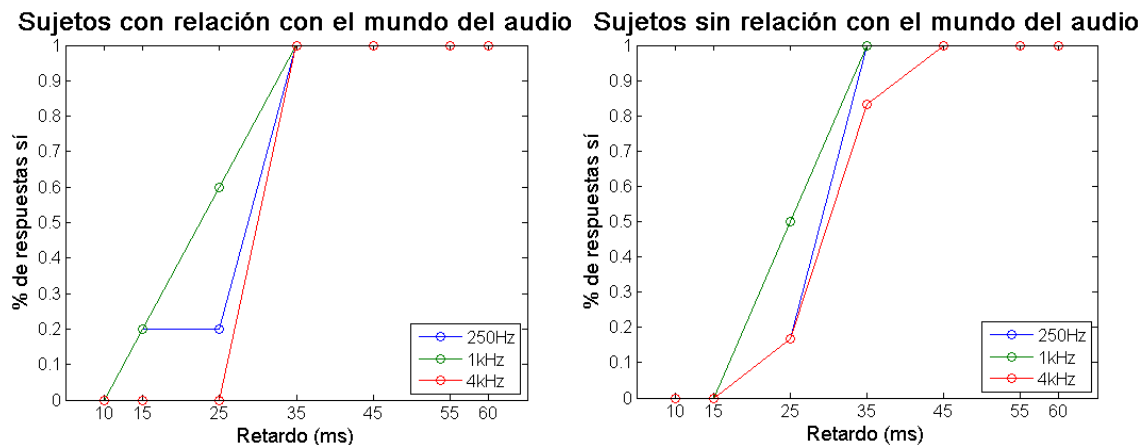


Figura 33: A la izquierda, respuestas de los sujetos con relación con el mundo del audio. A la derecha, respuestas de los sujetos que no tienen relación con el mundo del audio.

4.7 Discriminación por niveles de audición

Otra forma diferente de discriminar los valores, podría ser mediante las audiometrías. Con los valores obtenidos del test de la audiometría realizado por los sujetos, se ha procedido a realizar el descarte de aquellos casos en los que se evidencia una hipoacusia bilateral. Para ello, se ha tenido como referencia la gráfica de niveles de presión de Fletcher (figura 34). Se tomaran como “buenas” aquellas audiometrías que estén por debajo del umbral de 20 fonios y “malas” las que estén por encima.

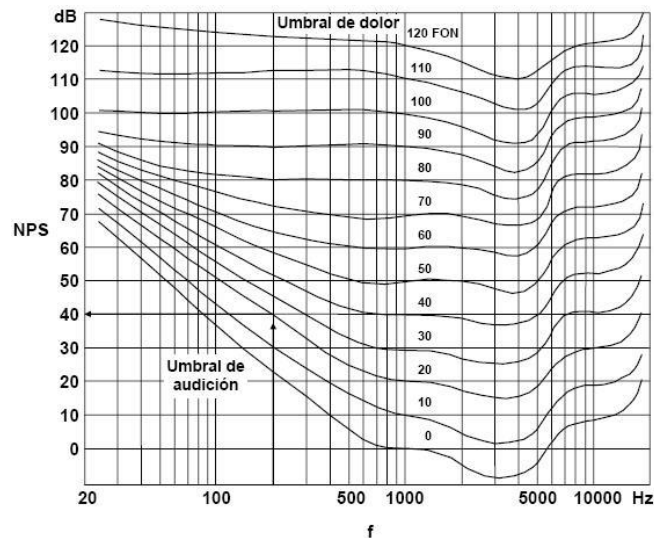


Figura 34: Gráfica de niveles de presión de Fletcher.

Con ello, y teniendo en cuenta únicamente los sujetos que han realizado el estudio correctamente (4.2 Discriminación de resultados incorrectos), se va a proceder a hacer una discriminación por audiometrías. Así, como podemos ver en las imágenes siguientes (figura 35), los sujetos con un nivel de audición “bueno” (izquierda) presentan una percepción del umbral de eco en torno a los 25 ms independientemente de la frecuencia. Mientras que en los sujetos con un nivel de audición “malo” (derecha), este umbral varía un poco más en función de la frecuencia, ya que para la frecuencia de 1 kHz el umbral se sitúa en los 20 ms y para 250 Hz y 4 kHz se encontraría en torno a 30 ms.

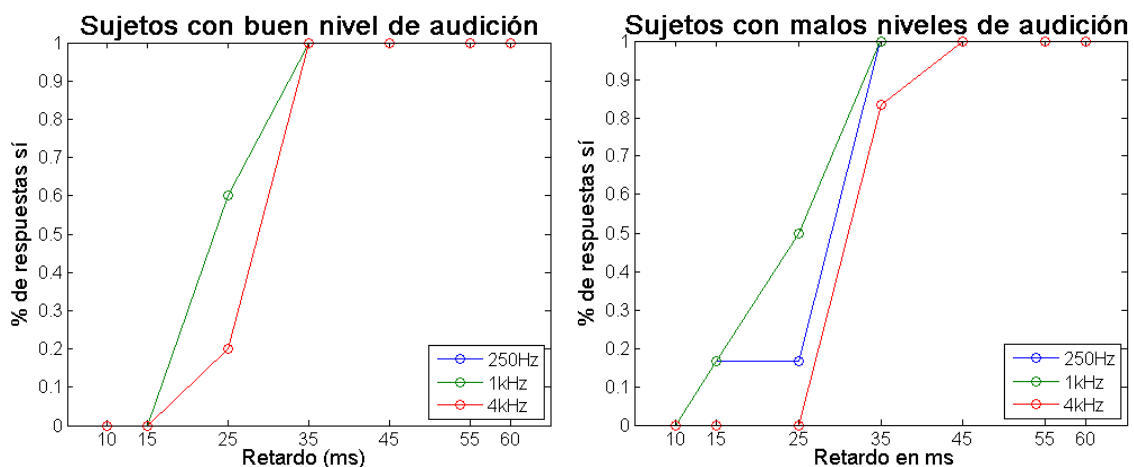


Figura 35: A la izquierda, respuestas de los sujetos con buenos niveles de audición. A la derecha, resultados de los sujetos con hipoacusia bilateral.

4.8 Resumen estadístico de los resultados

De cada una de las funciones de distribución obtenidas tanto sin discriminar por parámetros como discriminando, se muestra en la siguiente tabla (Tabla 3) las medias y desviaciones de las que mejor se ajustan a los datos correspondientes. Para cada grupo de sujetos se muestra, para cada frecuencia, el retardo obtenido mediante una inspección visual de cada gráfica (valor superior) y la media con desviación obtenida de la *cdf* mejor ajustada (valor inferior).

<i>Parámetro de la discriminación</i>		<i>Frecuencia (Hz)</i>		
		250	1000	4000
<i>Sin discriminar por parámetro</i>		30 26±1	25 24±6	30 30±4
<i>Sexo</i>	Hombres	30 27±3	25 21±5	30 26±1
	Mujeres	30 30±1	30 30±1	35 34±2
<i>Formación musical</i>	Con formación	30 27±3	25 23±6	30 30±4
	Sin formación	30 30±1	25 26±2	30 30±1
<i>Instrumento</i>	Ningún instrumento	30 30±1	25 26±2	30 30±1
		30 27±3	30 23±8	30 30±1
	Clásico de viento	30 30±1	25 25±1	35 30±1
		Clásico de cuerda	25 25±1	20 20±1
<i>Relación con el audio</i>	Con relación	30 36±1	20 23±7	30 30±1
	Sin relación	30 26±1	25 25±1	30 30±5
<i>Audiometría</i>	Buen nivel de audición	25 26±1	25 22±7	25 30±1
		Con hipoacusia bilateral	30 27±3	20 25±1

Tabla 3: Resumen valores umbral de eco (ms).

Capítulo 5 CONCLUSIONES

En este apartado se va a proceder a explicar las conclusiones sacadas del estudio.

Se esperaba una detección de umbral de eco, a bajas frecuencias, más temprana que a medias y a altas. Asimismo, se esperaba también una detección más temprana a medias frecuencias que a altas. Esta última suposición se ha cumplido pero la primera no. Esto ha podido ser ocasionado por la tarjeta gráfica utilizada. Ya que a pesar de utilizar la ganancia máxima de la misma, esta podría no ser suficiente para escuchar bien las bajas frecuencias. Es decir, no sería tanto un error de detección de eco a bajas frecuencias sino más bien una mala escucha de dichas frecuencias.

En las frecuencias en las que el oído humano es más sensible (4 kHz) se observa una detección más tardía del umbral eco. Esto podría deberse a que esta es la frecuencia de resonancia del oído humano

Aunque los resultados de este trabajo no se pueden considerar del todo concluyentes debido a cierto sesgo de las medidas, es decir, el número de encuestados no ha sido muy grande y el rango de frecuencias y retardos debería ser mayor para sacar resultados más fiables, sí que se ha podido observar cierta distinción entre frecuencias. Esto, puede tener cierta relación en otros ámbitos de la psicofísica como es en el caso de los diagramas de MacAdam. En estos diagramas (figura 36) se observa que la distinción entre dos colores de frecuencias próximas depende de la frecuencia media entre ambas. En este sentido, cada una de las elipses coloreadas de la figura representa colores entre los que el ser humano no es capaz de discernir. Por ejemplo en la zona de los verdes, donde el ojo humano es muy sensible, la elipse es más grande que en la zona de los morados, donde el ojo humano es menos sensible. Esto implica que el ser humano tiene más dificultad de distinguir entre verdes que entre morados.

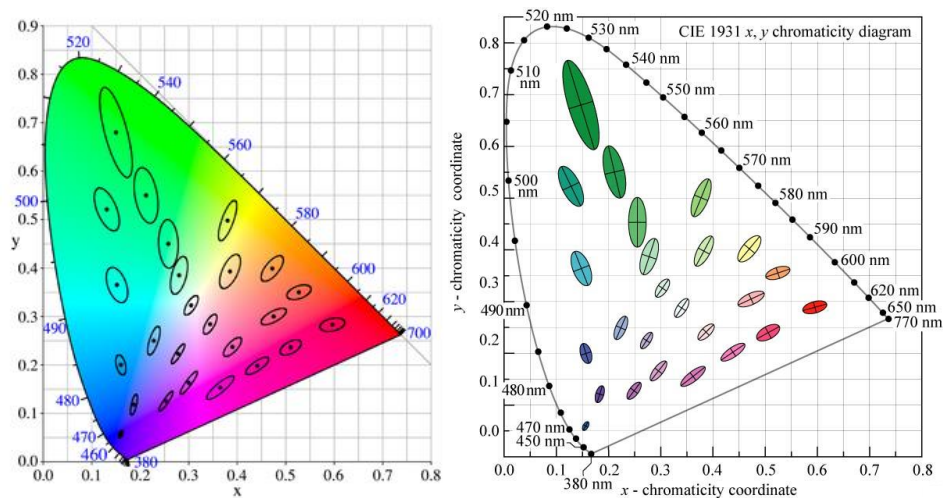


Figura 36: Diagramas de MacAdam.

Esto se relaciona con el comportamiento observado en este estudio, en el que el umbral de eco es más difícil de discernir en la frecuencia a la que el oído del ser humano es más sensible. Y por tanto, se observa una mejor detección del umbral de eco a medias frecuencias (1 kHz) que a altas (4 kHz).

REFERENCIAS

- [1] Aznar Casanova, J. A., *La psicofísica clásica y la contemporánea*, Universidad de Barcelona (Barcelona, España) [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: <http://www.ub.edu/pa1/node/113>
- [2] es.wikipedia.org (2016). *Fisiología humana* [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Fisiolog%C3%ADa_humana
- [3] Maggiolo, D., *El sistema auditivo periférico*, Escuela universitaria de música (Montevideo, Uruguay 2003) [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/sap.html>
- [4] Vera Candeas, P., *Desarrollo de técnicas de codificación de audio basadas en modelos de señal paramétricos*, Universidad de Alcalá (Madrid, España 2006) [Online consultado en Noviembre de 2016], disponible en: <http://www4.ujaen.es/~pvera/tesis.pdf>
- [5] Rodríguez, A., *Conceptos básicos de la psicoacústica*, Instituto de Ingeniería Eléctrica (Montevideo, Uruguay 2005) [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gmm/audio/seminario/seminariosviejos/2005/charlas2005/charla4_Informe.pdf
- [6] Maggiolo, D., *Umbrales de la audición*, Escuela universitaria de música (Montevideo, Uruguay 2003) [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/umb.html>
- [7] Pérez Cano, M., García Martín, J., *La audición humana, 4.1 Umbrales psicológicos*, Universidad de Valladolid (Castilla y León, España, 2004) [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io1/public_html/marcos.htm
- [8] Maggiolo, D., *Psicoacústica*, Escuela universitaria de música (Montevideo, Uruguay 2003) [Online, consultado en Octubre de 2016], disponible en: <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/int.html>
- [9] Aznar Casanova, J. A., *Los métodos psicofísicos directos o escalas psicofísicas*, Universidad de Barcelona (Barcelona, España) [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: <http://www.ub.edu/pa1/node/73>
- [10] Moreno Ibarra, G., *Estudio psicoacústico y estadístico de la audición en la profesión del DJ. Características y pérdidas auditivas de los individuos*, Escuela Politécnica Superior de Gandía, Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España, 2012) [Online, consultado en Octubre de 2016], disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14234/memoria.pdf?sequence=1>
- [11] Maggiolo, D., *Enmascaramiento*, Escuela universitaria de música (Montevideo, Uruguay 2003) [Online, consultado en Octubre de 2016], disponible en: <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/enm.html>

- [12] Martín Rocamora, L. J., *Psicoacústica*, Escuela universitaria de música (Montevideo, Uruguay 2011) [Online, consultado en Octubre de 2016], disponible en: <http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza/acustica/apuntes/Psicoacustica.pdf>
- [13] Royuela del Val, J., De la Parra García, C., *Escucha 3D y holofonía, 2. Escucha binaural*, Universidad de Valladolid (Castilla y León, España, 2004) [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io1/public_html/marcos.htm
- [14] es.wikipedia.org (2016). *Media* [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Media_\(matem%C3%A1ticas\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Media_(matem%C3%A1ticas))
- [15] es.wikipedia.org (2016). *Desviación típica* [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Desviaci%C3%B3n_t%C3%ADpica
- [16] es.wikipedia.org (2016). *Varianza* [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Varianza>
- [17] es.wikipedia.org (2016). *Distribución normal* [Online, consultado en Noviembre de 2016], disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_normal