

no/a.

AUTOR

AÑO



FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS

INTEGRACION TEMPORAL DE SONIDOS DE AMPLITUD MODULADA Y SU
RELACION CON LA INTEGRACION TEMPORAL EN BAJAS FRECUENCIAS
E INFRASONIDOS.

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica

Profesor guía:

PhD. Carlos Andrés Jurado Orellana

Autor:

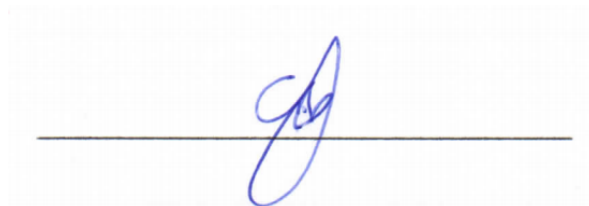
David Andrés Rosero López

Año de presentación:

2020

DECLARACION PROFESOR GUIA

"Declaro haber revisado este trabajo, Integración temporal de sonidos de amplitud modulada y su relación con la integración temporal en bajas frecuencias e infrasonidos, a través de reuniones periódicas con el estudiante David Andrés Rosero López, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



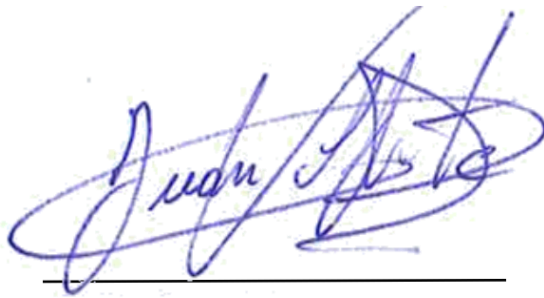
Carlos Andres Jurado Orellana

Doctor en Acústica

C.I. 1757027915

DECLARACION PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Integración temporal de sonidos de amplitud modulada y su relación con la integración temporal en bajas frecuencias e infrasonidos, de David Andrés Rosero López, en el semestre 202020, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



Juan Sebastián Vizúete Déley

Máster Universitario en Ingeniería Acústica

CI: 0604086769

DECLARACION DE AUTORIA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mí autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

David Rosero L.

David Andrés Rosero López

CI: 0105752752

RESUMEN

En este trabajo de investigación se evalúa la integración temporal del oído humano para estímulos de amplitud modulada y su relación con la integración temporal en infrasonidos. Se han planteado 4 experimentos que utilizan métodos psicofísicos para analizar el umbral de detección para tonos AM a distintas frecuencias de modulación, y para determinar la frecuencia límite que permite la discriminación de eventos separados. Los resultados obtenidos para el umbral de detección han sido contrastados con información previa de integración temporal en infrasonidos. La frecuencia límite para detección de eventos separados se ha buscado utilizando estímulos AM y también infrasonidos. Por último, se ha aplicado también un experimento que pretende buscar la relación entre el procesamiento temporal auditivo y visual a través de la percepción de eventos separados para estímulos visuales. Los resultados obtenidos muestran que el umbral de detección para estímulos AM y para infrasonidos es bastante diferente para 4 Hz después de 1000 ms, mostrando que no existe un comportamiento semejante. También se ha identificado que el límite de percepción de eventos separados es muy similar para tonos AM de diferente carrier (12.9 Hz para carrier de 1000 Hz y 11.2 Hz para carrier de 125 Hz) y para infrasonidos (14.8 Hz para tonos puros). Al analizar los resultados para estímulos visuales se ha encontrado que los límites sí presentan diferencias en comparación con los estímulos auditivos, sin embargo, parece existir una correlación positiva significativa entre estos valores que sugiere algún tipo de procesamiento similar.

ABSTRACT

In this research work the relation between temporal integration of the human ear for amplitude modulated stimulus and infrasound stimulus is evaluated. Four experiments were carried out, that made use of psychophysics methods, in order to analyze the detection threshold for AM tones at different modulation frequencies, and in order to determine the limit frequency at which subjects can perceive separate events. The results obtained for detection threshold have been compared with previous data on temporal integration for infrasounds, and limit frequencies have been found for AM and infrasound stimuli. Finally, one last experiment has been implemented in order to find if there is a relation between auditory and visual temporal processing for the perception of separate events on modulated visual stimulus. The results reveal that detection threshold for AM and infrasound vary considerably for very low frequencies (4 Hz). The perception of separate events for AM tones of different carrier frequencies (12.9 Hz for 1000 Hz carrier and 11.2 Hz for 125 Hz carrier) has been found to be very similar to that of the infrasound tones (14.8 Hz for pure tones). After analyzing results for visual stimulus, it has been found that perception of separate events differs from that of the auditory stimulus, nevertheless, there seems to exist a significant positive correlation between these values that suggests there may be a similar temporal process.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes:.....	1
1.2 Marco referencial:.....	5
1.2.1 Hipótesis:.....	6
1.3 Alcance:.....	7
1.4 Justificación:.....	7
1.5 Objetivos.....	9
1.5.1 Objetivo general.	9
1.5.2 Objetivos específicos.....	9
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Sistema auditivo periférico.	9
2.1.1 Oído externo.....	10
2.1.2 Oído medio.....	10
2.1.3 Oído interno.....	11
2.1.4 Membrana basilar.....	11
2.1.5 Función de transferencia del oído medio (FTOM).....	12
2.2 Ruido de baja frecuencia e infrasonido (RBI).....	13
2.3 Percepción del oído humano para RBI.	14
2.3.1 Curvas isofónicas de audición.....	16
2.4 Integración temporal del sonido en el oído humano.	18
2.4.1 Tiempos críticos	20
2.4.2 Integración temporal en bajas frecuencias.....	20
2.5 Percepción del oído humano para estímulos de amplitud modulada.....	21
2.5.1 Fuerza de fluctuación (<i>fluctuation strength</i>)	21
2.5.2 Sensación de aspereza (<i>roughness</i>).....	22
2.6.3 Función de transferencia de la modulación temporal.....	24
2.7 Sistema visual humano.	25

2.7.1	Procesamiento temporal visual en los seres humanos.	25
2.7.2	Factores que intervienen en la resolución temporal visual.....	26
2.8	Métodos psicofísicos.	27
2.8.1	Obtención del umbral absoluto.....	28
2.8.2	Procedimientos adaptativos en métodos psicofísicos.....	29
3.	METODOLOGÍA.	30
3.1	Experimento 1: Medición de umbral de audición para tonos modulados en función de la duración.....	31
3.2	Experimento 2: Discriminación de percepción de tono continuo y tono compuesto por eventos separados para RBI...	33
3.3.	Experimento 3: Discriminación de modulaciones como eventos separados en función de la frecuencia de modulación para estímulos auditivos con carriers mayores a 100 Hz.....	35
3.4.	Experimento 4: Discriminación de eventos separados en función de la frecuencia de fluctuación para estímulos visuales.	37
3.5	Calibración acústica del sistema.	41
4.	RESULTADOS.	42
4.1	Resultados de umbral de detección de tonos AM en función de la duración de los estímulos.	42
4.1.1	Comparación con infrasonido.....	46
4.2	Resultados de discriminación de eventos separados en función de la frecuencia para tonos puros de baja frecuencia e infrasonidos.	48
4.3	Resultados de discriminación de eventos separados en función a la frecuencia de modulación para estímulos auditivos.	50
4.3.1	Comparación con límites encontrados en infrasonidos.....	53

4.3.1 Resultados con estímulos visuales.	55
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	60
5.1 Conclusiones.	60
5.2 Recomendaciones.	64
REFERENCIAS	66
ANEXOS	74

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes:

El sistema auditivo humano está conformado por un complejo mecanismo, que consiste en procesos periféricos (aquellos en los que participan los órganos que componen al oído), y también de procesos cerebrales que involucran una actividad de la corteza cerebral. La integración temporal se refiere al estudio del procesamiento temporal del sistema auditivo, y fenómenos relacionados al tiempo de integración del oído ante diferentes estímulos. La integración temporal del oído humano ha sido estudiada desde hace muchos años, sin embargo, es principalmente el rango de las frecuencias medias-altas (> 250 Hz) el que es analizado. Solamente un estudio, hasta la fecha, ha investigado estos fenómenos en frecuencias bajas e infrasonidos (IS) quienes han buscado comparar resultados obtenidos para frecuencias más altas con sus resultados en infrasonidos (Jurado et al., 2020).

Algunos estudios desde hace muchos años han establecido que el nivel de loudness (sensación subjetiva de sonoridad) y el umbral de detección de un sonido depende de su duración y, debajo de cierto tiempo, sonidos cortos necesitan de mayor intensidad para ser detectados o tener un nivel de loudness similar (Gerken et al., 1990). A este fenómeno se lo conoce como integración temporal auditiva y se ha sugerido la influencia de ciertos procesos auditivos centrales (Viemeister & Wakefield, 1991) así como el efecto de mecanismos periféricos. En el 2014, Uppenkamp y Røhl en su estudio utilizando imagen por resonancia magnética funcional (IRMf) notaron la existencia de actividad en la corteza auditiva primaria relacionada con el loudness, lo que sugiere también relación con el sistema auditivo central. Tomando en cuenta estos datos Jurado, et al (2019) sugieren que hay todavía más factores y otras etapas del sistema auditivo relacionadas con la integración temporal que influyen en la percepción del loudness, como actividad en la corteza auditiva.

Estudios realizados por varios autores han mostrado que pasados los 1000 ms el umbral de detección y el punto de igualdad subjetiva deja de disminuir de manera significativa, tiempo que han denotado como “tiempo crítico” (Buus et al., 1997). Sin embargo, no existe mayor bibliografía acerca de integración temporal auditiva para frecuencias por debajo de los 250 Hz y para frecuencias menores a 100 Hz prácticamente no hay datos, aunque, algunos autores sugieren que probablemente existe un crecimiento del tiempo crítico para frecuencias muy bajas (Gerken et al., 1990).

Modelos diferentes a los propuestos por Green et al., (1957) han sido propuestos en otros estudios. Heil et al., (2017) han observado que el umbral de detección para estímulos formados por múltiples pulsos es mayor para estímulos en los que la separación de cada pulso es mayor y confirmaron que los umbrales bajan para duraciones más largas, pero lo hacen de una manera que parece depender de la envolvente temporal. Esto los ha llevado a plantear un modelo diferente que considera que el número de eventos afecta al umbral y que el umbral es más bajo para estímulos con mayor número de eventos. Este modelo presenta una nueva manera de interpretar la integración temporal, pues se asume que no hay respuesta que sea directamente proporcional a la amplitud de estímulo. Por otro lado, Viesmeister y Wakefield (1991) han planteado su propio modelo, sugiriendo que no existe una integración temporal larga, sino que para pulsos distanciados más de 5 ms, se integran como pulsos separados.

La mayor parte de la literatura actual que ha trabajado en temas de integración temporal se ha centrado en el rango de frecuencias 20 Hz y 20 kHz. Por ejemplo, se ha sugerido que la integración temporal es el resultado de la adaptación sináptica en la corteza auditiva, es decir, que es el resultado de la manera de comunicarse que tienen las neuronas en la corteza auditiva (May et al., 2015). Otro estudio ha analizado la relación entre la integración auditiva-motriz y los procesos auditivos en escalas de tiempo rápidos, mostrando que la adaptación del sistema auditivo y motriz depende de los procesos del sistema auditivo en tiempos cortos más que en tiempos mayores (Tierney & Kraus, 2016). Un estudio

similar sugiere que el sistema auditivo extrae información “fina” o detallada de los estímulos gracias a una integración de tiempo corto, y que obtiene información global de un estímulo a través de tiempos mayores (Teng et al., 2016)

Los ruidos de baja frecuencia e infrasonidos (RBI) están presentes en una manera amplia en la naturaleza, y en la sociedad actual es muy difícil librarse de ellos, pues se los encuentran en turbinas de viento, aires acondicionados, industrias y otros. Los infrasonidos (frecuencias < 20 Hz) tienen una gran carga energética, y sus efectos en la salud de los humanos todavía no son bien conocidos, aunque varios estudios han sugerido su influencia en cambios sobre la presión arterial y aumento del estrés (Nagamatsu & Yamamoto, 2019). Debido a la posible influencia que estos sonidos presentan, muchos gobiernos y organizaciones se han interesado en ampliar el conocimiento existente en estos temas financiando proyectos que ayuden a comprender cómo responde el oído y el cuerpo en bajas frecuencias, y qué medidas se pueden tomar para contrarrestar los efectos negativos que estos suponen para los humanos. Una de estas iniciativas es el proyecto de investigación “EARS II” que cuenta con el apoyo de distintas organizaciones y busca una comprensión más amplia de la interacción de los humanos con infrasonidos y ultrasonidos a través de la promoción de investigaciones y talleres que ayuden a sumar gente a una conversación acerca de la importancia de sonidos en baja frecuencia (BF) y su implicación con el ser humano (EMPIR, 2019).

Estudios previos de la Universidad de Las Américas, en cooperación con universidades extranjeras, han trabajado sobre RBI y la manera en que el oído humano percibe estos sonidos. En uno de estos estudios se identificó la influencia del helicotrema en la percepción de RBI (Jurado y Marquardt, 2016), esto después de medir los contornos de igual sonoridad (CIS) de 14 participantes y comprobar las similitudes entre la función de transferencia del oído medio (FTOM) inversa y los CIS.

En otro de los estudios realizado por este grupo (Jurado et al., 2017), se definieron de manera detallada las curvas isofónicas para bajas frecuencias, que no estaban bien definidos hasta entonces, pues siempre se han centrado en el rango entre 20 Hz y 20 kHz. Se identificó la presencia de una región no-monótona entre 40 y 100 Hz.

Avanzando con estos estudios, se trabajó con baja frecuencia con amplitud fluctuante, y la percepción del *loudness* o sonoridad que los humanos tienen de estos sonidos (Jurado et al., 2019). Para la obtención de datos en este proyecto participaron 24 sujetos con escucha normal y se les pidió igualar el nivel de loudness de un sonido con amplitud modulada con uno de amplitud continua. En este experimento se usaron métodos de ajuste de niveles que han sido usados desde hace muchos años en experimentos psicofísicos en los que se les pide a los participantes ajustar la intensidad de un estímulo hasta igualarlo con uno de referencia o hasta que perciba dicho estímulo. Aquí se utilizó un control rotatorio que permitía hacer el balance y ajuste del nivel de sonoridad.

Estudios acerca de la FTOM muestran que el oído medio y el helicotrema son los principales factores que afectan a la sensibilidad en bajas frecuencias, pues actúan como filtros pasa altos de 6 dB de pendiente cada uno, afectando un rango hasta los 500 Hz (Marquardt et al., 2007). El mismo estudio muestra también una técnica para evaluar esta función de transferencia de una manera no invasiva en seres humanos y cobayas, esto se logró usando productos de distorsión de emisiones otoacústicas (PDEO) modulados por sonidos de baja frecuencia, y ha sido clave para futuras investigaciones, pues antes solo se medían estas funciones de transferencia en oídos de cadáveres y en ratones. Estudios afines han mostrado que la exposición a infrasonidos puede alterar, de manera reversible, a las características de transferencia de la cóclea por cerca de 180 segundos (Drexel et al., 2016).

La falta de información dentro de la literatura acerca de la integración temporal auditiva en RBI, sirve a modo de motivación para realizar nuevas investigaciones

sobre el tema. Ampliar el conocimiento en esta área ha de permitir plantear mejores soluciones ante molestias producidas por BF, y también estudiar sus beneficios y cómo se las puede usar de mejor manera, pues un estudio sugiere que tonos de baja frecuencia de corta duración incluso pueden ser útiles y mejorar la actividad cognitiva (Weichenberger et al., 2015).

Se han realizado algunos intentos de relacionar el procesamiento temporal no solo auditivo sino también de otros sentidos y buscar qué tipos de conexiones existen entre estas. Boenke et al., en 2009 confirmaron que el efecto de integración temporal es bastante parecido tanto en el sistema visual como auditivo al variar las duraciones de los estímulos. Varios estudios han propuesto que hay varios factores temporales que afectan la interacción multi-sensorial (Stevenson & Wallac, 2013). Se sabe que información visual complementa a información auditiva para la percepción del habla, aunque los procesos responsables aún no están bien definidos (Plass et al., 2020) aunque existe evidencia de que actividad en redes de ciertas regiones del cerebro (lóbulo frontal y temporal) y sus tipos de conexión son importantes para esta integración audio-visual. Por esto conocer posibles relaciones entre el funcionamiento de los diferentes sistemas sensoriales puede resultar crucial para desarrollar nuevas soluciones para el habla y el lenguaje, entre otras áreas.

1.2 Marco referencial:

Sabiendo que gran parte del ruido ambiental de baja frecuencia tiene amplitud fluctuante y cambios en su temporalidad, se ha planteado un estudio que amplíe el conocimiento que se tiene acerca del procesamiento temporal del sistema auditivo ante estímulos de amplitud modulada y contrastarlo con datos preliminares que se tiene de integración temporal en RBI. Con el objetivo de interpretar los datos recientemente obtenidos acerca de integración temporal de RBI se pretende utilizar métodos psicofísicos para determinar los puntos en que subjetivamente el oído humano percibe los estímulos fluctuantes como eventos separados. Esto además se ha de complementar con una evaluación de

umbrales de detección para tonos fluctuantes y así ampliar la perspectiva de la integración temporal. Para esto es necesario el análisis de umbrales de detección, tests auditivos y otras pruebas que han de ser practicadas en varios sujetos.

Aparte de los análisis utilizando estímulos auditivos se ha planteado una prueba utilizando estímulos visuales, con el objetivo de evaluar si existe algún tipo de relación entre el procesamiento temporal auditivo y visual para estímulos de amplitud modulada.

Utilizando los datos tomados de las pruebas experimentales y pruebas preliminares con análisis estadísticos, como regresiones lineales o análisis de varianza, es posible determinar relaciones importantes entre límites de percepción de eventos separados para los distintos tipos de experimentos psicofísicos que puedan servir para identificar formas de procesamiento similares.

Los diferentes experimentos han de ser aplicados utilizando varias metodologías, de acuerdo con la pertinencia de cada caso. Todos se pueden llevar a cabo en el Laboratorio de Acústica de la Universidad de las Américas con la cadena electroacústica implementada o adaptando ciertos de sus parámetros, sin embargo, ciertos experimentos se han de realizar fuera de condiciones de laboratorio, específicamente aquellos que no requieren de equipamiento especializado y son de carácter subjetivo y menos sensibles a condiciones no ideales de ruido de fondo.

1.2.1 Hipótesis:

Se espera que, si el número de eventos determina el umbral de detección, entonces los tonos de amplitud modulada han de presentar una dependencia temporal similar a los datos referenciales a integración temporal de infrasonidos. Por otro lado, se espera que si el mecanismo que permite identificar estímulos

como si estuvieran compuestos por eventos separados es determinado por la corteza cerebral, u otro tipo de procesamiento central, exista un límite de percepción de eventos separados similar entre diferentes sistemas sensoriales.

1.3 Alcance:

Este trabajo de investigación propone la obtención de información relevante en el campo de la psicoacústica, audiolología, neurociencia, cognición y salud, pues permite ampliar el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema auditivo y su procesamiento temporal, lo que permite desarrollar mejores maneras de controlar el ruido que produce efectos negativos en el organismo, analizar relaciones temporales multi-sensoriales y evaluar nuevas perspectivas sobre el funcionamiento de la corteza cerebral.

Tomando en cuenta que la metodología dentro de esta investigación conlleva diferentes métodos de ajuste y calibración, así como de entrenamiento, y se requiere de varias muestras para disminuir la incertidumbre de medición, algunas pruebas pueden llegar a tomar entre 2 y 3 horas, lo cual limita, en un grado razonable, el número de personas sobre las que se pueden tomar datos, pues el período de tiempo destinado para la toma de pruebas coincidió con el período de confinamiento producto de la pandemia global del 2020.

Los experimentos planteados para este trabajo de investigación buscan la obtención de algunos parámetros tales como el umbral de audición en función de la duración del estímulo, el límite subjetivo de percepción de eventos separados para estímulos auditivos y visuales de amplitud modulada.

1.4 Justificación:

Si bien en los últimos años el interés por el estudio de la percepción del sistema auditivo humano ante bajas frecuencias e infrasonidos ha crecido, es evidente a la hora de revisar estudios previos que aún hay mucho que se desconoce acerca

del funcionamiento del oído ante estos estímulos. Impulsados por esta falta de conocimiento varias organizaciones internacionales y gobiernos de algunos países se han unido para financiar proyectos de investigación referentes al tema.

Desde la década de los 50's se ha estudiado el comportamiento temporal del sistema auditivo, pero siempre dentro del rango de frecuencias de audio, lo que deja un vacío de información y conocimiento acerca de la integración temporal del sistema auditivo ante estos estímulos que, si bien son difíciles de percibir a los mismos niveles que para frecuencias mayores, se ha demostrado su influencia en el organismo. Por esto el trabajo presenta una ampliación que permite conocer más a fondo cómo se comporta el oído humano debajo del rango de frecuencias comúnmente estudiadas e implicaciones que esta integración temporal podría tener.

Por otro lado, una evaluación de las relaciones entre tonos de amplitud modulada e infrasonidos ayudaría a determinar los procesos del sistema auditivo que permiten esta resolución temporal y así poder caracterizar y seguir evaluando el sistema auditivo humano.

Este trabajo de investigación representa un avance dentro del campo de la salud y la acústica y es útil para otros investigadores, pues presenta material nuevo y original que permite sentar las bases para futuras investigaciones. Además, en una sociedad altamente industrializada que busca soluciones efectivas a problemáticas de ruido, es necesario el desarrollo de soluciones para gente con problemas de audición y alternativas para disminuir la afección generada por estos estímulos (como el estrés, problemas de presión arterial y otros).

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general.

Evaluar la integración temporal auditiva para sonidos de amplitud modulada a frecuencias de modulación bajas.

1.5.2 Objetivos específicos.

1. Determinar diferencias del comportamiento temporal del sistema auditivo en estímulos de amplitud modulada a frecuencias bajas datos de integración temporal que se dispone de la literatura para infrasonidos.
2. Identificar las frecuencias límite que permiten distinguir sonidos de amplitud modulada y tonos puros de baja frecuencia como eventos separados.
3. Analizar la relación entre la integración temporal visual y auditiva a partir de estímulos visuales y auditivos de amplitud modulada.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sistema auditivo periférico.

El oído humano es el responsable del proceso de transducción que genera el sistema auditivo y está formado por tres partes: el oído externo, oído medio y oído interno. El oído externo contiene al pabellón y el canal auditivo, y está separado del oído medio por una membrana conocida como tímpano. El oído medio es una cámara vacía y contiene tres pequeños huesos llamados martillo, yunque y estribo, los cuales amplifican los niveles de vibración; este último hueso está conectado con la ventana oval, que separa al oído medio del oído interno. Dentro del oído interno el sonido termina por generar cargas eléctricas que son interpretadas por el cerebro permitiendo la escucha.

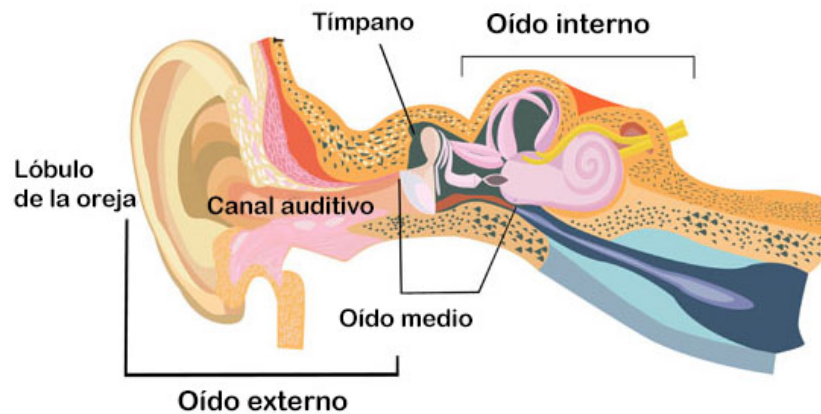


Figura 1. Estructura y partes del oído humano.

Tomado de (Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades, 2017)

2.1.1 Oído externo

Es la parte inicial del proceso auditivo. Su función es reunir energía acústica y redirigirla hacia la membrana timpánica. Para esto el pabellón cuenta con formas irregulares que permiten la reflexión y difracción de las ondas sonoras que han de ser direccionadas hacia el canal auditivo. Este último es un tubo pequeño que conecta al pabellón con el tímpano y sirve para transportar a la energía sonora hacia el oído medio; sus funciones son proteger al tímpano y enfatizar gracias a la resonancia la región del espectro de frecuencias que favorece a la inteligibilidad.

2.1.2 Oído medio.

El oído medio es una cámara que contiene tres huesos que transportan y aumentan los niveles de vibración, el tímpano, una serie de músculos y la Trompa de Eustaquio. El tímpano es una membrana cuya función es captar las ondas sonoras que llegan del canal auditivo y transformarlas en vibraciones mecánicas. El martillo está unido al tímpano, y las vibraciones provenientes de este último son llevadas hacia el yunque y el estribo que está unido a la ventana oval, en el oído interno. Los huesecillos están unidos a dos músculos que

aprietan del tímpano y el estribo, estos músculos pueden reducir la conducción de sonido en función de las reflexiones acústicas.

Por otro lado, la Trompa de Eustaquio comunica al oído medio con la garganta y permite la ventilación del sistema garantizando el equilibrio entre las presiones dentro y fuera del oído medio.

2.1.3 Oído interno.

Posee dos partes importantes, cada una tiene una función definida. La primera parte son los canales semicirculares, que constituyen el órgano sensor del equilibrio. La segunda parte es la cóclea, y su función, *grosso modo*, es transformar las vibraciones provenientes del oído medio en señales eléctricas dirigidas al cerebro. Esta estructura realiza una descomposición frecuencial del sonido.

Debido a que la membrana basilar, situada dentro de la cóclea, varía en masa y rigidez a lo largo de su longitud, la frecuencia de resonancia no es la misma. Esto produce que, dependiendo de la frecuencia de los sonidos y las propiedades de amortiguamiento de la membrana, se generen picos en distintos puntos de la membrana basilar; las altas frecuencias vibran cerca de la ventana oval, y las frecuencias más bajas tienen picos al otro lado de la membrana.

2.1.4 Membrana basilar.

La membrana basilar es una estructura pseudo-resonante (Holmes & Cole, 1983) que varía en ancho y rigidez. Esta estructura vibra de forma característica en respuesta a los estímulos, y la magnitud de esta vibración va incrementando hasta que llega a un pico en un punto específico de la membrana basilar y después disminuye abruptamente (Bacon et al., 2004). El lugar en donde la onda alcanza su máxima amplitud depende de la frecuencia, pues en frecuencias más altas este punto se ubica cerca de la base de la cóclea, mientras que las

frecuencias más bajas lo hacen cerca del ápice. Esta ubicación dependiente de la frecuencia a lo largo de la membrana basilar es conocida como organización tonotópica y se mantiene en todo el sistema auditivo. Entonces, de acuerdo a esta organización, cada punto de la membrana basilar responde de la mejor manera ante una sola frecuencia, aunque también ha de responder a otras frecuencias, y esta es llamada la “frecuencia característica”.

2.1.5 Función de transferencia del oído medio (FTOM).

La FTOM describe la transferencia (relación) de presión entre el tímpano y la membrana basilar. Esta función permite en los humanos que las ondas acústicas provenientes del exterior no pierdan energía al realizar el cambio de impedancia necesaria para el paso de un medio gaseoso (aire) a un medio líquido (perilinf). Por esto, el oído medio logra una transformación de impedancia que produce en los humanos que diferentes frecuencias sean percibidas con distintos niveles de intensidad. Aichinger (2009) presenta una función de transferencia como la que se puede ver en la Figura 2.

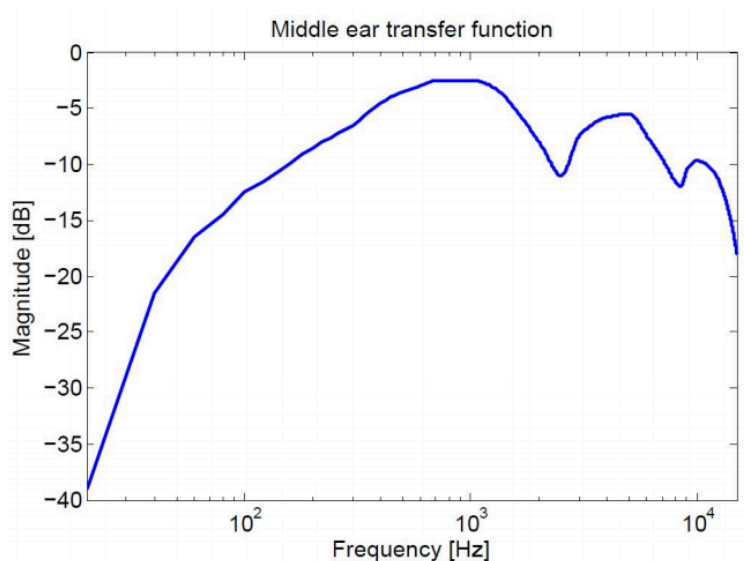


Figura 2. Función de transferencia del oído medio.

Tomado de (Aichinger, 2009)

La función de transferencia para humanos ha sido estudiada y aproximada a través de diferentes modelos y experimentos invasivos. Sin embargo, poca información se tiene acerca de la FTOM en bajas frecuencias que sea conseguida a través de experimentos prácticos en humanos. Se han presentado métodos no-invasivos para observar la vibración de la cóclea en bajas frecuencias usando DPEO en donde las curvas resultantes coinciden con los contornos de igual sonoridad (ISO226:2003) excepto por ciertas irregularidades encontradas en 45 Hz y 60 Hz, en donde se ha encontrado una caída y un pico respectivamente, posiblemente debido a una resonancia coclear (Marquardt et al., 2007).

2.2 Ruido de baja frecuencia e infrasonido (RBI)

Se ha determinado que el oído humano percibe frecuencias entre los 20 Hz hasta los 20 kHz, siendo todas las frecuencias menores al límite inferior conocidas como infrasonidos (Pujol, 2018). Sin embargo, se consideran sonidos de baja frecuencia a aquellos desde los 20 Hz hasta 256 Hz, y frecuencias medias y altas al rango que está encima (Cevallos & Velasco, 2019). Mientras menor es la frecuencia del sonido, la sensibilidad del sistema auditivo ante estos estímulos disminuye, así que para que el oído humano pueda percibir infrasonidos es necesario que la presión sonora de estos estímulos sea lo suficientemente alta. El oído es el principal órgano que percibe infrasonidos, aunque también es posible que sean captados por otras partes del cuerpo si las intensidades son lo suficientemente altas (Møller & Pedersen, 2004). Este rango de frecuencias es comúnmente usado por los seres humanos para el monitoreo de sismos y volcanes, formaciones de petróleo debajo de la tierra y también para el estudio de ciertos mecanismos del corazón humano.

Sonidos con características infrasónicas pueden viajar distancias mayores a 1000 km y tan altos como 125 km de altitud antes de regresar al suelo

(Department of Geosciences, 2018). Su propagación se puede ver afectada por parámetros atmosféricos como la temperatura o la fuerza y dirección del viento y debido a la larga longitud de onda y su capacidad energética pueden saltarse obstáculos sin pérdida de energía.

Los infrasonidos pueden ser producidos por fuentes naturales, así como fuentes artificiales. Algunos de los eventos naturales que pueden causar sonidos infrasónicos son: climas extremos, avalanchas, sismos, actividad volcánica, cascadas, aurora, explosiones o colisiones en la atmósfera más lejana, y otros (Fee & Matoza, 2013; Garces & Willis, 2006; Haak, 2006). Estos eventos pueden tener información frecuencial hasta en los 0.2 Hz. Otra fuente natural de infrasonidos es la comunicación animal, como aquella de las ballenas, elefantes, hipopótamos, rinocerontes, jirafas, pavos, que usan estos sonidos para comunicarse en largas distancias (Payne et al., 1986; Barklow, 2004; Von Muggenthaler, 2013).

Por otro lado, también existen fuentes artificiales de infrasonidos y sonidos de baja frecuencia tales como explosiones químicas o nucleares, motores a diésel, turbinas de viento, y también ciertos altavoces diseñados específicamente para la reproducción de frecuencias bastante bajas. Una de las características principales de las fuentes artificiales de RBI como las turbinas de viento, es que tienen componentes de amplitud modulada y este es un factor importante a la hora de determinar la respuesta subjetiva (Perkins et al., 2016).

2.3 Percepción del oído humano para RBI.

Si bien comúnmente se dice que los seres humanos percibimos frecuencias hasta no menos de los 20 Hz, de hecho, es posible escuchar sonidos de frecuencia bastante más baja si el nivel de presión sonora (NPS) es lo suficientemente alto. El umbral de escucha para las frecuencias bajas sigue una curva que aumenta mientras la frecuencia disminuye (Moller & Pedersen, 2004). Por debajo de los 20 Hz es posible que los sonidos pierdan sus características

tonales y empiecen a ser percibidos como sonidos separados, incluso se puede hasta escuchar cada uno de los ciclos si el NPS lo permite. Subjetivamente se ha descrito que los tonos de baja frecuencias mayores a 20 Hz pueden sonar de una manera “tonal” y “fluido”, mientras que tonos entre 5 y 15 Hz son percibidos como “desiguales” o que parecen “saltos” y para frecuencias menores a 5 Hz se sienten como “soplos” (Yeowart et al., 1967).

Una de las formas en que es posible detectar el efecto de los infrasonidos sin que existan necesariamente altos niveles de presión sonora es a través de la modulación de frecuencias más altas. El desplazamiento del tímpano y los huesecillos producido por estímulos infrasónicos puede ser tan alto que la amplitud de sonidos de frecuencia mayor puede ser modulada por el infrasonido. De hecho, un estudio por Jurado y Marquardt (2018) sugiere que, por este mismo efecto, es difícil distinguir entre estímulos que contienen un verdadero infrasonido, y sonidos de amplitud modulada.

Es común escuchar que los sonidos de baja frecuencia e infrasonidos son percibidos principalmente por otros órganos o sistemas del cuerpo humano, fuera del oído. Sin embargo, un estudio por Yeowart y Evans (1974) demostró que el oído es el principal responsable de la audición en bajas frecuencias, al comparar el umbral de detección para sonidos presentados directamente a los oídos y también a través de una “cámara de cuerpo entero”, en donde se encontró que el umbral es bastante similar en las dos situaciones. Otro estudio (Landstrom et al., 1983) más reciente ha mostrado que los umbrales de audición para frecuencias de 4 Hz y 20 Hz son de 110 dB y 90 dB respectivamente, y que la sensación a través de vibración puede ser percibida desde 20 dB encima del umbral.

Por debajo de los 40 Hz las ondas que viajan por la cóclea llegan al ápice y la presión diferencial es desviada a través del helicotrema, reduciendo marcadamente la sensibilidad debajo de esta frecuencia (Jurado & Marquardt,

2016) y se demuestra claramente que el helicotrema tiene un impacto sobre la forma en que el oído percibe bajas frecuencias.

El nivel de *loudness* también se comporta de manera especial en frecuencias bajas e infrasonidos. Algunos estudios mencionan que este aumenta considerablemente más rápido que en sonido de frecuencias mayores. Para 4 Hz se tienen datos de que con una diferencia de 1 dB es suficiente para pasar de “inaudible” a “definitivamente detectable”. Esto se evidencia en las curvas isofónicas, en donde los niveles de frecuencias bajas se encuentran mucho más juntos.

2.3.1 Curvas isofónicas de audición.

Las curvas isofónicas son medidas del NPS, presentadas frecuentemente, para las cuales un oyente percibe a tonos puros de diferente frecuencia con el mismo nivel de *loudness*. Los niveles de *loudness* se miden en fonos (*phon* en inglés) y se dice que dos tonos de diferente frecuencia tienen el mismo nivel en fonos cuando se perciben con un *loudness* igual; esto no necesariamente significa que deben tener el mismo NPS. De esta manera, por ejemplo, un sonido de NPS de 80 dB a 30 Hz puede tener *loudness* menor a uno de la misma intensidad, pero de 3000 Hz. Estas curvas fueron planteadas por primera vez por Fletcher y Munson en 1933, sin embargo, se han estandarizado después de mucha investigación llegando a ser unificado en la ISO 226:2003 en donde se establecen los niveles de sonoridad equivalentes para el rango de 20 Hz a 20 kHz.

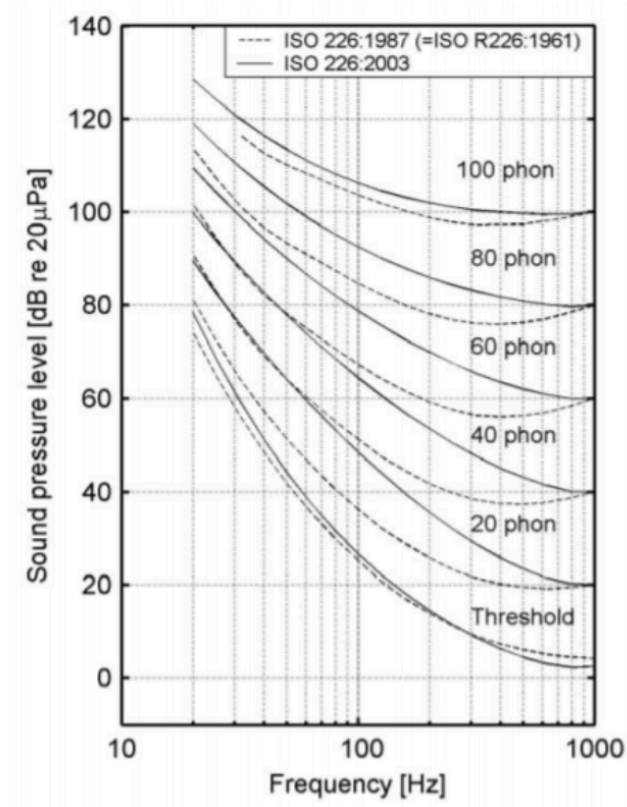


Figura 3. Curvas de igual sonoridad según la normativa ISO 226:2003 (línea sólida) e ISO 226:1987 (línea cortada).

Tomado de (Moller & Pedersen, 2004).

Varios intentos se han hecho por establecer los valores de estas curvas para frecuencias por debajo de los 20 Hz. Jurado et al. (2017) midieron las curvas para niveles de *loudness* de 30, 50 y 70 fonos en un rango de frecuencias de 10 a 250 Hz, obteniendo las curvas que se ven la figura 4. Para niveles de 50 y 70 fonos, se presenta una región de transición no-monótona entre 40 y 100 Hz, que se manifestaba como una caída entre 40 y 60 Hz, y un pico entre 50 y 80 Hz.

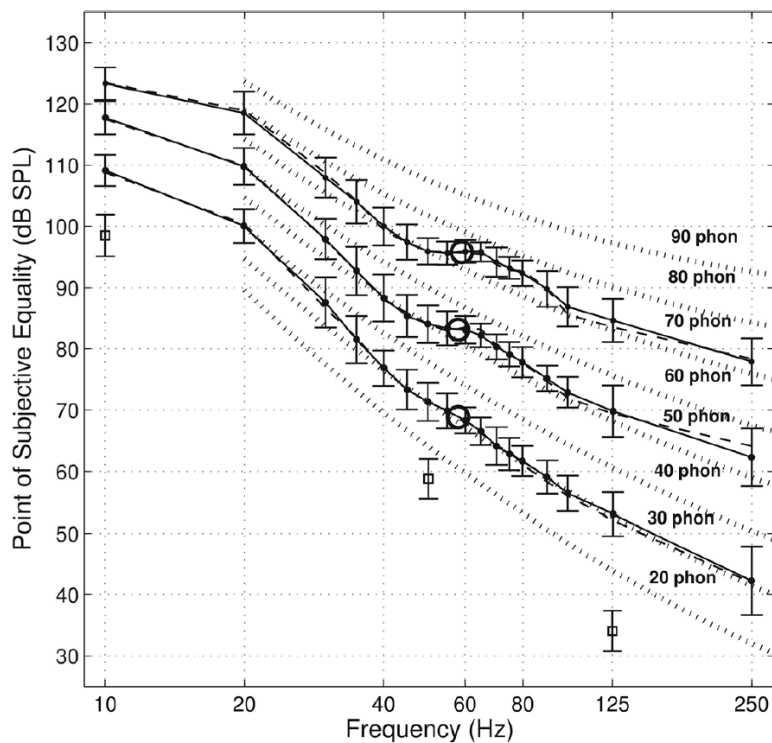


Figura 4. CIS para frecuencias encima de 10 Hz.

Tomado de (Jurado et al., 2017).

2.4 Integración temporal del sonido en el oído humano.

Desde hace tiempo se ha establecido que debajo de un tiempo crítico, sonidos de duración relativamente más corta requieren mayor intensidad para ser detectados o para tener un nivel de *loudness* que se perciba igual al de sonidos con duraciones mayores. A este fenómeno se lo conoce como integración temporal y el mecanismo exacto de su funcionamiento todavía no ha sido bien descrito, sin embargo, se sabe que participan procesos periféricos (relacionados a la cóclea), y también procesos centrales del cerebro. Existen varios modelos de integración temporal planteados, sin embargo, dos han sido los más ampliamente utilizados: el modelo exponencial y el modelo de *power function*.

El modelo exponencial fue planteado por Plomp y Bouman (1959) y viene dado por la siguiente expresión.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{(1 - e^{-t/\tau})}$$

Ecuación 1. Ecuación que describe el modelo exponencial de integración temporal en el oído humano, en donde I es la intensidad en el umbral, I_0 es la intensidad en el umbral para estímulos de larga duración, t es el tiempo de duración del estímulo y τ es una constante de tiempo.

Usando el modelo descrito por la Ecuación 1, se predice un decrecimiento del umbral de 3 dB cada vez que se duplica la duración del estímulo. Sin embargo, varias investigaciones (Garner, 1947; Poulsen, 1981) sugieren que para duraciones muy cortas (menores al 100 ms) la pendiente puede ser un poco mayor a 3 dB, lo que indica que la integración temporal podría involucrar más de una constante de tiempo.

Por otro lado, el modelo de *power function* (Green *et al.*, 1957) viene dado por la siguiente ecuación.

$$It^m = C$$

Ecuación 2. Expresión para la definición del modelo de *power function* en donde I es la intensidad en el umbral, t es el tiempo de duración del estímulo, C es una constante, y m es el exponente de la función o la pendiente.

Otros modelos se han ido desarrollando para poder evaluar el efecto de la integración temporal. Viemeister y Wakefield (1991) han planteado el modelo de *multiple-looks* o de múltiples eventos, que indica que la integración temporal no involucra una integración larga, sino que considera que los estímulos son muestreados a una velocidad muy alta y que estas muestras son guardadas y pueden ser procesadas de manera selectiva.

Diferentes estudios han probado que para sonidos que están compuestos de múltiples pulsos idénticos, el umbral de detección disminuye cuando aumentan el número de pulsos. Sin embargo, también se ha mostrado que es importante la duración de los espacios de silencio, pues cuando los espacios son muy cortos el umbral para un par de pulsos varía en comparación al umbral para un pulso. Sin embargo, esta dependencia de la duración de los silencios parece tener relevancia solo hasta duraciones de pocos milisegundos y, pasado este tiempo, los espacios de silencio dejan de tener importancia.

2.4.1 Tiempos críticos

Se define como tiempo crítico, o duración crítica, a la duración necesaria de un estímulo para que el umbral y el punto de igual sonoridad ya no presenten cambios significativos a nivel perceptual. Este tiempo ha demostrado ser dependiente de la frecuencia, y es menor a 1000 ms. Es decir, pasados los 1000 ms el nivel de *loudness* necesario para identificar un sonido deja de decrecer, esto al menos para tonos con una frecuencia mayor a 100 Hz, pues no existe información acerca de tiempos críticos para frecuencias menores.

2.4.2 Integración temporal en bajas frecuencias.

Poca investigación existe acerca del procesamiento temporal en bajas frecuencias, e información para frecuencias menores a 20 Hz es casi inexistente. Jurado et al., (2020) han analizado el efecto de la duración de los estímulos en el umbral de detección y nivel de *loudness* para frecuencias de 4, 16 y 32 Hz, determinando que para las frecuencias más altas el tiempo crítico es similar al planteado por la literatura y se estabiliza pasando los 1000 ms, mientras que el tiempo crítico en 4 Hz sí varía y no llega a estabilizarse hasta más de 4000 ms. Este fenómeno podría explicarse por el hecho de que en sonidos tan bajos como 4 Hz se puede percibir cada uno de los ciclos y perceptualmente se interpretan como eventos separados. Tomando esto en cuenta, es posible que la integración

temporal para estímulos inferiores a 16 Hz pueda estar relacionada con la integración temporal en los trenes de pulso.

2.5 Percepción del oído humano para estímulos de amplitud modulada.

La capacidad de las personas de detectar sonidos de amplitud modulada sinusoidal (SAM) varía con la frecuencia de modulación. Un tono de 1000 Hz con una amplitud modulada al 100% atraviesa tres áreas de sensación dependiendo de la frecuencia de modulación: en frecuencias muy bajas (máximo 20 Hz) se siente cómo la sonoridad va subiendo y bajando, esto se conoce como efecto de fluctuación (*fluctuation strenght*) y tiene un máximo cuando la frecuencia de modulación es de 4 Hz. Por encima de esta región se presenta una nueva sensación definida como “aspereza” (*roughness*) y su máximo efecto se siente cerca de los 70 Hz. Mientras la sensación de aspereza va disminuyendo al subir la frecuencia de modulación, aumenta la sensación de tres tonos diferentes sonando a la vez. Este efecto es casi imperceptible hasta los 150 Hz y se hace mucho más notorio mientras aumenta la frecuencia de modulación (Zwicker & Fastl, 1999).

2.5.1 Fuerza de fluctuación (*fluctuation strength*)

Puesto que la fuerza de fluctuación es una sensación que se puede considerar separado de otras sensaciones, son útiles valores tanto absolutos como relativos. Se ha definido un punto fijo como un tono de 1 kHz a 60 dB con una modulación del 100% a una frecuencia de modulación de 4 Hz que producido 1 vacil. En la Figura 5 se presenta información obtenida de sonidos de banda ancha de amplitud modulada (AM BBN), tonos puros de amplitud modulada (AM SIN) y tonos puros de frecuencia modulada (FM SIN).

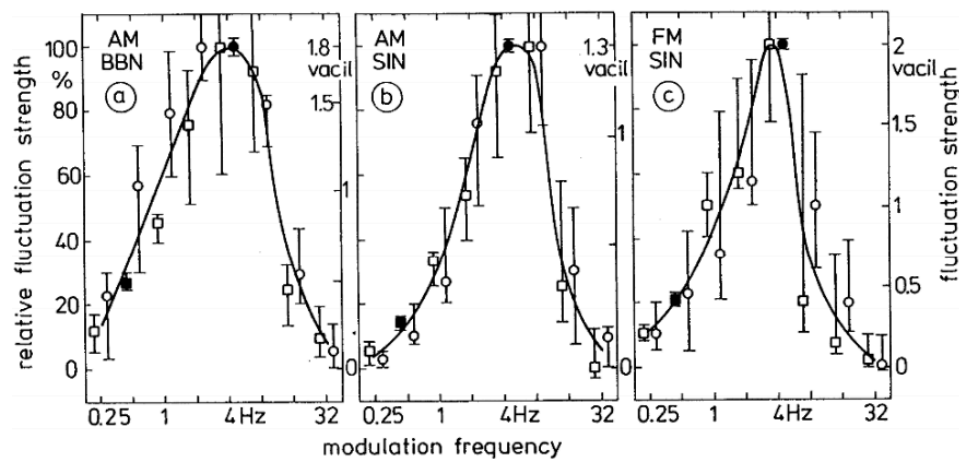


Figura 5. Niveles de *fluctuation strength* para sonidos AM de banda ancha (izquierda), tonos puros modulados AM (centro) y sonidos con modulación FM (derecha), en función de la frecuencia de modulación. El eje vertical representa el nivel medido en vacil.

Tomado de (Zwicker & Fastl, 1999).

Con esta información se ve que la fuerza de fluctuación tiene de una forma característica de pasa-banda y tiene su punto máximo en 4 Hz. Esto quiere decir que a esta frecuencia de modulación se tiene una larga fuerza de fluctuación así sea en banda ancha o banda corta o para modulación de frecuencia o de amplitud. El máximo de fuerza de fluctuación también tiene relación con la velocidad normal del habla que es de 4 sílabas por segundo, lo que corresponde a una frecuencia de 4 Hz. Esto parece indicar la excelente correlación entre el habla y el sistema auditivo.

2.5.2 Sensación de aspereza (*roughness*)

El fenómeno de aspereza se da por los cambios relativamente rápidos producidos por la modulación en frecuencias de un rango entre 15 y 300 Hz. Se ha establecido un valor de referencia como 1 asper, que es el *roughness* que produce un tono de 1 kHz a 60 dB modulado al 100% por una frecuencia de modulación de 70 Hz. Para la determinación del *roughness* es importante, aparte

de la frecuencia de modulación, también el nivel de modulación (o profundidad) que tiene una señal. Al igual que la fuerza de fluctuación, la curva de aspereza con respecto a la frecuencia de modulación tiene una forma tipo pasa-banda con su máximo en 70 Hz.

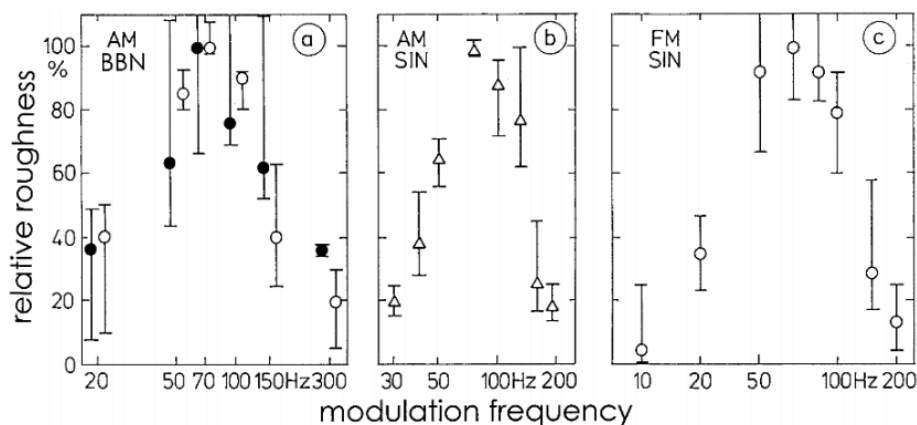


Figura 6. Niveles de aspereza para sonidos AM de banda ancha (izquierda), tonos puros modulados AM (centro) y sonidos con modulación FM (derecha), en función de la frecuencia de modulación. El eje vertical representa el nivel medido en asper.

Tomado de (Zwicker & Fastl, 1999).

Con la figura 6 se ve que para cualquier tipo de estímulos el máximo se encuentra cerca de los 70 Hz, y pasados los 300 Hz la sensación de aspereza ya es casi inexistente. Es sabido también, que el nivel con que se percibe esta sensación varía en función de la frecuencia del carrier. En la figura 7 se presentan curvas de carriers de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz mostrando como varían los niveles de aspereza (medidos en asper) en función de la frecuencia de modulación. Se ve que el máximo es alcanzado por 1 kHz en una frecuencia de modulación de 70 Hz, sin embargo, para frecuencias de carrier más bajas como, por ejemplo, 125 Hz el máximo se logra cerca de los 30 Hz y no llega ni siquiera a 0.5 de aspers.

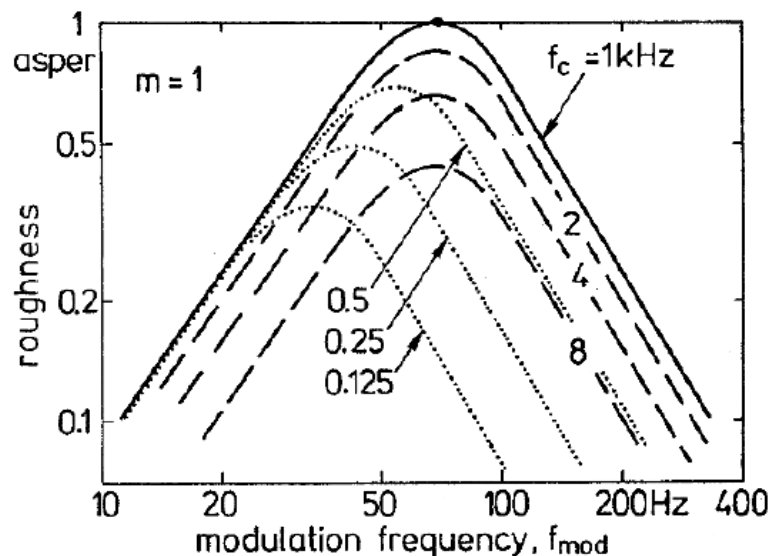


Figura 7. Asperidad en tonos de amplitud modulada al 100% con diferentes curvas de frecuencia carrier. En el eje horizontal se presenta la frecuencia de modulación, y en el eje vertical la sensación de asperidad medida en asper.

Tomado de (Zwicker & Fastl, 1999).

2.6.3 Función de transferencia de la modulación temporal.

Se sabe que el sistema auditivo tiene una resolución temporal limitada y no percibe cambios si estos ocurren en un lapso de tiempo muy corto. La función de transferencia de la modulación temporal es una función empírica que relaciona la capacidad de distinguir la modulación de amplitud sinusoidal con respecto a la frecuencia de modulación de las señales (Viemeister N. , 1979). Esta función tiene una forma de filtro pasa bajo en donde la frecuencia de corte, o frecuencia crítica de modulación, muestra la frecuencia de modulación necesaria que permite discriminar entre una onda modulada y una no-modulada. Los resultados de estos análisis ubican a esta frecuencia de corte entre 40 y 70 Hz, con una pendiente de 3 a 6 dB por octava. Esta frecuencia de corte permite estimar una constante de tiempo de integración de aproximadamente 2 o 4 ms,

sugiriendo que es el tiempo mínimo que se necesita para que el sistema auditivo pueda identificar modulaciones.

2.7 Sistema visual humano.

El sistema visual se encarga de detectar e interpretar información de la luz para generar una representación del ambiente que rodea al sujeto. Las imágenes que se observan están hechas de luz que se refleja sobre los objetos, la cual entra a los ojos a través de las pupilas. Dentro del ojo, la córnea refracta la luz en la retina, en la parte posterior del ojo, la cual está cubierta con millones de células sensibles a la luz (bastones y conos). Los conos son responsables por la visión en condiciones de luz (durante el día) y la percepción de color, mientras que los bastones para visión nocturna. La retina convierte la luz en señales eléctricas que llegan al cerebro a través del nervio óptico, en donde se genera una imagen. Los conos y bastones podrían considerarse similares a las células ciliadas, pues permiten transformar información que ingresa por un órgano sensorial (ojos u oídos) y convertirla en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por el cerebro. Se sabe que existen conos azules, verdes y rojos, siendo los conos azules los más sensibles, pero los que se encuentran en menor cantidad en el ojo humano (Williamson & Cummins, 1983), esto provoca que el sistema resulte, de manera general, más sensible ante tonos entre verde y amarillo (Robinson & Schmidt, 1984). Mientras disminuye el nivel de luz, la percepción de luz se ve más marcada por los bastones, que se guían por la cantidad de luz y no por el rango de colores, siendo los bastones células fotorreceptoras mucho más sensibles que los conos.

2.7.1 Procesamiento temporal visual en los seres humanos.

El sistema visual en los seres humanos procesa información en dos campos: espacial y temporal. La resolución temporal hace referencia a la capacidad de discriminar cambios de luminancia a lo largo del tiempo. Esta habilidad viene limitada por el tiempo requerido para recolectar y procesar información, y los

estímulos intermitentes pueden ser percibidos como estímulos separados solo si se presentan a una velocidad por debajo de cierto umbral que se define como Frecuencia Crítica de Fusión de Parpadeo (CFF) (Eisen-Enosh et al., 2017). Se ha reportado que esta frecuencia suele ser en situaciones normales, hasta 35 Hz (dependiendo de muchos factores) y se ha mostrado ser más marcada para frecuencias entre 9 Hz y 15 Hz (van der Tweel & Verduyn Lune, 1965). La analogía auditiva para la CFF es la Frecuencia de Fusión de Fluctuaciones, que define la frecuencia mínima de interrupción para la cual se dejan de percibir fluctuaciones y se percibe un sonido continuo (Colman, 2008).

La CFF puede verse afectada por algunos factores físicos como la intensidad, color, tamaño o contraste del estímulo, así como también la edad de los sujetos. Esto sin contar con condiciones médicas de los sujetos como encefalopatía, esclerosis múltiple o cataratas (Landis, 1954). Este valor es útil para medir la forma básica la función temporal de la visión humana. Si bien la resolución temporal del sistema visual puede ser estudiada a través de respuestas electrofisiológicas (como electroretinogramas o potenciales evocados por estímulos parpadeantes), es más común que se apliquen métodos psicofísicos para establecer valores de CFF.

Algunas analogías se han planteado para relacionar estímulos visuales y auditivos. Por ejemplo, se ha mencionado que el ruido blanco fluctuante funciona como análogo al parpadeo visual (David, 1955). En el mismo estudio anterior, se han reportado que la CFF parece ser más alta que para estímulos visuales. Por otro lado, los estímulos de luz de amplitud modulada suelen indicar la intensidad de la luz en función del tiempo (al contrario de amplitud en función del tiempo para estímulos auditivos) (CIE, 2016).

2.7.2 Factores que intervienen en la resolución temporal visual.

Una de las mediciones más comunes para estudiar la resolución temporal visual es la de CFF, y se sabe que varios factores pueden afectar estos procesos, tanto

externos como el nivel de luz, ángulo de incidencia, intensidad de la fuente de luz, distancia a la fuente, así como también anomalías cognitivas o patologías de la visión. Se ha analizado la influencia de diferentes factores en la sensibilidad de modulación ante estímulos visuales y se ha encontrado que para la visión periférica (es decir, visión fuera de un punto fijo de visualización) existen muy pequeñas variaciones de la sensibilidad con respecto al ángulo de incidencia, aunque no la bibliografía lo considera (Tyler, 1987).

Por otro lado, una de las teorías más famosas sobre la influencia de la luminancia en la percepción de estímulos parpadeantes viene dado por la ley de Ferry Porter, en donde se indica que la CFF es proporcional al logaritmo de la luminancia. Se ha confirmado la influencia de la intensidad de la fuente de luz en el CFF, notando que en niveles bajos de luminancia el CFF llega a ser hasta de 5 Hz, mientras que en niveles de luminancia altos se alcanzan casi los 60 Hz (Hecht & Verrijp, 1933). El mismo estudio ha determinado la influencia del color de la fuente de luz y la intensidad, notando que la diferencia que existe entre baja intensidad y alta intensidad es mucho más marcada para longitudes de onda que tienden al violeta, que para aquellas que tienden al rojo.

2.8 Métodos psicofísicos.

La psicofísica ha sido definida como el estudio científico de la relación entre estímulo y sensación (Geschneider, 1997), es decir, el análisis de la experiencia o comportamiento de un sujeto ante la variación de las propiedades de un estímulo. Muchas aplicaciones modernas dependen fuertemente en mediciones de umbral o detección de señales, las cuales son posibles a través de métodos psicofísicos (Boff et al., 1986). Se han aplicado estos métodos para estudiar todos los sentidos (visión, oído, tacto, sabor y olor), y las áreas que más se han investigado con estos principios son: umbral absoluto y umbral de discriminación. El objetivo principal de la psicofísica es establecer relaciones cuantitativas entre la presentación de un estímulo y la magnitud de la reacción por parte del sujeto.

Existen algunos tipos de modelos que suelen ser usados en experimentos psicofísicos, estos suelen ser respuestas de “Sí/No”, en donde se le presenta un estímulo al sujeto y este debe responder si “sí” lo detecta o “no” lo detecta, por ejemplo. También existen del tipo “*forced-choice*”, en donde se presentan dos estímulos y se le pregunta al sujeto, por ejemplo, en cuál de las dos opciones percibió al estímulo. Este tipo de respuestas de “*forced-choice*” puede tener variaciones y presentarle distintos estímulos y distintas alternativas dependiendo de la necesidad del experimento.

2.8.1 Obtención del umbral absoluto.

Moore (2012) define al umbral absoluto (UA) de un sonido como el nivel mínimo para detectar este sonido en la ausencia de cualquier otro sonido externo. Dos formas de determinar el UA son mencionadas por Moore, una denominada MAP (*minimum audible pressure*) o presión mínima audible, en donde se usa un audífono insertado dentro del canal auditivo en un oído (monoaural), y otro denominado MAF (*minimum audible field*) o campo mínimo audible, en donde el sonido es enviado a través del aire por ondas sonoras, generalmente en cámaras anecóicas y de manera binaural.

Fechner (pionero en la psicofísica) planteó 3 métodos experimentales para determinar los umbrales absolutos o de diferenciación y verificar sus hipótesis. Estos métodos son: método de los límites, método de ajuste y método de los estímulos constantes. Estos métodos permiten tanto la obtención del umbral absoluto (UA), como del umbral de diferenciación (UD). Para encontrar el valor de intensidad del UA es necesario tener datos previos acerca de los valores alrededor de los cuales fluctuaría el umbral, esto usando datos piloto o información de experimentos ya realizados anteriormente. Se inicia el experimento colocando la intensidad en un punto dentro del rango y el sujeto debe ir aumentando su valor o disminuyéndolo hasta que el sujeto encuentre el nivel en que logra percibir el estímulo. Tras varios intentos, se debe calcular un índice estadístico de tendencia central y ese ha de ser el valor del UA. El método

mencionado anteriormente corresponde al método de ajuste propuesto por Fechner, pues es el sujeto quien va alterando la intensidad del estímulo y no el experimentador. Esto logra muchas veces que sea más motivante y llamativo para los sujetos (Aznar, 2009).

2.8.2 Procedimientos adaptativos en métodos psicofísicos.

Se conoce como un método adaptativo a aquel en el cual el nivel del estímulo está determinado por respuestas a estímulos anteriores (Levitt, 1970). Este concepto ha sido utilizado desde hace muchos años con el objetivo de adaptar ciertos aspectos de un experimento con base en las respuestas o información que se va recolectando. Una clase de experimento es ampliamente usada en la psicoacústica y es aquel en que los niveles de los estímulos son determinados por datos anteriores.

Uno de los procedimientos adaptativos más simples es el *simple up-down procedure* o método de escalera en el que el nivel del estímulo que se va a presentar al sujeto es reducido cierto nivel (*step size*) si el sujeto respondió correctamente ante el estímulo anterior, y, de igual manera, si respondió de manera equivocada, el nivel aumenta en el mismo *step size*. El problema del *simple up-down procedure* es que solo sirve efectivamente para estimar valores en la región X_{50} y no se podrían obtener puntos fuera de esta región.

Para mejorar la determinación de estos puntos se han planteado diferentes procedimientos transformados o *transformed up/down procedure*, en donde el nivel de la intensidad del estímulo no disminuye cuando el sujeto responde correctamente una vez, sino cuando, por ejemplo, respondió correctamente dos veces seguidas, esto se conoce como *1-up/2-down procedure* y tiene un porcentaje de convergencia de 70,7% a diferencia del 50% de convergencia del procedimiento simple. Para mayor exactitud está también el *1-up/3-down procedure* en donde el nivel disminuye después de tres respuestas correctas y tiene una convergencia de 79,4%.

3. METODOLOGÍA.

La investigación consta de 4 experimentos que se realizaron: el Experimento 1 determina el umbral de detección en función de la duración del estímulo, el Experimento 2 permite detectar la frecuencia a la que los sujetos empiezan a discriminar IS como eventos separados, el Experimento 3 detecta la frecuencia de modulación a la que se empiezan a discriminar estímulos de AM como eventos separados y el Experimento 4 utiliza estímulos visuales para encontrar la frecuencia de fluctuación a la que se detecta claramente el cambio de estado de un LED parpadeante. Los dos primeros experimentos fueron llevados a cabo dentro del Laboratorio de Acústica de la Universidad de las Américas, usando sus equipos e instalaciones con la misma cadena electroacústica. Los dos últimos experimentos se realizaron en una sala adaptada para la toma de datos con una cadena electroacústica diferente a la usada en los dos primeros experimentos.

La cadena utilizada para los experimentos tomados en laboratorio (Experimentos 1 y 2) consta de un estímulo generado en MATLAB, en la computadora del laboratorio de acústica (HP ProDesk), con una conversión digital/analógica generada por una interfaz Fireface 802 a una frecuencia de muestreo de 48 kHz. Los Anexos 1 y 2 muestran el código para la reproducción de los estímulos utilizados en el experimento 1 y 2. Para el Experimento 1 los estímulos son enviados a través de un sistema Etymotic ER-10C, cuyo canal de reproducción se encuentra conectado a la salida de la interfaz. Por otro lado, para la reproducción de infrasonidos (necesario para el experimento 2) se utilizó un altavoz adaptado, formado de un driver DAYTONAUDIO DA270-8 conectado a través de una sonda al adaptador de espuma del Etymotic, con esto se logra la reproducción de infrasonidos y frecuencias bajas con bajo nivel de distorsión armónica. Se utiliza también un micrófono GRAS 46AO para la calibración del sistema, conectado, igualmente, a la interfaz.

3.1 Experimento 1: Medición de umbral de audición para tonos modulados en función de la duración.

La medición de umbral de detección consiste en encontrar el nivel (refiriéndose a NPS) mínimo necesario para que el oído detecte un sonido. El uso de estímulos de distinta duración permite comprobar cómo este factor afecta a la detección de sonidos. Esto se logra utilizando un método de 2-AFC (*2 alternative forced choice*), es decir, un método de elección entre dos alternativas. Se le presentan al sujeto dos escenarios y se le pregunta en cuál de las dos alternativas escuchó el estímulo.

Este método consta de un proceso adaptativo *3-down-1 up*, que permite reducir el efecto que puedan tener en los resultados respuestas aleatorias que puedan presentar los sujetos, pues este proceso adaptativo no baja el nivel del estímulo presentado a menos que se tengan 3 respuestas correctas seguidas. Los niveles iniciales de los estímulos son de 15 dB por encima de la curva establecida por la ISO 226 (2003) para 60 fonos. Los saltos del nivel de intensidad son inicialmente de 3 dB, después de una reversión el salto cambia a 2 dB, y después de otra reversión baja a 1 dB. El experimento termina automáticamente después de un número específico de reversas (12) y se repite una vez más. El resultado final de cada medición es la media de las últimas 8 reversas que el sujeto tuvo durante el test. Si la diferencia del resultado de las dos mediciones varía en más de 3 dB se toman datos una vez más, y el resultado es el promedio de las 3 mediciones.

Para llevar a cabo el experimento se lleva al sujeto dentro de una cabina audiométrica adaptada dentro del Laboratorio de Acústica de la UDLA. A continuación, se coloca dentro de un oído (medición monoaural) un audífono Etymotic (que funciona como micrófono y fuente de sonido), y junto a la esponja que se inserta en el oído se coloca también la parte final de la sonda que lleva el sonido desde la fuente para infrasonido, esto haciendo un pequeño agujero en la esponja. Después de realizar la calibración (proceso que se explicará más adelante), se inicia la prueba con el sujeto, a quién se le entrega un control de

respuestas con 3 luces verdes y 3 botones amarillos dispuestas de forma horizontal, como se muestra en la Figura 8. Este control está conectado a la computadora y, a través del microcontrolador que lleva dentro, se envían las respuestas del sujeto ante los estímulos que se le presentan. Inicialmente se le pide al sujeto que, cuando se encuentre listo, presione cualquiera de los 3 botones, esto dará paso a que se prenda la primera luz (del lado izquierdo), y, después de cierto tiempo, se ha de encender la tercera luz (del lado derecho). A continuación, el sujeto ha de responder en cuál de las situaciones escuchó al estímulo: cuando se encendió la luz del lado izquierdo, o del lado derecho. Después de que el sujeto responda, se enciende la luz correspondiente a la respuesta correcta y se pasa al siguiente estímulo y el proceso se repite.

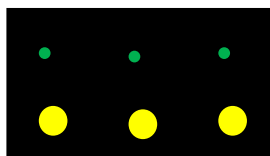


Figura 8. Gráfica del control de respuestas.

Las características de duración y frecuencia de modulación de los estímulos fueron elegida al azar. Los tiempos y frecuencias analizadas en el test han sido presentados en la Tabla 1. Los estímulos son tonos con un carrier de 1000 Hz modulados a diferente frecuencia de modulación, en MATLAB (revisar Anexo 3 para extracto de código usado para la modulación AM). La distribución de los tiempos y frecuencias de modulación fue como la que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Condiciones para las frecuencias analizadas en el experimento.

f (Hz)	Duración (ms)								
	83	125	167	250	500	1000	2000	4000	8000
24	x	x	x	x	x	x	x	x	
12	x		x	x	x	x	x	x	x

8	x	x	x	x	x	x	x
4		x	x	x	x	x	x

Los tests duran aproximadamente 1 hora por frecuencia, excepto en los casos en que se miden hasta 8000 ms, pues alarga considerablemente la duración del test. Se tomaron los datos en 3 sesiones diferentes para cada sujeto; cada sesión se midieron 2 frecuencias con descansos cortos cada 30 minutos de prueba y un descanso largo cada hora. Antes de realizar las pruebas con cada sujeto se realizó una audiometría, para encontrar si existe algún sujeto con problemas de audición que pudiesen alterar los resultados o presentar resultados variados. El test ha sido aplicado a 4 personas, todos con escucha normal y sin problemas de audición, cognición o neuronales reportados.

3.2 Experimento 2: Discriminación de percepción de tono continuo y tono compuesto por eventos separados para RBI.

El objetivo de este test consiste en encontrar la frecuencia que debe tener un estímulo para que el oído empiece a distinguir entre un tono puro y un tono “compuesto por eventos separados”. El procedimiento de este test utiliza un método 2-AFC en las que, dependiendo de las respuestas del sujeto, se sube o se baja la frecuencia del estímulo. Se ha usado la forma más simplificada de procedimiento adaptativo (*1-down 1-up*) con saltos variables.

En este caso dependiendo de la respuesta del sujeto se aumenta o se disminuye la frecuencia del tono puro que es el estímulo, iniciando con una frecuencia de 40 Hz y después empieza a variar en saltos de 4 Hz, después del primer cambio de estado cambia a 2 Hz, y después a 1 Hz. Todos los estímulos tienen una duración de 3 segundos. El experimento termina automáticamente igual que el Experimento 1. Si la diferente del resultado de las dos mediciones varía en más del 3 Hz, se toman datos una vez más, y el resultado es el promedio de las 3 mediciones.

El experimento se llevó a cabo en las mismas condiciones que el experimento anterior, sin embargo, los estímulos son diferentes, pues en este caso se usan tonos puros (a diferencia de los tonos modulados del experimento anterior) de diferente frecuencia, empezando por 40 Hz y un mínimo de 5 Hz. Para dar inicio al test se coloca el audífono dentro de un oído del sujeto, (para este test es indispensable el uso de la fuente de infrasonido) y se le entrega el control de respuestas. Después de terminar la calibración se encienden los tres botones del control de respuestas y se espera a que el sujeto presione cualquier botón para dar inicio al test. Se inicia con el primer tono (40 Hz) y después, dependiendo de las respuestas del sujeto, va subiendo o bajando la frecuencia del estímulo (ver Anexo 4 para código de configuración de los parámetros de los estímulos).

En este test los botones tienen una función diferente a la función del test anterior, ahora se le pide al sujeto que presione el botón izquierdo cuando escuche que el estímulo tiene una característica continua, y el botón derecho cuando escuche un tono cortado (esto es, que le parezca compuesto por varios tonos que se puedan distinguir claramente como tonos separados). Por otro lado, se le da la opción al sujeto de presionar el botón del centro cuando este seguro de haber encontrado el punto exacto en que se empieza a distinguir entre un tono continuo y un tono cortado, esto dará paso al fin del test. Si el sujeto nunca presiona el botón del centro, el experimento termina automáticamente y se realiza un promedio como el del Experimento 1.

Cada medición dura aproximadamente 20 minutos, así que dependiendo si se necesitan 2 o 3 mediciones el test puede tener una duración total de 1 hora, incluidos los descansos. Estos datos fueron tomados a 3 sujetos, hombres, saludables y sin condiciones reportadas.

3.3. Experimento 3: Discriminación de modulaciones como eventos separados en función de la frecuencia de modulación para estímulos auditivos con carriers mayores a 100 Hz.

El objetivo de este test consiste en encontrar la frecuencia de modulación que debe tener un estímulo para que el oído empiece a distinguir entre un tono continuo y un estímulo que se perciba como si estuviese conformado por eventos separados y pueda distinguir claramente cada uno de los tonos. Este test utiliza la misma metodología que el Experimento 2, solo que ahora se utilizan tonos de amplitud modulada en lugar de tonos puros.

Dependiendo de la respuesta del sujeto se aumenta o se disminuye la frecuencia de modulación del estímulo y la configuración de las frecuencias usadas en el Experimento 2 es el mismo para este caso, solo que ahora ha de variar la frecuencia de modulación del estímulo. Se han realizado dos condiciones de medición para este experimento, utilizando dos frecuencias carrier (125 Hz y 1000 Hz) y una duración de 3 segundos en todos los casos. El experimento termina automáticamente después de 12 reversas y se repite hasta tener un total de 4 mediciones por sujeto.

Para este experimento se les ha dado a los sujetos un tiempo mínimo de 30 minutos de entrenamiento para que se familiaricen con la interfaz de respuestas y entiendan a lo que se refiere el test con “tono continuo” y “eventos separados” (ver Anexo 5 para ejemplo de la interfaz gráfica). En la fase de entrenamiento se les ha pedido a los sujetos que recorran todo el rango de frecuencias de modulación (desde el máximo de 40 Hz hasta el mínimo de 5 Hz) con el objetivo de que pasen por todas las fases de fluctuación que se presentan en función de la frecuencia de modulación. En el Anexo 6 se presenta un ejemplo del tono inicial utilizado para la etapa de entrenamiento. Se instalaron en el programa dos botones de entrenamiento adicionales que permiten reproducir un tono continuo de una frecuencia de modulación relativamente alta de 40 Hz y otro de frecuencia muy baja (5 Hz) cuya sensación es claramente la que se define como “eventos

separados”. Con estos dos últimos botones se ha dado la opción de que puedan identificar los dos estados de manera directa.

Las indicaciones que se les dio a los sujetos antes de empezar el experimento fueron que inicialmente bajen la frecuencia de modulación hasta que se perciba claramente un tono formado por eventos separados, una vez logrado esto se les pide que suban nuevamente hasta que el tono tenga fluctuaciones muy rápidas y repitan este proceso hasta que el programa se detenga o hasta que identifiquen exactamente el punto en que se cambia de tono fluctuante a eventos separados y presionen el botón de “Stop”. Debido a la subjetividad del test, para simplificar la búsqueda de los sujetos, se les pidió que encuentren “el punto en que puedan identificar cada pulso como un tono separado, como si quisieran contarlos individualmente”, dejando claro que no se busca que cuenten el número de fluctuaciones. (revisar Anexo 7 para indicaciones puntuales dadas a los sujetos)

Después del entrenamiento inicial se da un tiempo entre 2 a 5 minutos a modo de descanso. Iniciado el experimento, después de la segunda medición, se le da otro descanso de 2 a 5 minutos a cada sujeto. Este test tiene una duración total de aproximadamente 1 hora incluido el tiempo destinado para el entrenamiento inicial y los descansos. En el Anexo 8 se puede revisar un ejemplo de la pantalla de resultados del test en MATLAB, en donde se presentan las frecuencias de modulación correspondientes a las respuestas de los sujetos.

Este experimento se realizó en condiciones diferentes a los experimentos anteriores. Se utilizó un estímulo generado en MATLAB en una computadora MacBook Pro, modulado a frecuencias variables utilizando el *toolbox* de PsychPortAudio, reproducido a través de una conversión digital-analógica con una frecuencia de muestreo de 48000 Hz utilizando una interfaz Focusrite Scarlett 2i2. El sujeto escucha el estímulo a través de un audífono Shure SE535 colocado en su oído derecho (escucha monoaural). El control de respuestas físico utilizado en los experimentos anteriores ha sido reemplazado por una interfaz gráfica generada en MATLAB que simula a los 3 botones del control y

tienen el mismo funcionamiento que en el test anterior (ver Anexo 9 para imagen de la interfaz de respuestas utilizada en experimentos 3 y 4). Al estudiar una característica subjetiva del sonido, y no utilizar estímulos de naturaleza infrasónica que puedan verse afectados marcadamente por niveles de ruido de fondo, no es necesario el *apparatus* utilizado para los dos primeros experimentos.

Se ha aplicado el test a un total de 9 sujetos, sin embargo, 2 fueron descartados por no lograr diferenciar entre un tono fluctuante y “eventos separados” después del entrenamiento dejando un total de 7 sujetos. De los 7 sujetos se presentaron 4 mujeres y 3 hombres, de un rango de edad entre 17 a 42 años con una mediana de 23.5 años. Para el test de 125 Hz, 3 sujetos realizaron 4 repeticiones, 1 sujeto realizó 3 repeticiones y 3 sujetos, solamente 2 repeticiones. Para el test de 1000 Hz, 2 sujetos realizaron 4 repeticiones, 2 sujetos realizaron 3 repeticiones y 3 sujetos realizaron solo 2.

3.4. Experimento 4: Discriminación de eventos separados en función de la frecuencia de fluctuación para estímulos visuales.

El objetivo de este test consiste en encontrar la frecuencia de fluctuación que debe tener un estímulo para que el ojo humano empiece a distinguir entre una luz LED encendida y una luz compuesta por eventos separados. El procedimiento de este test es igual al utilizado en los experimentos 2 y 3 exceptuando que ahora las respuestas del sujeto afectan a la frecuencia con la cual se enciende la luz LED. Los tamaños de los saltos son idénticos a los utilizados en el Experimento 3. El estímulo que se utiliza en este experimento es emitido por un diodo de luz LED cuya intensidad está modulada de manera sinusoidal a frecuencias especificadas y se reproduce por 3 segundos.

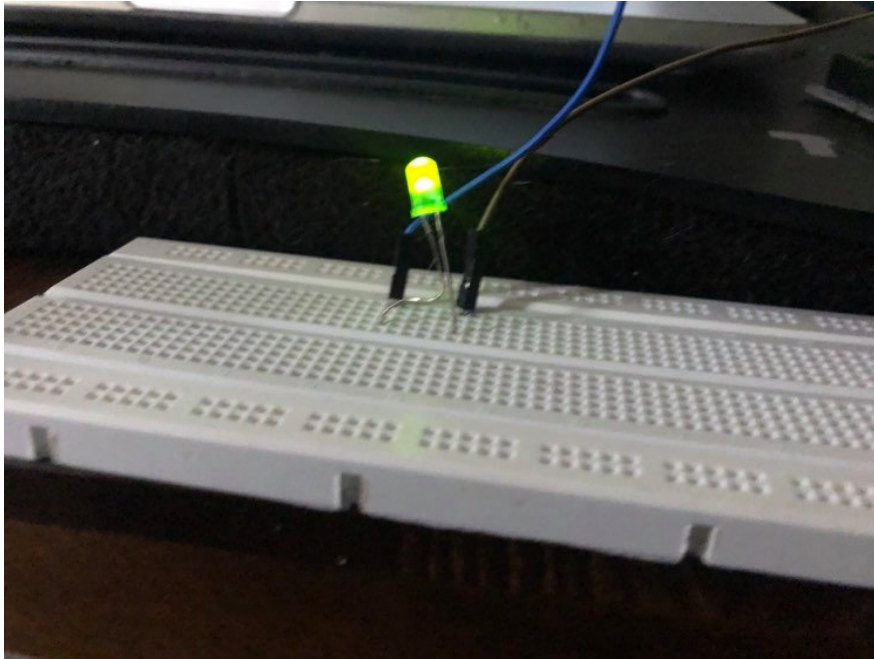


Figura 9. Luz LED encendida, conectada a ProtoBoard, con la que se ha emitido el estímulo.

Se utilizó un estímulo generado en MATLAB en una computadora MacBook Pro, modulado a frecuencias variables utilizando también el programa de Arduino que sirve para comunicar al computador con el LED que presenta al estímulo. El programa de MATLAB se encarga de recopilar los datos, las respuestas, decidir si subir o bajar o frecuencias y envía la frecuencia del estímulo al programa Arduino, el cual reproduce el estímulo utilizando una combinación de encendidos y apagados con la función de *Pulse Width Modulation* (PWM) que permite determinar la intensidad con la que se ha de encender el LED (ver Anexo 10 para código de Arduino).

Arduino usa valores de ciclo entre 0 (totalmente apagado) hasta 255 (totalmente encendido), esto permite que la intensidad de la luz tenga una forma que asemeje a la que se produce por una modulación AM, pues irá aumentando y decreciendo en el tiempo. Tomando en cuenta que Arduino debe pasar de un valor de 0 a 255 en cierto tiempo (correspondiente al período del estímulo que se ha de presentar), se ha trabajado en base a *delays* o pausas para lograr que

el tiempo que se tarda en cambiar de totalmente apagado a totalmente prendido sea el correcto. Esto se logró inicialmente segmentando al estímulo en 3 estados, uno de subida, en donde varía desde 0 a 250 (se ha limitado a 250 en lugar de 255 por simplicidad matemática, esto no representa mayor variación en la intensidad de la luz), otro de bajada en donde varía de 250 a 0, y otro de apagado, en donde debe permanecer apagado durante el mismo tiempo que se tardó en realizar el ciclo de subida y de bajada. De esta manera, un ciclo completo debe comprender de un tiempo t de subida, un tiempo t de bajada y un tiempo $2t$ de apagado.

Arduino logra pasar de 0 a 255 en menos de 1ms, lo que quiere decir que a base de retardos se debe lograr que el tiempo t sea el correcto para cada frecuencia. Primero se han recudido el número de pasos para llegar a “totalmente prendido” de 250 a 5, tomando saltos de 50; es decir el ciclo de PWM inicia en 0, el siguiente paso es de 50, el siguiente de 100 hasta llegar a 250. Esto permite que se tengan los tiempos mínimos necesarios para lograr que se reproduzcan las frecuencias de fluctuación necesaria, pues Arduino permite un retardo mínimo de 1ms, y si se hacen 250 saltos de 1 ms, se tardaría un mínimo de 250 ms en cumplir un ciclo de subida, que para frecuencias altas es mucho tiempo. Por esto se hacen 5 saltos de 50 y se aplica un pequeño delay a cada salto. Es decir, empieza en 0, espera un tiempo dt y cambia a 50, espera otro tiempo dt y cambia a 100 y así hasta llegar a 250, en ese momento empieza a bajar con la misma modalidad. De esta manera se puede asegurar que el programa reproduce el estímulo deseado a la frecuencia que se requiere, aunque puede tener una variación máxima de 70 ms en frecuencias más altas (30 – 40 Hz). El programa de Arduino recibe de MATLAB el dato de la frecuencia necesaria y lo utiliza para calcular el tiempo dt .

El sujeto tiene al computador, con la misma interfaz de respuestas del experimento anterior, ubicado frente a él y percibe el estímulo a través de una luz LED de color verde que está ubicado delante del computador sobre un *Protoboard* blanco a una distancia aproximada de 1 metro de los ojos del sujeto.

Para este experimento se le pide al sujeto que busque el punto (frecuencia de fluctuación) en el cual puede identificar claramente cuando el LED se prende o se apaga; se dejó claro que no se busca cuándo la luz parpadea, pues todos los estímulos son parpadeantes, sino que busquen el punto en que “pudieran contar cada uno de los pulsos si fuera necesario”, aunque se dejó claro que no se les pide contar, pues esto no forma parte del experimento (ver Anexo 11 para indicaciones sobre este Experimento).

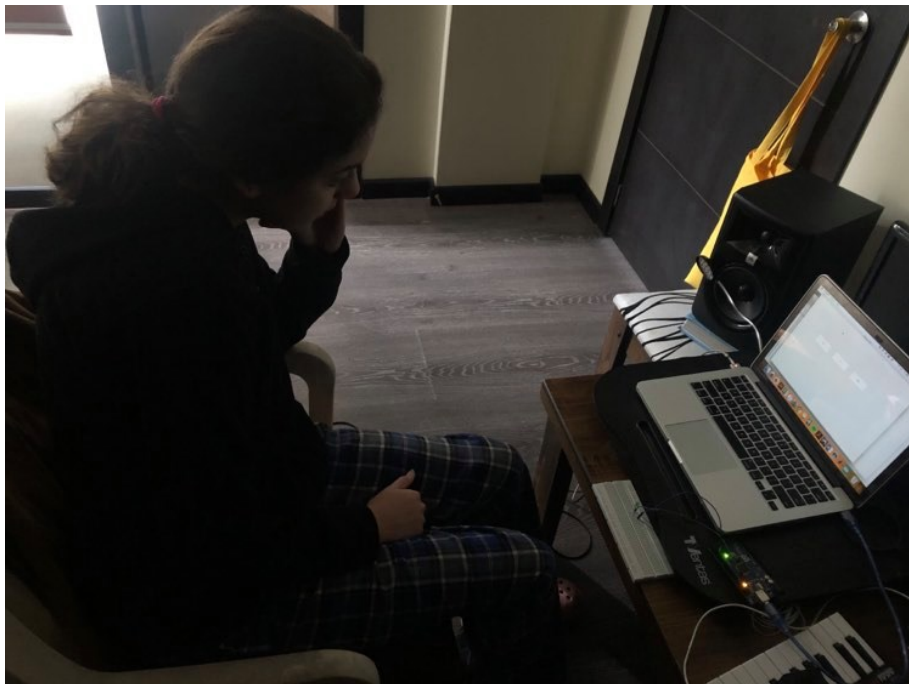


Figura 10. Configuración general durante medición con el sujeto, la luz LED en frente y el computador con la pantalla de respuestas.

Se da a los sujetos un período de entrenamiento similar al Experimento 3. Para esto se les sugirió que presionen el botón que hace que la frecuencia de fluctuación baje hasta que lleguen al límite inferior y pasen por todos los estados de parpadeo del LED. Esto permite que identifiquen que inicialmente la luz se ve como si estuviera encendida por 3 segundos, y mientras bajan la frecuencia de fluctuación se ve cada vez más parpadeante hasta que se diferencian claramente como eventos separados. Después del período de entrenamiento se toma la primera medición que tiene una duración de aproximadamente 7

minutos. En total este test dura aproximadamente 1 hora (incluyendo el entrenamiento), dependiendo de si se tomaron 2 o 3 mediciones.

Las condiciones para todas las mediciones han sido similares; se buscó que todas sean realizadas en el mismo rango de tiempo (entre las 15:00 y 18:00), con las cortinas y puertas cerradas para evitar interferencia de la luz exterior, con un nivel de iluminación bajo de aproximadamente 100 lux (tomando en cuenta que la única fuente de luz externa provenía de la ventana y la habitación contaba con medidas de 3 metros de largo, por 2.5 de ancho y 3 de alto), y a la misma distancia entre el LED y los ojos del sujeto (1 metro). Todas las mediciones han sido utilizando la luz LED en el centro del punto de fijación de cada sujeto, es decir, no se ha medido visión periférica. El experimento fue aplicado sobre 7 personas sanas (4 mujeres, 3 hombres) en un rango de edad entre 17 y 40 años, con una mediana de 23 años, sin condiciones neurológicas conocidas.

3.5 Calibración acústica del sistema.

El proceso de calibración de sistema tiene como objetivo principal asegurarse constantemente de que los niveles con los que se está trabajando en las distintas mediciones es siempre el mismo. Este procedimiento consta de dos partes, una inicial que se realizaba una vez al día, antes de las mediciones con los sujetos, y otra parte que se realizaba junto con los sujetos una vez que tenían el sistema armado para asegurar que dentro de su oído existe un NPS constante. Esto se llevaba a cabo usando un software de calibración dentro de MATLAB y haciendo uso del calibrador CESVA CB006 y el micrófono de medición GRAS 46AO. Este proceso se realizó para todas las mediciones del experimento 1 y 2.

El proceso de calibración ha sido similar al utilizado por Jurado., et al (2017). Se ha usado un micrófono Etymotic ER10C para las mediciones de calibración. Inicialmente, se ha calculado la respuesta en frecuencia del micrófono Etymotic grabando señal de ruido blanco por 20 segundos con este micrófono (y la fuente

de infrasonido acoplada al sistema) y después con el micrófono de medición GRAS. Se usa una FFT para transformar las respuestas de los micrófonos al dominio de la frecuencia y poder realizar el proceso de deconvolución para obtener la respuesta de frecuencia compleja del micrófono Etymotic.

Inicialmente, se mide la sensibilidad del micrófono GRAS utilizando su calibrador encendido dentro de la cabina audiométrica (misma en la que se ubica a los sujetos) y conectando este micrófono a la interfaz Fireface. El programa de MATLAB se encarga de grabar la respuesta del micrófono en 1 kHz a 94 dB y comprobar si efectivamente se recibe este nivel o la diferencia que pueda existir. Para la segunda parte de la calibración inicial se retira al calibrador CESVA y ahora se utiliza una jeringa adaptada para colocar de un lado el audífono Etymotic y en el otro lado se coloca el micrófono GRAS para emitir el ruido de calibración.

La tercera parte del proceso de calibración acústica consiste en reproducir el tono de calibración a través del altavoz miniatura y medir su respuesta usando el micrófono Etymotic.

Una calibración individual para cada sujeto, cuando ya se les ha colocado el audífono en el oído, ha sido aplicado para asegurar los niveles en el canal auditivo. El proceso se logra midiendo la respuesta del altavoz miniatura con el micrófono Etymotic y comparando este con la calibración general del sistema. Este procedimiento se realiza al inicio de cada prueba y después de los descansos.

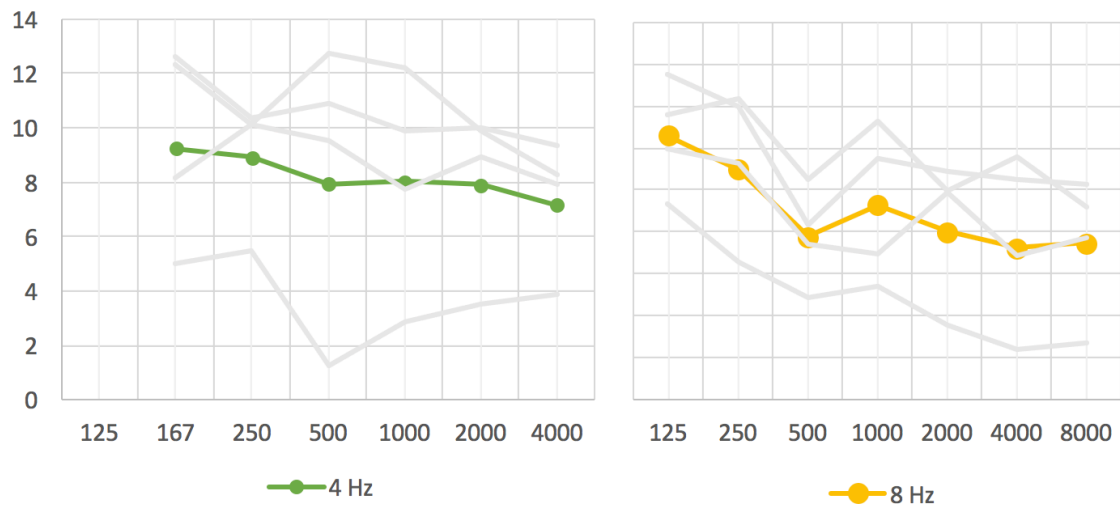
4. RESULTADOS.

4.1 Resultados de umbral de detección de tonos AM en función de la duración de los estímulos.

En la figura 13 se presentan las curvas de umbral de detección para las frecuencias de 4 Hz, 8 Hz, 12 Hz y 24 Hz, en función a la duración de los

estímulos, obtenidas a partir de todos los resultados de los diferentes sujetos. De manera general se cumple que los umbrales tienden a decrecer cuando incrementa la duración de los estímulos, como menciona la teoría y los modelos de integración temporal. Se notan también pendientes más pronunciadas para duraciones menores a 500 ms en todas las frecuencias de modulación.

a)



b)

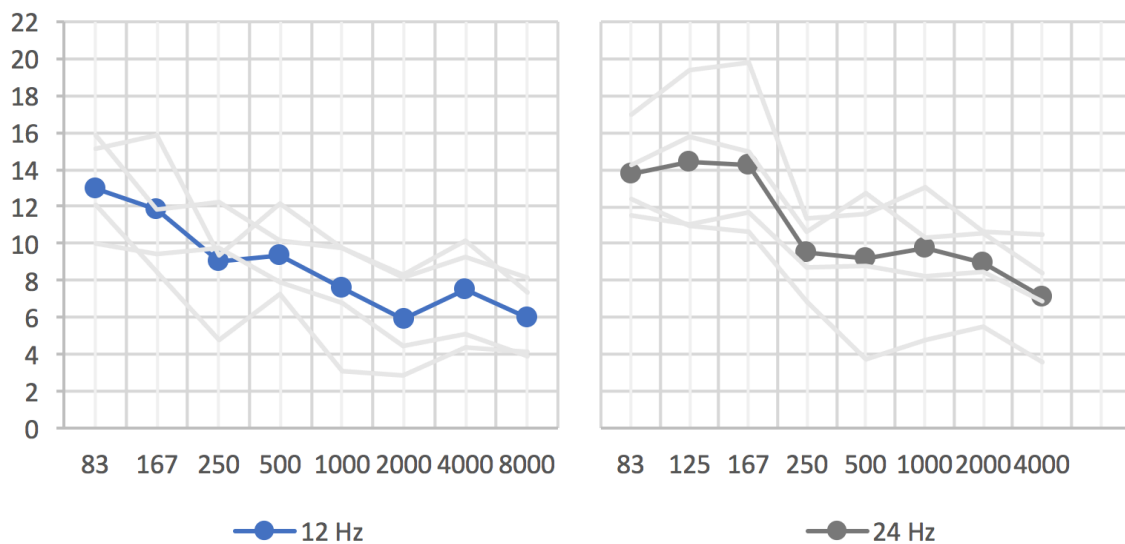


Figura 11. Promedios obtenidos de los 4 sujetos para umbral de detección de sonidos AM en función a la duración de los estímulos. Se presentan valores de umbral para 4 Hz y 8 Hz (en sección a) y para 12 Hz y 24 Hz (en sección b). Las líneas de color representan el promedio para cada frecuencia de modulación, y las líneas grises de fondo muestran los promedios de cada sujeto.

Para todas las frecuencias las curvas tienden a estabilizarse después de los 1000 ms, pues no se encuentran pendientes muy marcadas al pasar este tiempo. La media entre todas las frecuencias de modulación de la diferencia de nivel entre 250 y 1000 ms es de 1.06 dB, mientras que, entre 1000 y 4000 ms es de 0.81 dB. Se ve un cambio en pendiente, lo que quiere decir que para las duraciones iniciales hay un decrecimiento más marcado conforme aumenta la duración, sin embargo, pasados los 1000 ms, se ve que la pendiente se vuelve un poco más plana.

Se han comparado también las diferencias de niveles de umbral entre duraciones de 1000 ms y 4000 ms para todas las frecuencias de modulación analizadas del test (4, 8, 12, 24 Hz). Con los promedios de cada sujeto para las diferentes frecuencias se ha aplicado un análisis ANOVA de un factor encontrando que no existe diferencia significativa entre las frecuencias de modulación usadas ($F = 1.03$, $p > 0.4123$), lo que quiere decir que las diferencias de nivel de 1000 ms y 4000 ms no tienen una variación significativa dependiendo de la frecuencia de modulación.

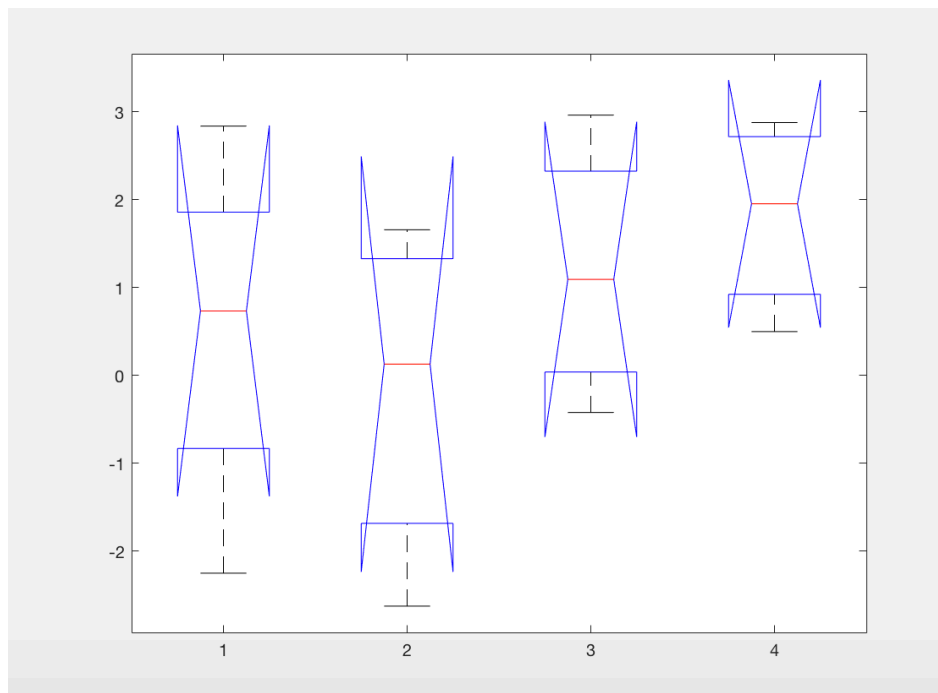


Figura 12. Tabla ANOVA en donde se analiza la relación de las pendientes entre 1000 ms y 4000 ms para frecuencias de modulación de 4 Hz, 8 Hz, 12 Hz y 24 Hz en orden de izquierda a derecha.

Si bien Heil et al., (2017) han mostrado que el número de eventos en un estímulo es determinante para el umbral de detección en trenes de tonos, esto no parece aplicar para tonos AM, pues las curvas para 4, 8, 12 y 24 Hz son bastante similares y no se ven afectadas por la frecuencia de modulación de los estímulos. Se ha mostrado que los umbrales para duraciones menores a 1000 ms tienden a decrecer con una pendiente mucho más marcada que para duraciones mayores, en donde ya se ven umbrales más nivelados para duraciones hasta los 8000 ms.

4.1.1 Comparación con infrasonido.

Resultados previos obtenidos con estímulos de baja frecuencias e infrasonidos presentados por Jurado et al., (2020) han mostrado que para tonos puros de 4 Hz los niveles de detección siguen disminuyendo y no parecen estabilizarse

incluso para duraciones mayores a 4000 ms, como para frecuencias mayores (> 16 Hz). El experimento realizado por el estudio anteriormente mencionado juntó los resultados del umbral de detección de infrasonidos para 4, 16 y 32 Hz en 5 sujetos con audición sana. En la Figura 15 se muestra una comparación de las dos curvas para la frecuencia de 4 Hz con el objetivo de comparar la similitud de sus pendientes.

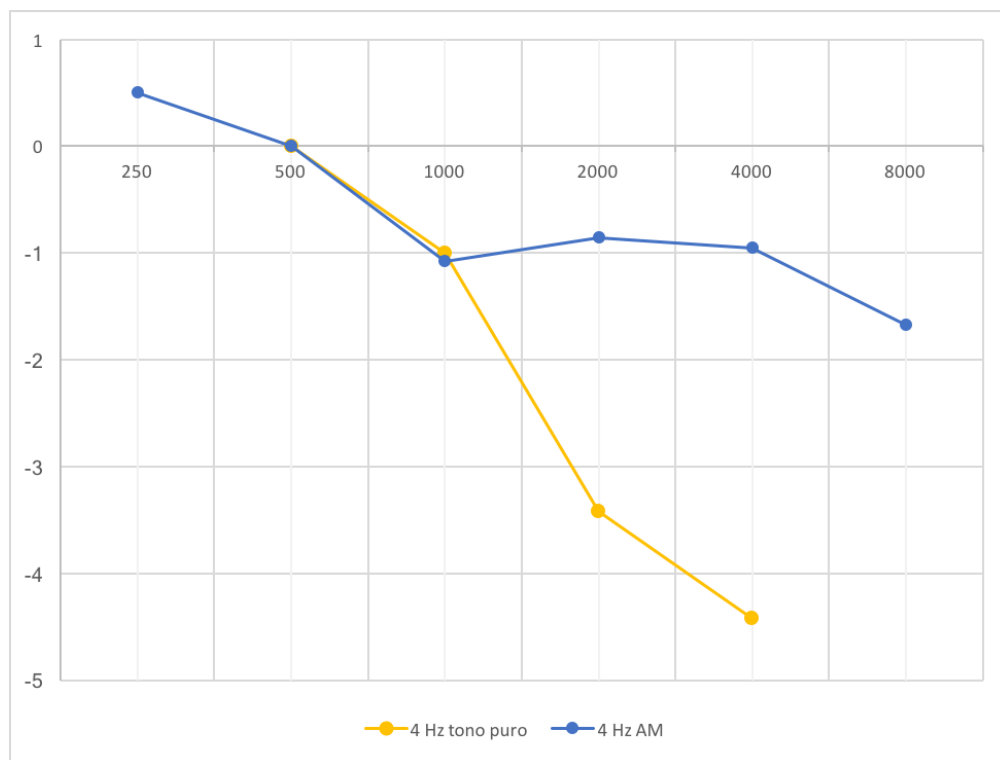


Figura 13. Comparación de las formas de las pendientes de las curvas promedio de nivel de detección de un tono puro de 4 Hz (amarillo) y un tono con un carrier de 1000 Hz y modulado AM a 4 Hz (azul). Los niveles han sido normalizados al valor correspondiente a 40 fonos (ISO 226, 200, para el tono AM; Møller and Pedersen, 2004, para el infrasonido)

La gráfica anterior muestra claramente una pendiente mucho más marcada en el infrasonido que para el estímulo AM. La pendiente entre 1000 y 4000 ms entre las dos pruebas tiene valores mucho más diferentes que cuando se comparan solamente estímulos AM; para el tono AM se ha visto que la diferencia del nivel

de los umbrales para duraciones entre 1000 y 4000 ms es de 0.51 dB, mientras que la diferencia promedio entre los diferentes sujetos para el tono puro de 4 Hz para el mismo rango de duraciones es de 3.43 dB, demostrando que el IS tiene una pendiente mucho más marcada que los otros tipos de estímulos. Esto sugiere que el fenómeno mostrado por Jurado et al., (2020) para 4 Hz es particular del infrasonido y no se evidencia un procesamiento parecido ni para tonos de amplitud modulada a baja frecuencia, ni para tonos del tipo tren de pulsos (analizados también por Jurado et al., 2020).

Se ha aplicado un análisis ANOVA tomando como factor la diferencia de niveles de cada individuo entre estas dos curvas (IS y AM) para duraciones entre 500 ms y 4000 ms. El análisis ha revelado que sí existe una diferencia significativa ($F = 16.48$; $p = 0.0019$) entre las diferencias de niveles, lo que prueba que no se pueden considerar iguales las dos curvas, y que los umbrales de detección para AM e IS son claramente diferentes, al menos para el caso de 4 Hz.

4.2 Resultados de discriminación de eventos separados en función de la frecuencia para tonos puros de baja frecuencia e infrasonidos.

La información preliminar que se ha obtenido sobre la discriminación de eventos separados a partir de estímulos auditivos de baja frecuencia permite estimar un rango en el que los sujetos perciben los sonidos de baja frecuencia e infrasonidos como sonidos con fluctuaciones a velocidad tan baja que perceptualmente parecen eventos separados. En la Figura 16 se presentan los datos promedio de cada sujeto junto con su desviación estándar y la media aritmética entre los tres resultados.

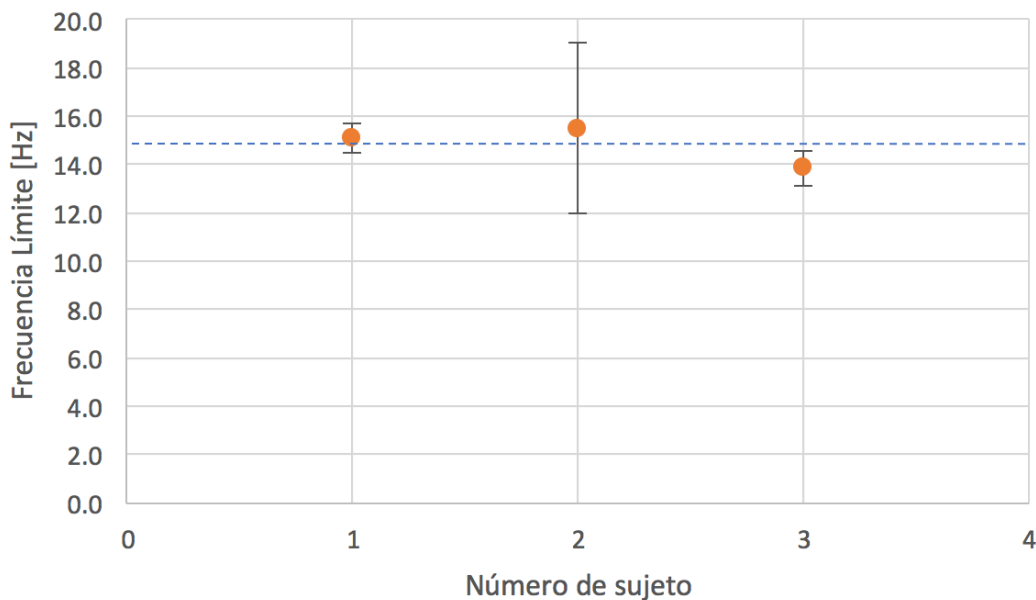


Figura 14. Frecuencia límite promedio para cada sujeto junto con su desviación estándar. La línea azul entrecortada representa la media de los tres sujetos.

La figura 16 muestra datos bastante similares entre sí, con una media de 14.8 Hz, mínimo de 13.8 Hz y máximo de 15.5 Hz. Estos datos muestran que los sujetos presentan un límite de percepción de eventos separados cerca de los 14.8 Hz, es decir, por debajo de esta frecuencia el oído empieza a percibir los infrasonidos como estímulos independientes. Si bien esta información es obtenida de una muestra pequeña, es útil para identificar valores de referencia alrededor de los cuales existe este límite de percepción, y la poca variabilidad de estos resultados permite tener un punto de partida para futuros análisis.

Estos límites revelan cierta similitud con percepción tonal de los infrasonidos. Por debajo de los 20 Hz desaparece la sensación tonal de los sonidos y se percibe discontinuidad y genera sensación de presión en el tímpano. Møller y Pederser (2004) también mencionan que incluso instrumentos musicales, como el órgano, están contruidos de manera que su límite inferior este sincronizado, como mínimo con 17 Hz. Por otro lado, un estudio realizado utilizando ruido provocado por los motores de los autos, ha encontrado que los máximos niveles

de cansancio, molestia y fatiga causados por ruido se presentan de manera más marcada para frecuencias por debajo de los 16 Hz (Ziaran, 2014), esto podría ser causado (aparte de factores ya conocidos como la gran carga energética que tienen los infrasonidos o los altos niveles de presión sonora que presentan), también por la percepción no-tonal que existe para infrasonidos por debajo del límite encontrado en esta investigación.

4.3 Resultados de discriminación de eventos separados en función a la frecuencia de modulación para estímulos auditivos.

En la Figura 17 se ven los resultados promedios de cada sujeto en este experimento junto con la gráfica de error (desviación estándar) entre todas las mediciones realizadas por cada sujeto.

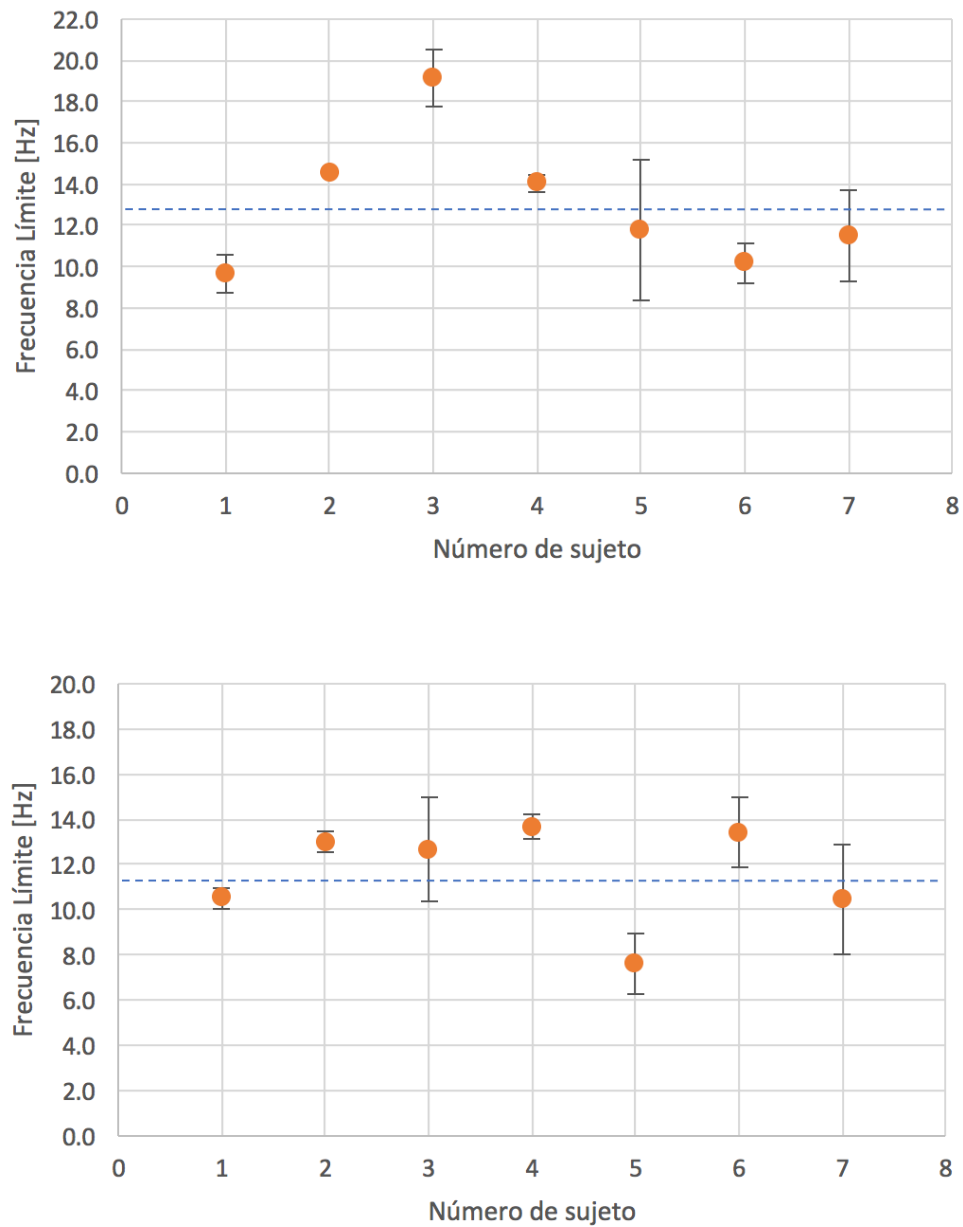


Figura 15. Promedios de cada sujeto para frecuencia carrier de 1000 Hz (arriba) y 125 Hz (abajo) junto con la desviación estándar correspondiente a cada sujeto. La línea azul horizontal representa el promedio global para cada frecuencia carrier.

La figura 17 muestra que los límites presentan variaciones entre los diferentes sujetos, por ejemplo, para el carrier de 1000 Hz se tiene una media de 12.98 Hz, un mínimo de 9.67 Hz (sujeto 1) y un máximo de 19.17 Hz (sujeto 3) con una

desviación estándar de 3.28. Para la frecuencia 125 Hz la media es de 11.61 Hz, un mínimo de 7.5 Hz (sujeto 5) y máximo de 13.67 Hz (sujeto 4) con una desviación estándar de 2.21. Sin embargo, si se comparan los resultados promedio para cada sujeto de las dos pruebas se ve que existen similitudes entre los límites para cada sujeto en la mayoría de los casos.

Se ha realizado un ANOVA de una vía entre los resultados promedios de cada sujeto tomando como factor la frecuencia *carrier* (125 y 1000 Hz), y se ha revelado que no existe una diferencia significativa entre las medianas dependiendo de la frecuencia ($F = 0.84$; $p > 0.37$), lo que quiere que la percepción de eventos separados no varía significativamente en función a la frecuencia del carrier, sino a la frecuencia de modulación, a diferencia, por ejemplo, de la sensación de aspereza que sí varía dependiendo de las frecuencia del carrier.

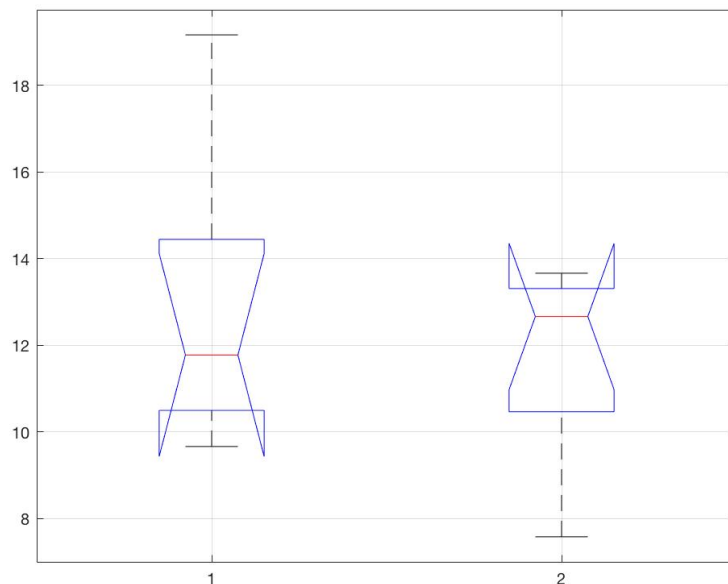


Figura 16. Tabla ANOVA relacionando los dos test que utilizan estímulos auditivos. La imagen de la izquierda representa al carrier de 1000 Hz y el de la derecha, al de 125 Hz.

Estos valores límites tienen relación con los reportados por Pressnitzer et al., (2001) para trenes de pulsos, pues los autores mencionan que para estos estímulos con frecuencia menores a 10 Hz es evidente la percepción de “eventos separados”. Por otro lado, existe cierta relación entre estos límites y la inteligibilidad del habla. Según un estudio por Foulke y Sticht (1969) la comprensión e inteligibilidad del lenguaje tiende a decrecer de manera marcada por encima de una velocidad de 275 palabras por minuto, lo que aproximadamente equivale a 9.2 sílabas por segundo (tomando en cuenta un promedio de 2 sílabas por palabra), lo que se corresponde con una envolvente temporal del habla de 9.2 Hz, un valor muy cercano al límite de detección de eventos separados encontrado en este estudio. Esto podría relacionar al procesamiento temporal de sonidos de amplitud fluctuante con la inteligibilidad del lenguaje.

4.3.1 Comparación con límites encontrados en infrasonidos.

Los resultados promedios presentados anteriormente pueden ser comparados con los límites encontrados para la percepción de eventos separados en infrasonidos. En la Figura 19 se presentan los promedios para las tres situaciones, juntos con las barras de desviación estándar.

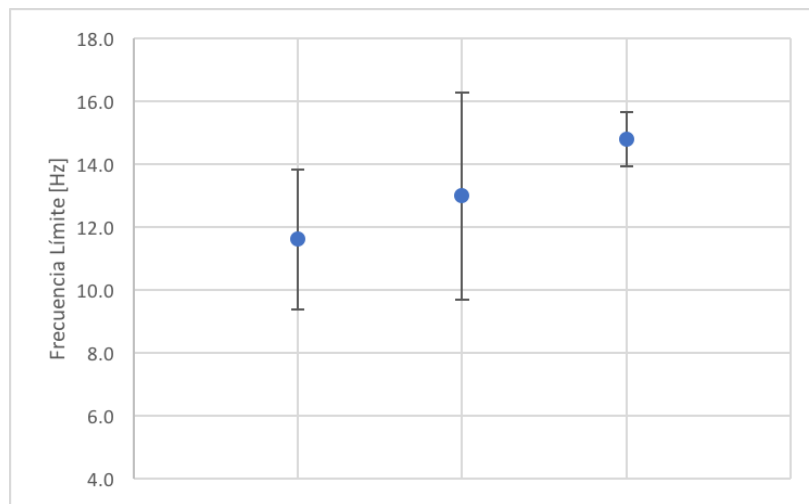


Figura 17. Frecuencias límites para cada prueba auditiva. Tono AM de carrier de 125 Hz (izquierda), carrier de 100 Hz (centro) e IS (derecha).

A partir de la gráfica anterior se sugiere que las frecuencias no varían mucho si se comparan los tonos AM con tonos puros infrasónicos. La diferencia máxima de frecuencia límite encontrada se da entre el tono puro y el tono con carrier de 125 Hz, que es de 3.2 Hz. Sin embargo, las variaciones no parecen ser significativas y se encuentran en el mismo rango.

Esta comparación permite asumir que existe relación en el procesamiento temporal para tonos modulados a baja frecuencia y para tonos puros por debajo de 20 Hz. Esto puede ser causado por la capacidad de diferenciar cambios de amplitud en un estímulo. Según Zwicker y Fastl (1999) la capacidad de identificar cambios de amplitud en función de la frecuencia de modulación se hace cada vez más pobre por encima de 10 Hz, lo que puede explicar por qué se requieren de frecuencias como las encontradas en estos resultados para poder percibir estímulos como eventos separados. En la Figura 20 se presenta el grado de modulación necesaria para captar cambios de amplitud en función a la frecuencia de modulación. Se puede ver un mínimo en 4 Hz (probablemente relacionado también con la sensación de *fluctuation strength*) y como por encima de 10-15 Hz el grado de modulación necesario es mucho mayor, hasta llegar a

un máximo cerca de 70 Hz (podría corresponderse con la sensación de aspereza).

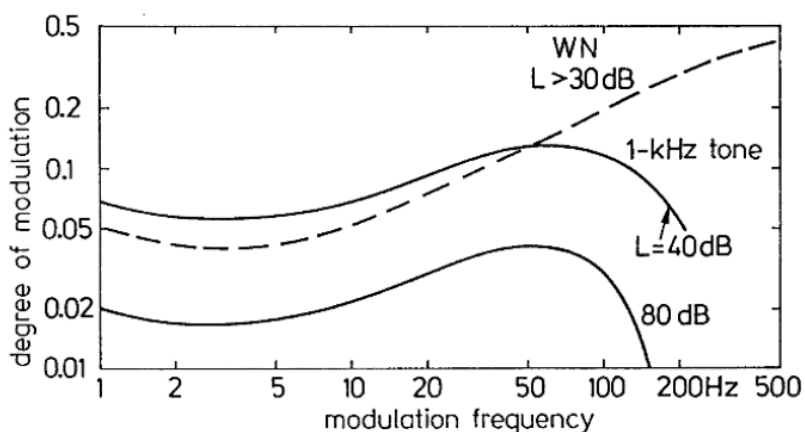


Figura 18. Nivel de modulación de amplitud necesario para identificar cambios en función a la frecuencia de modulación para tonos de 1 kHz (línea sólida) y para ruido blanco (línea cortada).

Tomado de Zwicker y Fastl (1999).

Debido a que la envolvente es la misma para tonos AM de modulación de 4 Hz y para tonos puros de 1S es posible que este sea el motivo de la relación y el procesamiento que permite la sensación de eventos separados.

4.3.1 Resultados con estímulos visuales.

Los resultados de este test para cada sujeto se presentan en la Figura 21 y se pueden diferenciar directamente resultados más bajos que en el test en que se utilizan estímulos auditivos. Los promedios de este test presentan una variación mucho menor entre los diferentes sujetos que en el caso del test auditivo, teniendo un mínimo de 5.72 (sujeto 4) Hz y un máximo de 9 Hz (sujeto 1), con una media de 6.85 Hz y una desviación estándar de 1.12.

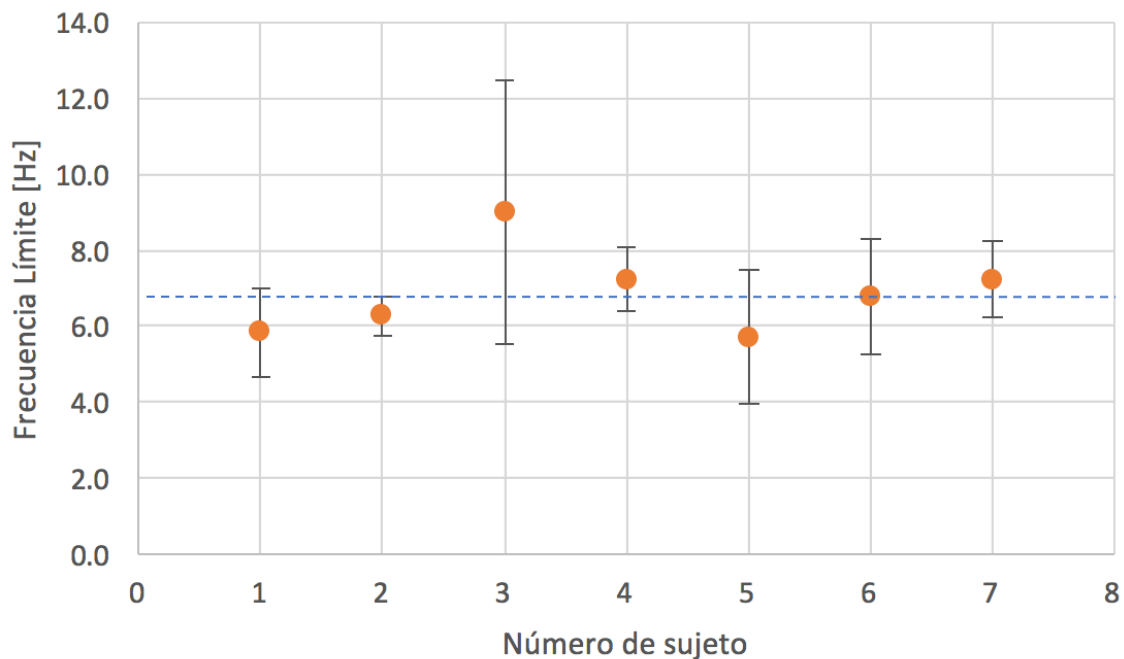


Figura 19. Resultados individuales para la prueba con estímulos visuales junto con su desviación estándar. La línea cortada representa la frecuencia promedio de todos los sujetos.

Con esta información se nota que los resultados para estímulos visuales son los que menos varían entre los diferentes sujetos, presenta una desviación menor, e individualmente también se ven variaciones más pequeñas si se compara con los resultados de estímulos auditivos modulados. Para la comparación y análisis de esta información se han reunido todos los datos en una sola gráfica, como se ve en la Figura 22. Aquí se nota que los resultados para estímulos visuales son menores a los límites para estímulos auditivos en todos los sujetos, sugiriendo un procesamiento temporal visual diferente al que realiza el sistema auditivo.

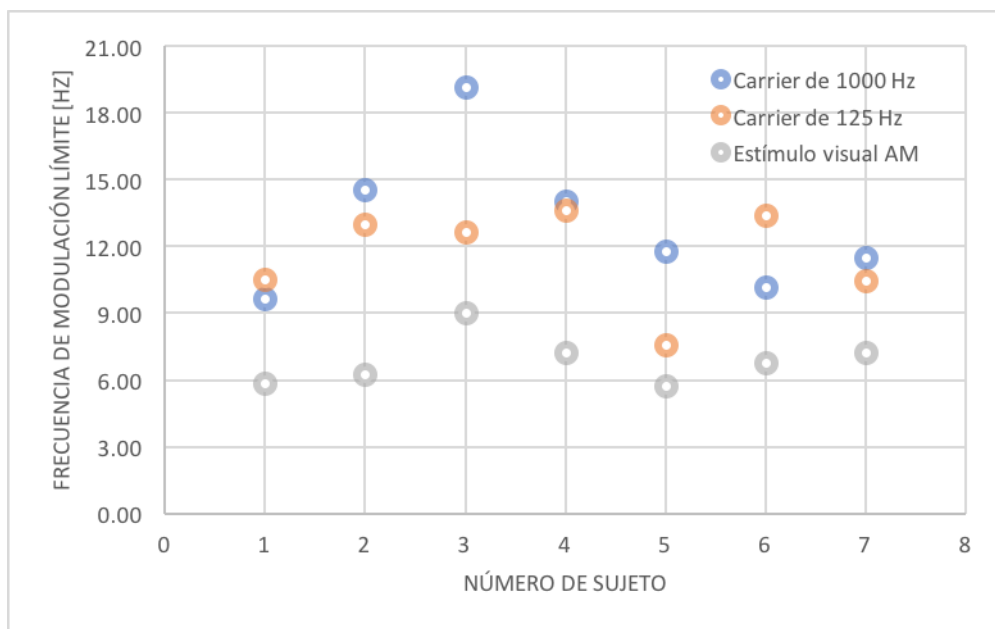


Figura 20. Resultados de los tests para discriminación de eventos separados para estímulos auditivos con frecuencia carrier de 1000 Hz y 125 Hz, y para estímulos visuales de nivel de intensidad fluctuante.

Los resultados anteriores muestran variabilidad entre cada test y cada sujeto, sin embargo, se ve cierta relación individual en un mismo sujeto; si bien los límites varían, los límites de un mismo sujeto para cada prueba parecen tener relación. Para evaluar estos resultados y la relación que pueda existir entre ellos se ha planteado un análisis de varianza (ANOVA) y de correlación (regresión lineal), partiendo de que inicialmente se identifica que, para sujetos con límites altos de detección de eventos separados en un test, también presenta límites altos en los otros test y viceversa.

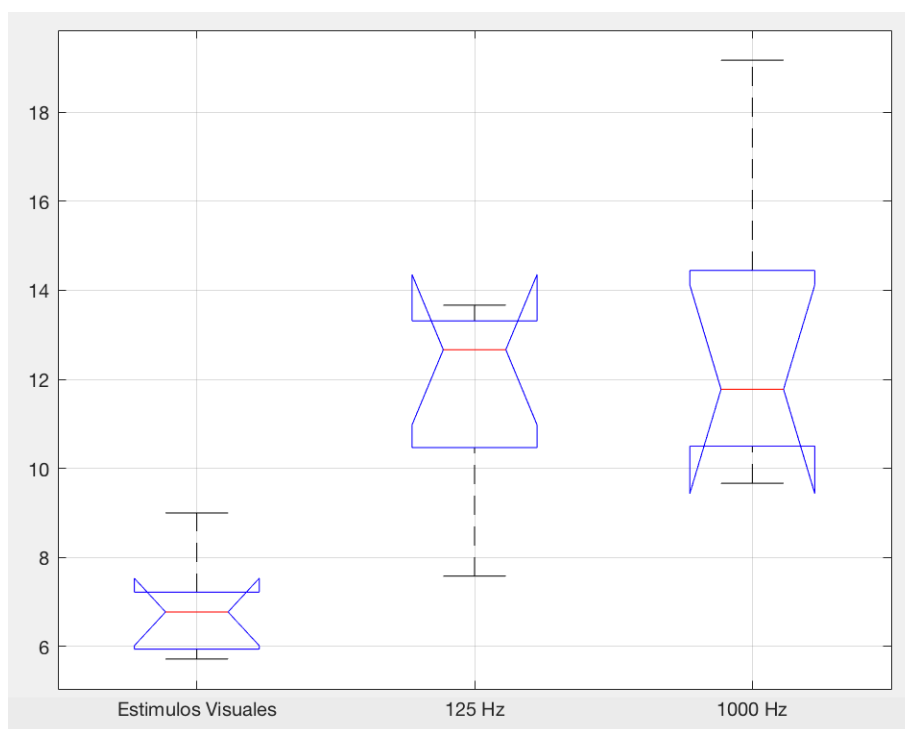


Figura 21. ANOVA de los 3 diferentes tests realizados. El test de estímulos visuales AM (izquierda), carrier de 125 Hz (centro) y carrier de 1000 Hz (derecha).

Se identifica a través del análisis ANOVA que sí existen diferencias significativas dentro del conjunto de datos ($F=12.82$; $p < 0.0003$), sin embargo, es posible también identificar que esta diferencia es causada por el tercer grupo, correspondiente al estímulo visual, a través de un análisis de comparación múltiple de medias realizado en MATLAB. En la Figura 24 se presentan los resultados del análisis, donde se identifica que el grupo correspondiente a los estímulos visuales presenta variaciones significativas en comparación con los otros dos grupos. Parece sugerir que existe una diferencia en la manera de procesar información temporal para estímulos visuales.

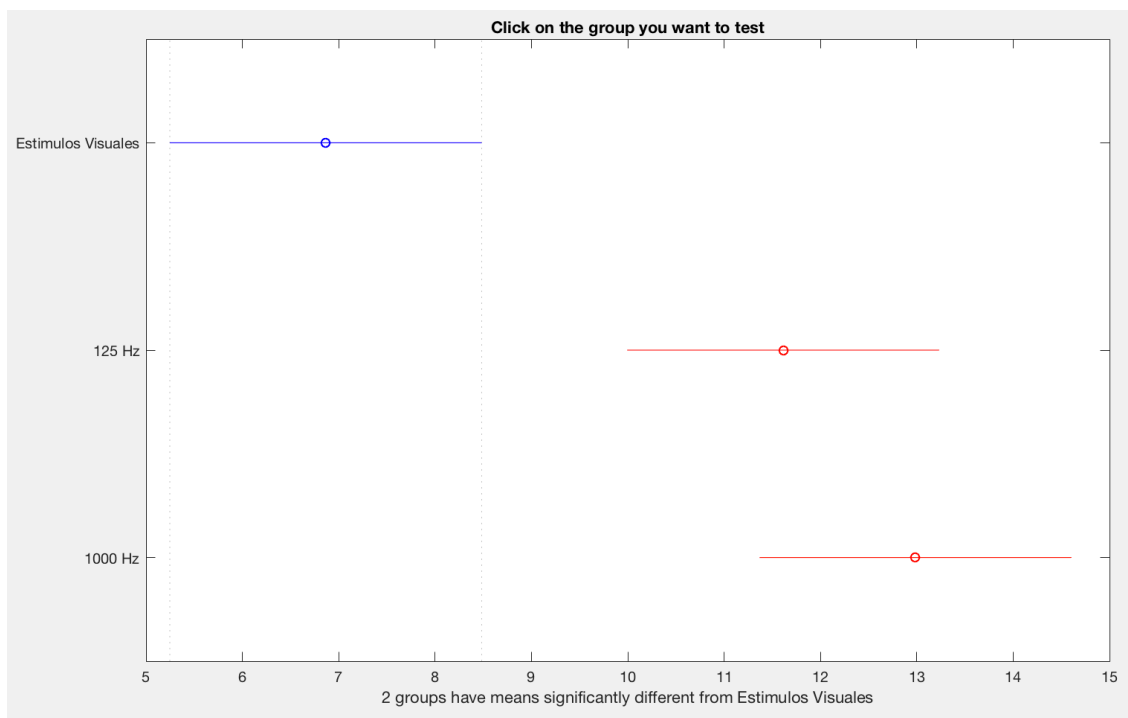


Figura 22. Gráfica de comparación múltiple de medias, obtenido al analizar los datos en MATLAB. El texto debajo del eje horizontal menciona que dos grupos presentan diferencias significativas con el grupo correspondiente a los estímulos visuales.

Aparte del análisis de varianza se ha realizado un ajuste lineal, con el objetivo de buscar si existe una relación lineal entre la percepción de estímulos auditivos y visuales. La Figura 25 (obtenida a través de la aplicación de *Curve Fitting* de MATLAB) sugiere que sí existe una tendencia lineal positiva entre los datos, lo que quiere decir que sujetos con resultados bajos de test auditivos también dan resultados bajos en tests visuales. Se ha analizado el nivel de correlación que existe entre estas dos variables, utilizando la función *corrcoef* de MATLAB, que obtiene el coeficiente de correlación y permite analizar la significancia de esta correlación. Se ha hecho una comparación entre el test de estímulos AM con carrier de 1000 Hz y el test de estímulos visuales, obteniendo un coeficiente de correlación de 0.778, lo que representa una correlación fuerte, y el análisis de significancia presenta un valor de 0.039, que sugiere que sí existe una correlación significativa entre estas dos variables.

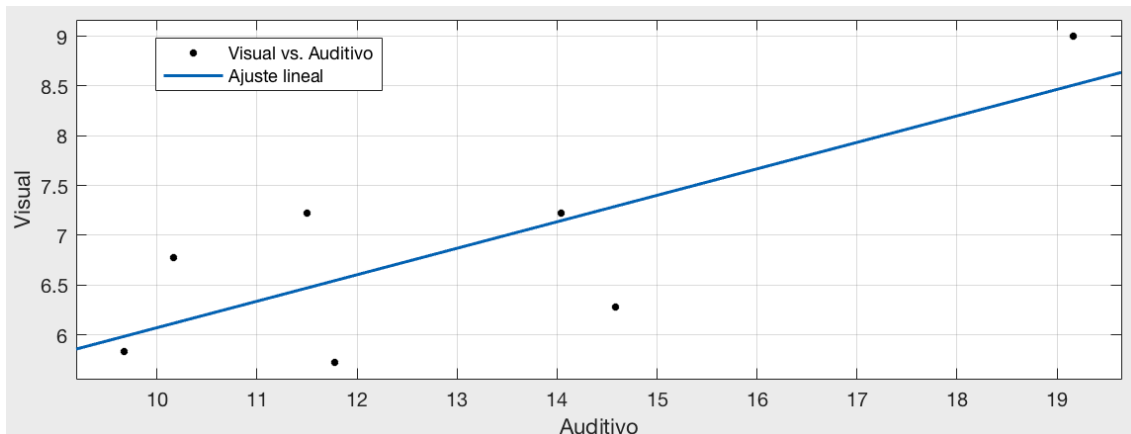


Figura 23. Regresión lineal comparando los datos del test auditivo con carrier de 1000 Hz (eje horizontal) y el test con estímulos visuales (eje vertical) aplicado para los 7 sujetos del Experimento 3 y 4.

Esto puede relacionarse con la información que se conoce acerca de procesamiento temporal visual, pues se sabe que el sistema visual identifica parpadeo a una frecuencia de aproximadamente 35 Hz, mientras que el sistema auditivo identifica fluctuaciones en tonos AM para frecuencias de modulación muy altas. Esto podría sugerir que el procesamiento temporal visual es más lento y necesita mayores separaciones de tiempo para identificar modulaciones, esto se puede confirmar también a través de estudios de tiempo de reacción, que sugieren un tiempo menor para estímulos auditivos que para estímulos visuales, sugiriendo un procesamiento auditivo más rápido (Shelton & Kumar, 2010).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

Los resultados obtenidos en las diversas pruebas realizadas en el marco de este trabajo de investigación han aportado para lograr ciertas afirmaciones. Se ha revelado que no parece existir semejanza entre el umbral de detección de

estímulos AM e IS con frecuencia de 4 Hz, principalmente al notar que las curvas entre estos dos tipos de estímulos son diferentes y, para los estímulos AM estudiados, no se ha encontrado una pendiente marcada por encima de los 1000 ms como se ha encontrado previamente en infrasonidos de 4 Hz.

Las curvas obtenidas en estos experimentos tienen más relación con las curvas presentadas en la bibliografía para estímulo tipo tren de pulsos o para tonos puros con frecuencias superiores a 16 Hz, que llegan a estabilizarse en duraciones de alrededor 1000 ms. Esto sugiere que la pendiente obtenida por Jurado et al., (2020) en 4 Hz es un efecto particular del IS y es provocado por procesos únicos de este tipo de estímulo, sin embargo, hasta la fecha no se establece un motivo específico para ese fenómeno. Más pruebas de detección de umbral con IS para frecuencias menores a 16 Hz deberían ser aplicadas para encontrar si este dato es único de 4 Hz o existe un rango de frecuencias en las que el tiempo crítico sigue aumentando y la curva de integración temporal no se llega a estabilizar pasados los 1000 ms.

El umbral de detección para estímulos AM no parece verse afectado por la frecuencia de modulación de los tonos. Para duraciones de hasta 1000 ms el umbral tiene una pendiente descendente marcada, efecto que no pasa para duraciones mayores en donde las pendientes tienen cualidades más planas según lo observado en todas las frecuencias de modulación. Esto es importante porque demuestra que, para los tonos AM analizados en estos experimentos, no existe una dependencia temporal parecida en tonos AM e IS. Si bien las curvas de integración temporal del IS de 16 Hz y 32 Hz analizadas por Jurado et al., son parecidas a las obtenidas en tonos AM, esto no es el caso para el IS de 4 Hz que presenta una pendiente mucho más marcada que en el caso de tonos AM y trenes de pulso.

Por otro lado, el límite de discriminación de eventos separados para estímulos auditivos (AM e IS) muestran que sí existe una relación en este tipo de procesamiento temporal. De manera general, se han obtenido promedio de 12

Hz, 11 Hz y 14 Hz para los estímulos de carrier de 1000 Hz, 125 Hz y RBI respectivamente. Los procesos detrás de esto aún no están bien definidos, sin embargo, puede que se deba a que el sistema auditivo identifica eventos separados cuando logra captar claramente los cambios de amplitud de un pulso, que son más evidentes cuando la frecuencia de la envolvente es menor a 16 Hz. Esto podría explicar la semejanza para estos límites en tonos AM e IS, sin embargo, se necesita más información para poder complementar esta idea.

Estos límites también parecen estar relacionados con niveles de molestia por ruido reportados para IS y ruido modulado. Establecer esta relación permiten la búsqueda de soluciones más acertadas para caracterizar los principios que causan las molestias y plantear formas correctas de disminuir el impacto en los seres humanos.

También es posible que exista relación entre los límites de percepción de eventos separados y límites de generación de eventos por los humanos. Los valores obtenidos en los resultados (entre 10 y 15 Hz) también pueden compararse con límites de generación de estímulos producidos por el cuerpo, como, por ejemplo, la capacidad de tocar una nota repetidamente en un instrumento. A manera de observación, es posible decir que si se toma en cuenta una velocidad de 120 bpm (velocidad estándar) la notación más corta que se puede distinguir (y tocar) como estímulo claramente independiente es una fusa. En un segundo a 120 bpm se pueden tocar 16 fusas, lo que representa una frecuencia de 16 Hz, muy similar al límite encontrado. Se puede notar también una semifusa, sin embargo, a 120 bpm (que correspondería a una frecuencia de 32 Hz) parece bastante difícil de ser interpretado por un humano, y su percepción sonora es más difícil de interpretar como evento separado. Esto parece indicar que estos límites no solo se refieren a límites de percepción de estímulo, sino también de generación. Más investigación se puede realizar al respecto para identificar si es una coincidencia o corresponde, tal vez, al resultado de un proceso evolutivo que ha desarrollado en el ser humano la capacidad de identificar y generar estímulos hasta cierta velocidad.

Los resultados en estímulos visuales hasta ahora revelan que el sistema visual tiene un procesamiento temporal diferente al auditivo, dando como resultado promedio una frecuencia límite de alrededor de 7 Hz. Sin embargo, esto también permite identificar que existe una relación lineal entre estos procesamientos, y se ha mostrado una correlación significativa, lo que sugiere que hay procesos centrales que son descritos de manera similar para el área visual y auditiva. Aunque es necesario tomar datos con más sujetos para tener datos más concluyentes y poder caracterizar de mejor manera esta relación, pues parece haber una relación de interés entre estos tipos de estímulos, que puede permitir una caracterización más fina de estos tipos de procesamiento. Se ha identificado que esta diferencia en el procesamiento visual y auditivo ha sido analizando en otras situaciones, con resultados similares.

La comparación entre los resultados obtenidos para estímulos visuales y auditivos sugieren que existen diferencias en su procesamiento temporal (diferencias que ya han sido mencionadas anteriormente en otros estudios). Tomando en cuenta que los límites de percepción de eventos separados son diferentes es difícil identificar si un mismo mecanismo funciona para estos sistemas sensoriales, y parece negar la posibilidad de un mismo límite de percepción y generación de estímulos para todos los sentidos. Sin embargo, a pesar de que los límites no son los mismos, los rangos en que los sujetos identifican estos eventos parecen ser parecidos, e incluso parece se ha identificado una relación lineal entre estos límites, lo que conlleva a pensar que es posible que un proceso cognitivo parecido sea llevado a cabo para la detección de estos estímulos. Sería interesante, primero, probar todos los experimentos en condiciones de laboratorio y con un número mayor de sujetos para que se pueda tener una idea más amplia de la relación entre estos sucesos y también se podría analizar la relación de estos límites con datos obtenidos por otros tipos de estímulos (vibro táctiles, por ejemplo) y evaluar si hay semejanzas o comportamientos similares. Esto podría fortalecer la idea de que estos límites tienen relación con la forma en que el ser humano ha evolucionado, y han

evolucionado juntos los límites en que se perciben y se generan estímulos de diferente naturaleza.

La metodología usada para las diferentes pruebas ha sido similar a la que se ha utilizado desde hace años para este tipo de experimentos, lo que brinda confianza en los tests. Sin embargo, para el experimento 3 y 4 se tuvo que utilizar equipamiento diferente, lo cual puede representar variaciones con respecto al experimento 1 y 2, y en general, con otros experimentos que utilizan la misma metodología. A pesar de estas variaciones, se ha logrado obtener información importante de 7 sujetos (descartando 2 que no pasaron el entrenamiento) para los dos últimos experimentos y se han utilizado metodologías que permiten su replicación y comprobación.

5.2 Recomendaciones.

Es importante mencionar que para lograr máxima confianza en los datos tomados es necesario mantener la metodología de manera muy sistemática, para lograr su repetición y que la información obtenida sea de alta fidelidad. Por esto es importante constancia en el número de repeticiones que se toman a cada sujeto para cada experimento y así presentar información más consistente; para el experimento 3 y 4 el número de mediciones por sujeto varió en función del tiempo disponible para cada prueba.

De igual manera, se debe tomar en cuenta las instrucciones que se dan a los sujetos para las pruebas (en especial aquellas que presentan preguntas de carácter más subjetivo), pues tener instrucciones claras ahorra tiempo de entrenamiento y evita que se den casos en que las respuestas de los sujetos sean incongruentes. Inicialmente se notó que, para los experimentos 3 y 4, resulta más efectivo la implementación de los botones de prueba que muestran ejemplos de qué se refiere uno con “fluctuación” y “evento separado” lo que ayudó al entrenamiento de los sujetos. Hay que hacer hincapié en que las instrucciones son determinantes a la hora de obtener resultados en este tipo de

test subjetivos. Para futuros experimentos con este tipo de instrucciones subjetivas utilizando estímulos AM se recomienda revisar la sensación de aspereza y el *fluctuation strength*, pues estas definiciones ayudan a describir las formas en que se perciben sonidos AM a distintas frecuencias de modulación. En el caso de estímulos visuales es importante aclarar la diferencia entre una luz parpadeante y la percepción de eventos separados, porque de esto ha de depender la respuesta de los sujetos.

Cuando los experimentos no son realizados en condiciones de laboratorio como en el experimento 3 y 4, es fundamental mantener en lo posible todas las variables en el mismo estado para todas las mediciones. Esto ha de ayudar a evitar variaciones de ruido, intensidad de la luz, distancias, niveles de intensidad u otros que pudiesen variar entre una prueba y otra. Mantener estos factores siempre estables ayuda también a que se pueda repetir el experimento y probar su fidelidad.

Los descansos entre mediciones, especialmente para mediciones de larga duración como las aplicadas en el experimento 1, son muy importantes para mantener a los sujetos concentrados, descansados y evitar la fatiga auditiva; todo esto ha de aportar a la recolección de datos y al bienestar de los sujetos. Se recomiendan descansos mínimos de 5 minutos cada 20 minutos para asegurar que los sujetos se mantienen en buena condición tanto mental como física.

REFERENCIAS

- Aichinger, P. (2009). *Investigation of psychoacoustic principles for automatic mixdown algorithms*. University of Music and Performing Arts Graz, Institute of Electronic Music and Acoustic. Graz: Institute of Electronic Music and Acoustic.
- Aznar, J. A. (2009). *Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona: Introducció a la psicofísica*. Recuperado de Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/9922>
- Bacon, S., Fay, R., & Popper, A. (2004). *Compression: From Cochlea to Cochlear Implants*. New York: Springer.
- Barklow, W. E. (2004). Low-frequency sounds and amphibious communication in Hippopotamus amphibious. *Journal of the Acoustical Society of America*.
- Boenke, L. T., Deliano, M., & Ohl, F. W. (2009). Stimulus duration influences perceived simultaneity in audiovisual temporal-order judgment. *Experimental Brain Research*, 233–244.
- Boff, K. R., Kaufman, L., & Thomas, J. P. (1986). *Handbook of perception and human performance: Vol. I. Sensory processes and perception*. New York: Wiley-Interscience.
- Buus, S., Florentine, M., & Poulsen, T. (1997). Temporal integration of loudness, loudness discrimination and the form of the loudness function. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 669-80.
- Campbell, M., & Greated, C. (1987). *The Musician's Guide to Acoustics*. New York: Schirmer Books.

- Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC). (2017, Septiembre 5). *Tipos de pérdida auditiva (sordera)*. Recuperado de CDC: <https://www.cdc.gov/ncbddd/spanish/hearingloss/types.html>
- Cevallos, I., & Velasco, J. (2019). Caracterización de la percepción de intensidad del ruido fluctuante de baja frecuencia. Quito: Universidad de las Américas.
- CIE. (2016). Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models. *Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models*.
- Ciganović, N., Warren, R. L., Keçeli, B., Jacob, S., Fridberger, A., & Reichenbach, T. (2017). Static length changes of cochlear outer hair cells can tune low-frequency hearing. *PLOS Computational Biology*.
- Colman, A. M. (2008). *A Dictionary of Psychology*. Oxford: Oxford University Press.
- David, S. W. (1955). Auditory and visual flicker-fusion as measures of fatigue. *The American Journal of Psychology*, 654-657.
- Department of Geosciences. (2018, Enero 3). *Infrasound propagation - Department of Geosciences*. Recuperado de University of Oslo: <https://www.mn.uio.no/geo/english/studies/mastertheses/geophysics-geodynamics-and-planetary-sciences/infrasound-propagation.html>
- Drexler, M., Otto, L., Wiegand, L., Marquardt, T., Gürkov, R., & Krause, E. (2016). Low-frequency sound exposure causes reversible long-term changes of cochlear transfer characteristics. *Hearing Research*, 87-94.

- Eisen-Enosh, A., Farah, N., Burgansky-Eliash, Z., Polat, U., & Mandel, Y. (2017). Evaluation of Critical Flicker-Fusion Frequency Measurement Methods for the Investigation of Visual Temporal Resolution. *Nature*.
- EMPIR. (2019, Marzo 18). *Workshop Infrasound*. Recuperado de ears II: <https://www.ears-project.eu/ears2-workshops/workshop-infrasound/>
- Fee, D., & Matoza, R. S. (2013). An overview of volcano infrasound: From hawaiian to plinian, local to global. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123-139.
- Fletcher, H., & Munson, W. A. (1933). Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation. *Journal of the American Society of Acoustics*.
- Foulke, E., & Sticht, T. G. (1969). Review of research on the intelligibility and comprehension of accelerated speech. *Psychological Bulletin*, 50–62.
- Garces, M., & Willis, M. (2006). *Modeling and Characterization of Microbarom Signals in the Pacific*. Defense Technical Information Center.
- Gelfand, S. A. (2004). *Hearing: an introduction to psychological and physiological acoustics*. New York: arcel Dekker.
- Gerken, G. M., Bhat, V. K., & Hutchison-Clutter, M. (1990). Auditory temporal integration and the power function model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 767-778.
- Geschneider, G. A. (1997). *Psychophysics: the fundamentals*. *Somatosensory & Motor Research*. Somatosensory & Motor Research.
- Gustafsson, H. A., & Arlinger, S. (1994). Masking of speech by amplitude-modulated noise . *The Journal of the Acoustical Society of America*, 518-529.

- Haak, H. (2006, Septiembre 1). Probing the Atmosphere with Infrasound : Infrasound as a tool. *CTBT: Synergies with Science, 1996–2006 and Beyond*. Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization.
- Heil, P., Matysiak, A., & Neubauer, H. (2017). A probabilistic Poisson-based model accounts for an extensive set of absolute auditory threshold measurements. *Hearing Research*, 135-161.
- Holmes, M., & Cole, J. D. (1983). Pseudo-Resonance in the Cochlea. *Mechanics of Hearing*. Dordrecht: Springer.
- Hoormann, J., Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Blanke, L. (1992). The human frequency-following response (FFR): Normal variability and relation to the click-evoked brainstem response. *Hearing Research*, 179-188.
- Hui, Z. J., Hai, W. J., Yan, L. J., Yan, G. X., Yan, W., & Yan, C. (2018). Effects of Infrasound on Gastric Motility, Gastric Morphology and Expression of Nitric Oxide Synthase in Rat. *Biomedical and Environmental Sciences*, 399-402.
- International Organization for Standardization. (2003). ISO 226:2003 Acoustics — Normal equal-loudness-level contours. International Organization for Standardization.
- Jurado, C., & Gordillo, D. M. (2019). On the loudness of low-frequency sounds with fluctuating amplitudes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1142–1149.
- Jurado, C., & Marquardt, T. (2016). The effect of the helicotrema on low-frequency loudness perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 3799–3809.

- Jurado, C., & Marquardt, T. (2018). Amplitude Modulation May Be Confused with Infrasound. *Acta Acustica United with Acustica*, 825-829.
- Jurado, C., Gallegos, P., & Gordillo, D. (2017). The detailed shapes of equal-loudness-level contours at low frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 3821-3832.
- Jurado, C., Larrea, M., Patel, H., & Marquardt, T. (2020). Dependency of threshold and loudness on sound duration at low and infrasonic frequencies.
- Jurado, C., Pedersen, C. S., & Møller, H. (2009). Auditory filters at low-frequencies: Filter shape in the range 50 Hz to 1000 Hz. *EURONOISE 2009*. Edinburgh: EURONOISE.
- Landis, C. (1954). Determinants of the critical flicker-fusion threshold. *Physiological Reviews*, 259–286.
- Landstrom, U., Lundstrom, R., & Bystrom, a. M. (1983). Exposure to Infrasound - Perception and Changes in Wakefulness. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*.
- Levitt, H. (1970). Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *The city University of New York Graduate Center*.
- Møller, H., & Pedersen, C. S. (2004). *Hearing at low and infrasonic frequencies H Moller, CS Pedersen - Noise and Health*. Recuperado de Noise and Health: <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2004;volume=6;issue=23;spage=37;epage=57;aulast=Moller>
- Marquardt, T., Hensel, J., & Scholz, G. (2007). Low-frequency characteristics of human and guinea pig cochleae. *Journal of the Acoustical Society of America*, 3628-3638.

- Marsh, J., Brown, W., & Smith, J. C. (1975, Febrero). Far-field recorded frequency-following responses: Correlates of low pitch auditory perception in humans. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 113-119.
- May, P. J., Westö, J., & Tiitinen, H. (2015). Computational modelling suggests that temporal integration results from synaptic adaptation in auditory cortex. *European Journal of Neuroscience*, 615-630.
- Moller, H., & Pedersen, C. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise & Health*, 6(23), 37-57. Recuperado de Noise & Health: <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2004;volume=6;issue=23;spage=37;epage=57;auiast=>
- Moore, B. C. (1998). *Cochlear hearing loss*. London: Whurr Publishers Ltd.
- Nagamatsu, M., & Yamamoto, M.-y. (2019). Influence evaluation of infrasound by using both biological information sensors in vicinity of wind turbine facilities. *Internation Congress of Acoustics* (pp. 2992-2999). Aachen: ICA.
- Payne, K. B., Langbauer, W. R., & Thomas, E. M. (1986). Infrasonic calls of the Asian elephant (*Elephas maximus*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 297-301.
- Perkins, R., Lotinga, M. J., Berry, B., Grimwood, C. J., & Stansfeld, S. A. (2016). A review of research into the human response to amplitude-modulated wind turbine noise and development of a planning control method. *Inter-noise 2016*. Hamburgo.
- Physical Sciences Laboratory. (n.d.). *NOAA ESRL Infrasonics Program: NOAA Physical Sciences Laboratory*. Recuperado de Physical Sciences Laboratory: <https://psl.noaa.gov/programs/infrasound/>

- Pressnitzer, D., Patterson, R. D., & Krumbholz, K. (2001). The lower limit of melodic pitch. *The Journal of the American Society of Acoustics*.
- Pujol, R. (2018, Junio 6). *Cochlea*. Recuperado de Cochlea: <http://www.cochlea.org/en/hear/human-auditory-range>
- Shelton, J., & Kumar, G. P. (2010). Comparison between Auditory and Visual Simple Reaction Times. *Neuroscience & Medicine*.
- Siegles, M. A., & Stern, R. M. (1995). On the effect of speech rate in large vocabulary speech recognition systems. *1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Detroit: IEEE.
- Stevenson, R. A., & Wallac, M. T. (2013). Multisensory temporal integration: task and stimulus dependencies. *Experimental Brain Research*.
- Teng, X., Tian, X., & Poeppel, D. (2016). Testing multi-scale processing in the auditory system. *Scientific Reports*.
- Tierney, A., & Kraus, N. (2016). Getting back on the beat: Links between auditory-motor integration and precise auditory processing at fast time scales. *European Journal of Neuroscience*, 782-791.
- Uppenkamp, S., & Röhl, M. (2014). Human auditory neuroimaging of intensity and loudness. *Hearing Research*, 65-73.
- Valderrama, J. (2010). Diseño e implementación de un sistema portátil de adquisición de potenciales evocados auditivos del tronco cerebral mediante estimulación acústica. Granada: Universidad de Granada.
- van der Tweel, L., & Verduyn Lune, H. (1965). Human visual responses to sinusoidally modulated light. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*.

- Viemeister, N. (1979). Temporal modulation transfer functions based upon modulation thresholds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1364-1380.
- Viemeister, N. F., & Wakefield, G. H. (1991). Temporal integration and multiple looks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 858-867.
- Viemeister, N. F., & Wakefield, G. H. (1991). Temporal integration and multiple looks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 858-865.
- Von Muggenthaler, E. (2013). Giraffe Helmholtz resonance. *Journal of the Acoustical Society of America*.
- Weichenberger, M., Kühler, R., Bauer, M., Hensel, J., Brühl, R., Ihlenfeld, A., . . . Kühn, S. (2015). Brief bursts of infrasound may improve cognitive function – An fMRI study. *Hearing Research*.
- Yeowart, M., & Evans, M. (1974). Thresholds of audibility for very low-frequency pure tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 814-818.
- Yeowart, N., Bryan, M., & Tempest, W. (1967). The monaural M.A.P. threshold of hearing at frequencies from 1.5 to 100 c/s. *Journal of the Acoustical Society of America*, 335-342.
- Ziaran, S. (2014). The assessment and evaluation of low-frequency noise near the region of infrasound. *Noise and Health*, 10-17.
- Zwicker, E., & Fastl, H. (1999). Psychoacoustics. In E. Zwicker, & H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models* (pp. 247-264). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

ANEXOS

Anexo 1. Fragmento del código de MATLAB utilizado para la reproducción de tonos AM para el experimento 1.

```
function [RModTone] = plotTTC_AM_TempInt_AmpMod(fc, fm, Dur, Fs, plt)
    if nargin < 5
        plt = 0;
    end
    t = (0:1/Fs:Dur-1/Fs);

    r_dur = 0.1;
    R_up = (sin(2*pi*(1/(4*r_dur))*(0:1/Fs:r_dur-1/Fs))).^2; % Sine/cosine squared ramps
    disp(size(R_up))
    disp(Fs*Dur-2*length(R_up))
    R = [R_up ones(1, Fs*Dur-2*length(R_up)) R_up(end:-1:1)];
    %%%%%%%%%%% AM %%%%%%%%%%%
    A = 0.5;
    Carrier = A*sin(2*pi*fc*t);
    I = 1; % Modulation Index (1 = 100 %)
    Modulator = I*sin(2*pi*fm*(t));
    ModTone = (1+Modulator).*Carrier; % Modulated Tone
    % Shift T/4 mod tone
    Ind = round(((1/fm)/4)*Fs);
    ModTone = circshift(ModTone, Ind, 2);
    RModTone = ModTone;

    if plt == 1
        f1 = figure();
        subplot(3,1,1)
        plot((0:1/Fs:r_dur-1/Fs), R_up);
        title('R^2')
        subplot(3,1,2)
        plot((0:1/Fs:r_dur-1/Fs), sqrt(R_up));
        title('R')
        subplot(3,1,3)
        plot(t, R)
        title('Window')

        f2 = figure(2);
        subplot(5,1,1)
        plot(t, Carrier)
        title(sprintf('Carrier: %i Hz', fc))
        subplot(5,1,2)
        plot(t, Modulator)
        title(sprintf('Modulator: %i Hz', fm))
        subplot(5,1,3)
        plot(t, ModTone)
        title('Modulated sign')
        subplot(5,1,4)

        plot(t, ModTone)
        title('Modulated sign (shift T/4)')
        subplot(5,1,5)
        plot(t, RModTone)
        title('R-Modulated sign')
        set(f1, 'Position', [221 186 989 440])
        set(f2, 'Position', [221 186 989 440])
    end
end
```

Anexo 2. Extracto del código de MATLAB para la reproducción de estímulos del experimento 2.

```
PsychPortAudio('Volume', handles.Tone, double(handles.Factor),[]); % Amplitude, set each time buffer

PsychPortAudio('Start', handles.Tone, 1,[],[],[],[]); % 1: play once, no need to stop it.
pause(0.3)
digitalWrite(a,11,1) % Turn on MIDDLE LED of pushbutton
set(handles.btnFreqDown,'enable','off')
set(handles.btnFreqUp,'enable','off')
set(handles.btnFreqStop,'enable','off')
btnOff = 0;
pause(handles.pause1) % pause same duration as stimuli to keep the color change synchronized
digitalWrite(a,11,0)% Turn off MIDDLE LED of pushbutton
pause(handles.pause2) % After presentation and before turning LEDs on to call for answering
digitalWrite(a,10,1) % Turn on the 3 LEDs (leftmost and rightmost used for adjusting the frequency,
digitalWrite(a,11,1)
digitalWrite(a,12,1)
btnOff = 1;
```

Anexo 3. Extracto de código de MATLAB para configuración de tonos AM y configuración de la interfaz de audio.

```
PsychPortAudio('Close')
InitializePsychSound([]); % ref. Psychtoolbox
devices = PsychPortAudio('GetDevices', [], []);
for j = 1:length(devices) % Find ASIO device ID (30 outputs and 30 inputs)
    A{j} = devices(j).DeviceName;
    b(j) = strcmp(A{j}, 'ASIO Fireface USB'); % Find ASIO ID. USED FOR ISLF SUPPRESSOR
end
deviceid = find(b)-1; clear b A
if strcmp(handles.StimType, 'AM')
    Stim = [plotTTC_AM_TempInt_AmpMod(handles.Tonefreq, handles.ModFreq, handles.ToneLength, handles.Fs);
            plotTTC_AM_TempInt_AmpMod(handles.Tonefreq, handles.ModFreq, handles.ToneLength, handles.Fs)];
elseif strcmp(handles.StimType, 'Continuous') % Ramped tone
    tx = (0:1/handles.Fs:handles.ToneLength-1/handles.Fs);
    R_up = (sin(2*pi*(1/(4*handles.RampLength))*(0:1/handles.Fs:handles.RampLength-1/handles.Fs))).^2;
    R = [R_up ones(1, handles.Fs*handles.ToneLength-2*length(R_up)) R_up(end:-1:1)];
    Stim = [R.*sin(2*pi*handles.Tonefreq*tx); R.*sin(2*pi*handles.Tonefreq*tx)];
end
```

Anexo 4. Extracto del código de MATLAB para la configuración del estímulo y la interfaz de audio para el experimento 2.

```
PsychPortAudio('Close')
InitializePsychSound([]); % ref. Psychtoolbox
devices = PsychPortAudio('GetDevices', [], []);
for j = 1:length(devices) % Find ASIO device ID (30 outputs and 30 inputs)
    A{j} = devices(j).DeviceName;
    b(j) = strcmp(A{j}, 'Scarlett 2i2 USB'); % Find ASIO ID. USED FOR ISLF SUPPRESSOR
end
deviceid = find(b)-1; clear b A

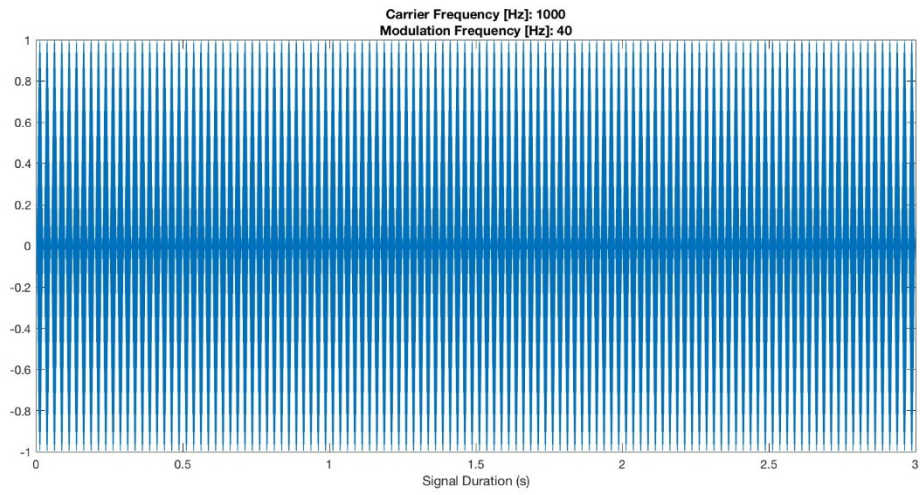
handles.Stim = [plotTTC_AM_TempInt_AmpMod(handles.Tonefreq, handles.ModFreq, handles.ToneLength, handles.Fs); ...
    plotTTC_AM_TempInt_AmpMod(handles.Tonefreq, handles.ModFreq, handles.ToneLength, handles.Fs)];
for i = 1:length(handles.Tonefreqs)
    handles.Stim{i} = [R.*sin(2*pi*handles.Tonefreqs(i)*tx); R.*sin(2*pi*handles.Tonefreqs(i)*tx)]; % Generate
end

channels = 2; % Choose 2 for Stereo, fixed for now.
mode = 9; % Playback only (+1)
handles.pamaster = PsychPortAudio('Open', deviceid, mode, [], handles.Fs, 2, [], [], [], []); % ASIO master channel.
handles.Tone = PsychPortAudio('OpenSlave', handles.pamaster, 1, [2], handles.Chan);
handles.Silence = PsychPortAudio('OpenSlave', handles.pamaster, 1, [2], handles.Chan);
handles.DesiredSPL = [];
```


Anexo 5. Interfaz de MATLAB utilizada para la recolección de datos para el experimento 3.



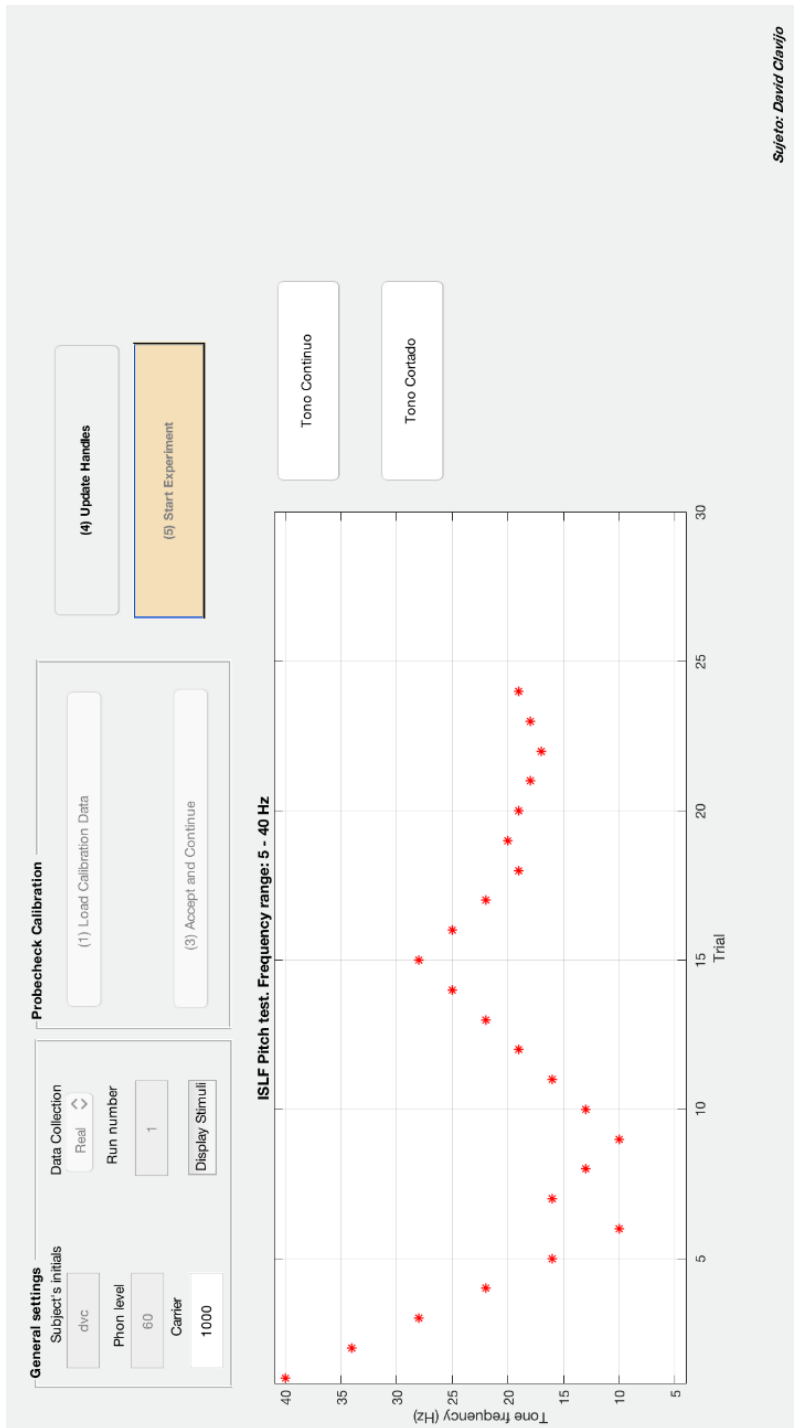
Anexo 6. Gráfica de Amplitud vs. Tiempo para tono con frecuencia de modulación de 40 Hz utilizado para el entrenamiento del experimento 3.



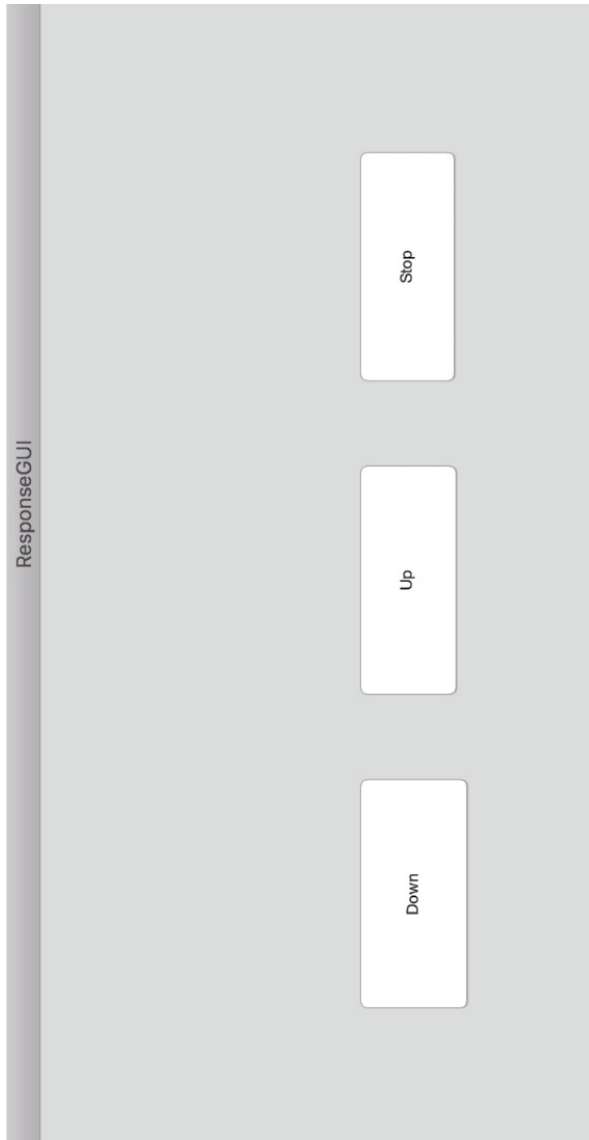
Anexo 7. Tabla con ejemplo de las indicaciones dadas para el Experimento 3.

Fase de entrenamiento
<p>En la gráfica tienes 2 botones, el botón de arriba te va a reproducir un tono fluctuante que tiene una velocidad de fluctuación bastante rápida, y el botón de abajo tiene una velocidad mucho más lenta y vas a poder distinguir claramente los pulsos, incluso puedes contarlos. Recomiendo que pruebes los dos varias veces hasta que hallas captado perfectamente la diferencia entre cada uno.</p>
<p>Cuando hallas logrado identificar las diferencias entre los dos tipos de tonos, vamos a probar una vuelta del proceso de medición. Cuando veas la pantalla de respuesta puedes aplastar cualquier botón y vas a escuchar el primer tono.</p> <p>Mientras escuches un tono que parezca continuo, o con cortes muy rápidos, aplasta el primer botón. Si escuchas un tono que te parezca que está claramente cortado e incluso pudieras contar cada pulso, aplasta el segundo botón. Recomiendo al principio aplastar varias veces el primer botón, y así vas a notar cómo cambia la velocidad hasta que esté claramente lento y cortado.</p> <p>El objetivo es que encuentres un punto medio en que puedas identificar el cambio de cuándo están lo suficientemente separados para ser contados, y cuando es muy rápido y no distingues uno de otro. Repite el proceso de subir y bajar hasta que el programa pare.</p>
Mediciones reales
<p>Nuevamente, vamos a realizar el mismo proceso de antes, y los vamos a repetir al menos una vez más. Ahora, si has encontrado el punto exacto donde se da este cambio, puedes aplastar el tercer botón y así termina el proceso, si no, sigue hasta que el programa pare solo.</p>

Anexo 8. Ejemplo de pantalla de resultados del test en MATLAB. En la gráfica se presentan las frecuencias de modulación correspondientes a las respuestas de los sujetos.



Anexo 9. Interfaz de respuestas con los tres botones que simulan al control físico en MATLAB. El primer botón se presiona cuando el sujeto todavía no identifica eventos separados, el segundo cuando identifica eventos separados, y el tercero cuando está seguro de que ha encontrado en límite exacto en que percibe eventos separados.



Anexo 10. Fragmento de código de ARDUINO para la reproducción del estímulo para el experimento 4.

```
dt=freq*4;
dt=dt*5;
dt=1/dt;
dt=1000*dt;
// Serial.println(dt);
int dur = 3;
//startTime = millis();
for (int c = 0; c<(freq*dur); c++)
{
  for (int i = 0; i < 250;i=i+50)
  {
    analogWrite(19, i);
    delay(dt);
  }
  for (int i = 250; i>0;i=i-50)
  {
    analogWrite(19, i);
    delay(dt);
  }
  analogWrite(19,0);
  delay(dt*2*5);
}
analogWrite(19,0);
```

Anexo 11. Tabla con indicaciones puntuales dadas para el Experimento 4.

Fase de entrenamiento
<p>Cuando veas la pantalla de respuesta puedes aplastar cualquier botón y se va a prender la luz que tienes al frente. Inicialmente vas a notar que la luz tiene una velocidad de parpadeo tan rápida que parece que nunca se apaga, pero mientras va bajando la velocidad vas a notar más claro el parpadeo. Mientras veas una luz que parezca continua, o con cortes muy rápidos, aplasta el primer botón. Si miras que la luz parece que está claramente cortada e incluso pudieras contar cada vez que se enciende y se apaga, aplasta el segundo botón.</p> <p>Lo que se busca ahora no es cuando se empieza a notar parpadeo, sino el punto en que puedes identificar cada parpadeo como si fuera separado. Es decir, busca el punto en que es lo suficientemente lento para que identifiques cada vez que se prende y se apaga, como si lo quisieras contar. Aunque, no es necesario que cuentes, porque de eso no se trata el experimento.</p> <p>Te recomiendo seguir en el proceso de subir y bajar hasta que el programa pare solo.</p>
Mediciones reales
<p>Nuevamente, vamos a realizar el mismo proceso de antes, y los vamos a repetir al menos una vez más. Ahora, si has encontrado el punto exacto donde se da este cambio, puedes aplastar el tercer botón y así termina el proceso, si no, sigue hasta que el programa pare solo.</p>

