



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE
CURVAS ISOFÓNICAS A BAJAS FRECUENCIAS

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

Autores

Pablo Esteban Gallegos Cajas

Darío Alejandro Gordillo López

Año

2016

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con los estudiantes, 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 Andrés Jurado Orellana

PhD en Acústica

C.I. 542886-6

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LOS ESTUDIANTES

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra 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”

Pablo Esteban Gallegos Cajas
C.I. 1716751837

Darío Alejandro Gordillo López
C.I. 1716075328

AGRADECIMIENTOS

A Dios. A Carlos Jurado y Darío Gordillo por su apoyo y aprendizaje de ellos. A mis profesores compañeros y amigos. A mi familia y madres por el sacrificio y la confianza en mí.

Pablo.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, principalmente padres y hermanos por su constante apoyo durante el corto camino de vida que he recorrido, a Carlos Jurado y Pablo Gallegos por su soporte y constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo de titulación y por el tiempo compartido en la etapa de estudios.

Darío.

DEDICATORIA

A Laura, Pablo, Estefy y Pamelita por ser inspiración en mi vida. A mis madres y familia. A J, F, F, C y S por cambiar mi mundo. Y a todos los que ayudaron en este proyecto.

Pablo

DEDICATORIA

A mi familia y a la vida.

Darío

RESUMEN

El tema central de este proyecto es el desarrollo, diseño e implementación de un sistema capaz de emitir bajas frecuencias a niveles altos y baja distorsión armónica con el fin de realizar experimentos psicoacústicos a futuro y obtener resultados de umbral absoluto y curvas de igual sonoridad (ELC's) de forma monoaural.

Mediante la interacción de componentes electroacústicos y programas basados en el software MATLAB se configuran los distintos parámetros de entrada y salida con el fin de obtener datos objetivos a partir de un sistema calibrado a través de la obtención y compensación de su curva de respuesta de frecuencia. La cadena electroacústica interactúa con un programa psicoacústico basado en métodos psicofísicos y el setup se comunica con el participante a través de un botón de respuestas. En el documento se explica a detalle el funcionamiento del sistema mediante la presentación de gráficos, tablas y anexos que dan una idea muy clara del buen desempeño del mismo.

El sistema responde de una manera óptima en el rango de frecuencias de 10 a 200 [Hz], donde la diferencia de nivel entre fundamental y armónicos validan el setup y los niveles de salida son lo suficientemente altos para la realización de pruebas psicoacústicas piloto.

ABSTRACT

The focus of this project is the development, design and implementation of a system capable of emitting low frequencies at high levels and low harmonic distortion in order to perform future psychoacoustic experiments to obtain absolute threshold and equal loudness contours (ELC's) monaurally.

Through interaction between electroacoustic components and MATLAB programming various input and output parameters are configured in order to get objective data from a calibrated system by obtaining and compensating its frequency response curve. The electroacoustic chain interacts with a psychoacoustics program based on psychophysical methods communicating with the participants through a push button. The document explains in detail the operation of the system by presenting graphs, tables and appendices giving a clear idea of its good performance.

The system performs efficiently in the frequency range from 10 to 200 Hz with a low value of harmonic distortion and enough sound pressure levels on the output, making it consistent to run psychoacoustic pilot tests.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Marco referencial.	3
1.3. Justificación.	5
1.4. Alcance.....	7
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. Objetivo general.....	8
1.5.2. Objetivos específicos.	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Procesamiento digital de señales.....	9
2.1.1. Señales y sistemas.	9
2.1.2. Filtros IIR y FIR.....	17
2.2. Análisis numérico.....	18
2.2.1. Interpolación de datos.....	18
2.2.2. Enventanado.....	21
2.2.3. Método de Welch.....	23
2.3. Psicoacústica.....	23
2.3.1. Psicofísica.....	24
2.3.2. Función psicométrica.	24
2.3.3. Métodos psicofísicos adaptativos.	25
2.3.4. Curvas de igual sonoridad.	26
2.3.5. ISO 226-2003.....	27
2.4. Ruido de baja frecuencia.	29
2.4.1. Propagación.....	30
2.4.2. Umbrales de audición en baja frecuencia.	30
2.4.3. Sonoridad y contornos de igual sonoridad en baja frecuencia.....	32
2.5. Infrasonido.....	35
2.5.1. Métodos de emisión de infrasonido.	35
3. METODOLOGÍA.....	41
3.1. Equipos requeridos para la implementación del setup.	41
3.1.1. Computador.	41

3.1.2. Interface.....	41
3.1.3. Sonómetro.	42
3.1.4. Micrófono de medición.....	42
3.1.5. Audífonos modificados.....	43
3.1.6. Botón de respuestas.	43
3.1.7. ER-10C.....	43
3.1.8. Software.....	43
3.2. Diseño del botón de respuestas.....	47
3.2.1. Arduino + MATLAB.	47
3.2.2. Push button.....	48
3.3. Modificación de audífonos DT 1350.....	49
3.4. Implementación del setup.	56
3.4.1. Descripción del conexionado entre componentes.....	56
3.5. Playback y grabación en MATLAB.....	57
3.6. Distorsión del sistema.	58
3.6.1. Nivel de distorsión de los audífonos sin modificación.....	58
3.6.2. Medición de distorsión de los audífonos modificados.	59
3.7. Calibración del setup.	61
3.7.1. Calibración utilizando tonos puros.	62
3.7.2. Visualización del espectro de frecuencias utilizando ruido blanco normalizado y el método de Welch.	64
3.8. Descripción del programa de medición de curvas isofónicas.....	66
3.8.1. Etapas del experimento.	66
4. RESULTADOS.....	68
4.1. Análisis y discusión de resultados.....	68
4.1.1. Implementación del botón de respuestas.	68
4.1.2. Audífonos modificados.....	69
4.1.3. Distorsión armónica en audífonos no modificados.....	74
4.1.4. Distorsión armónica del sistema modificado.....	75
4.1.5. Respuesta de frecuencia del sistema.	77
5. ANÁLISIS ECONÓMICO.	81

5.1. Análisis costo-beneficio.	81
6. PROYECCIONES.	83
6.1. Capacidad de expansión y potencial del proyecto.	83
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	85
7.1. Conclusiones.	85
7.2. Recomendaciones.	90
8. REFERENCIAS.	92
9. ANEXOS	95

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes.

En 1927 se registraron las primeras mediciones de equal-loudness contours o curvas de igual sonoridad en experimentos de Kingsbury, esto mediante audífonos monoaurales. La medición de curvas no exige un espacio con características definidas, ya que se han realizado mediciones en campo libre y mediante escucha binaural también. Fletcher y Munson en 1933 midieron por primera vez curvas de equal-loudness en el espectro más extenso de frecuencias hasta ese momento mediante escucha binaural. En el año 1956 Robinson y Dadson profundizaron el trabajo de Fletcher y Munson y sus resultados llegaron a formar parte de estándares internacionales como la ISO 226 en 1987 (Suzuki, Y Takeshima, H. 2004).

Es importante determinar un correcto procedimiento psicofísico para medir curvas de sonoridad. Levitt en 1972 propone el modelo "Transformed UP-DOWN procedure" para obtener el X50 es decir un valor que tenga un 50% de probabilidad de ser captado por el participante. A partir de ahí se podrá continuar con el proceso y con la obtención de la respuesta del oído a estímulos sonoros.

En la actualidad, existe un creciente estudio sobre el papel concreto del ruido de baja frecuencia (frecuencias < 200 Hz) en ruido ambiental donde, de acuerdo a Møller & Pedersen (2010, p.37) existen algunas fuentes que producen sonido audible en este rango tales como motores, compresores, sistemas de ventilación, tráfico e incluso instrumentos musicales. Todo esto y con el tiempo se puede traducir en problemas de salud asociados a la molestia, deficiencia en desarrollo mental y disturbios en el sueño por una sobreexposición al ruido de muy baja frecuencia (Hensel, Scholz, Hurttig, Mrowinski, & Janssen, 2007, pp. 66-76).

Existe infrasonido generado por la naturaleza, truenos, tornados, lluvia entre otros, que raramente se han considerado como un problema, sin embargo, la presencia de frecuencias infrasónicas en la aviación, automóviles, barcos y

otros medios de transporte de gran tamaño es considerada como perjudicial para el ser humano y mucho más si hay exposición prolongada y niveles elevados de intensidad (Nassbaum, Reinis, 1985). Von Besekey en 1936 determinó que el área del cuerpo humano que se siente mayormente estimulada por las bajas frecuencias es el oído, sin embargo, a intensidades mayores cierta sensación táctil en la piel fue percibida por los participantes. Además, el ruido de baja frecuencia es reconocido como un problema ambiental por la Organización Mundial de la Salud (Berglund, Lindvall, Schwela, & Goh, 2000).

Geoff Leventhall en 2003 menciona la publicación del año 1965 "Effects of low frequency and infrasonic noise on man" de Mohr como uno de los primeros indicios del estudio de bajas frecuencias y su efecto en la salud de los seres humanos, esto enfocado principalmente al tema de medicina aeroespacial, dado que la energía que producen los cohetes de transporte se concentra mayormente por debajo de los 20 Hz. Además, cabe destacar que se pierde la sensación de tono cerca de los 20 Hz (Von Gierke, Johnson, 1974), no obstante, la investigación de Moller y Pedersen en 2004, pp.37-57 indica que por debajo de los 10 Hz es posible percibir los ciclos individuales del tono a través de una sensación de presión en los tímpanos.

Un tema importante que considera el proyecto a desarrollar es el tratamiento de señales, su implementación, interacción y entendimiento. El conocimiento acerca de las series de tiempo y el procesamiento digital de señales se han ido evidenciando y profundizando con Telgarsky (2013, p.1) donde, a través de un análisis se ha ido informando y discutiendo temas como: ejemplos de fenómenos periódicos; algoritmos y librerías más comunes en el mercado de la programación; análisis de las series de tiempo; limitaciones en frecuencia; componentes de una señal; etc. Los cuales sirven para discernir qué metodologías usar para tratar a una señal de audio.

De igual manera, para el correcto desarrollo de este proyecto es necesario tener el conocimiento acerca de lo estipulado previamente por Berglund (1969, pp. 228-239) acerca de la transformada rápida de Fourier (FFT). Aquí se señala

que el algoritmo relacionado a esta transformada puede reducir el tiempo involucrado en el cálculo de su versión discreta desde unos cuantos minutos hasta menos de un segundo. La FFT será útil como herramienta en el procesamiento digital de señales, principalmente para la calibración del setup ya que esta transformada entrega la respuesta de frecuencia del sistema.

Para la emisión de infrasonido se han utilizado principalmente audífonos monoaurales y binaurales, cámaras de presión, y emisión en campo libre produciendo diferentes resultados. Por ejemplo, la escucha binaural es aproximadamente 3 decibeles más sensible que la monoaural. Corso en 1958 logró mediante escucha monoaural por audífonos emitir 5 [Hz]; binauralmente Yeowart y Evans en 1974 lograron emitir de 5 Hz a 100 [Hz]; mediante cámaras infrasónicas de presión Watanabe y Moller lograron emitir 4 [Hz] y en campo libre estos últimos lograron emitir desde 25 [Hz] (Leventhall, 2003).

El proyecto se realizará en su totalidad en la Universidad de Las Américas, Distrito Metropolitano de Quito.

1.2. Marco referencial.

Con respecto a la situación actual referente al tema de procesamiento digital de señales y auralización en la Universidad de Las Américas y siendo aún más específicos en la carrera de Ingeniería de Sonido y Acústica, la cantidad de investigaciones (tesis) amerita a que el proyecto propuesto sea aprobado y ejecutado. Los proyectos de titulación relacionados al tema antes mencionado son escasos considerando que en 7 años (2009-2016) solo han existido 8 tesis con temas del tipo desarrollo de software y psicoacústica.

Concretamente en León en 2013 (p.6) es posible tener una idea de los estudios que se han realizado en la UDLA en cuanto a manipulación de señales digitales, su procesamiento y su utilización en experimentaciones psicoacústicas (Robalino y Franklin., 2011, p.176). No obstante, el tema que se plantea en esta referencia pretende discutir sobre la localización de fuentes sonoras en la percepción binaural del sonido y no con el diseño y estudio de curvas isofónicas a bajas frecuencias como se planifica realizar en esta tesis.

El software de programación que se requiere emplear para el tema de esta tesis es MATLAB ya que es una herramienta muy utilizada internacionalmente para proyectos de investigación teniendo usos en distintos campos de la ingeniería como el procesamiento digital de señales, telecomunicaciones, procesamiento de imágenes y video, sistemas de control, análisis biomédico, entre otros. Cabe aclarar que, en otras investigaciones de la universidad, otro tipo de programación se ha elegido teniendo programas tales como MAX/MSP (León, 2013, p.17; Pazmiño, 2015, p.6), Visual Basic .NET (Páez, 2010, p.25), y LabVIEW (Robalino, 2011, p.6).

Para relacionar cuantitativamente parámetros de magnitudes físicas con respuestas sensoriales son necesarios procesos psicofísicos. En psicoacústica generalmente se utilizan métodos adaptativos, en los cuales los estímulos vienen dados por respuestas del mismo participante a estímulos anteriores, como ejemplo el método Up-Down; como método no adaptativo se puede mencionar el “constant stimuli”, en el cual los niveles de estímulo se configuran antes de la realización del experimento, durante el cual estos estímulos serán presentados de forma randómica. (Grassi, 2009).

Un aspecto importante para la realización de estos experimentos es la ubicación del punto en el cual el procedimiento converge con la curva psicométrica, así como en el punto en el que existe un 50% de probabilidad de obtener una respuesta positiva (Umbral de audición). Levitt propone el método adaptativo Up-Down, el cual puede ser: de escalera simple y transformed procedure.

Empezando a analizar el método de escalera simple Up-Down se puede considerar como un método eficiente para estimar X_{50} , es similar al método del límite en el hecho de la disminución y aumento del nivel según la respuesta positiva o negativa.

En 1963 Wetherill propuso tomar los valores máximos y mínimos de nivel de estímulo donde exista un cambio de criterio llamado turnpoint y promediarlos para obtener X_{50} , y para reducir el bias (error sistemático) se recomienda

tomar valores simétricos y números pares de corridas. Este método se denomina de estimación en base a mid-runs el cual es eficiente para calcular X50.

Se recomienda empezar los experimentos con valores grandes de step-sizes, y disminuir los valores según avance el experimento. El método Transformed Up-Down procedure, a diferencia del método de escalera simple, permite hallar valores distintos a X50, por lo que se tiene mayor flexibilidad en la evaluación de los puntos. Además, la regla del procedimiento no es tan fácil de deducir, de esta forma se evita que el participante se acostumbre a los cambios de nivel. Este método se ha utilizado para medir inteligibilidad y curvas de sonoridad. (Levitt, 1970).

Aún más, de acuerdo a Suzuki, Y Takeshima, 2004, p.2, se han hecho estudios donde las curvas isofónicas son comparadas con las curvas clásicas de Robinson y Dadson de 1956 donde difieren con información obtenida a partir de 1983 especialmente a bajas frecuencias (800 Hz para abajo).

Es válido incluir en este punto los trabajos realizados por dos tesis de la universidad los cuales hacen uso de estos métodos psicoacústicos. Concretamente, Larrea en 2015 (p.97) usó el procedimiento transformado Up-Down (Incremento-Reducción como él lo llama), así como Bejarano en 2015 (p.81) usó el método 2 down 1 up de escalera simple.

La percepción de sonoridad en los experimentos generalmente se ve afectada por factores cognitivos como la capacidad de asociación, comparación, clasificación o interpretación de los estímulos entre otros. Los criterios, métodos y conceptos aplicados para medir umbral de audición o curvas de igual sonoridad varían notablemente entre experimentos, lo cual supone una limitación en la comparación de datos. (Moore, 2014).

1.3. Justificación.

El diseño del setup pretende ser un paso importante en las técnicas asociadas al estudio y control de bajas frecuencias, ya que implica un proceso complejo

en el que se encuentran actividades como: selección adecuada de equipos, materiales y software, implementación del setup para la medición de curvas isofónicas de bajas frecuencias, control asociado, y la programación y testeado de software de control para los experimentos posteriores.

Todos estos procesos aportan de manera significativa al conocimiento relacionado al procesamiento de señales, diseño de experimentos, percepción de bajas frecuencias y temas relacionados.

El interés presentado por dos de las universidades más prestigiosas del mundo como lo es la University of Cambridge mediante el doctor Brian Moore y la University College London mediante el doctor Torsten Marquardt reflejan el amplio potencial de la instalación a realizarse en la Universidad de Las Américas. Estos investigadores serán guías clave para definir metodologías a aplicar en cada fase del proyecto.

La relación del tema con el área de la salud lo hace aún más interesante ya que se podría trabajar en conjunto con la escuela de ciencias de la salud de la Universidad para determinar si existen cambios fisiológicos en el oído al ser excitados a estas frecuencias. Las conclusiones podrían de esta forma expandirse y ser de gran ayuda para personas afectadas por una exposición prolongada a altos niveles de ruido.

Se espera que el setup implementado se convierta en una herramienta tecnológica importante para la universidad puesto que podrá emplearse en investigaciones posteriores. De igual manera, la instalación permitirá reducir costos de ulteriores proyectos y ofrecerá ventajas como: continuación de proyectos de tesis relacionados a las bajas frecuencias y asesoramiento de problemas causados por el ruido de las mismas. Incluso puede servir como elemento didáctico para asignaturas como procesamiento digital de señales e introducción a la acústica. Estas últimas presentan en su contenido tratamiento de señales y curvas isofónicas respectivamente.

1.4. Alcance.

El proyecto involucra el área de psicoacústica, así como de programación, medición de niveles acústicos, electroacústica, métodos estadísticos y matemáticos los cuales en conjunto permiten obtener valores numéricos, variables, tablas y gráficos.

Lo anteriormente hablado procederá a interpretarse y discutirse para que dependiendo de los resultados obtenidos se avance en cada etapa del proceso del proyecto. Así, por ejemplo, tablas de curvas isofónicas presentes en normativas actuales servirán como referencia para emitir un nivel de presión sonora (NPS) adecuado en frecuencias específicas.

Por otro lado, los valores de NPS producidos por audífonos de prueba (medidos con un sonómetro) servirán para determinar valores de constantes de amplitud en el dominio digital. Mediante estos valores de corrección o mediante la convolución de filtros correctivos con la respuesta de frecuencia total del sistema, se logrará obtener una respuesta plana en el rango de frecuencias de interés.

Mediante una correcta configuración de niveles de presión sonora desde el elemento emisor o fuente (programa en MATLAB) se podrán evitar errores de cuantización que se traducen en distorsiones (sobre todo para niveles de audio bajo y señales correspondientes a tonos puros), señales indeseadas y ruido de cuantización como es comúnmente conocido.

El trabajo propuesto culmina programando el software y testeando el setup de control para que experimentos posteriores sean efectuados a mayor escala, a cargo de otras personas vinculadas al proyecto.

Se decidió utilizar el software MATLAB para manejar todo lo relacionado a la programación y procesamiento de señales, debido a la variedad de herramientas disponibles en este y a que se ha utilizado previamente con éxito en la realización de experimentos similares (Hensel, et al, 2007).

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general.

Diseñar e implementar un sistema para la medición de curvas isofónicas a bajas frecuencias con baja distorsión armónica.

1.5.2. Objetivos específicos.

Construir un botón de respuestas para la comunicación digital entre un computador y las respuestas que un sujeto de prueba pueda dar a través del uso de un Arduino y respectiva programación en MATLAB.

Diseñar un acoplamiento a un lado de un audífono mediante la lectura de recursos bibliográficos y ejemplos de otros investigadores para lograr realzar el nivel acústico en frecuencias menores a 20 [Hz].

Corroborar la mejora del sistema a partir de la modificación de los audífonos DT 1350 valiéndose de la medición y gráfico de la señal en la frecuencia.

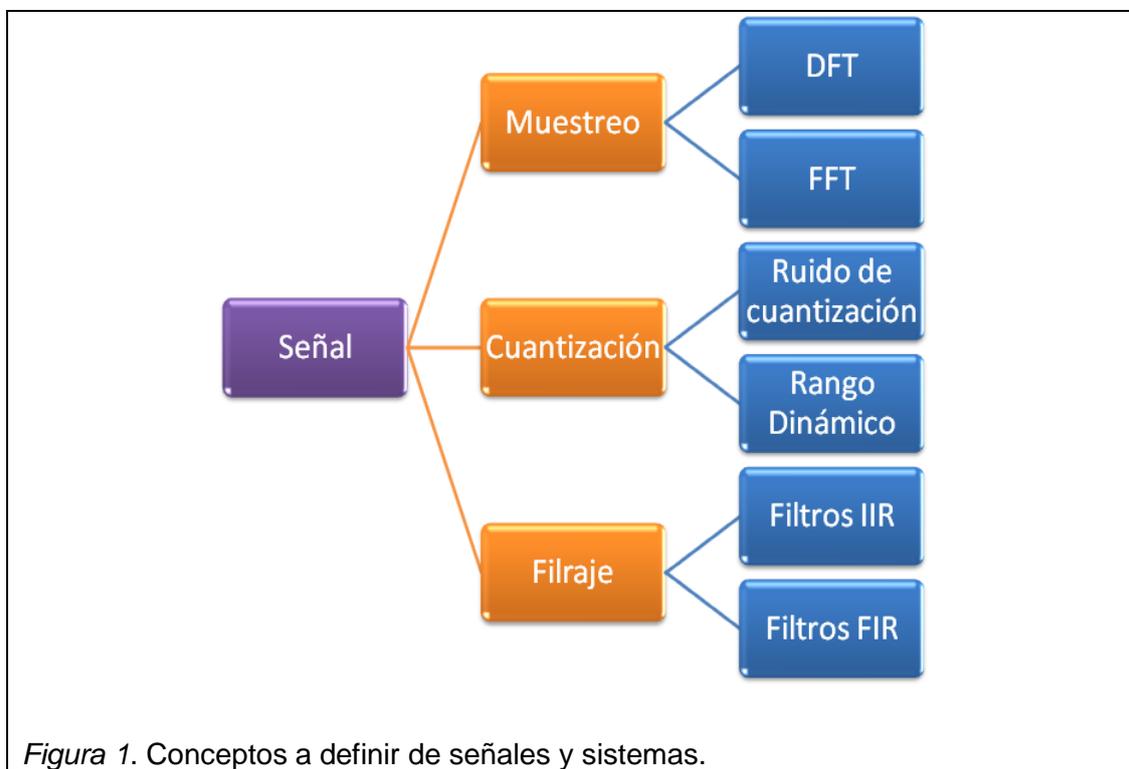
Obtener la curva de respuesta de frecuencia del sistema a partir de la interpolación de datos obtenidos mediante el micrófono de medición Samson MM01 y sonómetro CESVA CS 310.

Superar el umbral de audición especificado en la normativa ISO 226:2003 en las frecuencias de 10 a 200 Hz mediante la controlada amplificación de la señal en la interface RME Fireface 802.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Procesamiento digital de señales.

2.1.1. Señales y sistemas.



2.1.1.1. Señales continuas y discretas.

Una señal puede describir algún fenómeno físico según su patrón de variabilidad, el cual es representado matemáticamente como una función con variables dependientes e independientes, una señal acústica podría representarse como variaciones de presión como función del tiempo. Una señal es continua cuando ésta se define para un conjunto de valores continuos de su variable independiente, a diferencia de una señal discreta la cual en su variable independiente muestra un conjunto discreto de valores. (Oppenheim y Willsky, 1998, p.3).

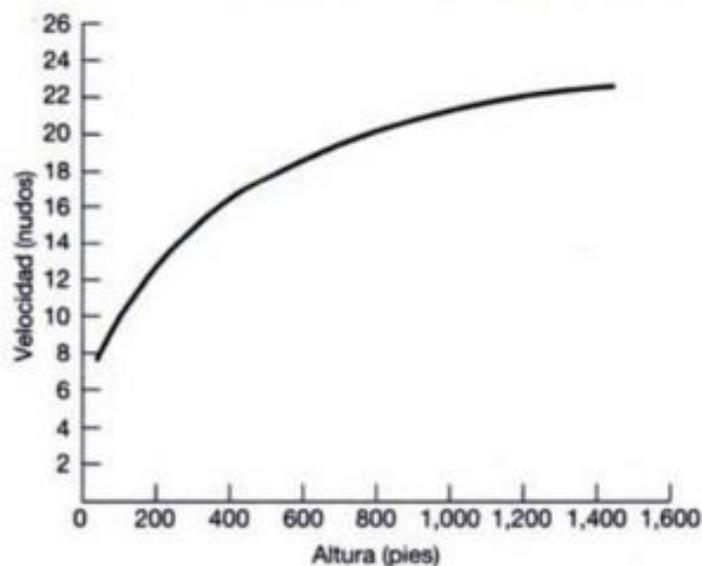


Figura 2. Señal en tiempo continuo.
Tomado de Oppenheim, Willsky & Nawab, 1998, p.3.

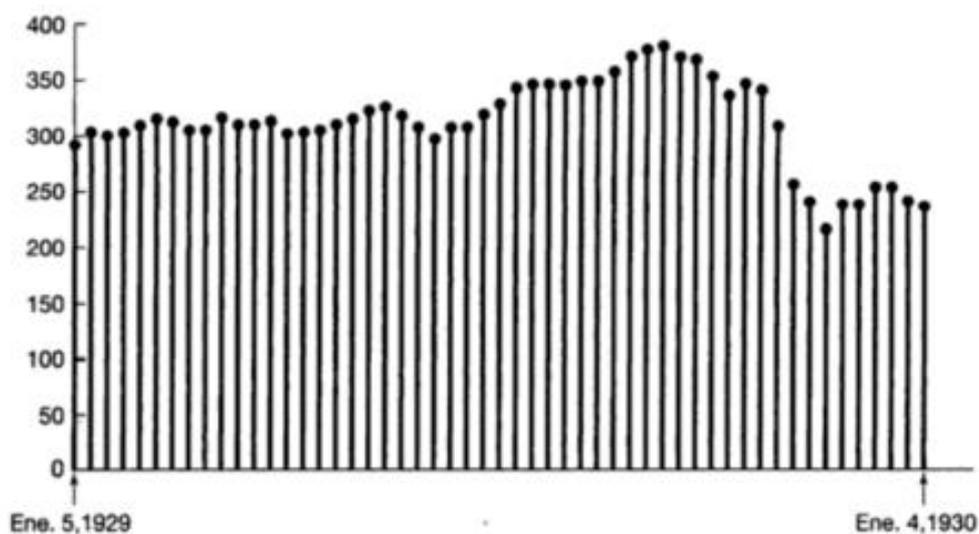
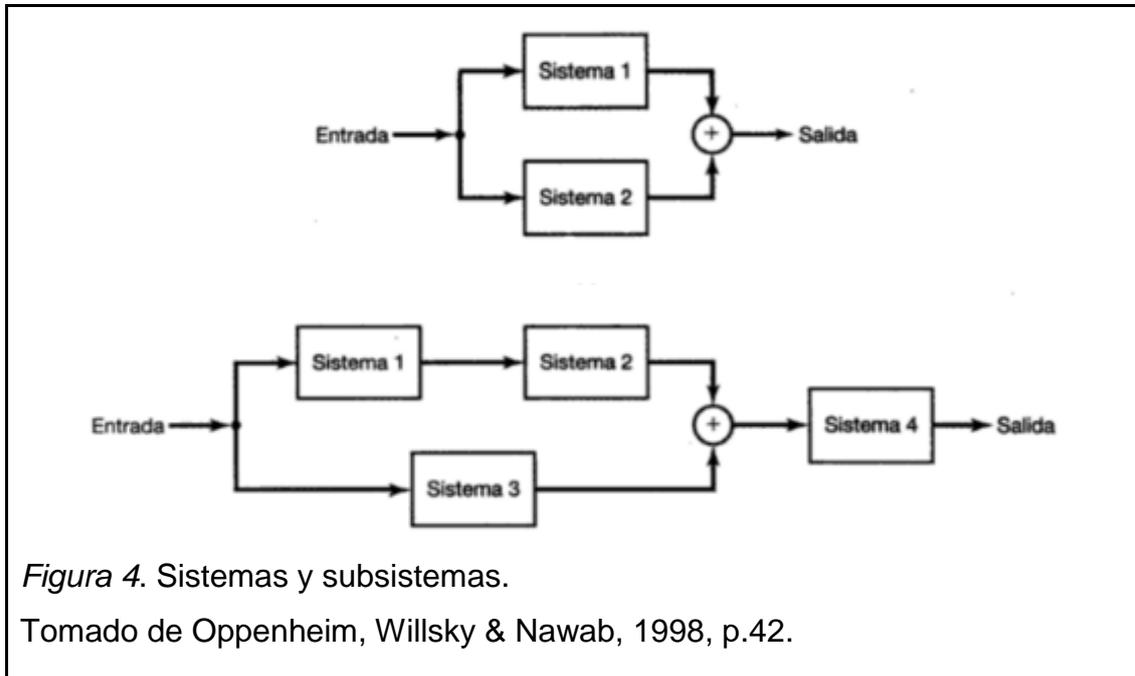


Figura 3. Señal en tiempo discreto.
Tomado de Oppenheim, Willsky & Nawab, 1998, p.4.

2.1.1.2. Sistema.

Un sistema físico básicamente es un conjunto de elementos interconectados, estos elementos pueden ser dispositivos o incluso subsistemas. Al igual que en las señales, los sistemas pueden ser continuos (entra señal continua sale señal continua) o discretos (entra señal discreta sale señal discreta), las cadenas electroacústicas son sistemas que integran una gran cantidad de subsistemas.

Conociendo a detalle el funcionamiento, configuración e interconexión de cada subsistema se puede llegar a determinar el comportamiento del sistema completo. (Oppenheim y Willsky, 1998, p.38.).



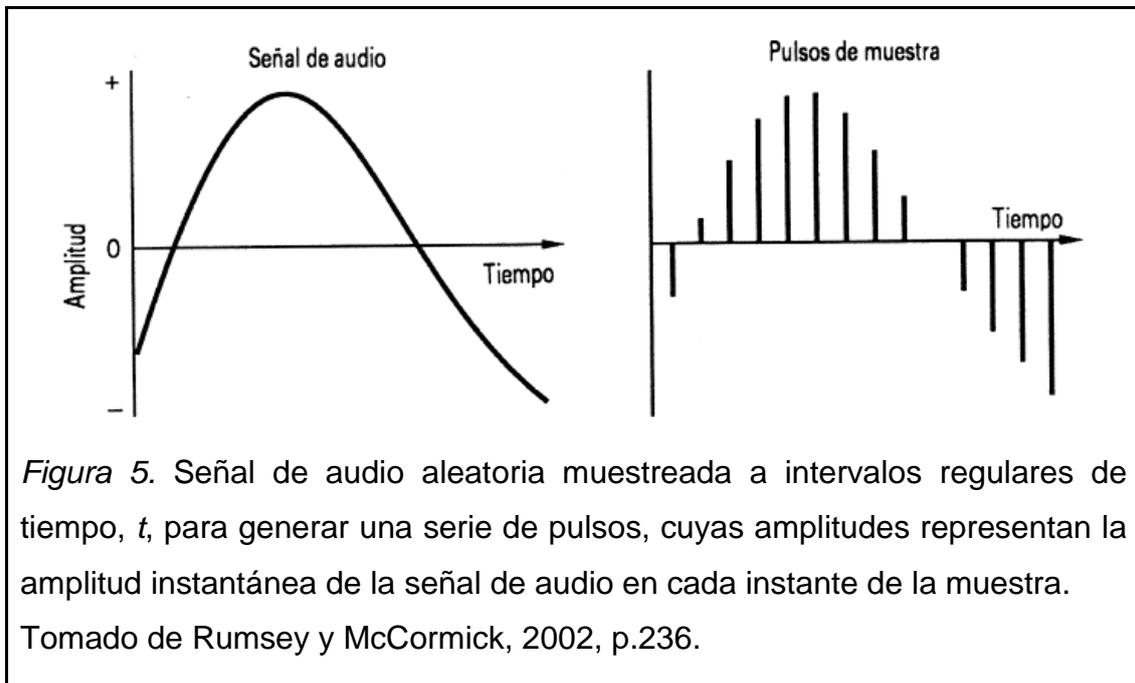
2.1.1.3. Muestreo.

Es el proceso que tiene lugar en un conversor Análogo-Digital cuando se empieza adquiriendo niveles de la señal de audio original a intervalos regulares de tiempo.

El voltaje eléctrico que representa el sonido puede ser positivo como negativo a través del tiempo y adicionalmente los pulsos de muestra representan la amplitud instantánea de la señal en cada momento. De esta manera la analogía del muestreo es como una fotografía estática de la señal de audio.

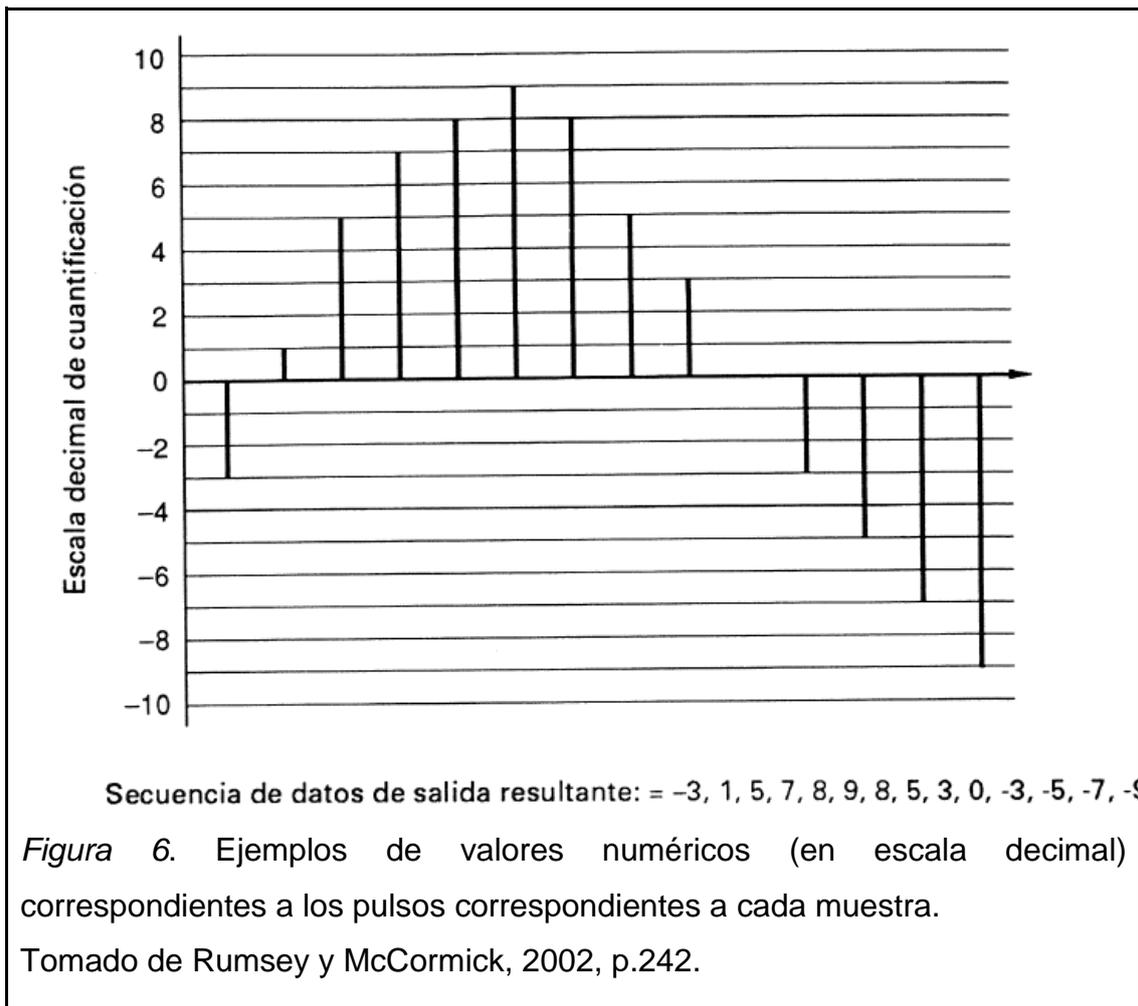
Además, para lograr representar a la señal con fidelidad es necesario tomar una gran cantidad de muestras por segundo. El teorema de muestreo expuesto por Shannon, aclara que se debe tomar al menos dos muestras por cada período de la señal de audio si se desea tener una información suficiente de la misma.

Esto se complementa con el criterio de Nyquist que dictamina: la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta del audio que vaya a manejar el sistema. (Rumsey y McCormick, 2002, pp.236-237).



2.1.1.4. Cuantización.

También llamada cuantificación, es un proceso en el que una vez muestreada la señal, esta debe convertirse en series de números. Consiste en asignar un valor numérico a cada uno de los pulsos, de acuerdo con su respectiva amplitud. Se asemeja mucho al proceso de medir la altura de cada uno de estos pulsos ya sea que se encuentren por arriba o abajo de la línea 0 volts. Este proceso implica asignar a cada muestra un valor de entre un conjunto de escalones prefijados. Se acota también que cada muestra se redondea al entero más próximo. (Rumsey y McCormick, 2002, p.238).



2.1.1.5. Ruido de cuantización.

Al digitalizar señales con un nivel bajo se evidencia un ruido que influye negativamente a la señal, generando armónicos a un nivel relativamente elevado (comparándolo con la señal original) y distorsión debida a la intermodulación. La inclusión de ruido aleatorio conocido como “dither” a la señal con ruido de cuantización reduce este efecto negativo causado por trabajar a niveles demasiado bajos. (Miyara, 2006, p.173).

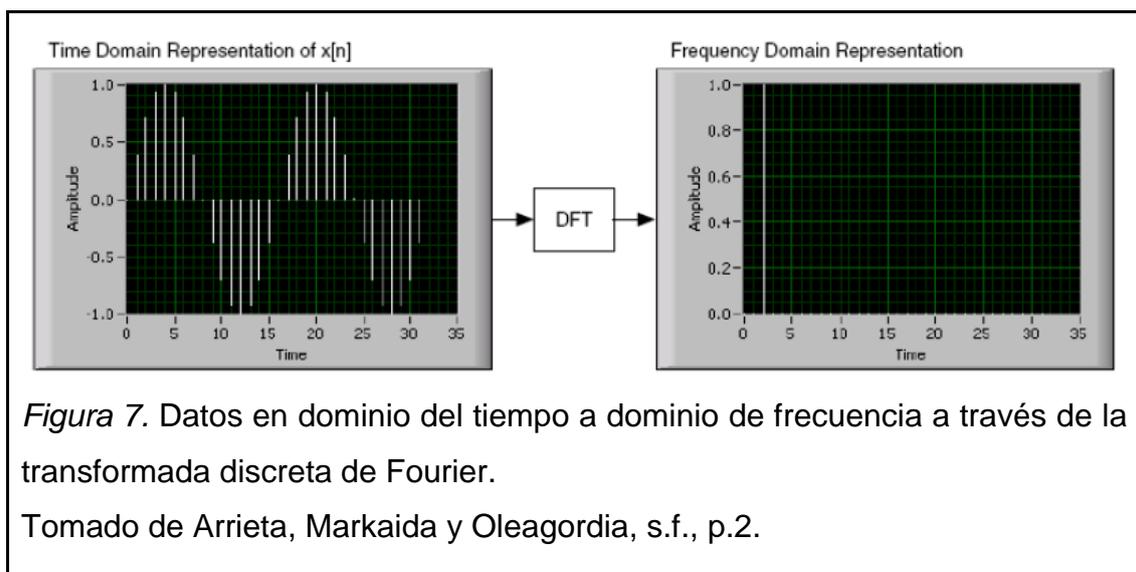
2.1.1.6. Función Rampa.

Función compuesta a base de impulsos unitarios discretos que permite modular el nivel de una señal de audio en el tiempo mediante convolución, se utiliza con el fin de evitar clipeo cuando una señal alcanza abruptamente un nivel elevado o disminuye en un tiempo muy corto, es común que los impulsos unitarios sigan

un patrón de crecimiento o decremento lineal o logarítmico. (Oppenheim y Willsky, 1998, p.612).

2.1.1.7. Transformada discreta de Fourier.

Es el algoritmo que se utiliza para transformar ejemplos de datos en el dominio de tiempo dentro del dominio de la frecuencia. Se conoce como Transformada discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés). La DFT estabiliza la relación entre las muestras de una señal en el dominio de tiempo y su representación en el dominio de la frecuencia, como se muestra en la siguiente figura. (Arrieta, Markadia y Oleagordia, s.f., p.2).



Tal como afirman Arrieta y otros (s.f., pp. 2-3), de obtenerse N muestras de una señal en la banda de tiempo en una adquisición de datos y posteriormente aplicar la DFT, la respuesta también tendrá N muestras y la información contenida estará en la banda de frecuencias.

Además, si la señal se muestrea a un índice de muestreo de f_s [Hz], el intervalo de muestreo Δt será: $\Delta t = 1/f_s$.

Las señales muestreadas se denotan $x[i], 0 \leq i \leq N - 1$ Donde N es el número de muestras y la transformada de Fourier está dada por la expresión (tomada de Arrieta y otros (s.f., p. 2)):

$$X_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{\frac{-j2\pi ik}{N}} \quad ,, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad \text{(Ecuación1)}$$

Esto se aplica a las N muestras y el resultado de las salidas es la representación del dominio de la frecuencia de $x[i]$.

Es así como el dominio de tiempo x y el dominio de la frecuencia X tienen un total de N muestras.

El espacio de frecuencia o resolución de la frecuencia Δf entre los componentes de X en el dominio de la frecuencia está dada por (Arrieta y otros (s.f., p. 3):

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N\Delta t} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Con el fin de incrementar la resolución de la frecuencia se debe incrementar el número de muestras N manteniendo f_s constante o incrementar la velocidad de muestreo para una N constante. A simple vista esto parece contradecirse ya que aumentando el denominador el resultado de Δf es más pequeño, no obstante hay que recordar que el término Δf es el espacio de tiempo entre las muestras o componentes de X en el dominio de la frecuencia, es decir una vez aplicada la DFT.

Por tanto, al seguir esta recomendación se tiene un espacio de tiempo más corto entre muestras, es decir se está siendo más específico y por ende se incrementa la resolución.

2.1.1.8. Transformada rápida de Fourier.

Las ventajas de la FFT incluyen eficiencia en la velocidad y la memoria. El tamaño de la secuencia de entrada debe ser múltiplo de 2. La DFT puede procesar cualquier tamaño de la secuencia eficazmente, pero la DFT es más

lenta que la FFT porque utiliza más memoria debido a que almacena resultados intermedios durante el procesado. (Arrieta et al., s.f. p.8).

Una técnica para hacer que el tamaño de la secuencia de entrada sea múltiplo de 2 e incrementar la resolución de la frecuencia (incrementando el número de muestras N) es adicionar ceros al final de la secuencia para que el número total de muestras sea igual al siguiente múltiplo de 2. Por ejemplo, si hay 10 muestras en una señal se pueden añadir seis ceros para hacer que el número total de muestras sea igual a 16 ($= 2^4$, múltiplo de 2) logrando que el cómputo sea más rápido usando FFT.

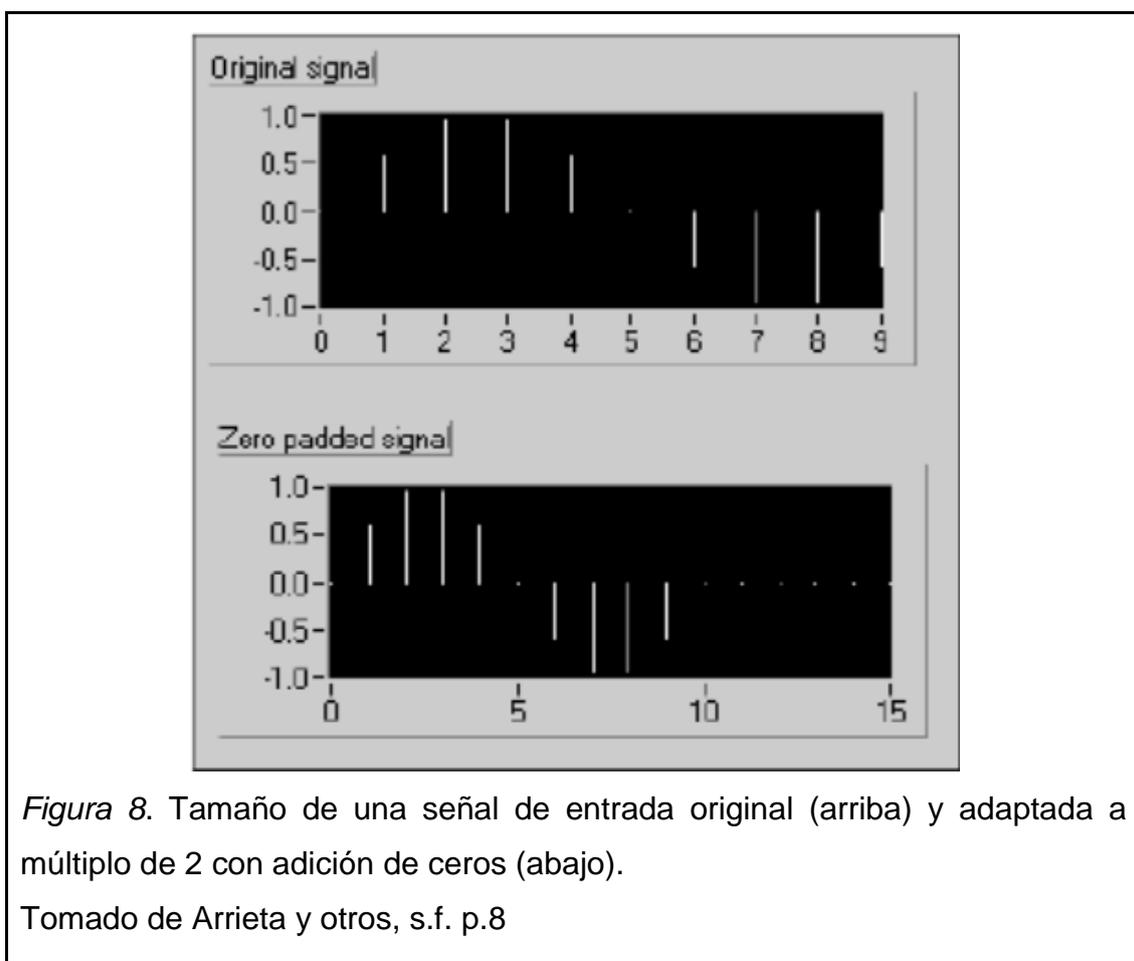


Figura 8. Tamaño de una señal de entrada original (arriba) y adaptada a múltiplo de 2 con adición de ceros (abajo).

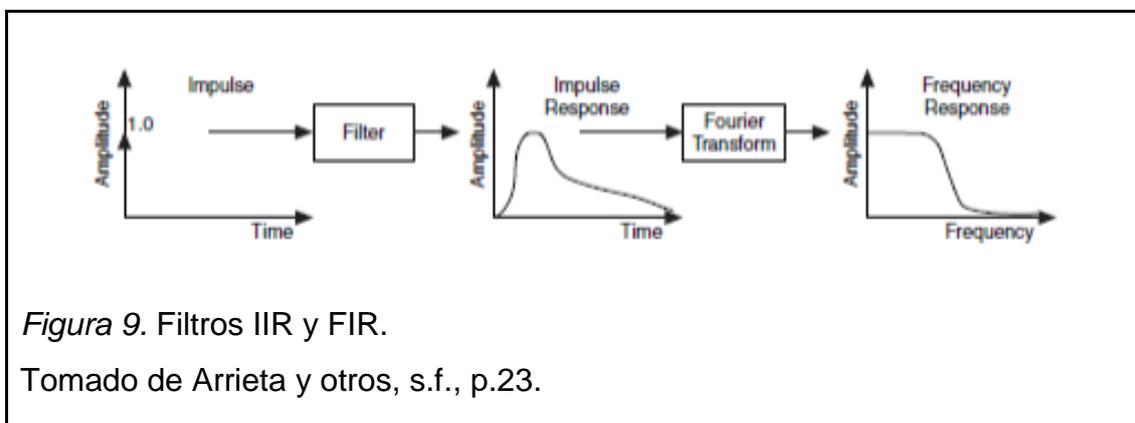
Tomado de Arrieta y otros, s.f. p.8

2.1.1.9. Rango dinámico.

Indica la relación entre el nivel máximo y mínimo de una señal, se expresa en decibeles y nos permite conocer si el sistema se adaptará satisfactoriamente a la señal de entrada. (Miyara, 2006, p.68-69).

2.1.2. Filtros IIR y FIR.

La función de un filtro básicamente es alterar la respuesta de frecuencia de una señal; según su respuesta a un impulso estos se clasifican en filtros de respuesta impulso finita (FIR) si la respuesta impulsiva de un filtro decae a 0 después de un tiempo finito, o de respuesta impulso infinita (IIR) si esta respuesta existe en un tiempo indefinido. La transformada de Fourier de esta respuesta impulso determinará la respuesta de frecuencia que tendrá el filtro. (Arrieta et al., s.f., p.23).



2.1.2.1. Filtros IIR.

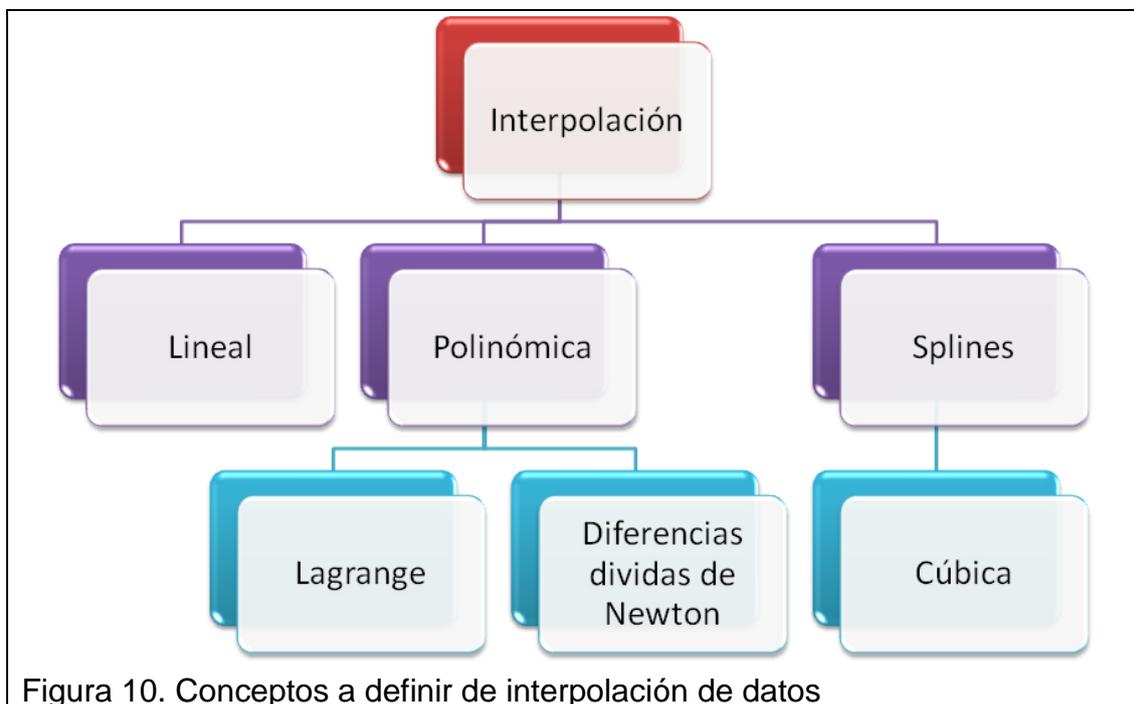
Los filtros de respuesta al impulso infinita se implementan mediante el principio de la ecuación de recurrencia y se caracterizan por ser filtros recursivos, es decir el valor de su coeficiente de alimentación no es nulo, por lo que su salida se calcula agregando la suma de los últimos valores de su salida con la suma de sus valores de entrada en ese instante. La respuesta al impulso de este filtro se expresa como una combinación de exponenciales y sinusoides decrecientes. (EUM, 2011).

2.1.2.2. Filtros FIR.

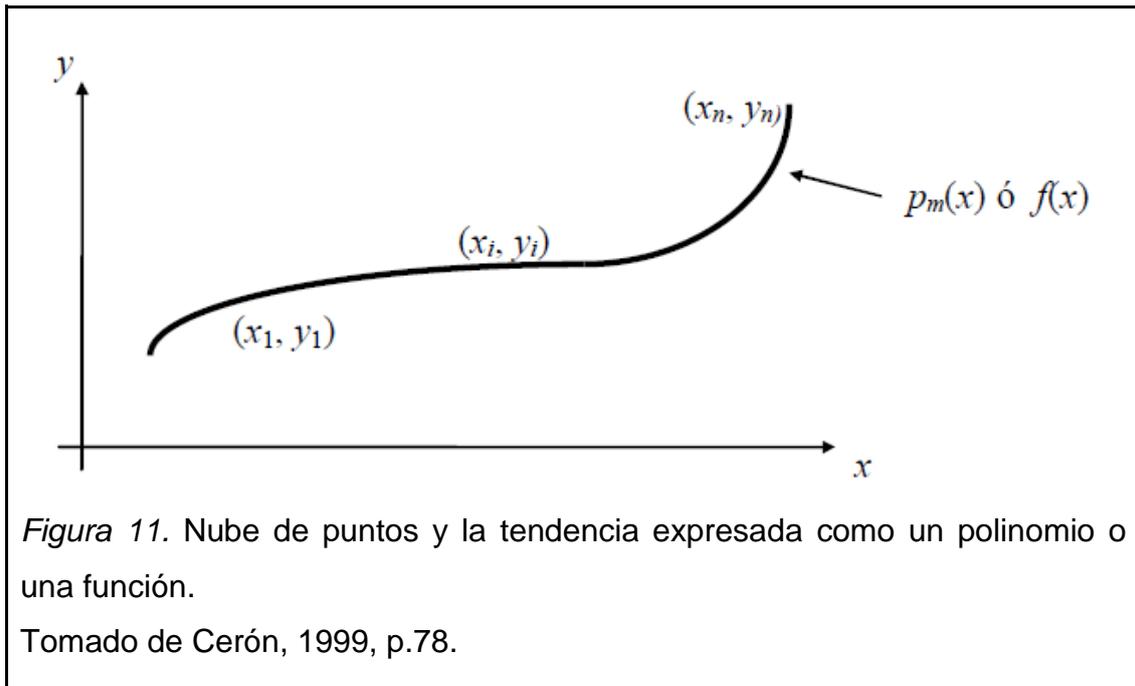
Los filtros de respuesta al impulso finita son filtros no recursivos que se implementan mediante convolución de la entrada con la respuesta impulsiva del filtro. La salida del filtro en cada instante es un promedio ponderado de muestras anteriores de la entrada y la muestra actual. (EUM, 2011). Se consideran como más estables en relación a los filtros IIR, y pueden alcanzar una respuesta de fase lineal y pasar una señal sin distorsiones de fase. (Arrieta et al., s.f., p.28.).

2.2. Análisis numérico.

2.2.1. Interpolación de datos.



La interpolación (aproximación) estadística considera n puntos o pares de valores (x_i, y_i) obtenidos como resultado de algún proceso estadístico o de medición. Con dichos valores se define un polinomio de grado m ($m \leq n$) o una función $f(x)$ que pase lo más cerca posible de los puntos conocidos. (Cerón, 1999, p.78).



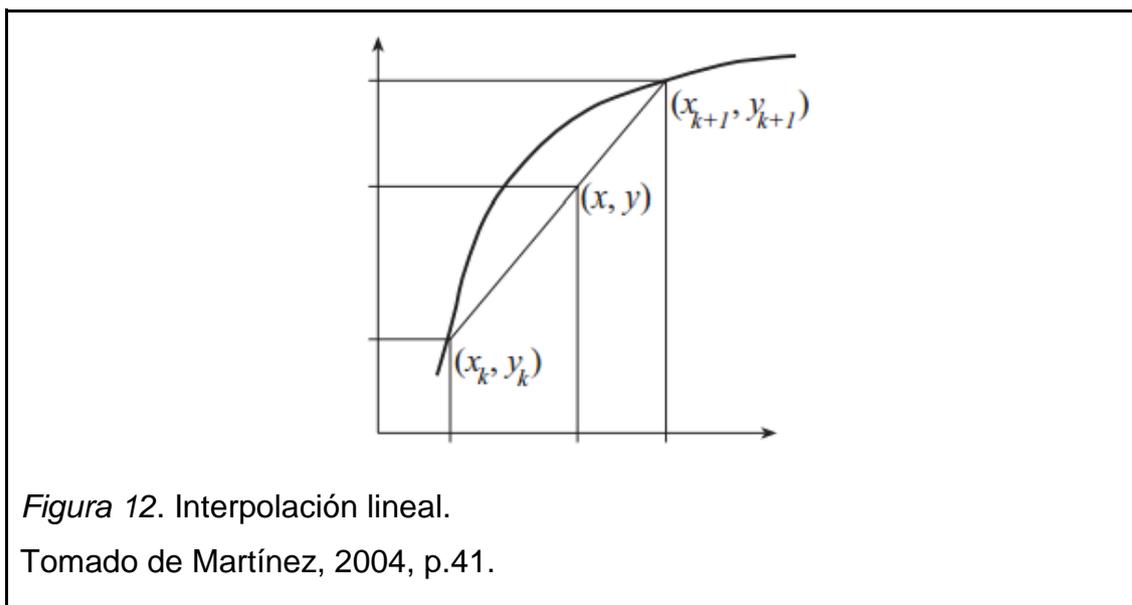
2.2.1.1. Interpolación lineal.

Dados dos puntos en un plano que forman una línea recta se puede estimar valores intermedios a partir de la aplicación del método de interpolación lineal que utiliza teoría de triángulos semejantes. Las siguientes ecuaciones tomadas de Martínez, (2004, p.41) indican que teniendo los puntos (X_k, Y_k) y (X_{k+1}, Y_{k+1}) se aplica:

$$\frac{y - y_k}{x - x_k} = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} \quad (\text{Ecuación 3})$$

y para Y :

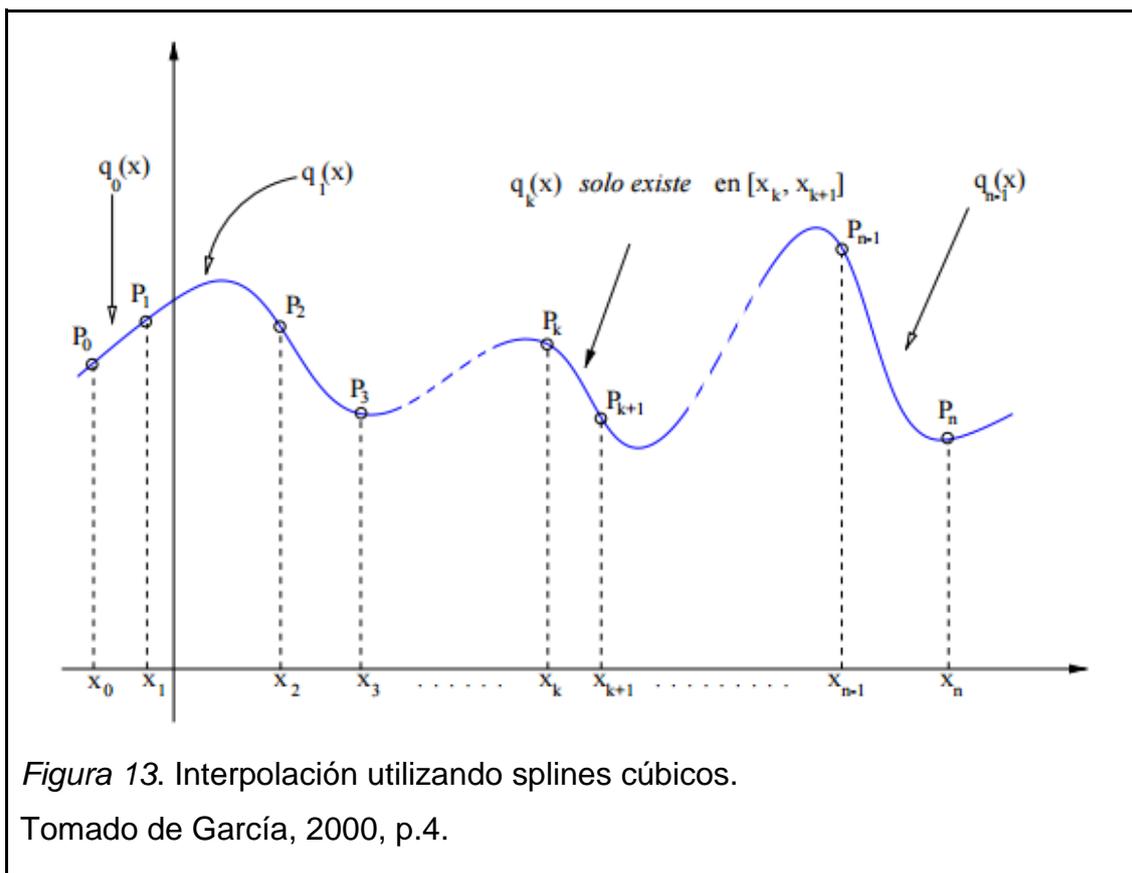
$$y = y_k + \left(\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} \right) (x - x_k) \quad (\text{Ecuación 4})$$



2.2.1.2. Interpolación por splines cúbicos.

El método de interpolación por splines cúbicos coloca un polinomio de tercer grado en cada intervalo de datos. El método no exige equidistancia entre los valores en las abscisas.

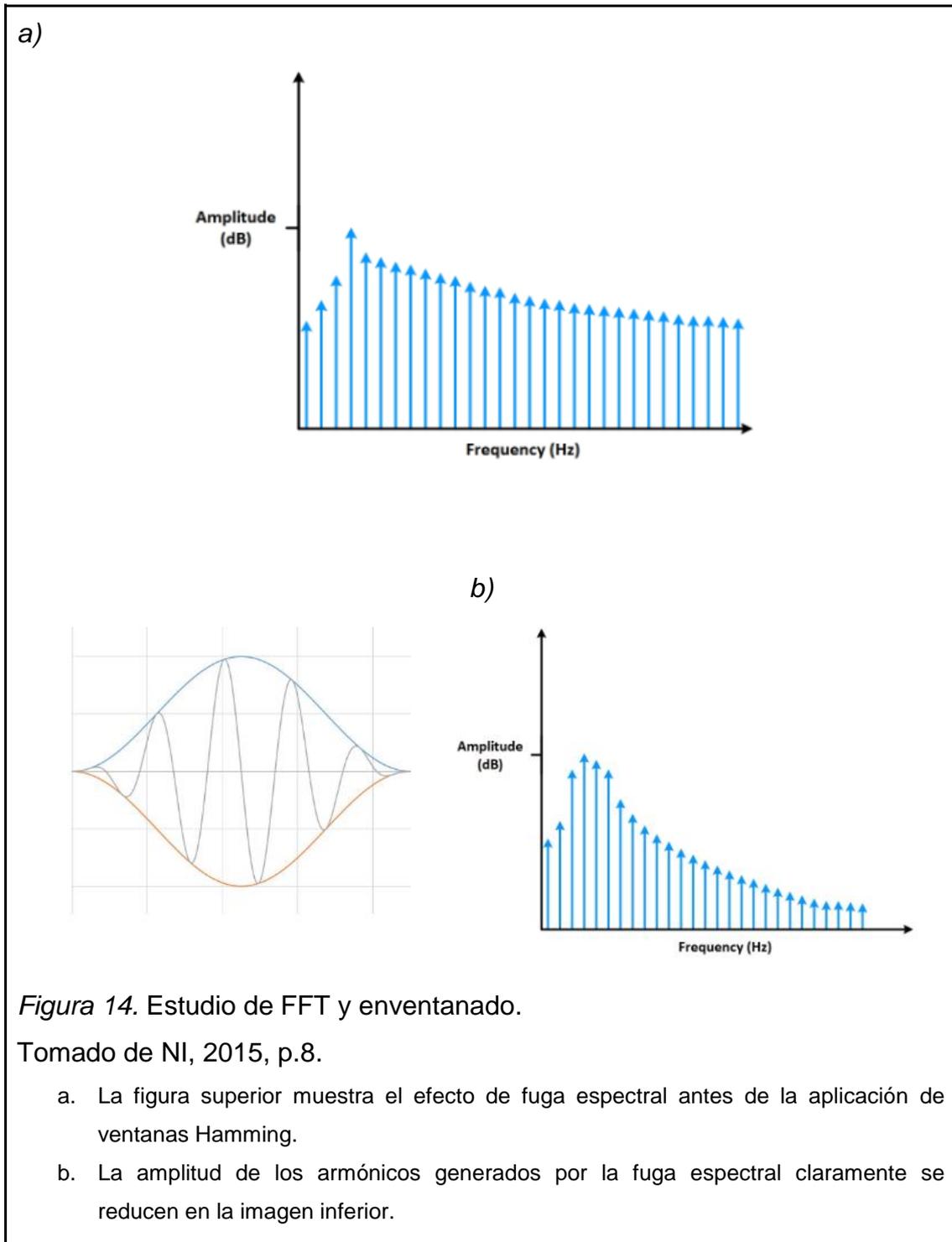
La fórmula a continuación (tomada de García, 2000, p.4) indica que los polinomios cúbicos que interpolen la función tienen que estar dentro del subintervalo $[X_k, X_{k+1}]$, $k = 0, 1, \dots, n - 1$. (Ecuación 5)



2.2.2. Enventanado.

Las ventanas son funciones matemáticas que compensan errores de truncamiento cuando se aplica la FFT a una señal. Esto pasa debido a que la transformada rápida de Fourier interpreta los datos de la señal como períodos completos y no siempre se tiene un número entero de períodos. El truncamiento puede alterar la señal original y producir discontinuidades que resultan en armónicos en alta frecuencia.

El enventanado reduce la energía en las frecuencias que no estaban presentes en la señal original en los límites de cada secuencia finita obtenida por la digitalización al multiplicar una ventana de longitud finita (la cual gradualmente disminuye su nivel en los bordes hasta acercarse a cero). El resultado es la unión de los puntos de inicio y final de los pedazos de señal resultando en una señal continua sin transiciones bruscas reduciendo el efecto de “fuga espectral”. (NI, 2015, p.8.).



2.2.2.1. Ventana Hanning y Hamming.

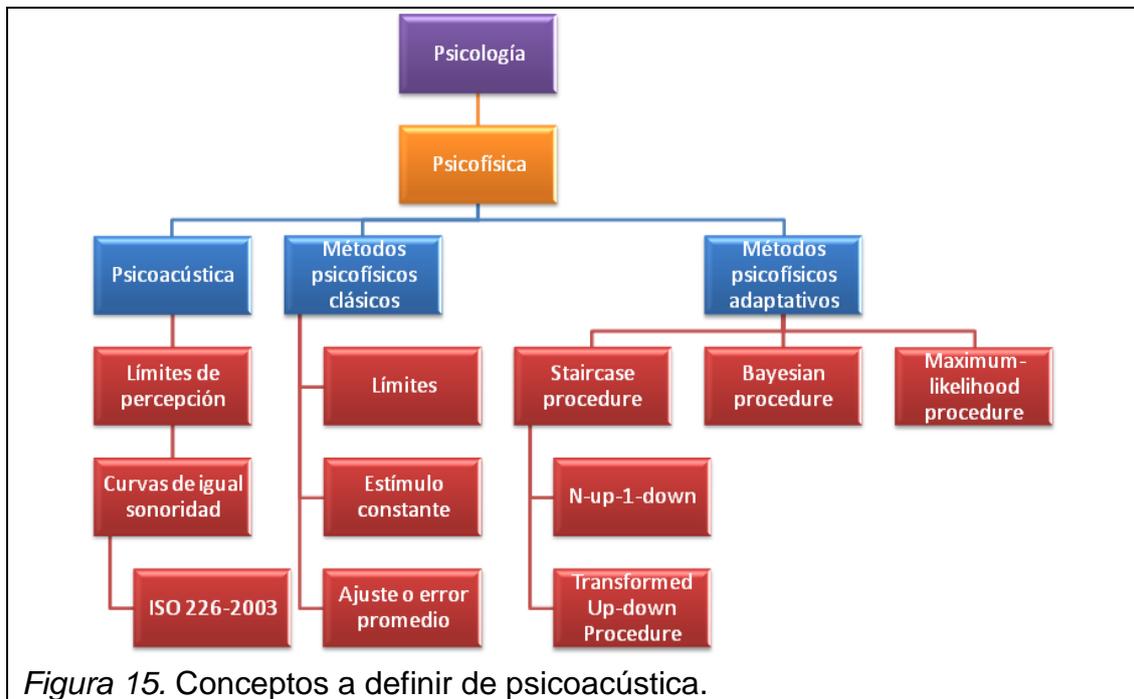
En un 95% de los casos se recomienda el uso de ventanas de Hanning o Hamming por su buena resolución de frecuencia y disminución de fuga espectral. La diferencia básica entre estos dos tipos de ventana es que a pesar

de que ambas tienen una silueta senoidal la ventana de Hamming no llega a cero absoluto en los bordes resultando en mayor discontinuidad con relación a la ventana Hanning. Estos dos tipos de ventanas son recomendadas para ser aplicadas en mediciones de ruido donde se necesite obtener un espectro de mejor resolución. (NI, 2015, p.8.).

2.2.3. Método de Welch.

Es un método de estimación de contenido espectral de una señal a partir de un conjunto finito de observaciones promediadas que consiste en dividir un número N de muestras en K registros, los cuales pueden tener cierto porcentaje de solapamiento (50% recomendado) para posteriormente aplicarles una ventana de Hamming y promediarlos en el dominio de la frecuencia. (Santamaría, s.f. p.40.).

2.3. Psicoacústica.



La psicoacústica es un campo multidisciplinario que incluye a temas físicos (vibraciones, teoría de ondas), fisiológicos (construcción del oído) y percepción (sensaciones auditivas) relacionados a la generación, transmisión y recepción

del sonido. Examina además las vías en la que la física y la fisiología interactúan para dar origen a sensaciones auditivas o percepciones. (Vassilakis, 1995-2013, para.1).

De acuerdo a Plack (2014, pp.3-4) la audición psicofísica o psicoacústica, es el estudio conductual de la audición en la que un participante es requerido a dar respuestas a los sonidos que le son presentados. El principal objetivo de la psicoacústica es determinar la relación entre un estímulo físico (sonido) y las sensaciones producidas por un oyente.

Asimismo, mediante experimentos (llevados a cabo por lo general en cabinas cerradas y a través de audífonos en los que el oyente responde a través de la presión de un botón a ciertos estímulos sonoros) se puede descubrir una gran cantidad de información respecto al funcionamiento del oído y cerebro.

2.3.1. Psicofísica.

El término engloba un conjunto de procedimientos para determinar la relación entre estímulos físicos y las reacciones sensoriales ante estos estímulos, la psicofísica puede ser aplicada a los sistemas sensoriales como la visión, la escucha, el tacto, el olfato o el gusto utilizando los mismos principios y teoría. Un experimento psicofísico sigue 4 principios fundamentales, el estímulo, el test, el método, el análisis y la medición. (Kingdom y Prins, 2010, p.1.).

2.3.2. Función psicométrica.

La función psicométrica describe la forma en que las características físicas de un estímulo alteran las respuestas de un test psicofísico (Kingdom y Prins, 2010, p.59.).

Como ejemplo, en experimentos psicoacústicos la función psicométrica puede tener el nivel del estímulo en el eje de las abscisas y la proporción de respuestas positivas en las ordenadas como se muestra en la siguiente figura. (La definición de “respuesta positiva” depende de cada experimento. Ejemplo: detección de una señal). (Levitt, 1971, p.2.).

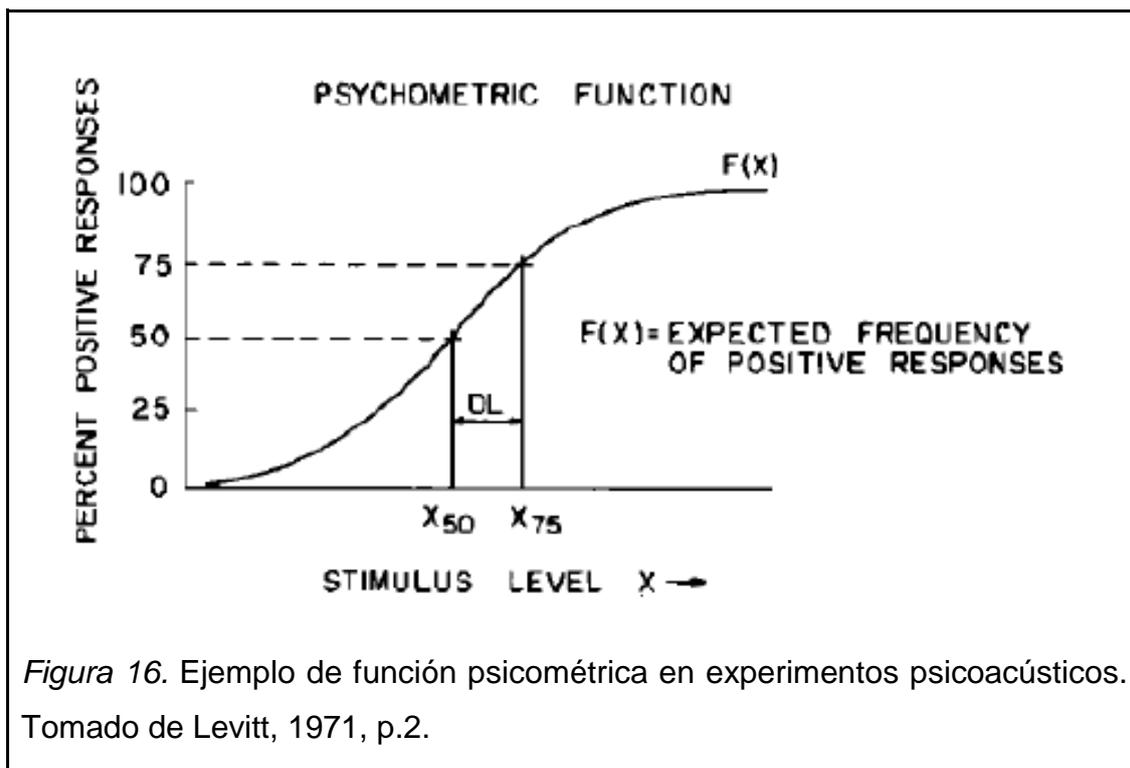


Figura 16. Ejemplo de función psicométrica en experimentos psicoacústicos. Tomado de Levitt, 1971, p.2.

2.3.3. Métodos psicofísicos adaptativos.

Los métodos adaptativos tienen como objetivo aumentar la eficiencia en un test psicofísico y volver menos largo y tedioso el mismo. Se basa en presentar un estímulo a un nivel en el cual se puede esperar obtener mayor cantidad de información de interés. El término adaptativo también viene dado porque los niveles de los estímulos vienen dados o se adaptan a respuestas del sujeto a estímulos anteriores. (Kingdom y Prins, 2010, p.121.).

2.3.3.1. Transformed Up-Down procedure.

El método desarrollado en 1965 por Levitt y Wetherill, varía respecto al Up-Down en cuanto la reducción de nivel de un estímulo no viene dada por la última respuesta sino por dos o más respuestas anteriores. Como ejemplo, un estímulo podría aumentar su nivel si se obtiene una respuesta negativa pero disminuir su nivel a partir de dos respuestas positivas. Se conoce el procedimiento como 1 up/ 2 down el cual tiene un 70,71% de probabilidad de obtener respuestas positivas.

Se pueden realizar variaciones de este método como el 1 up/ 3 down que aumenta su probabilidad a un 79,37% de obtener una respuesta positiva.

La ventaja frente al procedimiento Up-Down tradicional es que el “Transformed” Up-Down procedure permite ubicarse en distintos puntos de la curva psicométrica para su evaluación.

Existen otros métodos adaptativos aparte de up-down y sus variaciones, Termination Criteria o métodos PSI (Psychological Screening Inventory). Un estudio más profundo de los métodos, así como una introducción a su aplicación en MATLAB se encuentra en el libro Psychophysics: A practical Introduction. (Kingdom y Prins, 2010, p.125.).

2.3.4. Curvas de igual sonoridad.

Una curva de igual sonoridad (curva isofónica) es una curva en un gráfico con variables de NPS (eje y) versus la frecuencia (eje x) que representan a los tonos del mismo nivel sonoro. (Moller y Pedersen, 2004, p.50).

Se tienen como principal referencia los estudios realizados en 1933 por Fletcher y Munson, quienes utilizaron un tono de 1000 [Hz] a una amplitud fija como referencia y otro tono de distinta frecuencia y amplitud variable que el sujeto tenía que ajustar hasta que sea igualmente intenso que el tono de referencia. Al graficar los resultados en función de la frecuencia se obtienen las curvas de igual sonoridad para intensidades que van desde 0 hasta 120 decibeles en pasos de 10 decibeles en el tono de referencia. Las curvas muestran una comparación de intensidad subjetiva de dos tonos puros con diferentes intensidades y frecuencias. Robinson y Dadson en 1956 determinaron estas curvas con mayor precisión y posteriormente fueron normalizados en la ISO 226. (Miyara, 2006, p.21).

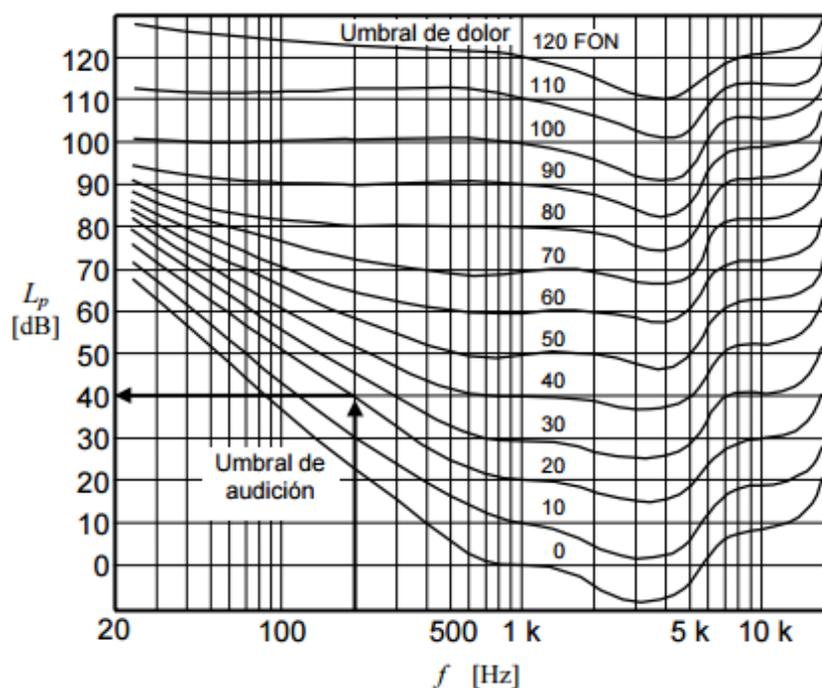


Figura 17. Curvas de igual sonoridad de Fletcher y Munson 1933.

Tomado de Miyara, 2006, p.21.

2.3.5. ISO 226-2003.

El primer estándar internacional que define un acuerdo internacional acerca de los umbrales de audición humana es la ISO R224:1961. Este documento da información acerca de los umbrales de audición y de las curvas de igual sonoridad. Los contornos aparecidos aquí fueron basados únicamente en los estudios de Robinson y Dadson en 1956. No obstante, no cubre datos bajo los 20 [Hz].

Posteriormente se realizaron revisiones y publicaron nuevos estándares tales como la ISO 226:1987 e ISO 389-7:1996 para culminar en la ISO 226:2003. En esta última los umbrales de audición son basados en los de 1996 y adicionalmente siete investigaciones más siendo 2002 el año más reciente de este conjunto. (Moller y Pedersen, 2004, p.45-46).

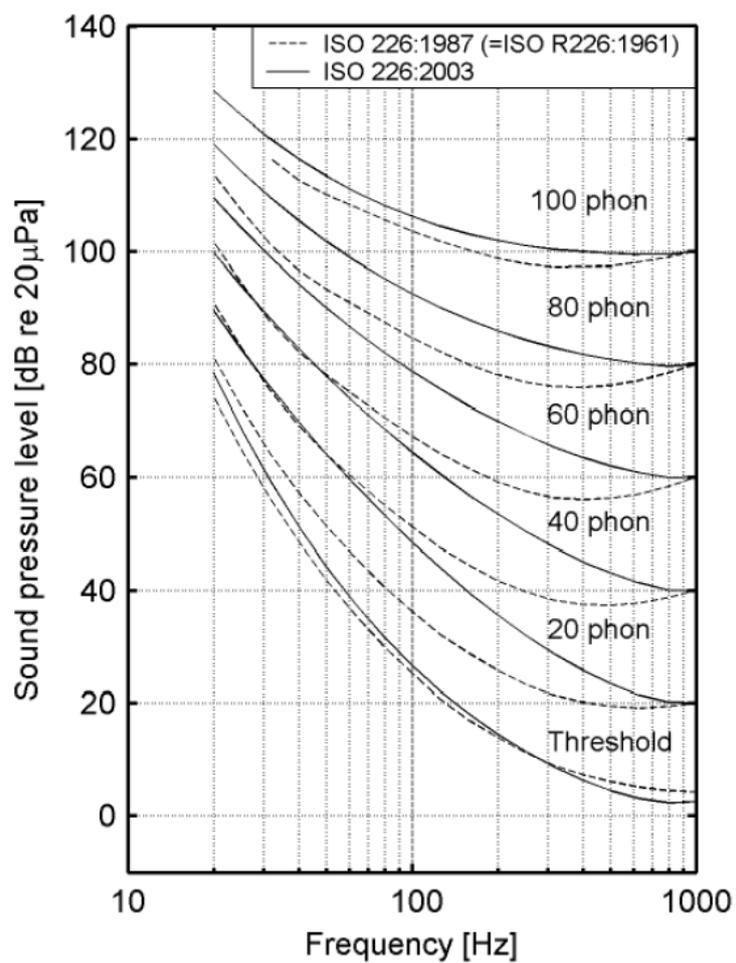


Figura 18. Curvas de igual sonoridad estandarizadas.

Tomado de Moller y Pedersen, 2004, p.53.

- a. Las curvas cubren el rango de frecuencia de 20 [Hz] a 1000 [Hz].
- b. Se presentan las curvas de la ISO de 1987 (igual a la de 1961) y la del 2003 (más actual y en vigencia).

2.4. Ruido de baja frecuencia.



El rango de frecuencias por debajo de los 200 [Hz] se considera como baja frecuencia, y desde 20 [Hz] hacia abajo se considera infrasonido. Si bien la sensación tonal se pierde a partir de los 16 a 18 [Hz] el infrasonido es audible. El ruido de baja frecuencia se considera entre los 10 hasta los 200 [Hz].

Moller y Pedersen (2004, p. 54) dictaminan que a pesar de la concepción de que el infrasonido es inaudible, los humanos pueden percibir el sonido debajo de 20 Hz. Esto se aplica a todos con un órgano normal de la audición y no solo a pocas personas. Igualmente, entre los ejemplos típicos de fuentes sonoras de baja frecuencia están: sistemas de ventilación, compresores, camiones con motor encendido y sistemas estéreo de residencias.

El infrasonido a niveles audibles es hallado en autos viajando con ventanas abiertas. Sin embargo, este infrasonido es comúnmente acompañado de sonido a otras frecuencias por lo que la sensación de escucha al infrasonido puro no es común. (Moller y Pedersen, 38, 2004).

2.4.1. Propagación.

La atenuación del aire aumenta en una proporción cuadrática según aumenta la frecuencia, en el rango de baja frecuencia e infrasonido esta atenuación es casi despreciable. La atenuación por barreras o de la superficie son igualmente muy bajas en este rango del espectro de frecuencias. La reducción en nivel por el recorrido de la onda en el espacio sí contribuye en su disminución de nivel en hasta 6 [dB] por doble de distancia. (Leventhall, 2003, p.8.).

Leventhall (2003, p.54) ahonda aún más aclarando que la exposición al infrasonido es constante en el día a día de humanos ya que es generado naturalmente a través de fuentes sonoras como terremotos y el viento. Incluso es común en entornos urbanos y como emisiones de fuentes sonoras artificiales entre las que se encuentran a: automóviles, aviones y explosiones mineras. También en movimiento de aire mecánico como turbinas de aire y unidades de ventilación y aire acondicionado.

Los efectos perjudiciales en humanos por la exposición a esta baja frecuencia o infrasonido; al no atenuarse rápidamente en el tiempo y distancia debido a constantes fuentes de emisión, propagación óptima y pobre eficiencia de materiales aislantes (paredes, fachadas y protectores auditivos); son del tipo cardiovascular (presión sanguínea), nervioso, irritabilidad, sueño, debilitamiento, afectación en el sistema vestibular, sistema auditivo, sistema endócrino, entre muchos otros.

2.4.2. Umbrales de audición en baja frecuencia.

El término umbral de audición implica la existencia de un punto discreto a lo largo de la intensidad continua de un estímulo particular sobre el cual cada persona es capaz de detectar la presencia del estímulo. No obstante, la sensibilidad del organismo a los estímulos sonoros tiende a fluctuar y las mediciones de los valores de umbral deben ser promediados con el fin de llegar a una estimación acertada de umbral. (Scharine, A., Kara D., & Tomasz, L., p.393).

Tal como menciona Scharine et al. (2009, p.396), al momento de describir un umbral de audición es vital considerar no solo si el umbral es monoaural o binaural sino también cómo es presentado el sonido y dónde es medido el arribo del estímulo. Por ende, dos tipos de umbrales de audición son de importancia.

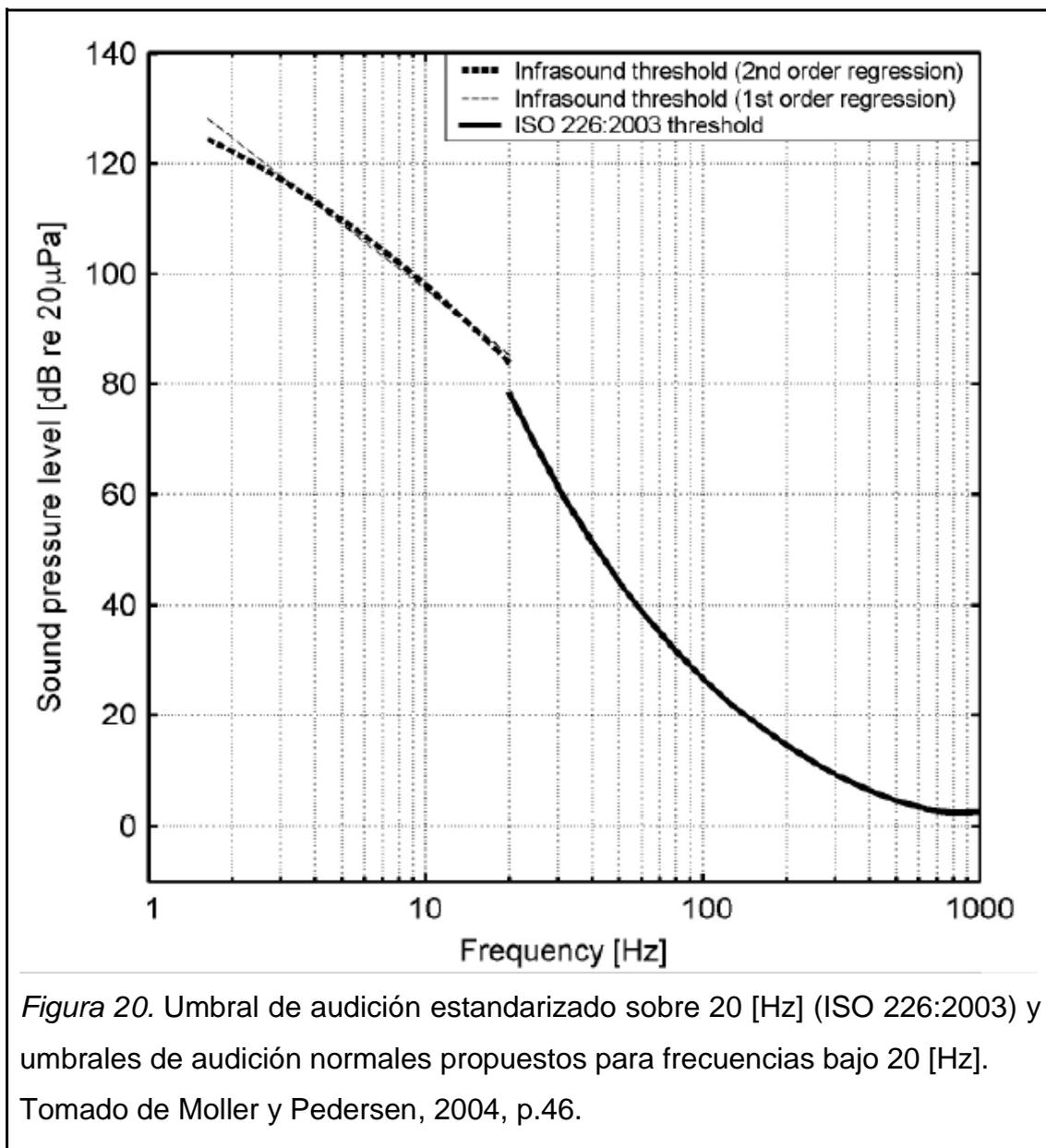
El umbral del mínimo campo audible o (MAF por sus siglas en inglés) se refiere al umbral de audición para ondas sonoras que llegan al oído en un campo libre desde una distanciada fuente sonora como un altavoz.

Por otro lado, el umbral de la mínima presión audible se refiere al umbral auditivo de un estímulo que llega ocluyendo el canal auditivo a través de un audífono intraural (earphone).

Desde el año 1958 se han mostrado resultados de umbral auditivo en el rango de baja frecuencia e infrasonido. La metodología de medición con la que se realiza el experimento (audífono monoaural/binaural, cámara de presión, campo libre) generalmente muestra resultados distintos, por ejemplo, la escucha binaural es 3 [dB] más sensitiva que la monoaural o que los niveles en campo libre son obtenidos sin el sujeto a diferencia de la cámara de presión.

Adicionalmente el estudio de Sivian y White de 1933 concluyó que los umbrales binaurales fueron similares a los monoaurales para el mejor oído de la persona.

Aparte, resultados de Watanabe y Moller (1990, p.111) indican que las diferencias de las curvas de umbrales de audición eran muy bajas y nunca excedían 1 [dB] y por tanto la presión presentada al oído del sujeto fue la misma que en la metodología de campo libre.



La baja sensibilidad en bajas frecuencias se debe principalmente a la pobre transmisión de energía en estas frecuencias por los sistemas mecánicos del oído externo y medio y la excitación limitada de las células ciliadas en el rango de baja frecuencia. (Scharine et al., 2009, p.396).

2.4.3. Sonoridad y contornos de igual sonoridad en baja frecuencia.

Principalmente, la sonoridad es una manifestación perceptual de cómo el mecanismo de la audición representa la intensidad de una onda sonora y

además crea comparaciones de intensidad entre señales a través de la frecuencia y tiempo.

En términos fisiológicos la intensidad puede ser una medida de la actividad total de la membrana basilar. (Vassilakis, 1995-2013, p.1).

La sonoridad es una medida de la intensidad subjetiva percibida de un sonido. Su unidad es el phon (fono) y para un sonido dado tiene el mismo valor numérico que el NPS ([dB] relativo a 20 [μ Pa]) de un sonido de referencia igualmente fuerte. (Moller y Pedersen, 2004, p.50).

La unidad de nivel de sonoridad es el fono (phon). El nivel de sonoridad de una frecuencia dada en fonos es equivalente al nivel de intensidad sonora (SIL por sus siglas en inglés) de un tono igualmente fuerte de 1000 [Hz].

Por otro lado, se tiene que el sono (sone) es una unidad de sonoridad y representa la sonoridad de un tono de 1000 [Hz] a un SIL o NPS de 40 [dB]. La ventaja de la escala en sonos es que es basada en unidades sonoras proporcionales a la sonoridad y pueden ser manipuladas aritméticamente en vez de logarítmicamente (Ejemplo: dos sonos suenan el doble de fuerte que uno solo). (Vassilakis, 1995-2013, para. 16-24).

Los contornos de igual sonoridad publicados en la normativa ISO 226/1987 fueron medidos a partir de la variación del nivel por parte del sujeto en relación a un tono de 1000 [Hz], con el fin de evaluar frecuencias menores éstas se comparan indirectamente con este tono de referencia de 1 [kHz], por ejemplo, al comparar un tono de 100 con uno de 1000 [Hz] y posteriormente uno de 50 con uno de 100 [Hz] se puede continuar evaluando la curva de x fonos en frecuencias menores.

Investigaciones de umbrales en baja frecuencia e infrasonido también han incluido mediciones de contornos de igual sonoridad, los resultados de Watanabe y Moller de 1990, muestran una tendencia en cuanto a la disminución de la frecuencia de estudio en la que las curvas de distinto valor de

fonos se juntan significativamente como se muestra en la siguiente figura. (Leventhall, 2003, p.15.).

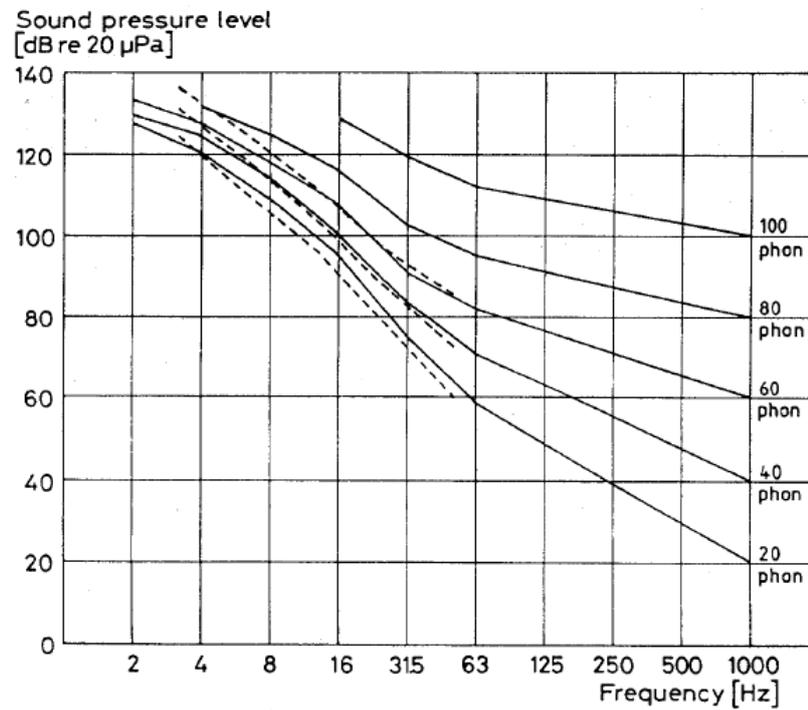
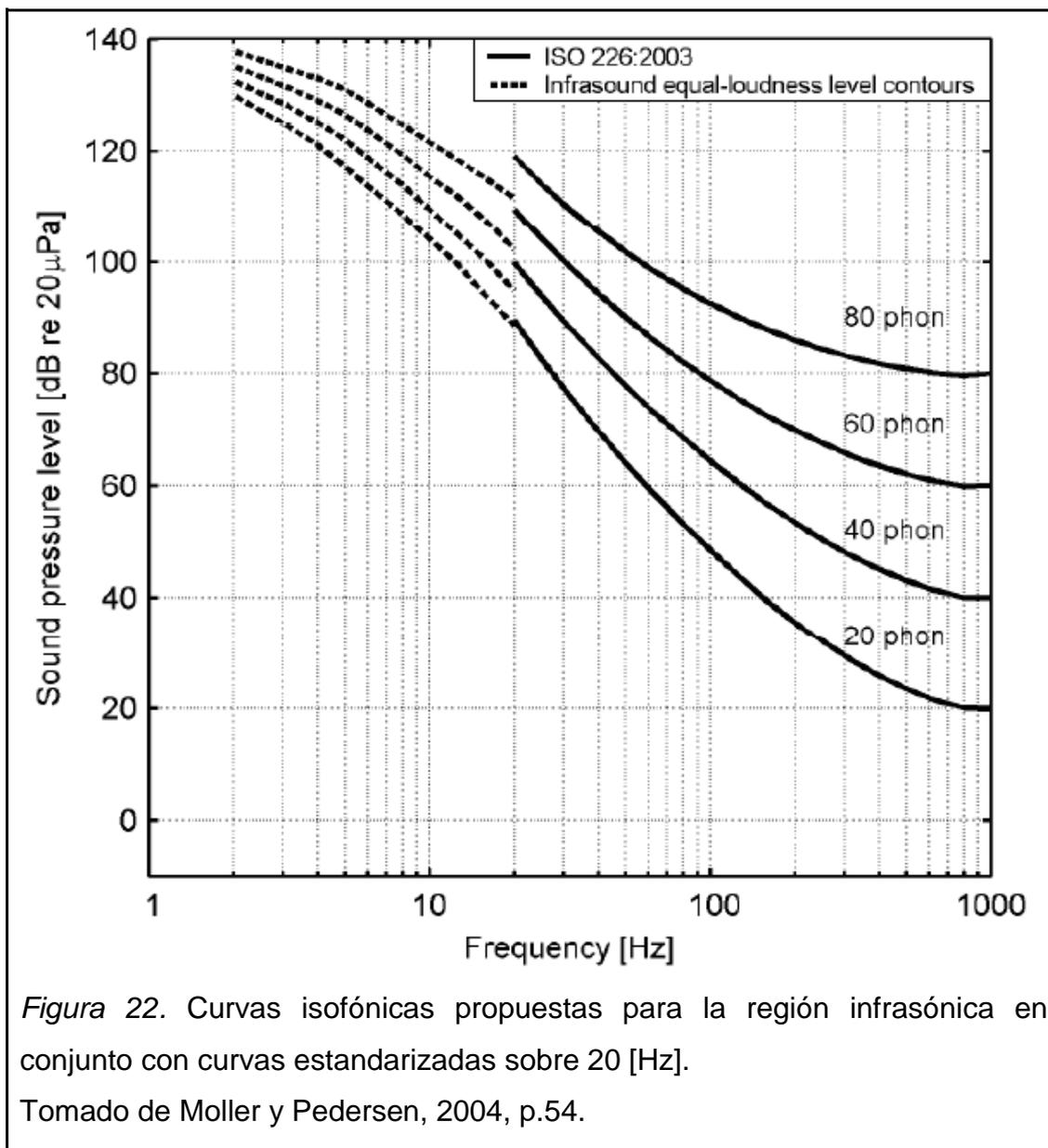


Figure 9. Loudness measurements.

— Møller and Andresen
 - - - - Whittle

Figura 21. Mediciones de sonoridad en infrasonido.

Tomado de Leventhall, 2003, p.16.



2.5. Infrasonido.

2.5.1. Métodos de emisión de infrasonido.

2.5.1.1. Cámara de presión.

Este método de medición consiste en obtener niveles a bajas frecuencias usando un espacio o cuarto pequeño dispuesto de una cantidad de altavoces en cada una de las paredes y el techo. Estos parlantes son excitados en fase para que ninguna energía fluya en el recinto. (Suzuki y Takeshima, 2004, p. 919).

Está dicho también que la MAP puede ser medida en cualquier campo sonoro, no obstante, es usualmente realizada en cámaras de campo de presión que encierran al cuerpo entero del oyente.

El estudio de Watanabe y Moller (1990, p.114) concluyó que no hay diferencia entre los umbrales de audición en el campo libre y en el campo de presión, y los valores encontrados pueden considerarse como muy fiables.

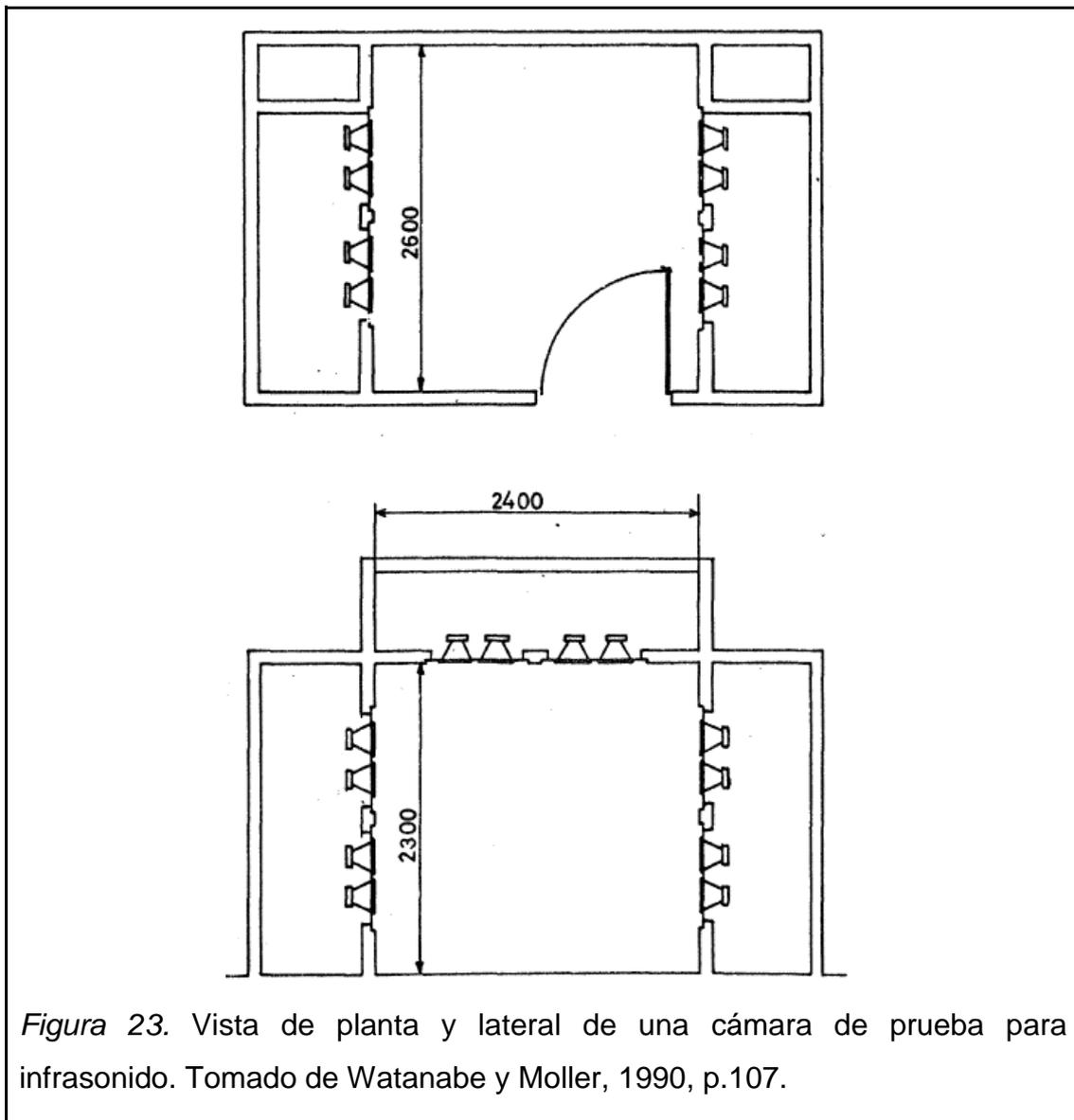
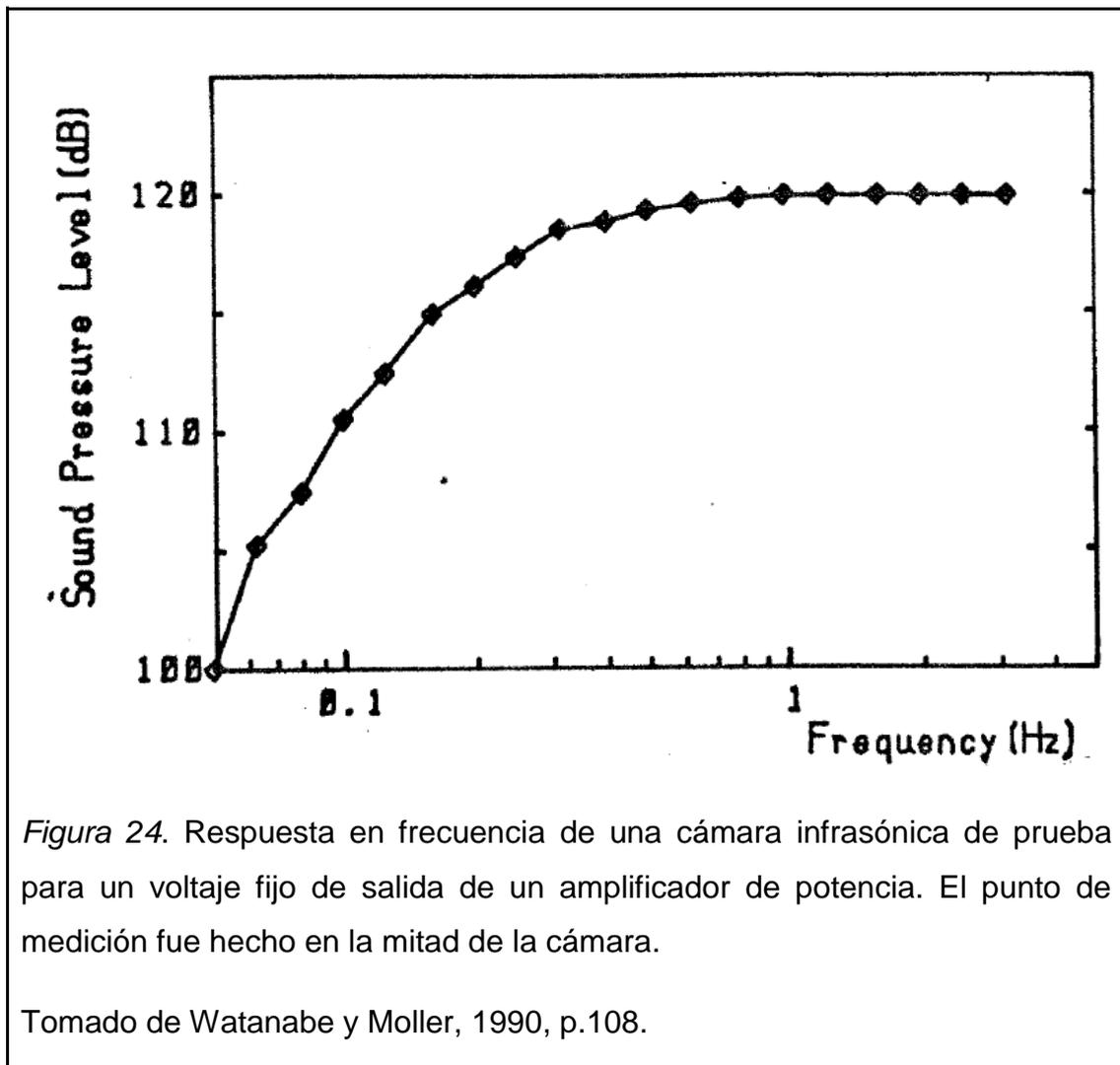


Figura 23. Vista de planta y lateral de una cámara de prueba para infrasonido. Tomado de Watanabe y Moller, 1990, p.107.

Como ejemplo se presenta la respuesta en frecuencia del sistema cámara de presión empleado en 1990.



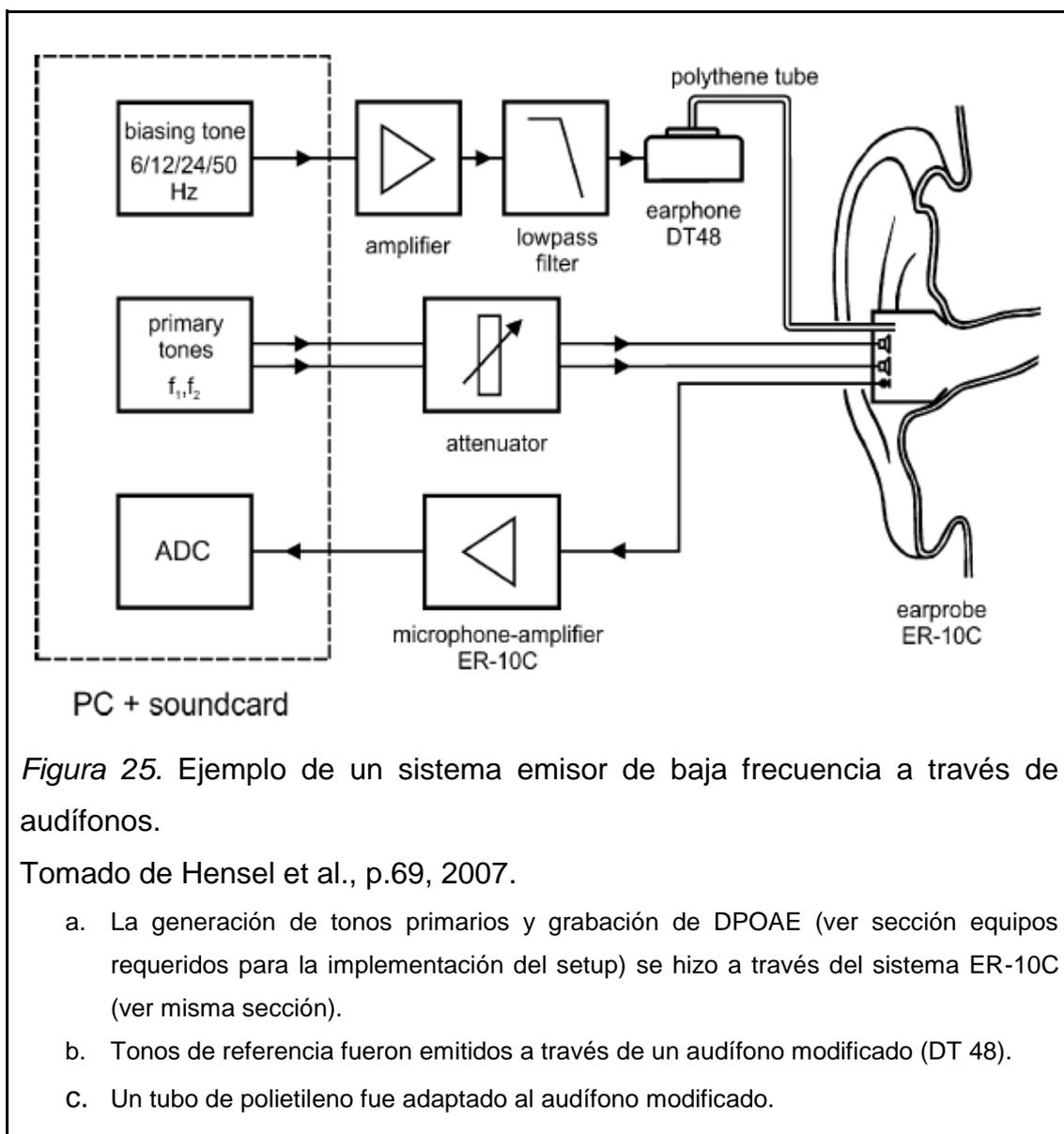
2.5.1.2. Mediante audífonos.

Este método consiste en generar sonido creado en una cavidad que es acoplada al oído (o ambos oídos). Esta cavidad es muy pequeña tal como el audífono supraural (recae en el pabellón auditivo) para audiometrías. La actividad fisiológica alrededor de la oreja parece resultar en ruido debajo del audífono que eleva el umbral particularmente a bajas frecuencias.

Muchos investigadores han producido sonido en una cámara de presión conectando el/los oído/s externo/s a tubos pequeños. (Moller y Pedersen, 2004, p.40-41).

Otro estudio realizado por Kuehler et al., (2015, p.2) usando un método similar indica que el volumen cerrado entre la membrana de un altavoz, un tubo y el

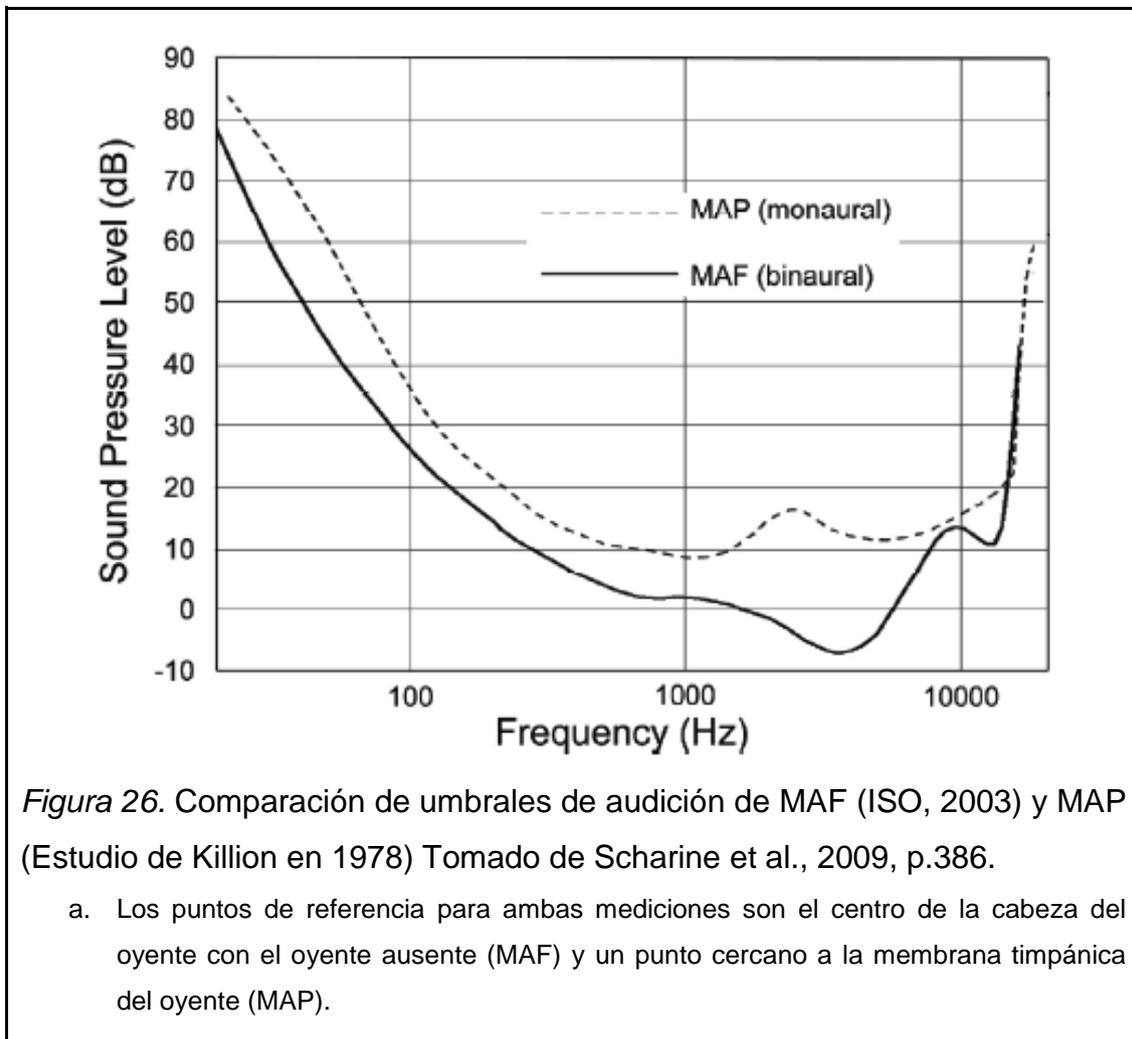
oído de una persona de prueba representa una cámara de presión para muy bajas frecuencias (<10 [Hz]) y por tanto permiten bajas pérdidas de excitación acústica para generación de infrasonido e inclusive, el tubo acoplado actúa como un filtro paso bajo.



2.5.1.3. Campo libre.

Un campo sonoro libre es un campo acústico libre de reflexiones y dispersiones en el que las ondas sonoras llegan a los oídos de los oyentes desde una única dirección identificada por la posición de la fuente sonora en relación con el eje central del oyente. (Scharine et al., 2009, p. 393).

En torno a las altas frecuencias la presencia o ausencia de una persona tiene un impacto directo en el campo sonoro y existe una significativa diferencia entre los indicadores para medición de umbrales de audición como el campo sonoro mínimo (MAF por sus siglas en inglés) y la mínima presión audible (MAP).



Las diferencias entre ambos umbrales obtenidos para sonido presentados en el campo libre versus aquellos a través de audífonos son grandes debido a las propiedades reflectivas de la cabeza humana, el torso y diferentes amplificaciones sonoras por propiedades de resonancia propias del canal auditivo.

Con respecto a las bajas frecuencias, por otro lado, el efecto de la cabeza o cuerpo del oyente tienen poco o nada de impacto en una onda plana libre.

De acuerdo a Moller y Pedersen (2004, p.40). La mayoría de estudios para medir umbrales de audición han sido realizados en un campo libre o aproximadamente libre (cámara anecoica) usando un transductor electrodinámico (por lo general un altavoz) como fuente sonora.

Por debajo de 25 [Hz] mucha información no ha sido reportada debido a que en campo libre es difícil producir altos y suficientes niveles de presión sonora especialmente a bajas frecuencias e incluso las paredes de las mejores cámaras anecoicas se tornan reflectivas.

3. METODOLOGÍA

3.1. Equipos requeridos para la implementación del setup.

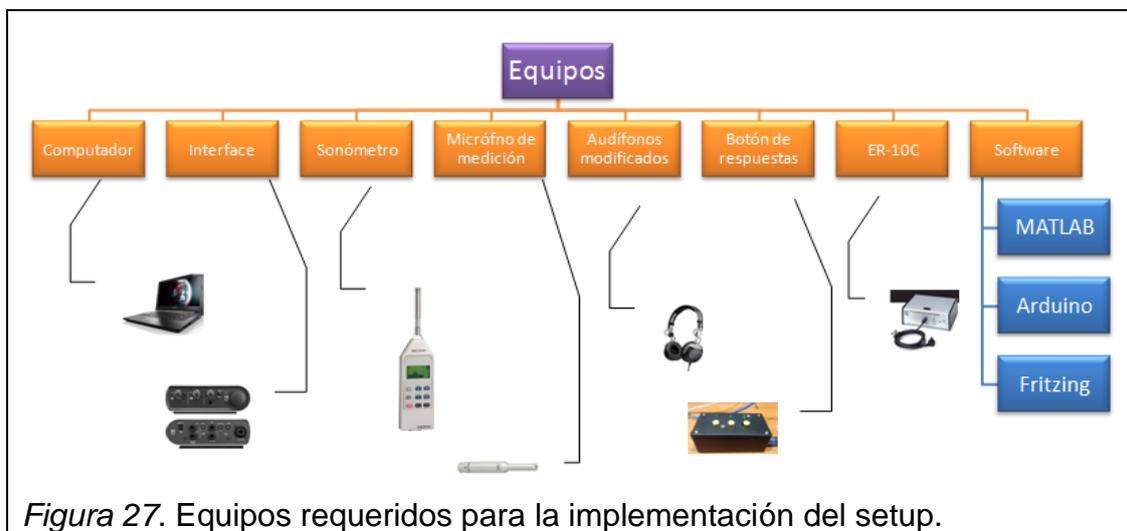


Figura 27. Equipos requeridos para la implementación del setup.

3.1.1. Computador.

Aunque se quiso usar una estación de trabajo de escritorio (y las proyecciones de esta investigación contemplan eso) se usó una computadora portátil marca Lenovo modelo G40. Sus características técnicas incluyen: procesador Intel Core i7 con 6GB de memoria RAM y sistema operativo de 64 bits.

Este recurso es usado para el sistema de emisión y control ya que en este se conecta la interface Fireface 802 a través de un puerto USB, la cual se encarga de interactuar con los otros elementos (micrófono y audífono) para temas de calibración, emisión y medición de datos de NPS.

3.1.2. Interface.

Básicamente se usaron dos interfaces. Una Mbox 3 mini prestada por la carrera para medir respuesta de espectro de los audífonos DT 1350 antes de modificarse y posteriormente se adquirió la interface RME Fireface 802. Este sería el dispositivo encargado de convertir la señal digital a análoga (emitiendo tonos puros de baja frecuencia y ruido blanco normalizado hacia el audífono DT 1350) y viceversa (midiendo niveles de presión sonora captados por el micrófono).

Esta interfaz dispone de 12 entradas y salidas analógicas de las cuales para el proyecto se usaron: entrada analógica 9 para la conexión del micrófono de medición Samson MM01 y salida Phones 11-12 donde se conectaría a través de un plug $\frac{1}{4}$ ' a jack estéreo $\frac{1}{8}$ ' el parlante derecho del audífono DT1350 modificado.

3.1.3. Sonómetro.

Ya que el trabajo propuesto involucra gran variedad de mediciones acústicas para temas de calibración, fue necesario hacer uso de un sonómetro y analizador de espectro profesional marca CESVA modelo SC 310 disponible en la carrera junto con su respectivo calibrador acústico modelo CB006.

Se trata de un sonómetro integrador clase 1 ampliable a analizador de espectros en tiempo real por tercios de octava. Entre las funciones que permite obtener este dispositivo se encuentran: funciones F, S e I, niveles continuos equivalentes, percentiles, índices de impulsividad, niveles pico, niveles de exposición sonora, Short Leq, entre otras.

El uso que se le dio principalmente fue de instrumento medidor de ruido de fondo del espacio (laboratorio) donde se realizó el trabajo y medición de NPS sin ponderación (z) para distintas frecuencias debajo de 350 [Hz] con el fin de interpolar valores para frecuencias intermedias posteriormente en software.

Para la verificación del correcto funcionamiento del sonómetro se hizo uso del calibrador antes mencionado cuya frecuencia de verificación de 1 [kHz] y nivel de 94 [dB].

3.1.4. Micrófono de medición.

El micrófono de medición empleado para analizar los niveles y respuesta de frecuencia del sistema (antes y después de modificar los audífonos empleados) fue el Samson MM01. Se eligió usar a este debido a su respuesta plana a partir de 20 [Hz] ya que el micrófono ideal (con respuesta plana más abajo de 20 [Hz]) no se pudo cotizar al momento de realizar la tesis.

3.1.5. Audífonos modificados.

Originalmente se adquirió un par de audífonos Beyerdynamic DT 1350 al cual se le modificó su canal derecho mediante la sustracción del cojín para oreja y en vez de eso se ubicó a un anillo de goma/caucho/poliuretano que iba a ser aplastado por una placa de aluminio. Más adelante se detalla su diseño y construcción.

3.1.6. Botón de respuestas.

Para la interacción del oyente y sus respuestas ante estímulos sonoros, fue necesaria la implementación de un botón de respuestas para almacenar información y posteriormente análisis y discusión. Se diseñó en Fritzing y se usó un Arduino para su fabricación.

3.1.7. ER-10C.

Es un sistema tipo sonda de bajo ruido para la correcta interpretación de mediciones de distorsiones producidas por emisiones otoacústicas (DPOAE) que en el proyecto de fin de carrera se pretende usar (a futuro) como complemento de la calibración.

Viene con 8 diferentes tamaños de puntas de orejas (ear tips) de fácil reemplazo que se ajustan a la mayoría de oídos para ocluirlos. En el desarrollo de esta tesis este fue el principal elemento utilizado de este sistema.

3.1.8. Software.

3.1.8.1. MATLAB.

MATrix LABoratory (abreviado MATLAB) es un paquete de software de alto nivel para computación científica orientado al desarrollo de cálculos numéricos, operaciones matriciales y principalmente a aplicaciones científicas y de ingeniería.

Es usado como calculadora matricial, herramienta de funciones de propósito tanto específicas como genéricas y capacidades de visualización gráfica.

Adicionalmente, integra un lenguaje de programación propio que permite al usuario escribir conjuntos de comandos escritos en ficheros ejecutables con una única orden llamados scripts con el fin de solventar un problema concreto y desarrollar nuevas funciones mediante algoritmos propios. Numerosas funcionalidades especializadas son también disponibles gracias a los toolboxes (librerías). (Echevarría, s.f., p.1).

Puesto que MATLAB trabaja con vectores y matrices (son el tipo fundamental de dato), es necesario conocer cómo crearlos o definirlos.

Para crear un vector se introducen los valores deseados separados por espacios (o comas), todo ello entre corchetes []. Si lo que se necesita es crear una matriz, se hace de forma análoga, pero separando las filas con puntos y comas (;).

MATLAB permite usar hasta 31 caracteres con letras mayúsculas, minúsculas, dígitos y guión bajo cuando se nombran a las variables sean estas matrices, vectores o escalares.

Entre las funciones que se usaron en MATLAB para el desarrollo del trabajo de fin de carrera están:

analoginput: Construye un objeto de entrada analógica.

addchannel: Añade canales a la entrada o salida analógica.

zeros: Crea una matriz de ceros.

ones: Crea una matriz de unos.

randn: Matriz de números aleatorios distribuidos normalmente con media cero y varianza unidad.

size: Dimensiones de la matriz. Devuelve el número de filas y columnas de una matriz.

input: Muestra en la pantalla el PROMPT (conjunto de caracteres que se muestran en una línea de código para indicar que está a la espera de órdenes) para ingresar especificaciones.

roundn: Redondeo al decimal más próximo.

length: Devuelve la longitud de un vector o la máxima dimensión de una matriz.

Operadores. *, ./, .^ permiten aplicar las funciones de multiplicación, división y potenciación elemento a elemento respectivamente.

3.1.8.2. Arduino.

Es una plataforma de código abierto basada en el manejo fácil de hardware y software. Las placas de Arduino son capaces de leer entradas tales como luz en un sensor, dedo en un botón o un mensaje cualquiera los cuales pueden convertirse en salidas (activación de un motor, encender un LED o publicar algo vía online). Se puede decir qué hacer a la placa mediante instrucciones o comandos destinados al microcontrolador de la misma. Para este proceso se utiliza el lenguaje de programación de Arduino y el software Arduino (basado en procesamiento). (Arduino, s.f., para.1).

Entre las ventajas que ofrece esta plataforma y por las que se decidió optar usarlo se encuentran: bajo costo, software usable en varios sistemas operativos, entorno de programación fácil y simple y diseño o planos de módulos o proyectos en código abierto para su comprensión y mejora. (Arduino, s.f., para, 6-10).

3.1.8.3. Fritzing.

Es un software de diseño electrónico automatizado orientado para diseñadores, artistas y cualquier persona interesada en la computación física y prototipos.

Mediante este programa es posible documentar y compartir proyectos de computación física, esquemas para placas de circuito impreso, (PCB por sus siglas en inglés) aprendizaje y enseñanza de electrónica básica.

El programa en cuestión sirvió para dar origen al diseño de las figuras 28 y 29.

Adicionalmente, la versatilidad de este software al momento de diseñar fue idónea ya que además de ver circuitos en protoboard, es posible ver diseños esquemáticos, diseño en PCB y códigos de programación.

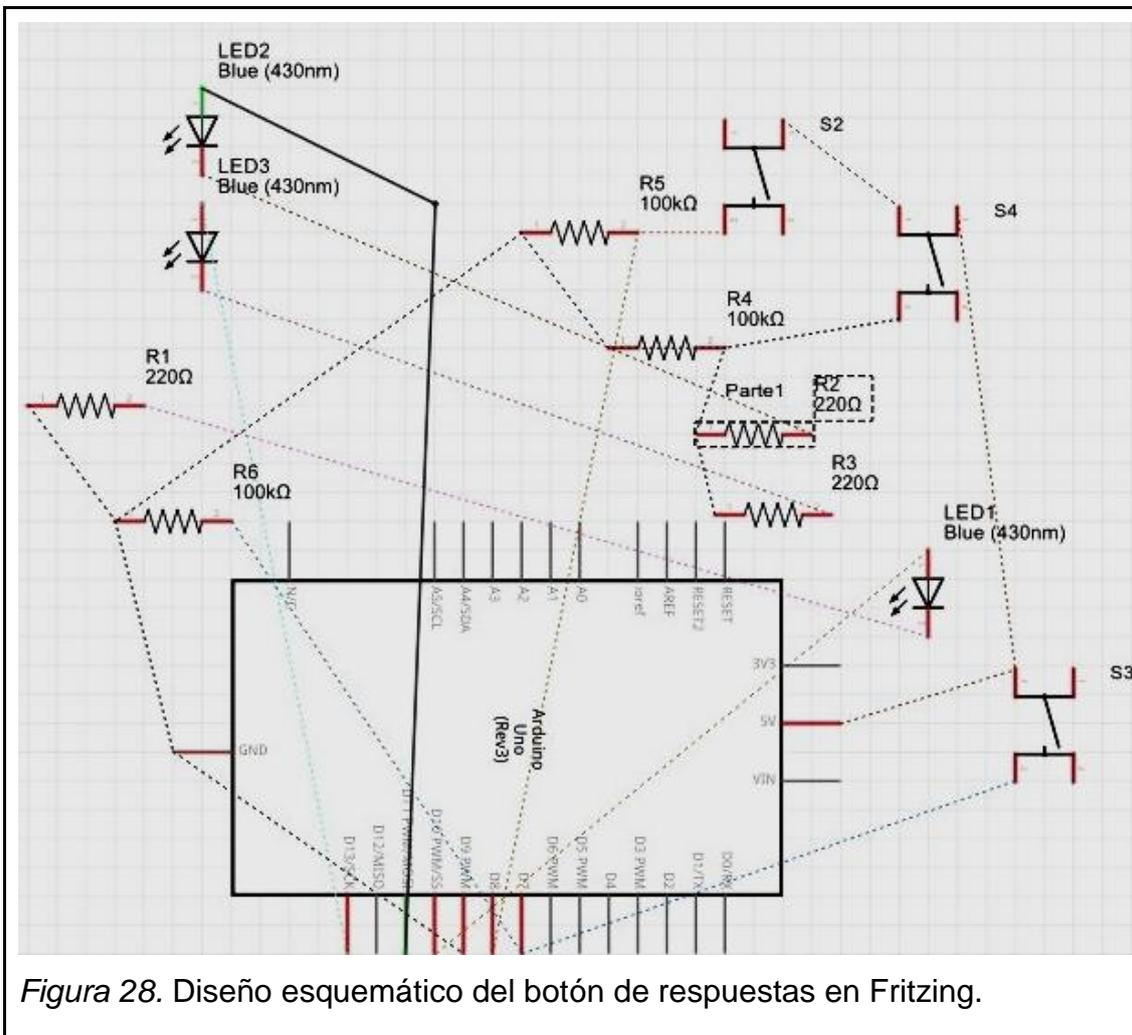


Figura 28. Diseño esquemático del botón de respuestas en Fritzing.

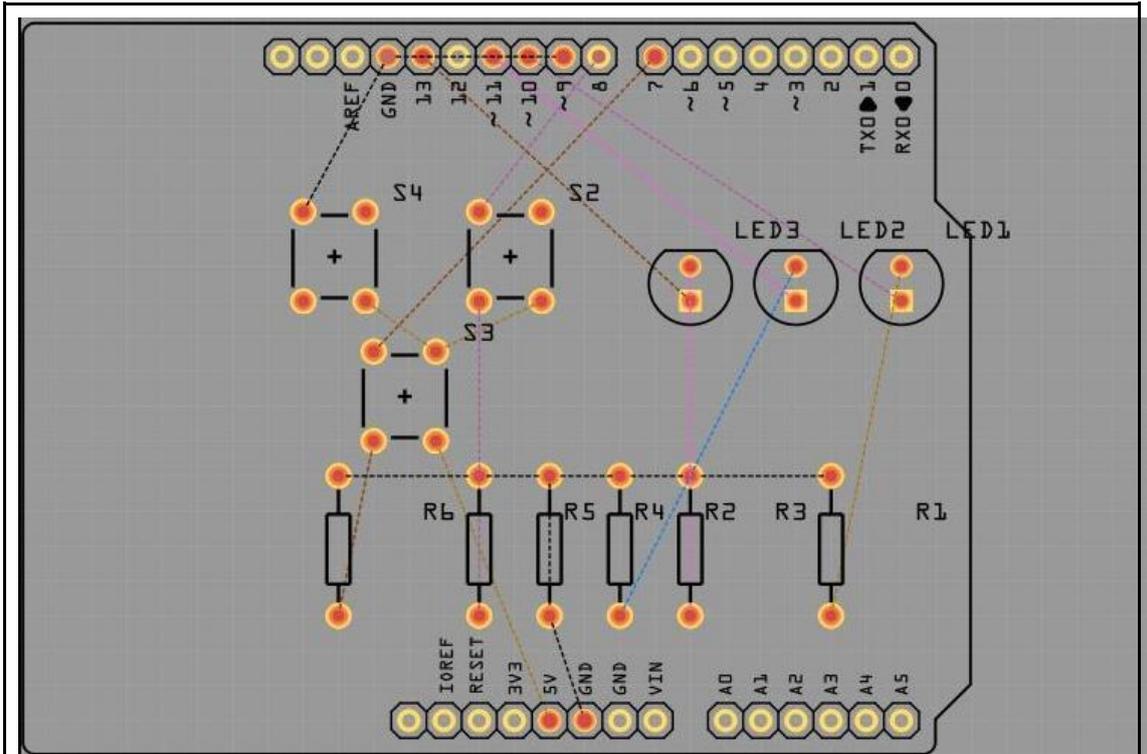


Figura 29. Diseño en PCB del botón de respuestas en Fritzing.

3.2. Diseño del botón de respuestas.

3.2.1. Arduino + MATLAB.

Para que pueda haber interacción entre el usuario, el botón de respuestas y MATLAB, fue necesario adquirir un complemento programado disponible en mathworks (s.f.) llamado `install_arduino.m.`, el cual permitió configurar entradas y salidas al Arduino por parte de MATLAB y por tanto permitir que los pines 7-9 actúen como entradas y del 10-12 como salidas.



Además, se aclara también que en el programa de Arduino se subió un archivo `.pde` etiquetado `adio.pde` el cual se transfirió al microcontrolador para que pueda setear los pines de acuerdo a la lógica que el programa `install_arduino.m` entiende.



3.2.2. Push button.

Este botón fue implementado para acoplarse al programa de curvas isofónicas disponible por el profesor guía Doctor Carlos Jurado.

Específicamente en el diseño, se usaron los pines 7-12, GND y 5V para que cumplan las siguientes funciones:

Pines GND y 5V para polarizar el circuito del botón de respuestas o push-button.

Los pines 7-9 para conectar botones pulsadores que permiten dos estados: abierto (no presionado) o cerrado (aplastado).

Los pines 10-12 se conectarán al ánodo de 3 LEDS a una misma distancia, la cual permitirá mostrar visualmente la interacción del usuario con sus respuestas asociadas a la experimentación de curvas isofónicas en las pruebas piloto.

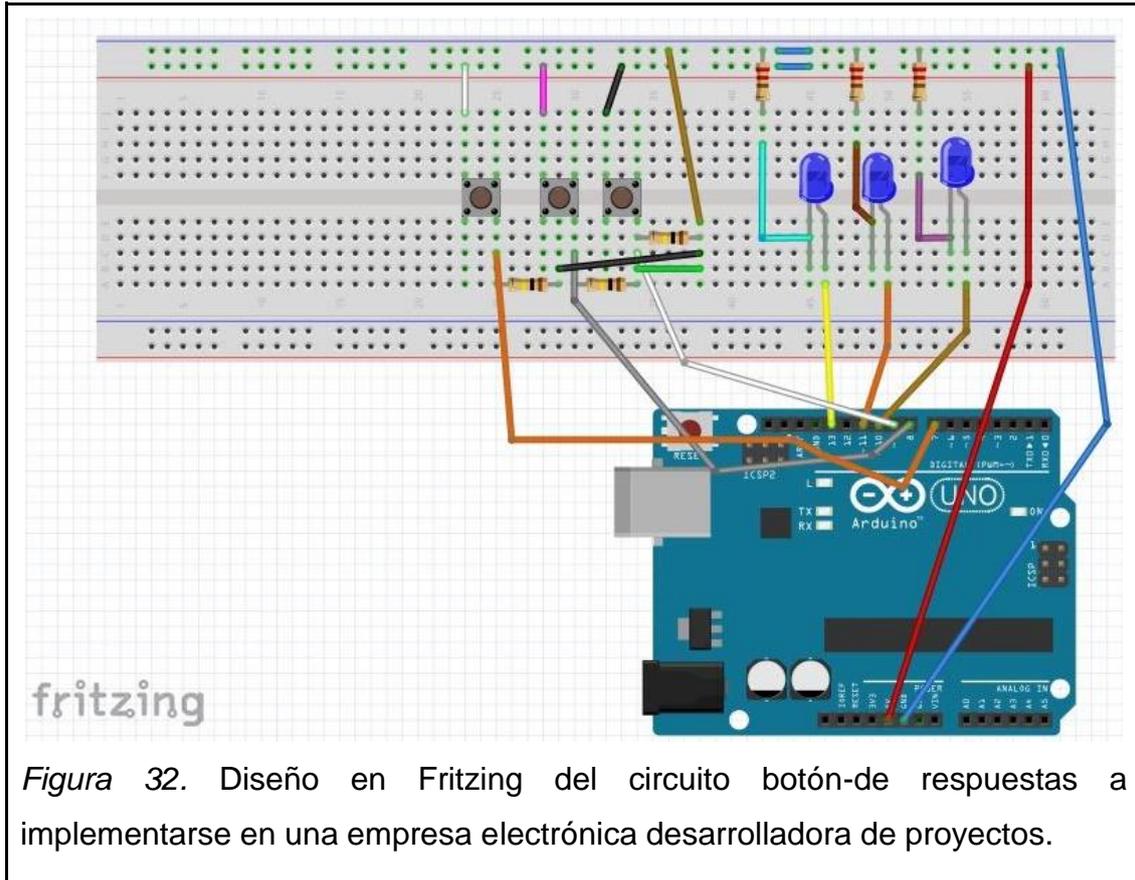


Figura 32. Diseño en Fritzing del circuito botón-de respuestas a implementarse en una empresa electrónica desarrolladora de proyectos.

3.3. Modificación de audífonos DT 1350.

Con respecto al diseño de la placa, se tuvo una guía por parte del colaborador de la University College London (UCL) PhD. Torsten Marquardt el cual a través de correos proporcionó guías y recomendaciones en cuanto a forma y materiales.

La placa sirve para lograr que el sonido emitido a través del parlante del audífono DT 1350 viaje a través de un reducido espacio y termine en un volumen muy pequeño como un tubo/manguera de 1 [mm] de diámetro.

Lo que se consigue con este acoplamiento es reforzar el NPS mediante la variación de un volumen ocasionada por la excursión del driver del audífono, la ecuación:

$$\Delta p = -\gamma p_0 \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Relaciona variaciones de volumen con variaciones de presión, y puede calcular el NPS estimando dentro del volumen de aire generado a partir de la modificación de audífonos. En la fórmula gama adquiere un valor de 1.4 (constante adiabática), presión atmosférica de 72000 pascales considerando la altura de 2800 [m] de la ciudad de Quito, 1 [mm] de excursión del cono tomado de drivers de similares características y un volumen de aire total de $1.17/100000$ [m³] obtenido de la siguiente suma de volúmenes:

Volumen entre el driver y la placa de aluminio: 4.77×10^{-6} [m³]

Volumen del tubo de metal de 4 [cm]: 5.076×10^{-6} [m³]

Volumen del tubo de plástico de 17 [cm]: 3.53×10^{-7} [m³]

Volumen del canal auditivo ocluido: 1.5×10^{-6} [m³]

Aplicando la ecuación 6 con los parámetros especificados se puede estimar un nivel de presión sonora en la salida:

$$\text{Excursión peak} = 1 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro del driver} = 4.5 \text{ [cm]}$$

$$\Delta v \text{ peak} = \pi \left(\frac{(0.045)}{2} \right)^2 \times (1 \times 10^{-3}) = 1.59 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\Delta v \text{ RMS} = \frac{1.59 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{\sqrt{2}} = 1.12 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\Delta p = -1.4 \times 72000 \times \frac{1.12 \times 10^{-6}}{1.17 \times 10^{-5}} = 9678.8 \text{ [Pa]}$$

$$\text{NPS} = 20 \log \left(\frac{9678.8}{2 \times 10^{-5}} \right) = 173.7 \text{ [dB]}$$

Teóricamente el sistema entregará 173.7 [dB] en la salida debido a la variación de volumen y desplazamiento del driver.

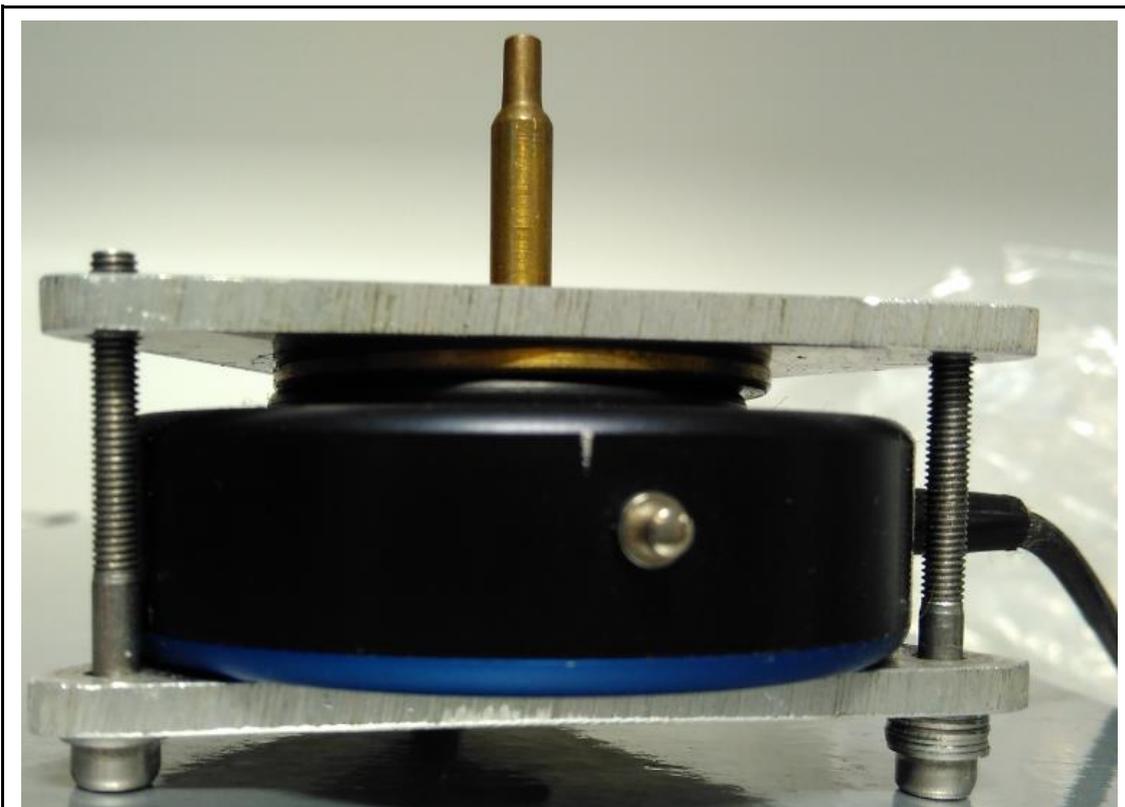


Figura 33. Detalle de la implementación de un sistema de bajas frecuencias realizado por el colaborador de la UCL PhD. Marquardt.

- a. Entre los principales materiales empleados en este diseño están: anillo de caucho/polietileno, placas triangulares de aluminio, placa de 2 piezas de bronce y audífono Beyerdynamic DT 48.
- b. La placa de bronce se compone de un anillo circular aproximadamente del mismo diámetro del altavoz del audífono y más adelante recae en un tubo no muy largo con diámetro menor.

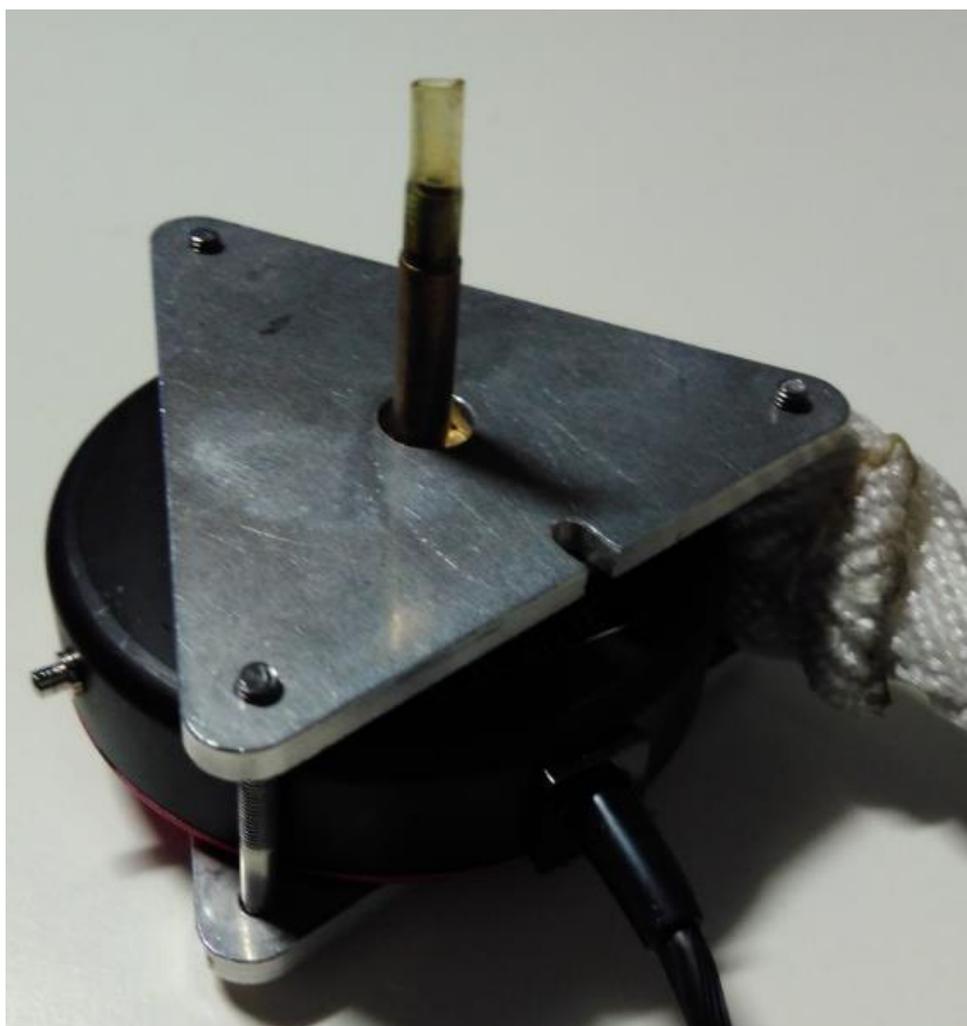
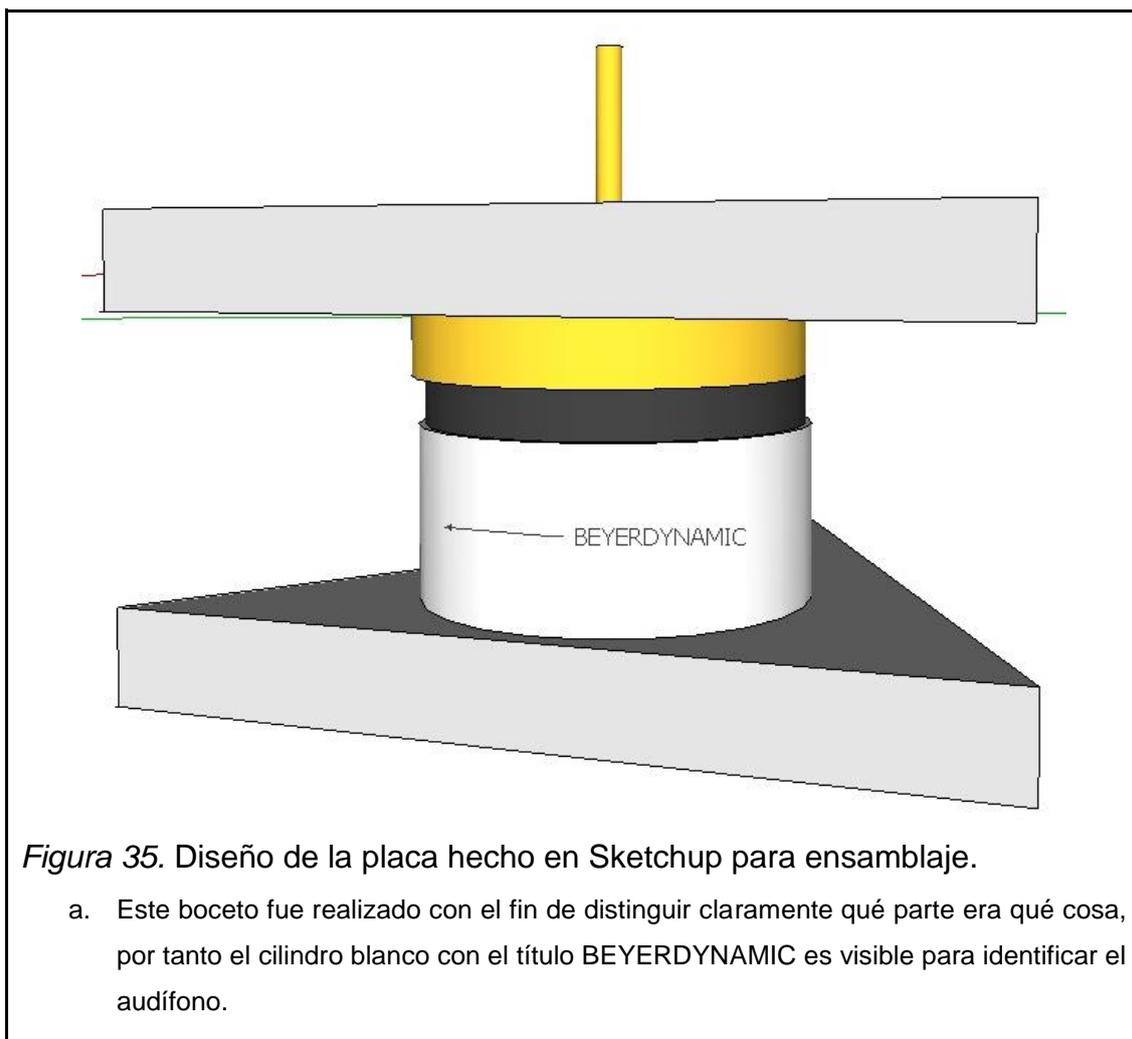


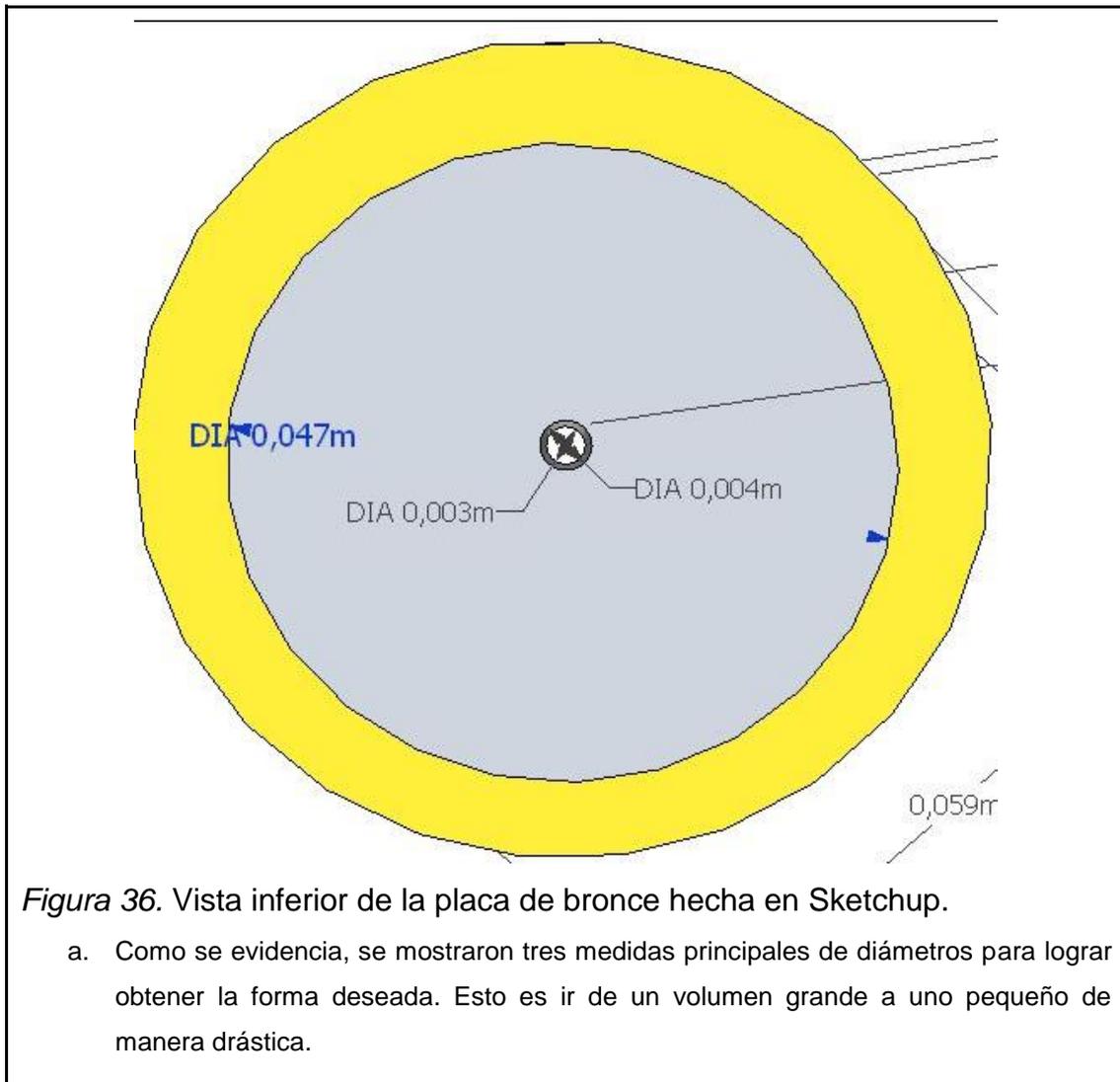
Figura 34. Perspectiva de la placa del sistema del colaborador de la UCL PhD. Marquardt.

- a. Como se aprecia un tubo de aproximadamente 1 [mm] de diámetro se ha acoplado en la parte superior de la placa de bronce.

En base a estas descripciones se dispuso a diseñar la placa en base a los materiales disponibles en el software Sketchup de Google. Se usó debido a que es gratuita y bastante fácil de manejar.



Ya que fue necesario indicar detalladamente cada medida, algunas partes no eran totalmente descubiertas para identificar cotas por lo que se presentó al sitio de ensamblaje varias perspectivas del diseño con sus respectivas características.



Como últimas especificaciones, se requirió tener un hueco interno de 3 [mm] en la parte saliente de la placa de bronce. Esto con el fin de acoplar un tubo de plástico de aproximadamente 1 [mm].

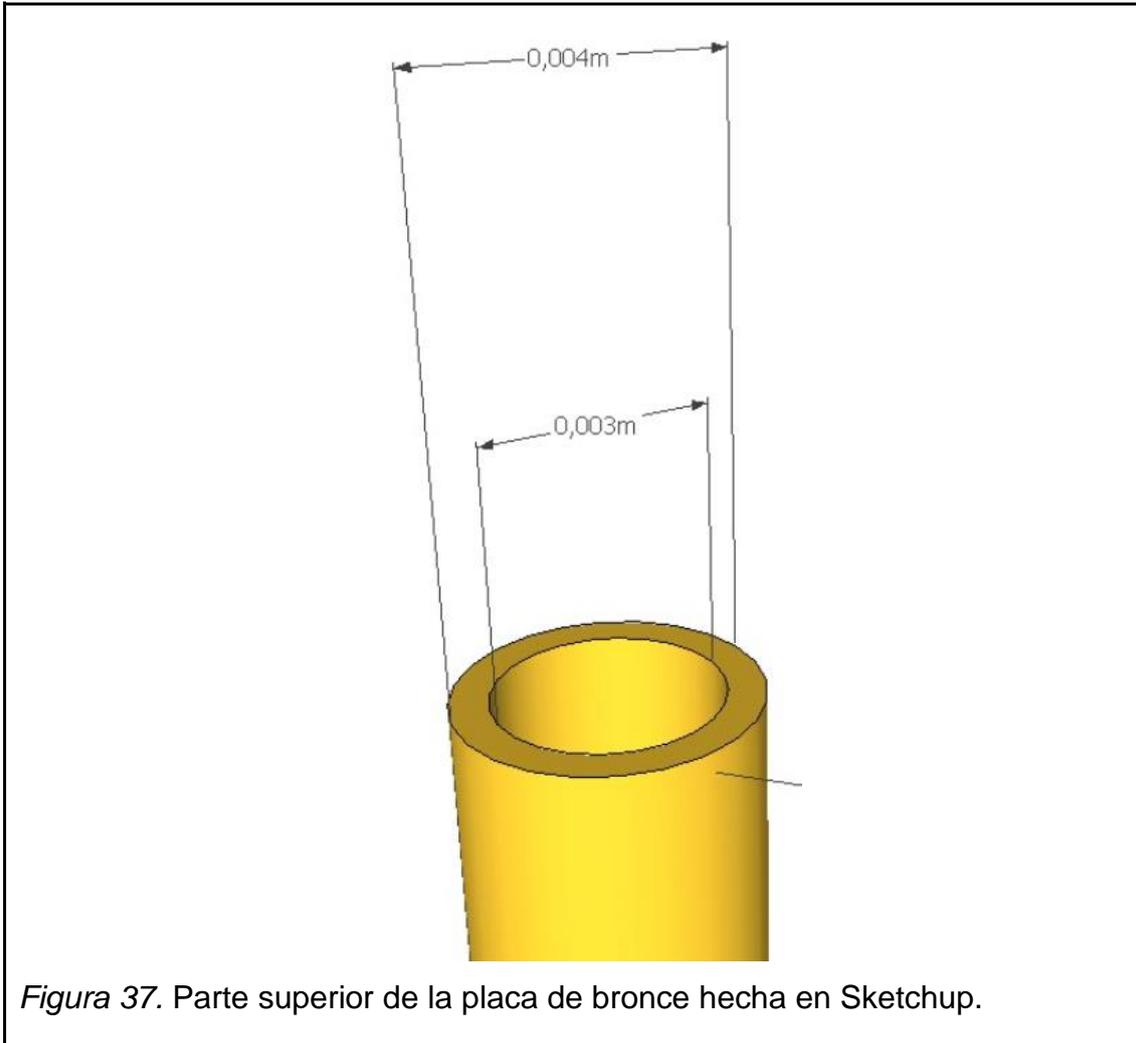


Figura 37. Parte superior de la placa de bronce hecha en Sketchup.

3.4. Implementación del setup.

3.4.1. Descripción del conexionado entre componentes.



Como primer punto se aclara que el software MATLAB usado fue la versión R2013a y configurado a 32 bits debido a que la compatibilidad con toolboxes orientados a la comunicación de computadora con la interfaz disponible era posible si se cumplían estos requerimientos. Así pues, aunque el sistema operativo del computador era a 64 bits, fue posible instalar MATLAB en formato 32 bits y trabajar normalmente.

La señal de entrada al canal auditivo se generará en MATLAB mediante el programa para medición de curvas isofónicas, y a través de la interface RME Fireface 802 se convierte a analógica y llega a su nivel acústico óptimo al pasar por el amplificador de audífonos.

La modificación de los auriculares DT 1350 permitirá generar un campo de presión que eleve el nivel de la señal en bajas frecuencias mientras que el envío de la señal mediante el tubo de plástico de 1 [mm] de diámetro permitirá que el oyente sienta el estímulo correctamente a través del acoplamiento de cojines supraurales insertados en el pabellón auditivo.

3.5. Playback y grabación en MATLAB.

Para poder emitir y grabar sonido, sea este ruido o tonos puros, se valió de teoría básica de procesamiento digital de señales mediante la implementación de códigos en MATLAB para la creación de variables correspondientes a vectores o matrices de información tales como tiempo de muestreo, ecuación de la onda senoidal, amplitud digital, frecuencia de sampleo, frecuencia a emitir, graficación, análisis fft, generación de ruido blanco normalizado y tiempos de grabación de la señal principalmente.

De igual manera para una correcta comunicación entre interface y software fue necesaria la configuración de entradas y salidas mediante las funciones AI (Analog Input) y AO (Analog Output) respectivamente.

En el anexo 9 se adjuntan las líneas de código correspondientes al playback y grabación tanto de ruido blanco como de tonos puros.

Para reducir el clipeo digital (el cual es bastante fuerte) al momento de emitir bajas frecuencias se implementó una rampa lineal que permita que el nivel de la frecuencia emitida llegue a su amplitud máxima progresivamente en un tiempo determinado.

Un aspecto útil al momento de grabar ruido blanco normalizado con duración de 2 minutos aproximadamente es el hecho de almacenar estos datos en variables distintas y poder disponer de estas posteriormente para un análisis más profundo. Esto se hizo mediante los archivos .mat (MATLAB Data) y la función wavwrite.

3.6. Distorsión del sistema.

La medición de nivel de los tres primeros armónicos de la frecuencia fundamental se realizó antes y después de la modificación de los audífonos DT 1350, esto con el fin de evaluar la mejora que aporta el sistema final respecto al de fábrica.

3.6.1. Nivel de distorsión de los audífonos sin modificación.

Esta medición se hizo usando la interfaz Mbox 3 mini debido a que al momento de mandar el diseño de la placa al torno elegido no se encontraba disponible la interfaz RME Fireface 802 y cuando esta ya se encontraba lista para usar la pieza diseñada estuvo acoplada al driver permitiendo realizar la medición de distorsión con el ajuste en bajas frecuencias.

Para las mediciones se utilizó un soporte ya disponible en el laboratorio LA1 y se aplicó una ligera presión con el fin de simular una correcta colocación de los mismos por parte de una persona.

Se emitieron tonos puros con una duración de 30 segundos. Para la grabación, se utilizó el micrófono Samson MM01 seteando en primera instancia su ganancia con la referencia de los 94 [dB] entregada por el calibrador CESVA CB006. Una vez que se obtuvieron los datos, se grafica el resultado en el dominio de la frecuencia y se obtienen los valores de NPS de los armónicos de la señal.

Para obtener el espectro a través de ruido blanco normalizado se realizaron tres mediciones de 120 segundos de duración, reposicionando los audífonos en el soporte con el fin de simular la práctica del participante hasta sentirse cómodo con la colocación.



Figura 39. Medición de distorsión del sistema de los audífonos DT 1350 sin modificar.

3.6.2. Medición de distorsión de los audífonos modificados.

Una vez acoplado el sistema a la pieza de bronce y placas de aluminio se realizó una nueva medición de distorsión obteniendo valores más altos en torno a las bajas frecuencias lo que indica que el sistema es idóneo para la investigación.

Ciertos aspectos hay que aclarar en este apartado que son los siguientes.

El criterio de división de frecuencias medido corresponde a $\frac{1}{6}$ de octava, no obstante, en el rango de 10 a 20 [Hz] las diferencias entre fundamental y armónicos son valores aproximados obtenidos con el sonómetro ya que el analizador de espectro del mismo solo alcanza una resolución de $\frac{1}{3}$ de octava y a partir de la mínima frecuencia mencionada.

El micrófono MM01 si bien podría entregar datos en $\frac{1}{6}$ de octava, la respuesta en frecuencia no llega hasta tan bajo por lo que se prefirió descartar estos posibles valores.

En un principio los valores cercanos a 20 [Hz] en adelante fueron medidos con el micrófono MM01 (leyendo una respuesta del calibrador CB006 a 93.4 [dB] en 1000 [Hz]), no obstante, analizando la respuesta en frecuencia (en MATLAB) de estas mediciones se evidenció que existía una caída en decibeles en torno a las bandas cercanas a 20 [Hz]. Esto sucede debido a que el gráfico de la respuesta en frecuencia de las especificaciones técnicas del micrófono de medición ya no es plana.



Figura 40. Utilización de la jeringa para la obtención de niveles acústicos.

- a. Se aclara que para evitar fugas en el volumen empleado se selló ambos extremos.

la parte del micrófono del sonómetro con un anillo de goma y la del tubo con 2 cojines supraaurales para mayor hermetismo.

- b. Se usó 1.5 [cm³] de distancia que simulan a un canal auditivo ocluido.

Se utilizó una jeringa con el tubo de plástico y el cojín supraaural en un extremo y en el otro se colocó el micrófono Samson MM01 y el sonómetro con un volumen entremedio de 1.5 centímetros cúbicos que representa un volumen promedio de un oído ocluido (ver figura 40), la ganancia de la salida de audífonos 11/12 de la interface RME Fireface 802 se configuró en un porcentaje aproximado de 40% (11:00 horas en las manecillas del reloj) con el fin de no exceder el nivel máximo tolerado por el sonómetro de 137 [dB] RMS.

Lo que se hizo para corregir estos valores fue realizar una nueva medición con los mismos parámetros empleados en todo el sistema, esto es: potenciómetros intactos, nivel de ganancia del preamplificador de micrófono calibrado, amplitud digital 1 o Full Scale, etc, y como siguiente proceso fue medir el nivel en torno a los 20 [Hz] con el sonómetro para verificar que la respuesta verdadera del sistema sigue siendo plana por debajo de esta frecuencia.

Como acción posterior se midió bajo esta banda (recordando que el MM01 ya no responde eficientemente de acuerdo al fabricante) y anotando los valores hasta 10 [Hz] para obtener una gráfica bastante aproximada y validada de la respuesta del sistema hecho.

Finalmente, estos valores presentan una corrección de +0.2 [dB] por la lectura del calibrador y sonómetro (97.8 [dB] a [kHz]) de 10 a 25 [Hz] y de +0.6 [dB] por la lectura del calibrador y micrófono de medición (93.4 [dB] a 1 [kHz]).

3.7. Calibración del setup.

Como primer paso para la calibración del setup se realizaron mediciones de ruido de fondo en el laboratorio "LA1" en condiciones específicas antes de realizar la medición como tal con el fin de asegurar que exista una buena relación señal/ ruido en torno a frecuencias bajas partiendo de 315 [Hz] para abajo.

Esto se realizó como un antecedente ya que la relación señal/ruido propiamente se analiza mediante el gráfico de FFT que se haga en la medición y empleando un volumen bastante distinto al del laboratorio que es una jeringa en la cual se simula el volumen de un canal ocluido y donde el ruido de fondo obviamente difiere del de la sala empleada. En el anexo 14 se muestra la tabla de ruido de fondo del laboratorio LA1.

3.7.1. Calibración utilizando tonos puros.

La calibración se hizo mediante la obtención de niveles acústicos a la salida del tubo de plástico en amplitud digital Full Scale a través del micrófono de medición Samson MM01 desde 28 hasta 200 [Hz] y del sonómetro CESVA SC 310 de 10 a 25 [Hz] en sextos de octava. Los puntos entremedio fueron estimados mediante una interpolación por splines cúbicos, configurada para entregar valores cada 0.1 [Hz].

Se repitió el método utilizando la jeringa presentado en la medición de distorsión armónica del sistema, con los mismos valores de salida en la interface y el mismo volumen entremedio de 1.5 [cc].

Los valores de NPS obtenidos a la salida a una amplitud digital Full Scale se ven en la siguiente tabla.

Tabla 1. Extracto de los niveles acústicos obtenidos por el micrófono de medición y sonómetro en sextos de octava.

Frecuencia [Hz]	Nivel de la Frecuencia Fundamental [dB]
10	110.3
12	111.6
16	113.5
20	114.4
30	115.8
50	116
63	115
100	110.7
125	107.9
160	103
200	101.4

Nota: Estos valores son idénticos a los vistos en el anexo 13. Presentan una corrección de +0.2 de 10 a 25 [Hz] debido al valor obtenido en el sistema calibrador-sonómetro y de 0.6 a partir de 28 [Hz] en adelante por el valor obtenido en el sistema calibrador-micrófono.

Los factores de corrección se aplican una vez que se llama al tono con una amplitud 1 conocida como Full Scale (FS), la cual tiene un valor de 0 [dBFS] y se ingresa en el software el valor en decibeles NPS requerido en la salida, posteriormente se realiza una resta de niveles con el fin de calcular el valor digital que representaría esa variación de NPS. Esto mediante el cálculo de un factor de compensación igual a:

$$\text{Factor de compensación} = 10. ^{((\text{NPS Output}-\text{NPS en FS}) / 20)}.$$

(Ecuación 7)

El resultado de la resta entre el NPS requerido en la salida y el NPS medido en full scale es negativo, esto debido a que el valor en decibeles FS que representará el NPS en la salida no podrá exceder el nivel de 0 [dBFS].

En el anexo 10 se adjuntan las líneas de programación correspondientes a la obtención del espectro a través de tonos puros e interpolación de datos.

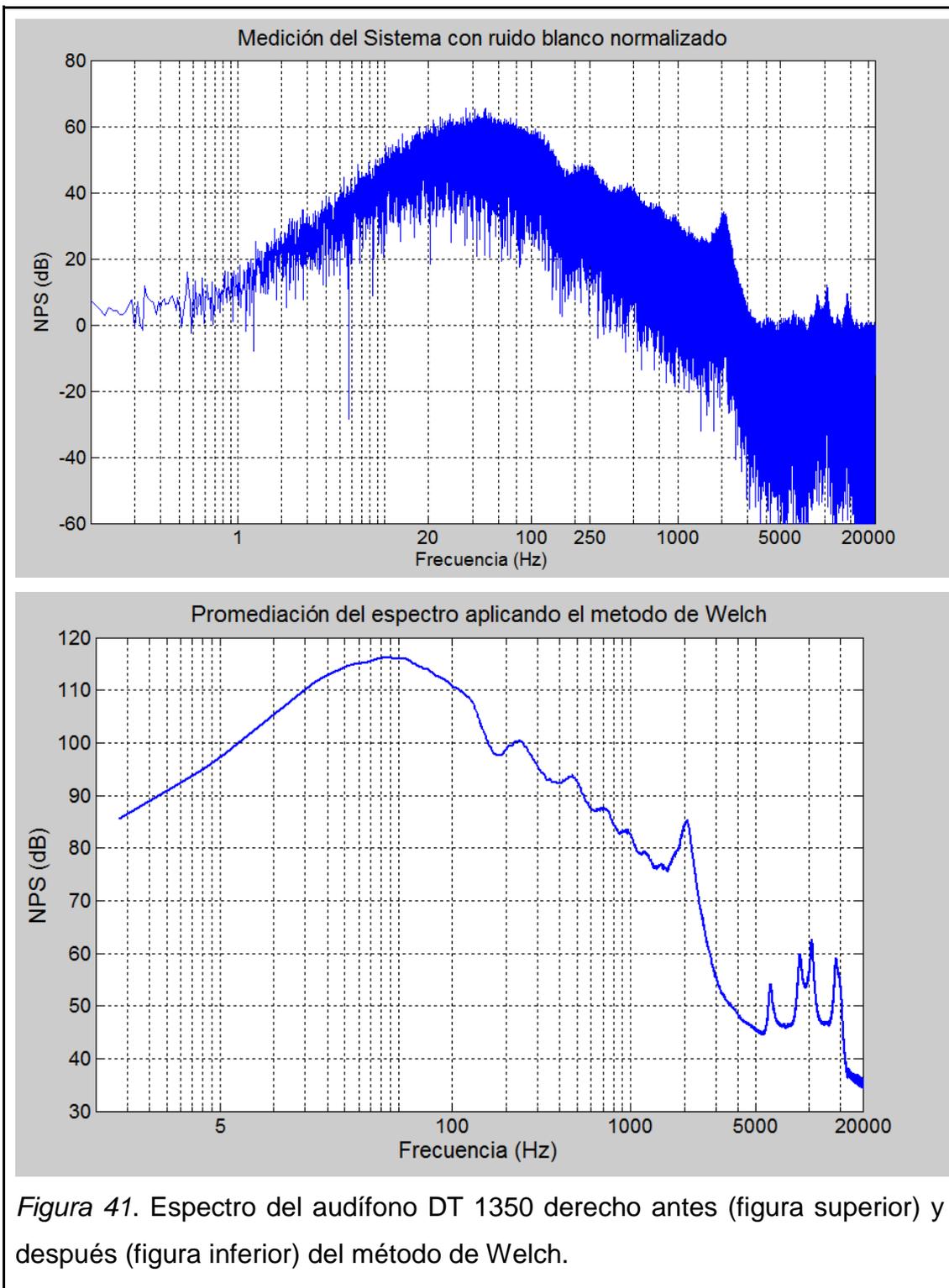
3.7.2. Visualización del espectro de frecuencias utilizando ruido blanco normalizado y el método de Welch.

El método de Welch permite promediar secciones temporales de una grabación de ruido randómico proveniente de una fuente específica (audífonos DT 1350 modificados) con el fin de representar un espectro suavizado mediante la aplicación de ventanas Hamming en cada sección de tiempo y una promediación de las secciones en la frecuencia.

El método permite comparar la respuesta obtenida a partir de la medición con tonos puros con la respuesta del sistema generando y grabando ruido blanco gaussiano a la salida de la sonda y el cojín supraaural. Se utilizó el método de la jeringa para obtener esta señal.

En la figura 41 se puede observar la diferencia entre un espectro de frecuencias sin la aplicación del método de Welch y uno con la aplicación del mismo, claramente el método de Welch muestra un espectro más limpio para el análisis.

En el anexo 11 se adjuntan las líneas de código correspondientes a la promediación utilizando el método de Welch.



3.8. Descripción del programa de medición de curvas isofónicas.

3.8.1. Etapas del experimento.

3.8.1.1. Medición de umbral absoluto.

Antes de la medición de curvas isofónicas se procede a la obtención del umbral absoluto del participante en un tono de 50 [Hz] mediante una prueba de tres opciones aplicando el método psicofísico adaptativo 3 down-1 up.

La señal emitida tendrá una duración de 1.2 segundos incluyendo 0.2 segundos de la rampa lineal. Los leds se encienden uno por uno en pausas de 400 [ms]. Después de cada respuesta proporcionada por el participante se enciende el led correspondiente a la respuesta correcta.

Los aumentos y decrementos de nivel de la señal van en pasos de 8, 4 y 2 decibeles respectivamente cada dos turnpoints (cambios de estado). El experimento concluye una vez que existieron 8 turnpoints promediando los mismos para finalmente obtener el valor de umbral absoluto promediando dos mediciones del mismo participante.

3.8.1.2. Medición de curvas isofónicas.

Para la obtención de las curvas isofónicas se utiliza un test de dos opciones, y utilizando el procedimiento 1 up-1 down, los tiempos de emisión no cambian respecto a la medición de umbral absoluto. El tono de referencia de 50 [Hz] y el tono de comparación se emiten con un orden específico y el participante presiona el botón relacionado al tono percibido con mayor nivel.

Existen dos pistas a evaluar seleccionadas de manera aleatoria. El nivel de una de las pistas se emite 10 [dB] por debajo de los 40 fonos y el de la pista restante 10 [dB] por encima, sin embargo, si el tono de referencia utilizado es de 20 [Hz] entonces las pistas están 5 [dB] arriba y 5 [dB] abajo de la curva de 40 fonos.

El promedio de 6 turnpoints determina los puntos de igualdad subjetiva (PSE). Se estiman estos puntos después de un intento mediante el promedio de dos

PSE. Si los dos puntos de igualdad subjetiva tuvieran una diferencia de 3 [dB] o mayor el programa automáticamente corre otra medición con el fin de promediar los tres valores.

El experimento tiene aproximadamente dos horas y media de duración incluyendo descansos entremedio para evitar posible fatiga por parte del participante.

4. RESULTADOS.



Figura 42. Resultados a presentar.

4.1. Análisis y discusión de resultados.

4.1.1. Implementación del botón de respuestas.

La tienda de electrónica donde se cotizó y consolidó el proyecto del botón de respuestas se llama Megatrónica y está ubicada en el norte de Quito.



Figura 43. Detalle del botón de respuestas implementado.

El botón de respuestas recibe señales para encender sus leds mediante MATLAB y a su vez envía datos al mismo software una vez que el participante presiona cualquiera de los 3 push buttons.

En pruebas preliminares se evidenció un correcto funcionamiento del botón de respuestas en conjunto con el programa de medición de curvas isofónicas. Simplemente modificando las entradas y salidas referentes al envío de señales lumínicas y recepción de respuestas del programa (las cuales tenían una configuración para comunicarse a través de un puerto serial) se logró realizar experimentos preliminares de umbral de audición con éxito. De la misma forma se modificaron los tiempos de retardo de las señales con el fin de que exista una sincronía entre las señales de audio y el encendido y apagado de los focos led.

4.1.2. Audífonos modificados.

Una vez mandado a hacer el trabajo en un torno el resultado quedó muy similar al diseñado y recomendado por el colaborador de la UCL mencionado anteriormente.



Figura 44. Acoplamiento final para emisión de bajas frecuencias.



Figura 45. Audífonos DT 1350 modificados.

- a. En la parte superior se evidencia la falta del audífono derecho (el cual fue acoplado a la placa de aluminio).
- b. Debajo de la placa superior de aluminio con el tubo delgado azul se encuentra fijo el driver del audífono derecho.



Figura 46. Audífono DT 1350 derecho modificado.

- a. En la imagen se evidencia que el driver descansa en una placa de aluminio inferior. Encima de este se ubica un anillo de goma y por encima de éste la pieza de bronce que a la mitad se une a un tubo de metal por el que sale el sonido.



Figura 47. Acople de tubos.

- a. La imagen muestra claramente que un tubo de metal de 4 [cm] se eleva para acoplarse a una pieza de plástico azul que reduce el diámetro interno para poder incrustar un tubo de plástico menor (disponibles por la compra del sistema ER-10C). Por último este permitía ubicar un tubo de plástico flexible de aproximadamente 17 [cm] el cual ingresaría al pabellón auditivo externo.

4.1.3. Distorsión armónica en audífonos no modificados.

Se encontraron resultados interesantes en cuanto la colocación de los audífonos no modificados por parte del participante.

Puesto que en un ensayo psicoacústico; el cual involucra emitir un estímulo a través de audífonos conectados al oído; la persona suele reposicionarse el audífono hasta quedar cómodo y escuchar bien, la disminución o pérdida de nivel en un rango de frecuencias específico es consecuencia de este proceso. En el proyecto se evidenció que a bajas frecuencias este efecto es muy notorio y por tanto el audífono inicialmente no servía para los objetivos del trabajo. Es por eso que el diseño de la placa fue importante para compensar este decremento.

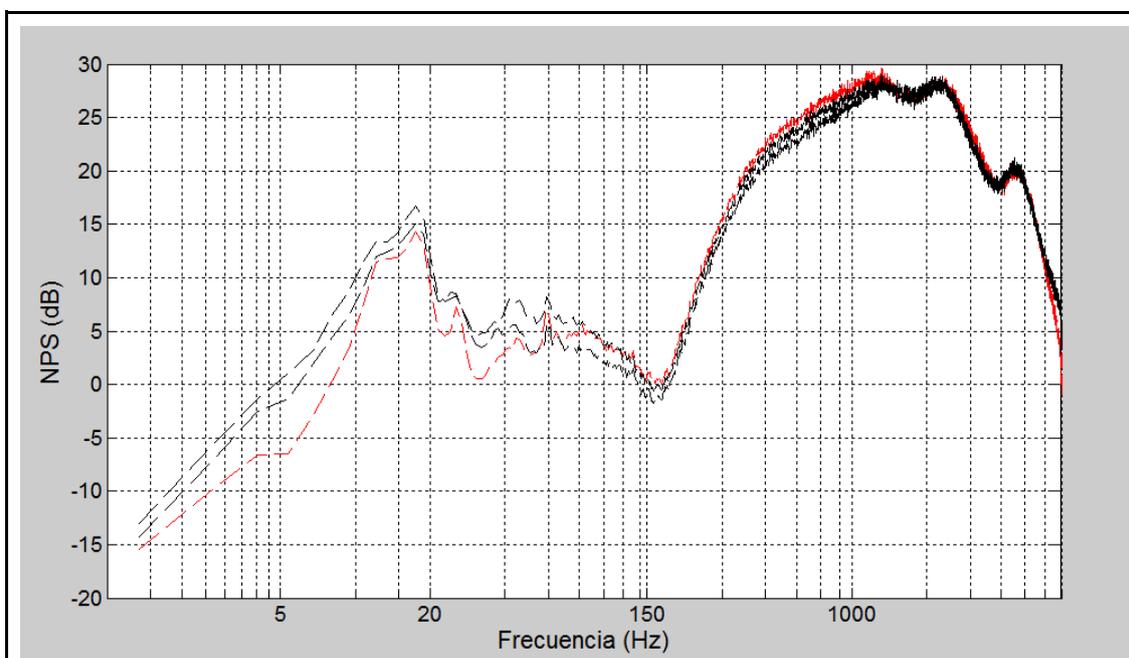


Figura 48. Análisis frecuencial del reposicionamiento de los audífonos DT 1350.

- a. Se muestran tres mediciones diferentes donde es claro que en el rango de 150 [Hz] para abajo existen variaciones de nivel debidas a una mala colocación de los auriculares.

En el anexo 12 se adjunta la tabla referente a los niveles de distorsión en los tres primeros armónicos de la frecuencia fundamental, en promedio se obtuvieron diferencias de 26[dB], 15[dB] y 40[dB] lo cual hace al sistema poco

eficiente para la realización de experimentos psicoacústicos debido a que se requiere baja distorsión y no se cumple con la recomendación de 30, 40 y 50 [dB] de diferencia entre fundamental y primeros armónicos.

4.1.4. Distorsión armónica del sistema modificado.

El sistema empleado al momento permite obtener un NPS bastante aceptable a bajas frecuencias, siendo de particular interés aquellas bajo 20 [Hz]. Un buen indicador de que está logrando lo que se desea es la concepción de evidenciar una caída de 30, 40 y 50 [dB] entre la frecuencia fundamental y el segundo, tercer y cuarto armónico respectivamente. En la figura 49 se presenta esta tendencia aproximada.

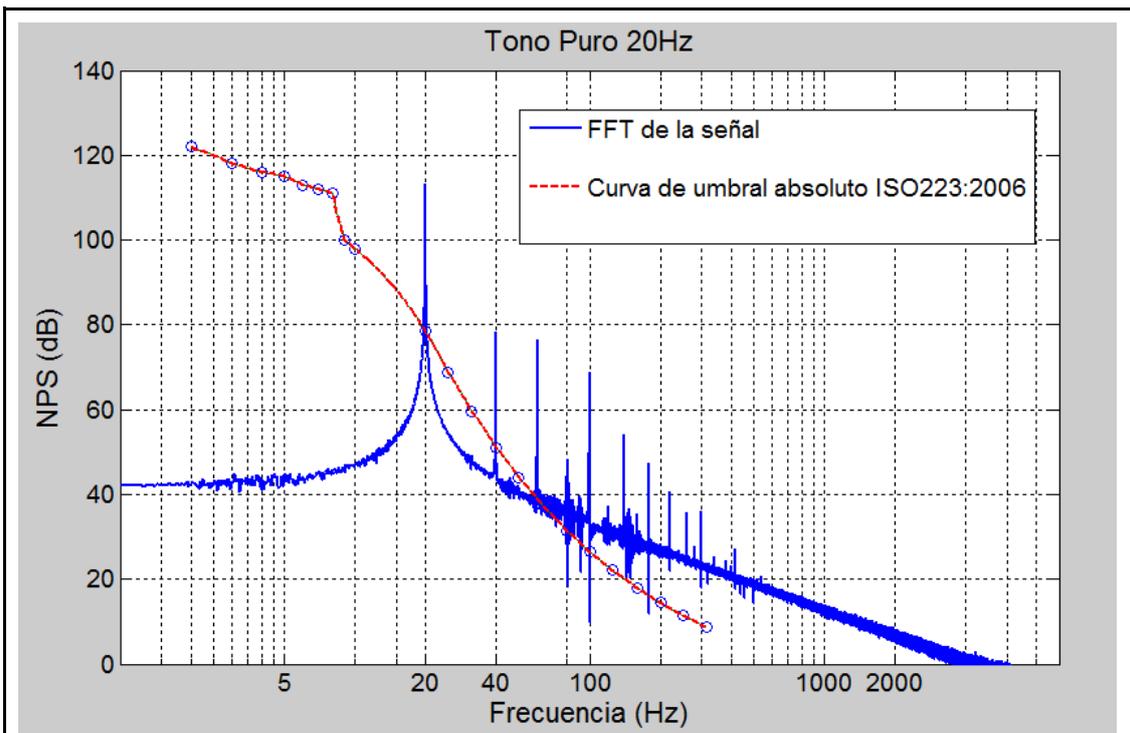


Figura 49. Tendencia de las diferencias entre fundamental y armónicos para 20 [Hz].

- a. Se dibuja el umbral de audición sugerido para cerciorarse de la eficiencia del sistema principalmente a bajas frecuencias.
- b. Los valores de diferencia correspondientes a esta frecuencia de acuerdo al anexo 13 son 37.8, 42.3 y 67.8 [dB], estos valores cumplen de sobra con la recomendación de (30, 40 y 50 [dB]).
- c. Se realizó la graficación en el dominio de la frecuencia y la obtención de los valores de los armónicos en sextos de octava de 10 hasta 200 [Hz].

Tal como se halla en el anexo 13, en el rango de 22 a 45 y de 70 a 130 [Hz] las diferencias entre la fundamental y segundo y tercer armónico son bastante cercanas o no cumplen esa sugerencia de 30, 40 y 50 debido a que posiblemente un ruido eléctrico (cuantización o tal vez tierra) está saliendo por el sistema con el seteo general de interface, ganancia de computadora, micrófono y demás.

Esto se soluciona al darle más nivel de salida a los Phones 11-12 de la interface sin embargo, no se aplicó esto porque si se realizaba esta acción el micrófono saturaba y por ende todos los datos presentados no servirían para una validación.

Por último y en términos generales, el segundo armónico tiene un nivel inferior promedio respecto a la frecuencia fundamental de 43 [dB], el tercero de 44 [dB] y el cuarto de 69 [dB] (anexo 13) en el rango de las frecuencias medidas, lo cual expresa claramente la mejoría respecto a las diferencias de 26[dB], 15[dB] y 40[dB] (anexo 12) del sistema de fábrica.

4.1.5. Respuesta de frecuencia del sistema.

Para evaluar bajo condiciones similares el aporte del sistema modificado frente al de fábrica se compararon los gráficos de ruido blanco normalizado antes y después de la modificación de los audífonos DT 1350.

A simple vista se puede observar la mejora en cuanto a nivel a partir de los 250 [Hz] hacia abajo; y de la misma forma el sistema se comporta como un filtro paso-bajo lo cual es beneficioso para el proyecto ya que su estudio se basa en frecuencias menores a 200 [Hz].

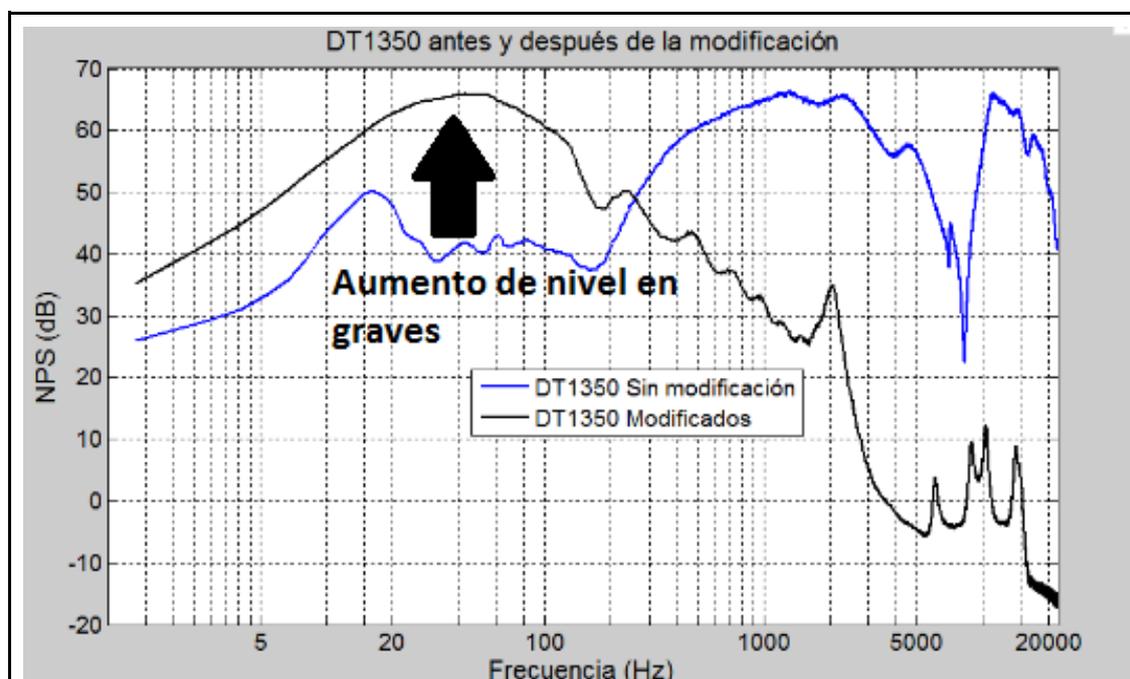
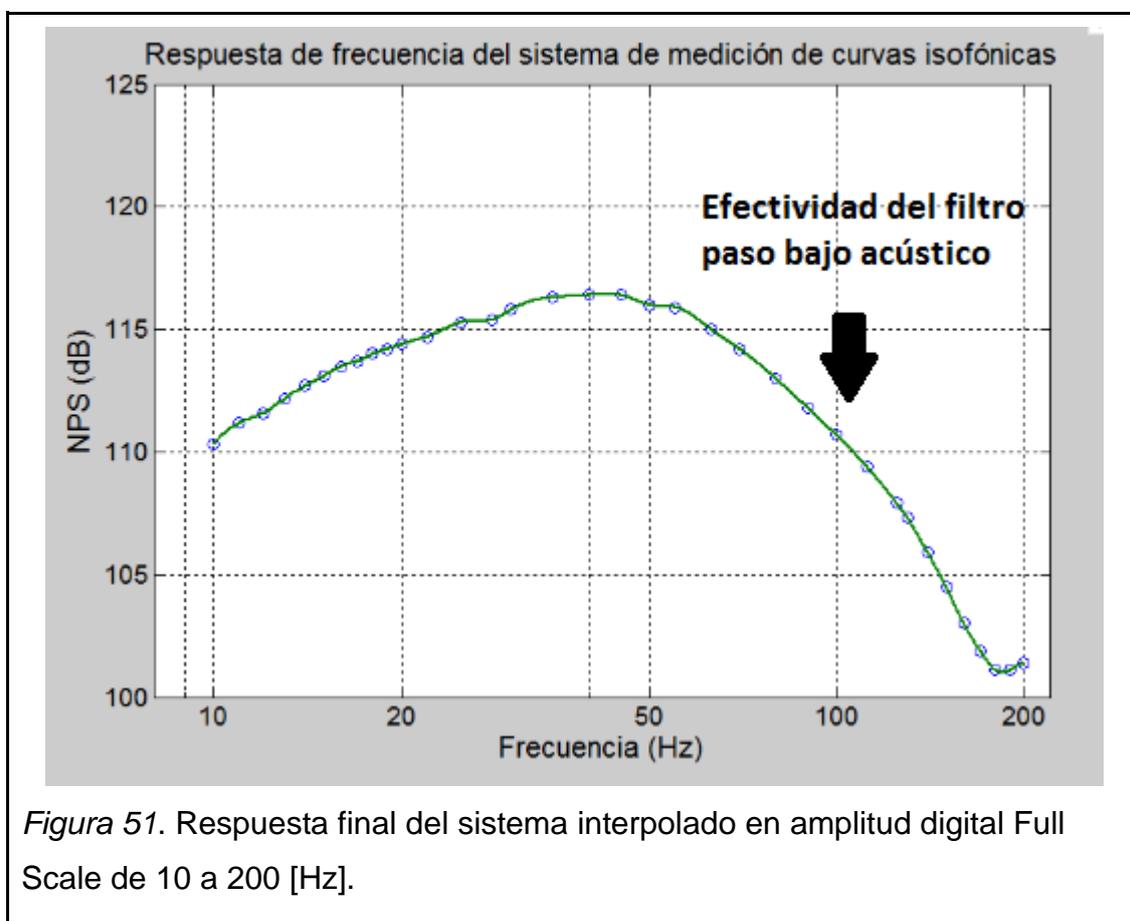


Figura 50. Cambio de respuesta de frecuencia con la modificación de los audífonos Beyerdynamic DT 1350.

La curva de respuesta de frecuencia a utilizarse como data de calibración en el programa de mediciones psicoacústicas será la obtenida a través de la

medición de tonos puros como se explica en la metodología. Estimando puntos entremedio a partir de interpolación por splines cúbicos.

Es posible constatar que la respuesta del sistema en amplitud digital full scale es bastante buena hacia las frecuencias de interés ya que como se ve en la figura 51 la curva no presenta variaciones significativas desde 10 hasta 50 [Hz].

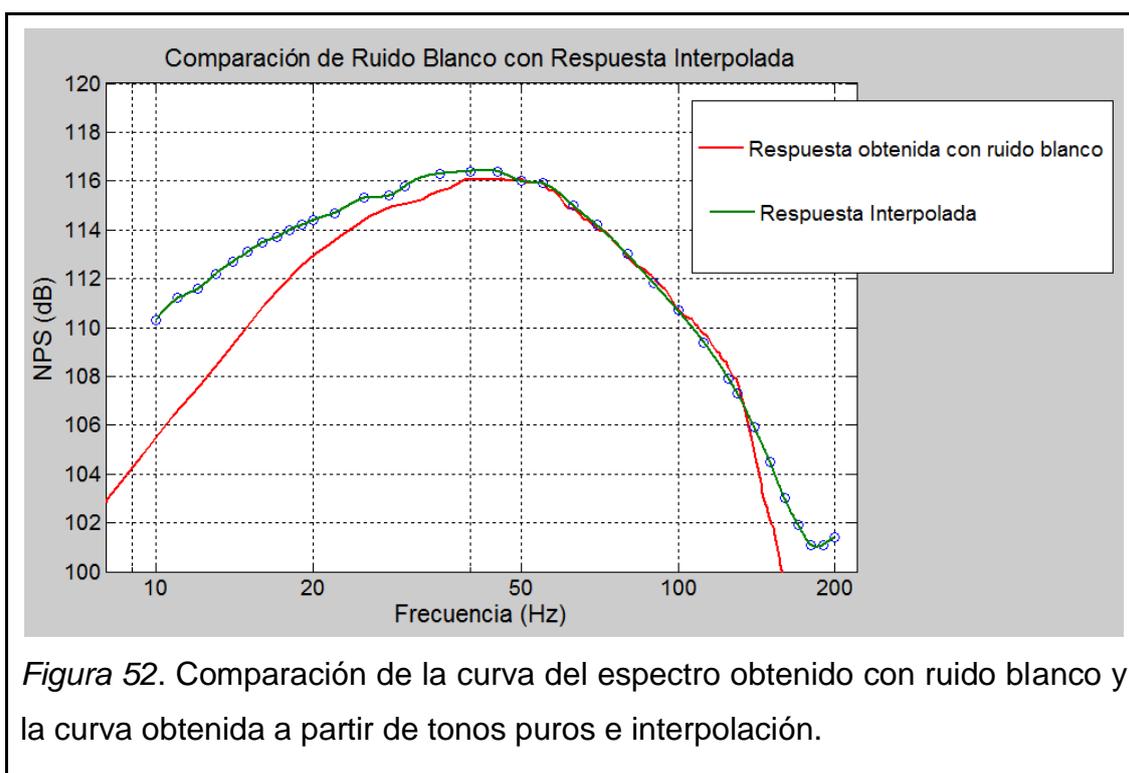


Claramente se puede observar que el nivel de la frecuencia fundamental de 10 [Hz] sube considerablemente hasta un valor máximo de 110.1 [dB] en comparación con los 49.8 [dB] de ruido de fondo (del laboratorio) y también en base a los 76.2 [dB] de los audífonos sin modificar en 10 [Hz], teniendo en cuenta que no se empleó el nivel máximo permitido por la interface RME Fireface 802 con el fin de proteger el micrófono del sonómetro el cual tolera un nivel de hasta 137 [dBA] RMS.

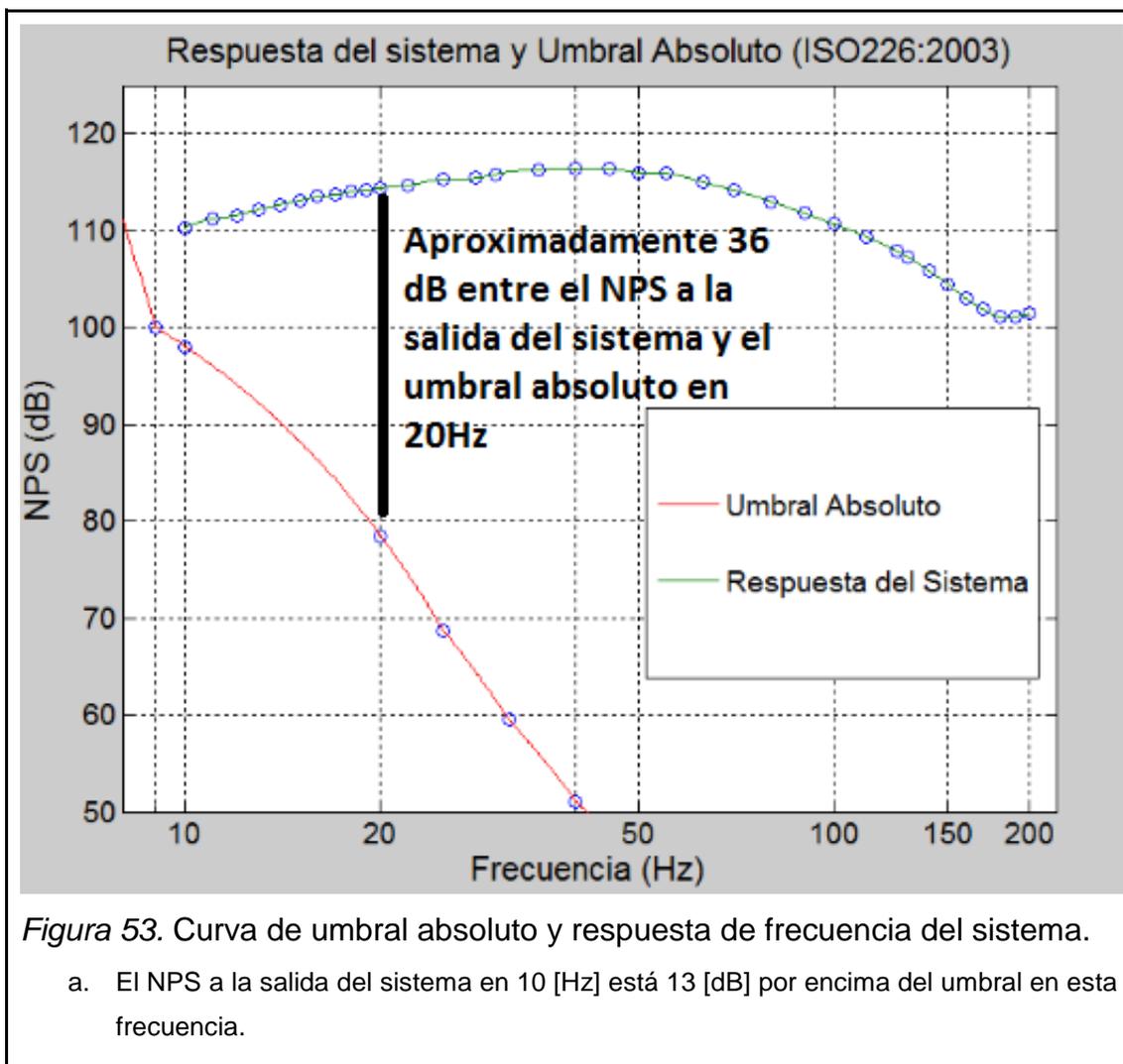
Resulta interesante comparar la curva de la figura 51 con la figura 24 ya que los dos gráficos tienden a una respuesta frecuencial similar (aclarando que uno

y otro sistema usaron otro tipo de metodología) ya que ambas simulan una cámara de presión y por ende los valores se correlacionan. Esto asegura que el sistema es óptimo y se puede continuar realizando futuras pruebas.

Las respuestas obtenidas a partir de ruido blanco y tonos puros son bastante parecidas, lo cual es un buen indicio. Hay que tomar en cuenta que la señal de ruido blanco se grabó con el micrófono Samson MM01 el cual presentaba una limitación por debajo de los 25 [Hz], lo cual se representa en la figura 51, sin embargo, en el rango óptimo de trabajo del micrófono se evidencia una correlación entre los gráficos.



Con respecto a los umbrales de audición para bajas frecuencias, es interesante comprobar que el sistema utilizado sobrepasa eficientemente el nivel de audición propuesto por los estudios de Moller y Pedersen por debajo de 20 [Hz] los cuales se vieron en las figuras 18 y 20.



Se aprecia como para la frecuencia de 20 [Hz] el umbral de audición está en 79 [dB] aproximadamente y los resultados del anexo 13 indican que para la misma frecuencia se cuenta con un nivel de 114.2 [dB]. Ya que como se ha ido diciendo en el transcurso de este trabajo, lograr emitir y aún más, escuchar frecuencias bajas es realmente complicado, los resultados muestran que se ha podido implementar el sistema correctamente. Esto permitirá realizar experimentos psicoacústicos de manera efectiva cerca de la curva de 40 fonos en 20 [Hz] con el fin de analizar el umbral de audición en personas e incluso dibujar curvas isofónicas a muy baja frecuencia. Aspecto que en la actualidad hay poca información del tema y tiende a ser aproximaciones matemáticas a falta de disponer de un sistema eficaz capaz de emitir y medir estos niveles.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO.

5.1. Análisis costo-beneficio.

Debido a la dificultad metodológica que representa la emisión de infrasonido a niveles altos de presión sonora y baja distorsión, el laboratorio de mediciones psicoacústicas a implementarse en la universidad tendrá el potencial de publicar resultados de vanguardia relacionados a la investigación en bajas frecuencias. Tema que no es común debido a los factores metodológicos mencionados.

El beneficio que tendrá la carrera y la universidad es considerable y el costo del proyecto justifica notablemente el paso adelante que se dará en cuanto a la investigación de la percepción y el asesoramiento de la UDLA en cuanto a problemas causados por fuentes de ruido de baja frecuencia.

A continuación, se detalla una tabla aproximada de los costos (al momento) de la investigación en proceso.

Tabla 2. Tabla aproximada de costos del trabajo de titulación.

Equipamiento	Costo
Audífonos Beyerdynamic DT 1350	\$200
Computador Lenovo G40 (portátil)	\$600
Adaptador para conexión hermética de audífonos (placa de bronce)	\$150
Alquiler sonómetro Cesva SC 310	\$50
Software MATLAB 2013a	\$625
Toolbox Data Acquisition para MATLAB	\$250
Interfaz RME Fireface 802	\$2500
Implementación de push button	\$100
Jeringas para simular canal auditivo	\$2
Pegamento y silicona	\$10
Extras (cableado y equipos electrónicos adicionales)	\$20
Total	\$4507

6. PROYECCIONES.

6.1. Capacidad de expansión y potencial del proyecto.

Puesto que esta investigación contempla realizar experimentos en sujetos de prueba como umbral de audición y gráfico de curvas isofónicas a bajas frecuencias, sin duda otros tesisistas podrán continuar desarrollando líneas de código y reajustes del acoplamiento del sistema (placa de bronce y gomas de poliuretano) con el fin de lograr obtener niveles de presión sonora mucho más elevados. Para esto se puede cotizar la fabricación de estos elementos en otro lugar de ensamblaje o torno con los planos disponibles y transferibles para su respectiva modificación.

La investigación propuesta puede avanzar de mejor manera mediante la adquisición de equipos aún más profesionales que no estuvieron disponibles en el período de ejecución de esta tesis. Es así como futuros investigadores podrán contar con un micrófono mucho más sofisticado como el de campo de presión que se deseó emplear en esta tesis que era el Brüel & Kjær modelo 4193-C-004 de media pulgada el cual presenta una respuesta en frecuencia de 0.07 [Hz] a 20 [kHz] y rango dinámico de hasta 162 [dB] lo que podría asegurar un proceso de medición y análisis del sistema en general mucho más preciso y confiable.

La inclusión del sistema de mediciones otoacústicas ER-10C (sistema especial para mediciones monoaurales en el canal auditivo) aportará considerablemente a los resultados que se podrán obtener en los experimentos, debido a que permitirá una calibración mayormente dinámica y efectiva ya que se considerarían las características físicas del oído de cada participante y permitirá descansos durante los experimentos los cuales tienen tiempos aproximados de 2 horas.

En un principio, este proyecto de investigación tenía contemplado un tiempo de ejecución de 6 a 24 meses calendario de los cuales los primeros 12 meses estarían involucrados los dos alumnos de esta tesis, no obstante, por fuerzas mayores no se pudo contar con este tiempo así que la continuación de este

proyecto estará beneficiada por el aporte intelectual de al menos 4 tesis más en el período restante.

Nuevas pruebas de validación del setup podrían efectuarse en el nuevo laboratorio disponible para la carrera que no interferiría con actividades propias de docentes tales como tutorías o clases y por ende dedicar mucho más tiempo al desarrollo de este proyecto y a la obtención de resultados relevantes con el apoyo de los futuros tesis, director de tesis y autoridades superiores.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1. Conclusiones.

Se pudo comprobar que el sistema diseñado y testeado equivale a un método de emisión de infrasonido correspondiente a una cámara de presión en la que se está midiendo una mínima presión audible (MAP), a diferencia de un mínimo campo libre (MAF) que como su nombre lo sugiere se realiza con el método de campo libre. La principal diferencia entre estos dos es que, con el sistema de esta tesis existe una diferencia de 6 [dB] aproximadamente a frecuencias altas entre uno y otro método siendo el MAP aquél con mayores niveles de presión sonora detectables por el oído humano.

Es de suma importancia trabajar con niveles cercanos a la amplitud digital Full Scale. Esto debido a que mientras más bajo sea el nivel digital de la señal, más cerca se estará del ruido de cuantización y por consecuencia los resultados reflejarán mayor amplitud del ruido de fondo y una menor relación señal/ruido.

A pesar de que el software MATLAB tiene muchas funciones que realizan los procesos matemáticos estudiados en el trabajo de titulación; por ejemplo, la función "pwelch" para la ejecución del método de Welch; se recomienda la implementación del código de manera manual, lo cual se traduce en un mejor entendimiento del funcionamiento y de la aplicación que tienen los métodos en las señales estudiadas.

Con las configuraciones del sistema de emisión se consiguieron diferencias entre la frecuencia fundamental y sus segundos, terceros y cuartos armónicos de 43, 44 y 69 [dB] en promedio respectivamente. Estos valores cumplen los 30, 40 y 50 [dB] recomendados, teniendo en cuenta que una vez que se mida el sistema con un micrófono que tolere mayor NPS, se evitarán efectos de distorsión.

En sistemas dependientes de variaciones de volumen es importante evitar y controlar posibles fugas de aire, por lo cual se recomienda tener especial consideración al correcto sellado de las uniones entre las piezas que

conforman la estructura para la modificación de los audífonos. En las mediciones tanto de tonos puros como de ruido blanco posteriores al sistema diseñado se observó claramente un aumento de nivel en los armónicos a la salida debido a fugas de aire en cualquiera de las etapas del sistema. Materiales como silicona, pegamento y cintas scotch o taípe son de gran ayuda para una implementación sin pérdidas.

La ecuación aplicada para estimar la presión sonora mediante variaciones de volumen interno debidas a la excursión del driver, predice que existirá un mayor NPS a la salida al reducir el volumen, ya que el driver desplazará mayor cantidad de aire con su excursión.

En conclusión, el sistema podría mejorar su nivel de salida reduciendo ligeramente el volumen interno ya sea en la placa como tal o en los tubos de salida. Siempre y cuando se asegure de no reducirlo en exceso y de seguir recomendaciones de investigadores vinculados al tema.

El objetivo del sistema como tal es lograr emitir altos niveles de NPS en bajas frecuencias, sin embargo, hay que considerar que para medir estos niveles a la salida se necesitan micrófonos que toleren niveles considerables de presión sonora. En su mayoría, los micrófonos con los que cuenta la carrera de ingeniería en sonido y acústica están en un rango de tolerancia de hasta 137 [dB] de presión sonora por lo cual hay que tomar en cuenta el nivel en la salida del sistema para evitar sobrepasar este nivel y saturar a los equipos involucrados. Este fue uno de los principales inconvenientes al momento de estimar cuál sería el nivel máximo a la salida del sistema. Este percance se soluciona controlando el nivel del potenciómetro de salida de audífonos hasta estar aproximadamente 10 [dB] por debajo del máximo nivel tolerable del micrófono de medición.

Se resume que, al momento de experimentar un poco con el sistema descrito en este proyecto de fin de carrera y alterando la configuración de los niveles de salida de audífonos en la interface para tener valores realmente altos de nivel, fue posible escuchar o distinguir claramente frecuencias como 5 y hasta 1 [Hz]

con un buen sellamiento del cojín supraaural en pruebas preliminares de este proyecto.

Varios investigadores recomiendan el uso de los audífonos Beyerdynamic DT 48 para esta clase de proyectos, sin embargo, al ser audífonos obsoletos no se pudo contar con los mismos y también debido a que la Universidad no suele adquirir equipo de segunda mano. Ahora bien, los resultados obtenidos con los DT 1350 son relativamente buenos, incluso comparables con respuestas de cámaras de presión, específicamente la testada por el director de esta tesis en Dinamarca.

A pesar de que los audífonos Beyerdynamic DT 48 son circumaurales y los DT 1350 supraaurales, esto no supone un problema ya que el audífono no se colocará en el oído como viene de fábrica. Los modelos mencionados coinciden en el tipo de bobina dinámica del tipo Tesla, sin embargo, la principal razón para la elección de los Beyerdynamic DT 1350 está en su respuesta de frecuencia (5 hasta 30000 [Hz]) y sobre todo en la calidad y prestigio de la marca y sus transductores. Esto hace que sean muy utilizados en proyectos de investigación como el del presente trabajo de titulación.

Debido a la duración de aproximadamente dos horas y media del experimento completo es de considerable importancia realizar pausas intermedias para que el participante se relaje y no sienta una fatiga que pueda reflejarse en los resultados. Además, hay que considerar que la colocación de la sonda y cojín supraaural pueden cambiar después del descanso con respecto a la primera colocación. Esto hace que la inclusión del sistema ER-10C sea necesaria (en un futuro) para la recalibración del sistema después de cada reposicionamiento del cojín supraaural.

Se concluye que al momento de realizar la medición del NPS de los tonos puros (en bajas frecuencias) con el sonómetro (ya que era el único instrumento con respuesta plana hasta 10 [Hz] para obtener muestras certeras) fue difícil obtener datos mucho más finos como por ejemplo en sextos de octava (que sería lo ideal) ya que este disponía de un análisis de hasta máximo

$\frac{1}{3}$ de octava y a partir de la frecuencia mencionada en adelante. Esto quiere decir que al momento de presentar los valores de las diferencias de nivel entre fundamental y armónicos del anexo 13 no se está siendo muy preciso ya que, al medir una banda en particular, la energía de las adyacentes se suma llegando a tener una visualización de niveles bastante altos y casi parejos que podrían alterar el nivel total y real de estas diferencias entre armónicos.

El proceso de medición a través de micrófonos se tornó complejo ya que se usó un conjunto variado de los mismos. Primeramente se quiso usar el micrófono profesional Brüel & Kjær modelo 4193-C-004 pero por problemas de cotización al día de la presentación de la tesis no fue posible; luego y en base a los recursos disponibles se eligió el MM1 de la marca Beyerdynamic (accesible en la carrera) cuya respuesta en frecuencia permitía analizar mínimo hasta 20 [Hz] sin embargo no era posible usar ni el calibrador del sonómetro para asegurar 94 [dB] en 1 [kHz] ni tampoco emplear la jeringa que simulaba el pabellón auditivo ocluido, ya que la dimensión de la cápsula exterior de este instrumento no coincidía con la $\frac{1}{2}$ pulgada que se necesitaba. Se usó por tanto el Samson MM01 que tenía respuesta similar al Beyerdynamic y cumplía con la medida requerida de $\frac{1}{2}$ pulgada.

Una buena práctica al momento de empezar a analizar la respuesta en frecuencia de los audífonos DT 1350 (antes de modificarlos) es realizar un reposicionamiento de los mismos con el fin de simular el proceso real que hace una persona al momento de realizar una prueba psicoacústica que es acomodarse bien el audífono hasta sentirse a gusto y con certeza de escuchar claramente. El director de la tesis insistió en esta práctica debido a su experiencia en previas mediciones y ayudó considerablemente ya que fue posible ver en un gráfico fft cómo la respuesta a bajas frecuencias cambia drásticamente debido a fugas de presión por una mala colocación de los audífonos.

Resulta muy conveniente el uso del tubo de plástico y el cojín supraaural, ya que el método implica no variar el volumen del canal auditivo para los experimentos (1.5 a 2 [cc] promedio), de la misma forma el filtro acústico

generado en la salida de la sonda y el cojín vuelve al sistema más seguro en cuanto a posibles armónicos que puedan generarse en altas frecuencias y resulten perjudiciales para el sujeto de prueba, la utilización de audífonos circumaurales o supraaurales (sin modificación) ya que se limita esta buena respuesta que tiene el método empleado en este trabajo de titulación.

Para la correcta interpretación de los gráficos obtenidos a partir de mediciones es fundamental conocer la respuesta de frecuencia del micrófono empleado. Generalmente los micrófonos de medición de bajo costo tienen un menor valor de sensibilidad y una respuesta en frecuencia limitada hasta los 20 [Hz], marcas como G.R.A.S., o Brüel & Kjær si bien son bastante costosas, en sus datasheets entregan un mayor detalle de su funcionamiento y una mejor sensibilidad y respuesta de frecuencia lo cual los hace idóneos para la continuación del presente trabajo de titulación. De igual forma los colaboradores del proyecto recomiendan altamente estas marcas de micrófonos debido a su experiencia y resultados obtenidos.

Debido a la experiencia adquirida durante el desarrollo del presente trabajo de titulación se considera que será de gran ayuda trasladarse a un lugar con un menor ruido de fondo y tránsito de personas. Específicamente al nuevo laboratorio de la carrera de ingeniería en sonido y acústica, el cual asegurará un mejor ambiente de trabajo y una menor influencia de factores externos en futuros resultados.

El desarrollo del trabajo de titulación implicó una profunda investigación de temas no solamente relacionados a la ingeniería sino a métodos psicofísicos y al funcionamiento hasta cierto punto del cerebro humano frente a un estímulo cognitivo, lo cual representa un aprendizaje altamente valioso en varios aspectos de la ciencia.

El estudio del cerebro humano frente a estímulos sonoros abre muchas puertas a la investigación, estudio y desarrollo de proyectos que puedan concluir en aspectos interesantes acerca del complejo funcionamiento y comportamiento del oído humano.

7.2. Recomendaciones.

Se recomienda un estudio de las ecuaciones, programación y lectura de papers de investigación previo a la reconfiguración del sistema, debido a que muchos conceptos pueden tener una interpretación incorrecta si no se conoce la teoría a detalle.

Es necesario un conversatorio ulterior a la presentación de esta tesis con el director de la tesis para analizar si es óptimo reconfigurar el diseño de las placas con otros materiales o medidas menores para asegurar una mejor eficiencia en el sistema y por tanto un mayor nivel en bajas frecuencias.

Se considera útil una revisión al programa de curvas isofónicas de MATLAB para compensar posibles retardos de comunicación de entradas y salidas entre software y microcontrolador del Arduino ya que, al momento de verificar el funcionamiento del botón de respuestas en interacción con el programa en cuestión sucedían inconsistencias temporales traducidas en retardos de pulsación de un botón y su respectiva información lumínica a través del foco led.

Es idóneo aprovechar las herramientas nuevas y accesibles a los futuros tesisistas, específicamente el micrófono (de marca G.R.A.S.) incluido con el tubo de Kundt (que a la fecha de presentación de esta tesis no estuvo disponible) cuya respuesta en frecuencia (plana de 5 [Hz] en adelante) permitirá una medición más precisa al medir tonos puros a bajas frecuencias.

Aunque la calibración del sistema se hizo con tonos puros y se mencionó algo del ruido blanco, es recomendable contemplar otro tipo de calibración tal como la utilización de tonos sweep los cuales aprovechan de mejor manera la relación señal/ruido. Esto permitirá obtener otra información (desfases, promediados de varias mediciones, entre otras) posiblemente similar al otro método. No obstante, sería indispensable para un mejor discernimiento en cuanto a qué metodología aplicar al calibrar el sistema. Esto se podría hacer mediante un estudio minucioso del programa (en MATLAB) perteneciente al colaborador de la UCL PhD. Torsten Marquardt.

Se recomienda una mejor planificación de tiempos de ejecución del proyecto y/o mayor presión al departamento de adquisiciones de la Universidad ya que al no tener listo aspectos como equipamiento necesario licencias profesionales, futuros tesisas, espacios adecuados para trabajar (laboratorios), entre otros; se ve afectado el progreso en general de la investigación y especialmente la fecha en la cual se podrían graduar futuros tesisas.

Después de cada medición de ruido blanco o tonos puros es recomendable la superposición del gráfico de la curva de umbral auditivo (valores establecidos en la normativa ISO 226:2003) sobre los resultados obtenidos. Esto con el fin de evaluar rápidamente si la frecuencia fundamental tiene el nivel suficiente para medir alguna curva isofónica y determinar si los armónicos son audibles o no, ya que los umbrales de frecuencias menores a 20 [Hz] alcanzan niveles de hasta 140 [dB].

Para futuros tesisas se recomienda una continua interacción con el director de la tesis y familiarización con los equipos disponibles, ya que el conocimiento del funcionamiento del sistema mejora al realizar mediciones constantemente. De la misma forma la amplia experticia del doctor Carlos Jurado sobre el tema hace que las conversaciones y discusiones enriquezcan el proyecto.

8. REFERENCIAS.

- Arduino. (s.f.). *Arduino - Introduction*. Recuperado el 23 de abril de 2016, de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>.
- Arrieta, B. Markaida, I., & Oleagordia, I. (s.f.). *Adquisición de datos y acondicionamiento de la señal*. Recuperado el 19 de mayo de 2016, de http://www.ehu.eus/daq_tutorial/Doc/PDF/Tema5.pdf.
- Berglund, B., Lindvall, T., Schwela, D., & Goh, K.-T. (2000). *Guidelines for Community Noise*. World Health Organization.
- Buitrón, J. (2013). *Desarrollo de un software de procesamiento para obtener señales de audio binaurales a partir de señales de audio monofónicas*. Quito. UDLA, Sede Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. 198 p.
- Cerón, O. (1999). *Métodos numéricos*. Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 25 de mayo de 2016 de, <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10022/1/metodos%20numericos.pdf>.
- Echevarría, R. (s.f.). *Breves Apuntes de MATLAB*. Recuperado el 30 de mayo de 2016, de <http://personal.us.es/echevarria/documentos/IntroduccionMATLAB.pdf>.
- García, J. (2000). *Tutorial de Análisis Numérico Interpolación: Splines cúbicos*. Departamento de Informática y Sistemas Universidad de las Palmas de Gran Canaria: Tarifa, España.
- Grassi, M. (2009). *MLP: A MATLAB toolbox for rapid and reliable auditory threshold estimation*. Behavior Research Methods, 20-28.
- Hensel, J., Scholz, G., Hurttig, U., Mrowinski, D., & Janssen, T. (2007). *Impact of infrasound on the human cochlea*. Hearing research, 233(1), 67-76.
- Jurado, C., Pedersen, C. S., & Moore, B. C. (2011). *Psychophysical tuning curves for frequencies below 100 Hz*. The Journal of the Acoustical Society of America, 129(5), 3166-3180.
- Kingdom, F y Prins, N. *Psychophysics: A Practical Introduction*. London:

- Academic, 2010. Print.
- Kuehler, R., Fedtke, T., & Hensel, J. (2015). *Infrasonic and low-frequency insert earphone hearing threshold*. The Journal of the Acoustical Society of America, 137(4), EL347-EL353.
- Leventhall, G. (2003). *A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects*. London-England. Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- Levitt, H. (1971). *Transformed up-down methods in psychoacoustics*. Journal of the Acoustical Society of America, 49, 467-477.
- Marquardt, T., & Hensel, J. (2013). *A simple electrical lumped-element model simulates intra-cochlear sound pressures and cochlear impedance below 2 KHz*. J. Acoust. Soc. Am., 134(5), 3730-3738.
- Marquardt, T., Hensel, J., Mrowinski, D., & Scholz, G. (2007). *Low frequency characteristics of human and guinea pig cochlea*. J. Acoust. Soc. Am., 121, 3628-3633.
- Martínez, H. (2004). *Métodos Numéricos Material de apoyo al Curso*. Tecnológico de Monterrey: Monterrey, México.
- Mathworks. (s.f.). *ArduinoIO*. Recuperado el 25 de abril de 2016, de <http://www.mathworks.com/matlabcentral/mlcdownloads/downloads/submissions/47057/versions/1/download/zip/ArduinoIO.zip>.
- Miyara, F. (2006). *Acústica y sistemas de sonido*. Universidad Nacional de Rosario.
- Moller, H., & Pedersen, C. S. (2004). *Hearing at low and infrasonic frequencies*. Noise and health, 6(23), 37.
- Moore, B. (2014). *Development and Current Status of the "Cambridge" Loudness Models*. Trends in Hearing Vol 18, 1-29.
- Oppenheim, A., Willsky, A., (1998). *Señales y Sistemas*. Segunda Edición. Massachusetts Institute of Technology: Boston.
- Páez, E. (2010). *Diseño e implementación de un software didáctico para la materia de acústica arquitectónica*. Quito. UDLA, Sede Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. 176 p.
- Plack, C. (2014). *The Sense of Hearing*. New York, NY: Psychology

Press/Taylor & Francis.

- Pazmiño R. (2015). *Implementación de un software de emulación de reverberación del teatro Lalama y coliseo Uta de la ciudad de Ambato*. Quito. UDLA, Sede Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. 98 p.
- Reinis, S y Nussbaum, D. (1985). *Some Individual Differences in Human Response to Infrasound*. Institute for Aerospace Studies: University of Toronto.
- Robalino M y Franklin M. (2011). *Software de estimulación de pérdida auditiva*. Quito. UDLA, Sede Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. p. 176.
- Rumsey, F. & McCormick, T. (2002). *Sonido y grabación. Introducción a las técnicas sonoras*, IORTV (2a Ed). Madrid. España.
- Scharine, A., Kara D., & Tomasz, L. (2009). "Auditory Perception and Cognitive Performance." *PsycEXTRA Dataset*. Print.
- Suzuki, Y., & Takeshima, H. (2004). Equal-loudness-level contours for pure tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2), 918-933.
- Telgarsky, R. (2013). *Dominant Frequency Extraction*. arXiv preprint arXiv:1306.0103.
- Vassilakis, P. (1995-2013). *Psychoacoustics: definitions and scope of study*. Recuperado el 29 de abril de 2015, de <http://acousticlab.org/psychoacoustics/>.
- Watanabe, T y Møller, H. (1990). *Hearing Thresholds and Equal Loudness Contours in Free Field at Frequencies below 1 kHz*. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 9(4), 135-148.

ANEXOS

Anexo 1. Sonómetro integrador analizador de espectro en tiempo real por bandas de tercio de octava y octava SC 310 y calibrador acústico CB006.



Anexo 2. Ficha técnica de los audífonos Beyerdynamic DT 1350.

DT 1350 DT 1350 CC

Dynamic Headphone



FEATURES

- Ideal for studio applications
- Excellent ambient noise attenuation
- Tesla technology with highest efficiency
- Swivelling ear cups 90°
- Single-sided cable

APPLICATIONS

The DT 1350/DT 1350 CC opens up new dimensions with its excellent sound quality and superior materials. Despite the compact, supraaural ear pads, the DT 1350/DT 1350 CC provides an extraordinary high ambient noise attenuation and due to the enormous maximum sound pressure level, this headphone is perfect for sound engineers, musicians and DJ's.

The efficient Tesla transducers ensure a perfectly balanced and analytical sound. Their extremely high level of efficiency is useful for users in loud environments such as sound engineers when listening to PA systems or musicians. The comfortable, replaceable ear pads and the spreadable headband ensure superior comfort for a long period of time and an absolutely safe fit. The swivelling ear cups (90°) allow listening with one side; the supplied bag ensures easy transport.

With its reduced shape, the DT 1350/DT 1350 CC is visually impressing and characterised by simplicity and elegance.

The single-sided connecting cable is provided with a gold plated 3.5 mm stereo jack with 1/4" inch adapter, and is therefore suitable for use with almost all headphone amplifiers.

VERSIONS

DT 1350	Headphone, 80 Ω, with straight cable	Order # 702.072
DT 1350 CC	Headphone, 80 Ω, with coiled cable	Order # 703.575

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Transducer type	Dynamic
Operating principle	Closed
Frequency response	5 - 30,000 Hz
Nominal impedance	80 Ω
Sound pressure level	109 dB
Max. SPL	129 dB
T.H.D.	< 0.2%
Power handling capacity	100 mW
Sound coupling to the ear	Supraaural
Ambient noise attenuation	approx. 23 dBA
Nominal headband pressure	approx. 5.5 N
Length and type of cable	
DT 1350	1.5 m / straight cable, single-sided
DT 1350 CC	2.5 m / coiled cable, single-sided
Connector	Gold plated mini stereo jack plug (3.5 mm) and 1/4" adapter (6.35 mm), in-flight adapter 2 x mini jack (3.5 mm)
Weight (without cable)	174 g

SPARES AND ACCESSORIES

Ear pads (pair)	Order # 910.376
Cable curler (spiral)	Order # 906.816
1/4" jack adapter (6.35 mm)	Order # 906.824
In-flight adapter 2 x 3.5 mm	Order # 906.832
Bag	Order # 906.840
Headband pad	Order # 913.200
Straight cable (DT 1350)	Order # 908.045
Coiled cable (DT 1350 CC)	Order # 913.219

1 of 1

beyerdynamic GmbH & Co. KG
Theresienstr. 8 | 74072 Heilbronn - Germany
Tel. +49 (0) 71 31 / 617 - 0 | Fax +49 (0) 71 31 / 617 - 204
info@beyerdynamic.de | www.beyerdynamic.com

For further distributors worldwide, please go to www.beyerdynamic.com
Non-contractual illustrations. Contents subject to change without notice. E4 / DT 1350 (07.14)

beyerdynamic

Anexo 3. Interfaz Mbox 3 Mini.



Anexo 4. Ficha técnica del micrófono de medición Beyerdynamic MM1.

MM 1

Measurement Microphone

Order # 449.350

**FEATURES**

- Linear frequency response in the diffuse field / under 90°
- Omnidirectional polar pattern
- Calibrated open circuit voltage
- Narrow tubular construction

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Transducer type	Condenser (back electret)
Operating principle	Pressure
Frequency response	20 - 20,000 Hz (50 - 16,000 Hz \pm 1.5 dB)
Polar pattern	Omnidirectional, diffuse field calibrated
Open circuit voltage at 1 kHz	15 mV/Pa (= -36.5 dBV) \pm 1 dB
Nominal impedance	330 Ω
Nominal load impedance	\geq 2.2 k Ω
Max. SPL at f = 1 kHz, k = 1%, R _L = 2.2 k Ω	128 dB _{ref}
S/N ratio rel. to 1 Pa	> 57 dB
A-weighted equivalent SPL	approx. 28 dB(A)
Power supply	12 - 48 V phantom supply
Current consumption	approx. 3.4 mA
Output	transformer balanced
Connection	3-pin XLR male
Dimensions:	
Length	133 mm
Shaft diameter	19/9 mm
Head diameter	9 mm
Weight (w/out cable)	88 g

APPLICATIONS

The MM 1 is a measurement microphone which has been designed specifically for measuring sound reinforcement and PA-systems. It is designed to work with spectrum analysers for measuring frequency response and sound pressure levels of loud speaker systems. The MM 1 is the ideal microphone for the measurement of audio signals in the research, development, for reverberation testings and other applications.

The narrow tubular construction ensures that the microphone has negligible influence on the sound field so that an increase in sound pressure is avoided with high frequencies. A natural reproduction is achieved due to the linear frequency response.

OPTIONAL ACCESSORIES

GST 400	Microphone stand, 3/8", height 0.90 - 1.65 m, with G 400 boom.	Order # 421.294
GST 500	Microphone stand, 3/8", height 0.85 - 1.60 m, with telescopic G 500 boom.	Order # 406.252
ST 400	Microphone stand, 3/8", height 0.90 - 1.65 mm	Order # 421.286
ST 500	Microphone stand, 3/8", height 0.85 - 1.60 mm	Order # 406.643
WS 10	Wind shield, charcoal grey	Order # 403.008

Anexo 5. Ficha técnica de la interface RME Fireface 802.

A LEGEND REBORN



The image shows the RME Fireface 802 audio interface, a high-end USB and FireWire audio interface. It is a rack-mountable device with a black and silver finish. The front panel features four microphone preamps with gain knobs and meters, a 'PHONE / LINE SWITCH', and a 'SMIT' (Stereo Mix) section with level controls and meters. The bottom section contains various digital and analog I/O ports, including ADAT, AES/EBU, and balanced line level inputs and outputs.

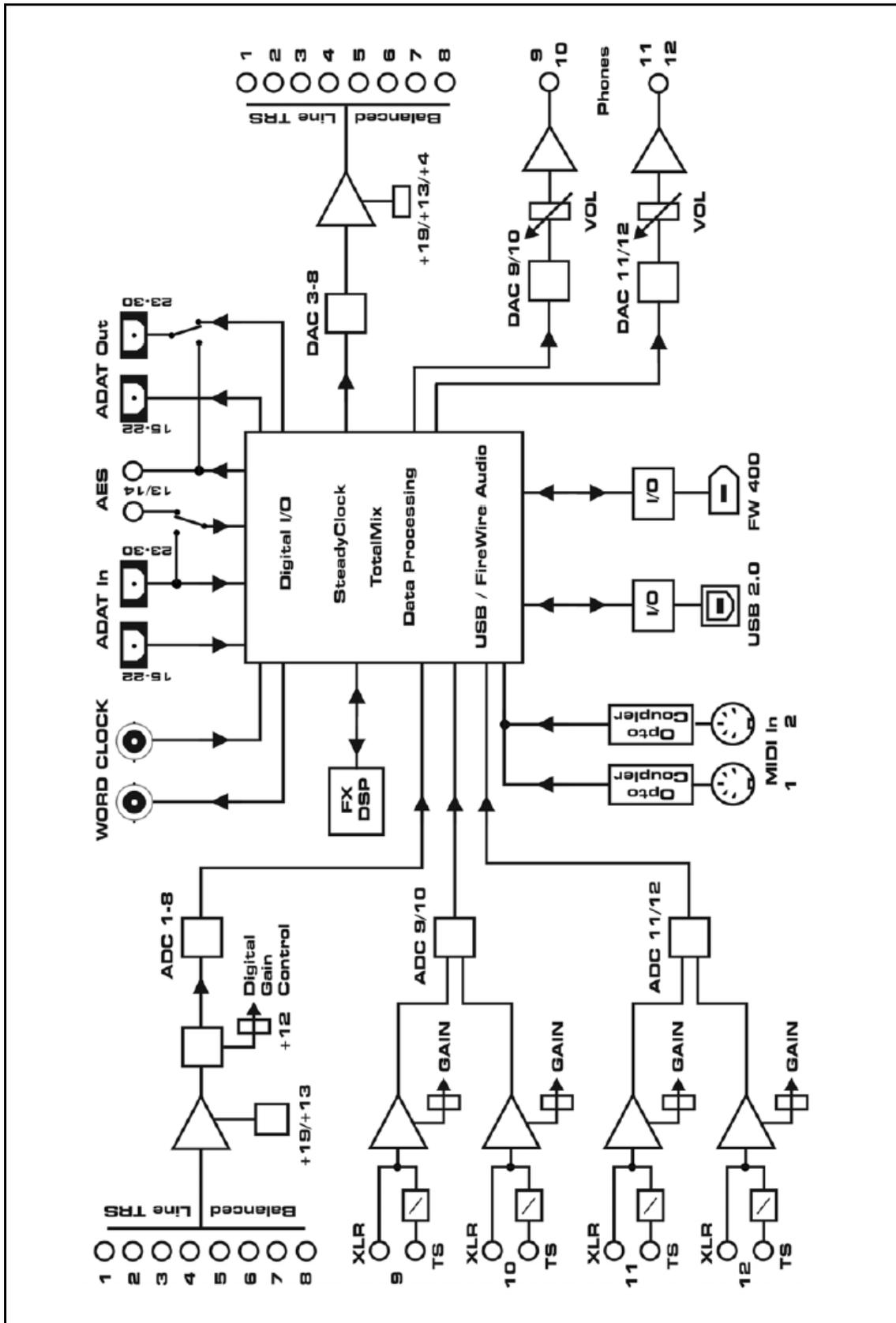
Fireface 802

60-Channel 192 kHz High-End USB & FireWire Audio Interface

- 30 Input / 30 Output channels
- 12 x Analog I/O
- 4 x Mic/Instrument Preamp
- 1 x AES/EBU I/O
- 2 x ADAT I/O (or 1 x ADAT I/O plus 1 x SPDIF I/O optical)
- 1 x Word Clock I/O
- 1 x MIDI I/O
- FireWire or USB operation
- TotalMix FX



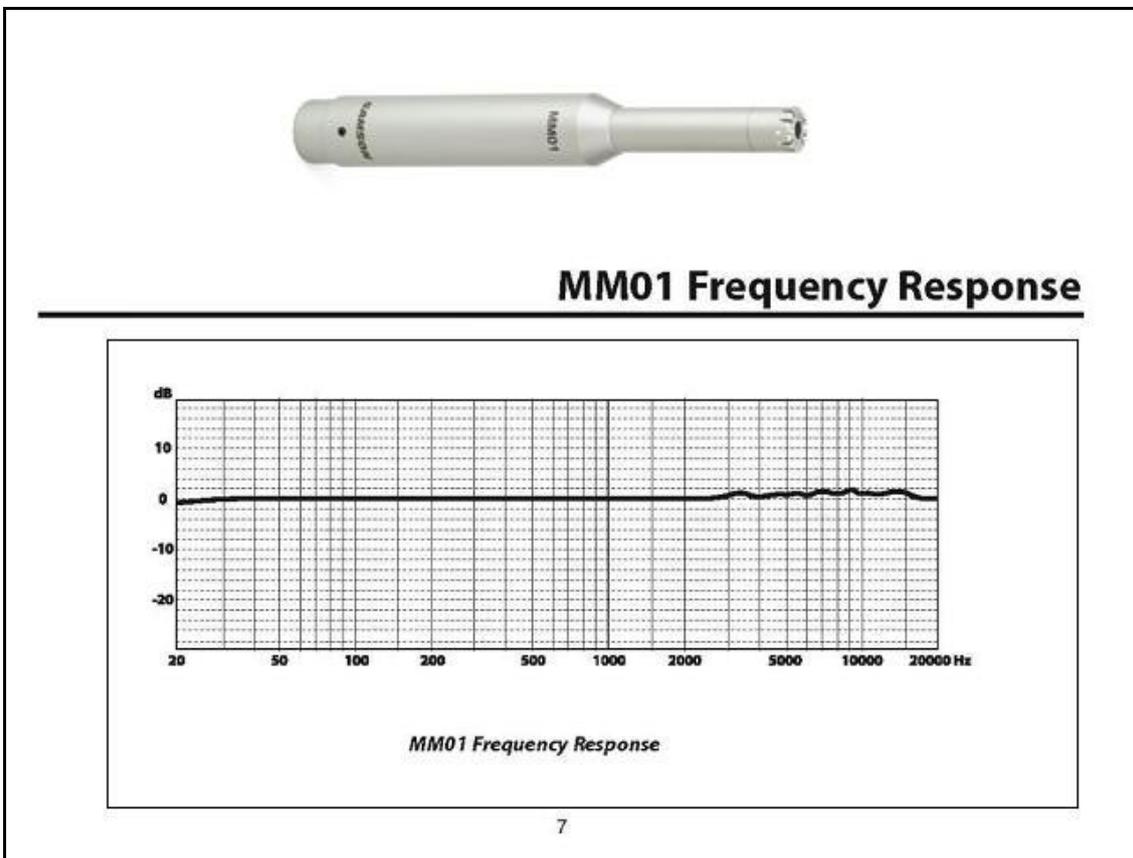
Anexo 6. Diagrama de Bloques de la interface RME Fireface 802.



Anexo 7. Computadora portátil Lenovo G40.



Anexo 8. Ficha técnica del micrófono de medición Samson MM01.



Anexo 9. Corrección de nivel, playback y grabación en MATLAB.

◀ Corrección de Niveles en la salida

```

AI = analoginput('winsound'); %Configuración de la interface de audio.
addchannel(AI, 1);
Fs = 44100; % Sample Rate is 8000 Hz
set (AI, 'SampleRate', Fs)
duration = 30; % 2 second acquisition
set(AI, 'SamplesPerTrigger', duration*Fs);
% -----
fs =44100; %frecuencia de muestreo
T = 100;
% -----Cambio de nivel de salida-----
f2=(input('Frecuencia a emitir de 20 a 315 Hz: '));
FSLsplines(f2,1); % --- Busca el Valor FS obtenidos en medición.
n1=(input('Nivel de salida en decibeles: '));
n2=ans-n1; % --- Resta de niveles para buscar la amplitud digital correspondiente
n3=10.^(-n2/20); %Factor de corrección para el nivel de salida
b=1;
bt=b*n3;
t2=0:(1/(fs-(1/T))):T;
x=bt*sin(2*pi*f2*t2);
x3=zeros(1, fs*T);
xt=[x3; x];
%---Configuración de la Rampa
rs=0.1;
rb=0.1;
s=1-rs-rb;

r=linspace(0,1,(fs*T)*rs);
rr=ones(1,(fs*T+1)*s);
rrr=linspace(1,0,(fs*T)*rb);
% Configuración Monoaural
ram=[x3;r rr rrr];
res = xt.*ram;
warning('off','all');
warning;
% -----Playback del Tono
p= audioplayer(res, fs, 24);
play(p, [1 (get(p, 'SampleRate') * T)]);
% -----Empieza la grabación.
pause (0.6)
start(AI);
data = getdata(AI);
delete(AI)
N = length(data) ;
t = (0:N/2)*Fs/N ;
% -----Grificación de la FFT
xfft = abs(fft(data));
mag = 20*log10(xfft);
mag = mag(1:end/2+1);
semilogx(t, mag)
grid on
hold on

```

```

% Umbral absoluto ISO226:2003.
% Se lo dibuja para evidenciar niveles
% generales entre norma y medición in situ.
x8=[2 3 4 5 6 7 8 9 10 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315];
y9=[122 118 116 115 113 112 111 100 98 78.5 68.7 59.5 51.1 44 37.5 31.5 26.5 22.1 17.9 14.4
11.4 8.6];
xx8 = 1:1:315;
yy9 = interp1(x8,y9,xx8);
plot(x8,y9,'o',xx8,yy9);
hold on

```

GRABACIÓN DE RUIDO BLANCO AUDIFONOS.

```

clc;
load('120.mat'); %Se carga una matriz que contiene ruido blanco normalizado con buena
relacion Señal/Ruido.
    %Este vector debe estar en la misma carpeta que el
    %programa a usarse.
AI = analoginput('winsound'); %Configuración del driver de la interface.
addchannel(AI, 1);
Fs = 44100;
set (AI, 'SampleRate', Fs)
duration = 120;
set(AI, 'SamplesPerTrigger', duration*Fs);
T=120; %Tiempo de grabación de 2 minutos del ruido blanco.
fs=44100;
Nbits=24;
x3=zeros(1, length(x1)); %Vector de ceros en los datos del audífono izquierdo (configuración
monoaural).
xt=[x3' x1];
% xt=[x1 x3']; %Suena el otro canal.
% -----Playback del Tono

```

```

p= audioplayer(xt, fs, 24);
play(p, [1 (get(p, 'SampleRate') * T)]);
% -----Empieza la grabación.
pause (0.1);
start(AI);
data = getdata(AI);
delete(AI)
N = length(data) ;
f = (0:N/2)*Fs/N ;
xfft = abs(fft(data));
mag = 20*log10(xfft);
mag = mag(1:end/2+1);
semilogx(f, mag) % Gráfico de resultados en el dominio de la frecuencia
grid on
wavwrite(data,Fs,Nbits,uiputfile('%*.wav'),'Guardar como')); %Generación del archivo
.wav

```

Anexo 10. Interpolación de datos para calibración en MATLAB.

```
%VALORES OBTENIDOS POR MEDICIÓN E INTERPOLACIÓN DE DATOS

x8=[10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 22 25 28 30 35 40 45 50 55 63 70 80 90 100 112 125
130 140 150 160 170 180 190 200];
y9=[110.3 111.2 111.6 112.2 112.7 113.1 113.5 113.7 114 114.2 114.4 114.7 115.3 115.4
115.8 116.3 116.4 116.4 116 115.9
115 114.2 113 111.8 110.7 109.4 107.9 107.3 105.9 104.5 103 101.9 101.1 101.1
101.4];

xx8 = 10:.1:200;
yy9 = spline(x8,y9,xx8);
semilogx(x8,y9,'o',xx8,yy9);
axis([10 315 100 125])
hold on
title('Respuesta del sistema de medición de curvas isofónicas'); xlabel('Frecuencia');
ylabel('dB NPS');
grid on
```

Anexo 11. Método de Welch en MATLAB.

```

%PROMEDIADO UTILIZANDO EL MÉTODO DE WELCH
clear all;
clc;
v=hanning(2^15);
%Se cargan los archivos .wav de ruido blanco normalizado grabado a la
%salida del sistema
[data1,Fs,NBITS]=
wavread('C:\Users\Darío\Desktop\TESIS_TESIS\ProgramaInterpolado\WNSAMSONMM01_1.wav');
[data2,Fs,NBITS]=
wavread('C:\Users\Darío\Desktop\TESIS_TESIS\ProgramaInterpolado\WNSAMSONMM01_2.wav');
[data3,Fs,NBITS]=
wavread('C:\Users\Darío\Desktop\TESIS_TESIS\ProgramaInterpolado\WNSAMSONMM01_3.wav');
% Archivo 1
data1=data1(1:3932160); %Truncamiento en múltiplos de 2^n
w=buffer(data1,32768,16384);
h=repmat(v,240,1);
h=buffer(h,32768);
wi=abs(fft(h.*w)); %Multiplicación por ventanas Hamming en la frecuencia.
m1=mean(wi',1);
N=length(m1);
f=Fs*(0:N/2)/N;
% Archivo 2
data2=data2(1:3932160);
w=buffer(data2,32768,16384);
h=repmat(v,240,1);
h=buffer(h,32768);
wi=abs(fft(h.*w));
m2=mean(wi',1);
N=length(m2);
f=Fs*(0:N/2)/N;
% Archivo 3
data3=data3(1:3932160);
w=buffer(data3,32768,16384);
h=repmat(v,240,1);
h=buffer(h,32768);
wi=abs(fft(h.*w));
m3=mean(wi',1);
N=length(m3);
f=Fs*(0:N/2)/N;
% Promedio
MeanL=(m1+m2+m3)./3; %Promedio de las tres mediciones.
% Smooth
SMeanL=smooth(MeanL);
% Gráfico
semilogx(f,20*log10(SMeanL(1:N/2+1)));
hold on;
grid on

```

Anexo 12. Distorsión armónica del audífono derecho DT 1350 sin modificación.

F. F [Hz]	Nivel de la Frecuencia Fundamental [Hz]	Nivel Segundo Armónico [Hz]	Nivel Tercer Armónico [Hz]	Nivel Cuarto Armónico [Hz]	Diferencia entre fundamental y segundo armónico [dB]	Diferencia entre fundamental y tercer armónico [dB]	Diferencia entre fundamental y cuarto armónico [dB]
10	76.2	63.1	60.5	56.3	13.1	15.7	19.9
11	76.2	61.9	60.9	54.7	14.3	15.3	21.5
12	77.6	62.3	62.7	54.7	15.3	14.8	22.9
14	79.5	62.3	65.4	53.7	17.3	14.1	25.9
16	81.2	62.1	67.6	52.4	19.1	13.6	28.8
18	82.6	62.1	69.1	50.7	20.5	13.4	31.8
20	83.8	62.0	70.5	49.4	21.8	13.3	34.4
22	84.6	61.6	71.3	47.4	23.1	13.4	37.2
25	86.1	61.6	72.8	45.3	24.5	13.3	40.8
28	87.1	61.3	73.7	42.4	25.8	13.4	44.7
30	87.6	60.9	73.9	41.5	26.7	13.7	46.1

0							
3							
5	88.5	59.9	74.0	38.5	28.6	14.5	50.0
4							
0	88.9	58.3	73.8	38.7	30.6	15.1	50.3
4							
5	91.0	59.1	75.5	38.8	31.8	15.5	52.2
5							
0	91.3	58.1	74.9	37.8	33.2	16.4	53.5
5							
5	90.8	56.6	73.5	39.6	34.2	17.4	51.3
6							
3	93.7	59.2	75.2	43.2	34.5	18.5	50.5
7							
0	94.5	60.4	73.9	44.0	34.1	20.6	50.4
8							
0	95.5	62.6	72.6	48.8	33.0	22.9	46.7
9							
0	96.3	64.6	74.5	52.4	31.7	21.8	43.9
1							
0							
0	96.8	66.1	78.3	54.8	30.7	18.5	41.9
1							
1							
2	97.4	67.8	81.8	56.4	29.6	15.6	41.0
1							
2							
5	98.5	70.3	85.7	59.0	28.2	12.9	39.5
1							
1	99.5	72.4	88.2	59.8	27.1	11.3	39.7

4 0							
1 6 0	100.9	73.7	90.3	61.4	27.3	10.6	39.5
1 8 0	102.4	75.1	91.2	61.4	27.3	11.2	41.0
2 0 0	103.8	75.7	91.7	62.3	28.1	12.1	41.5

PROMEDIO	26.4	15.1	40.3
----------	------	------	------

Anexo 13. Distorsión armónica del audífono derecho DT 1350 modificado.

	Nivel de la Frecuencia Fundamental [Hz]	Nivel Segundo Armónico [Hz]	Nivel Tercer Armónico [Hz]	Nivel Cuarto Armónico [Hz]	Diferencia entre fundamental y segundo armónico [dB]	Diferencia entre fundamental y tercer armónico [dB]	Diferencia entre fundamental y cuarto armónico [dB]
10	110.1	80.3	72.6	59.0	29.8	37.5	51.1
11	110.9	79.0	72.6	59.5	31.9	38.3	51.4
12	111.4	79.4	70.9	56.6	32.0	40.5	54.8
13	112.0	79.1	72.5	55.6	32.9	39.5	56.4
14	112.5	77.0	72.7	60.7	35.5	39.8	51.8
15	112.9	78.4	70.3	52.7	34.5	42.6	60.2
16	113.3	78.2	72.0	52.0	35.1	41.3	61.3
17	113.5	77.6	72.4	55.8	35.9	41.1	57.7
18	113.8	75.9	72.0	60.4	37.9	41.8	53.4
19	114.0	76.9	70.4	49.5	37.1	43.6	64.5
20	114.2	76.4	71.9	46.4	37.8	42.3	67.8
22	114.5	74.4	71.8	56.2	40.1	42.7	58.3
25	114.9	74.0	71.6	43.7	40.9	43.3	71.2
28	114.9	74.6	72.2	44.3	40.3	42.7	70.6
30	115.8	74.3	76.0	62.5	41.5	39.8	53.3
35	116.3	73.3	75.2	49.9	43.0	41.1	66.4
40	116.4	73.6	77.2	45.0	42.8	39.2	71.4
45	116.4	73.5	76.4	68.8	42.9	40.0	47.6

50	116.0	73.3	70.9	54.8	42.7	45.1	61.2
55	115.9	72.7	68.0	32.5	43.3	48.0	83.4
63	115.0	70.9	66.1	36.6	44.1	48.9	78.5
70	114.2	69.1	66.8	31.6	45.1	47.4	82.6
80	113.0	66.8	67.4	28.6	46.2	45.6	84.4
90	111.8	64.7	65.7	29.6	47.1	46.1	82.2
10							
0	110.7	62.5	63.0	29.4	48.2	47.7	81.3
11							
2	109.4	60.2	60.0	29.3	49.3	49.4	80.1
12							
5	107.9	58.0	57.8	25.3	49.9	50.1	82.6
13							
0	107.3	57.4	57.6	27.6	50.0	49.7	79.7
14							
0	105.9	55.8	58.6	27.2	50.1	47.3	78.7
15							
0	104.5	54.2	60.3	26.3	50.3	44.2	78.2
16							
0	103.0	52.0	60.8	26.1	51.0	42.2	76.9
17							
0	101.9	49.9	59.7	25.1	52.0	42.2	76.8
18							
0	101.1	47.6	57.6	25.6	53.5	43.5	75.5
19							
0	101.1	45.2	56.0	22.7	55.9	45.1	78.4
20							
0	101.4	44.2	54.5	22.6	57.2	46.9	78.8

PROMEDIO	43.1	43.6	68.8
----------	------	------	------

Anexo 14. Nivel de ruido de fondo en el laboratorio LA1.

RUIDO DE FONDO LA1				
Frecuencia [Hz]	Med1 [dB]	Med2 [dB]	Med3 [dB]	Promedio [dB]
10	49.8	41.5	47.4	47.8
12.5	46.4	48.9	50.9	52.3
16	49.3	51	60.3	54.5
20	51.7	48.6	53.8	52.9
25	43.2	44.3	45.6	47.8
31.5	35.3	43.7	39.1	46.8
40	35.2	36.3	45.1	39.8
50	33.3	28.6	42.6	33.3
63	28.7	34.1	43.3	37.3
80	39.4	32.6	38.8	38.2
100	36.2	29	29.8	34.7
125	34.7	29.6	28.5	34.5
160	26.9	25.8	24.9	29.7
200	27.4	23.9	21.6	28.3
250	22.1	21.8	21.3	25.5
315	18	16.2	17.2	20.2
400	14.2	17	17	20.4
500	13.5	23.8	17.1	26.9
630	14.7	14.2	19	18.0
800	13.1	11.4	18.4	15.4

Anexo 15. Ficha técnica del sistema ER-10C.

