



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN PSICOACÚSTICA DEL EFECTO DE PRECEDENCIA DE UNA SEÑAL ACÚSTICA  
CON DISTINTOS NIVELES DE REVERBERACIÓN, MEDIANTE AURALIZACIÓN  
Y ESTÍMULOS FUSIONADOS.

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

Profesor Guía  
MSc. Jorge Páez Rodríguez

Autor  
Jonathan Alexander De la Torre Ojeda

Año  
2016

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

—Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, 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.

---

MSc. Jorge Páez Rodríguez  
Máster en Gestión y Evaluación de Contaminación Acústica  
C.I. 4452061600

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

—Declaro que este trabajo es original, de mi 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.

---

Jonathan Alexander De la Torre Ojeda  
C.I.171719653-7

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos quienes de manera directa o indirecta colaboraron para que mi formación académica superior llegase hasta este punto, a mis padres y amigos por ser un soporte para el desarrollo intelectual y humano que confieren todas las enseñanzas académicas adquiridas.

A mi familia por su modo de ser tan incondicional en todos los aspectos.

A los compañeros y colegas de la carrera con quienes compartí momentos inolvidables que perdurarán a través del tiempo.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a todas las personas que tengan la visión y perseverancia para perseguir sus sueños a pesar de todos los obstáculos que puedan aparecer en el camino.

A todos mis allegados que con gran ímpetu y sacrificio me han apoyado a lo largo de mi vida a alcanzar mis logros.

## RESUMEN

En el trabajo de titulación presente, se realiza la investigación del efecto psicoacústico por el cual los seres humanos son capaces de localizar un sonido dentro del azimut o eje horizontal respecto a la cabeza, de modo que la percepción y ubicación de una fuente sonora desemboca dentro de términos psicofísicos que serán evaluados y comparados en diferentes ambientes reverberantes.

Para implementar el procedimiento, se realizó una convolución estereofónica o auralización de tres salas con distintos parámetros reverberantes con estímulos acústicos de diferente naturaleza armónica. Siendo estos presentados, junto a los estímulos sin reverberación alguna, a un grupo de seres humanos con capacidades auditivas normales, en el cual se realizó una integración psicoacústica de percepción y localización sonora mediante la marcación del azimut o proveniencia del sonido reproducido mediante audífonos.

Los resultados entregan principalmente respuestas erráticas en las salas con reverberación y altos niveles de confusión dentro del campo de la localización del azimut, especialmente en tonos puros y angulaciones exageradas del eje horizontal.

## ABSTRACT

In the present final project, research psychoacoustic effect is performed by which humans are able to locate a sound within the azimuth or horizontal axis relative to the head, so that perception and location of a sound source opens into psychophysical terms that will be evaluated and compared in different reverberant environments.

To implement the method, a stereophonic convolution or auralization of three rooms with different acoustic reverberant parameters, stimuli of different harmonic nature was made. These being presented with stimuli without any reverberation to a group of humans with normal hearing abilities in which a psychoacoustics integration of perception and sound localization is performed by dialing the azimuth or source of sound played through headphones.

The results mainly delivered erratic responses in rooms with high levels of reverb and confusion within the field of azimuth location, especially in pure tones and exaggerated angles in the horizontal axis.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2 Alcance .....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivo general .....	4
1.5 Objetivos específicos .....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Percepción sonora y efecto de precedencia.....	6
2.2. Criterios psicoacústicos para la localización de sonidos. ....	7
2.2.1. ITD y ILD .....	8
2.3. Preceptos de la localización de una fuente sonora.....	9
2.3.1. Fusión .....	10
2.3.2. Dominancia de localización.....	10
2.3.3. Discriminación supresiva .....	10
2.4. Reverberación.....	11
2.4.1. Definición de reverberación .....	11
2.4.2. Cuantificación de la reverberación.....	13
2.4.3. Inteligibilidad .....	14
2.4.4. Medición de reverberación.....	14
2.4.4.1. Condiciones de la medición.....	15
2.4.5. Radio crítico .....	16



2.5. Procesamiento digital de señales .....	19
2.5.1. Señales continuas y discretas.....	19
2.5.1.1. Sistemas.....	20
2.5.2. Transformada de Fourier .....	22
2.5.2.1. Transformada Discreta de Fourier (DFT). ....	25
2.5.2.2. Transformada Rápida de Fourier (FFT). ....	25
2.5.3. Convolución y auralización .....	26
2.5.3.1. Convolución discreta y convolución en el dominio de la frecuencia. ....	27
2.6. Grabación Binaural .....	27
<b>3. MÉTODO Y DESARROLLO.....</b>	<b>30</b>
3.1 Equipamiento .....	30
3.2. Enumeración y análisis de parámetros acústicos de recintos arquitectónicos participantes.....	31
3.2.1. Control Room.....	31
3.2.2. Sala de conferencias.....	33
3.2.3. Teatro.....	35
3.3. Grabación de impulsos dentro de las salas. ....	37
3.4. Procedimiento para auralización.....	42
3.4.1. Convolución estereofónica.....	43
3.4.1.1. Entrada.....	43
3.4.1.2. Procesamiento.....	44
3.4.1.3. Salida.....	45
3.4.2. Cantidad de señales procesadas digitalmente. ....	46

3.5. Prueba con individuos reales .....	46
3.5.1. Audiometrías .....	46
3.6. Pruebas psicoacústicas .....	47
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	50
5. ANALISIS ECONÓMICO .....	68
6. PROYECCIONES .....	70
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	71
REFERENCIAS .....	74
ANEXOS .....	78

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

A través de la historia del ser humano, el interés de la investigación de temas científicos relacionados con los efectos y fenómenos acústicos ha sido de relevancia; la precedencia denota la identificación de la proveniencia de una fuente sonora, es decir que psicoacústicamente el humano es capaz de identificar y localizar sonidos en el azimut o eje horizontal en cualquier ambiente cotidiano (Brown, 2014). De hecho, desde décadas atrás se conoce que el humano convencional fue capaz de identificar fácilmente una fuente sonora en ambientes cotidianos en respuesta a las señales espaciales acústicas realizadas por la llegada del primer sonido (Wallach, 1949). Fenómenos muy similares tales como la '*Ley de la primer frente de onda*' (Cremer, 1977) o '*Efecto Haas*' (Haas, 1949).

Hasta el momento la propuesta realizada por Wallach en 1949, refiere la cuantificación de la precedencia mediante diferencias de tiempo y nivel interaural. Dado que se tiene conocimiento de que la separación espacial que tienen los aparatos de audición del humano definirá un tiempo de retardo entre cualquier señal acústica (Macpherson & Middlebrooks, 2002). sin embargo, en espacios arquitectónicos con diferente gradiente de reverberación, las reflexiones acústicas interfieren con el sonido directo que llega a los oídos de cualquier individuo. Por lo que existirá distorsión de la espacialidad en la localización de la fuente sonora y conforme se eleva la reverberación también la calidad de localización de una fuente sonora (Giguere & Abel, 1993) (Rakerd & Hartmann, 2005).

La percepción acústica de un solo sonido o de varios sonidos puede ser descrita por los preceptos detallados por Wallach en 1949 y Freyman en 1991. Siendo estos el de fusión; el cual consta de la identificación de dos señales como una señal. El método de dominancia de localización, que hace referencia

a localizar la señal acústica fusionada en o cerca de la ubicación desencadenada por la primera de las señales y por último la discriminación supresiva que denota a la pérdida de sensibilidad de las características de la segunda señal, especialmente en su ubicación (Litovsky & Colburn, 1999).

Los indicios de niveles interaurales de tiempo que denotan la precedencia de una fuente sonora serán efectivos solamente por debajo de 1.6 kHz, mientras que para el resto de frecuencias mayores a la dicha anteriormente lo que afecta la percepción sonora es la diferencia temporal que se tiene en el ataque de las envolventes, cuyos valores se puede representar en función del ancho de banda de las señales (Cetta, 2003). En cuanto a la diferencia interaural de presión sonora se tendrá un comportamiento irreconocible en la localización de bajas frecuencias, esto es debido a la difracción de ondas acústicas, que se produce cuando la longitud de onda es mayor al diámetro de la cabeza y esto afectará las señales con frecuencias inferiores a 1800 Hz (Wightman, 1992).

Hoy en día la relevancia de los estudios han llegado a análisis médicos, binaurales, espectrales, con una variedad de estímulos, entre otros, con el fin de conocer más acerca de la fisonomía natural del cuerpo humano tanto en su degradación por edad, como por reacciones de individuos con afectación auditiva (Roberts & Lister, 2004).

## **1.2 Alcance**

La investigación propuesta procura alcanzar el desarrollo de un estudio de localización de una fuente acústica. Se realizarán pruebas interaurales de tiempo y nivel mediante auralización de espacios arquitectónicos. Para que de ese modo se pueda comparar el comportamiento de individuos con audición normal en salas con diferentes gradientes de tiempos de reverberación, siendo estas en salas secas y con niveles elevados de reverberación.

Este estudio psicoacústico plantea la aplicación de procesamiento digital de señales, dado que se tendrá que realizar la combinación del estímulo junto con

el tiempo de reverberación de tres salas reales, en donde se pueda modificar las propiedades sonoras de las ondas.

Otra de las áreas involucradas es la práctica de ensayos de mediciones acústicas tal como la medición UNE-EN ISO 3382: Acústica. Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos. (ISO 3382:2008). Acústica arquitectónica y análisis de espacios sonoros para el cálculo referencial de tiempo de reverberación para de este modo lograr realizar la convolución de señales y análisis correspondientes.

Los estudios llegarán a abarcar las convoluciones binaurales o auralización de espacios arquitectónicos reales, sin embargo para investigaciones futuras se podrían plantear formas más acercadas a la realidad de llevar a cabo la experimentación, con el fin de obtener datos más aproximados dentro del entorno acústico y sonoro.

Es necesario conocer más acerca de los efectos de precedencia o localización de sonidos en espacios arquitectónicos dado que las aplicaciones pueden llegar a ser tecnológicas como científicas.

Con la finalidad de realizar los análisis y conclusiones se necesita el uso de quince sujetos de prueba, algunos de estos con entrenamiento auditivo. La prueba consta de preguntas sobre la proveniencia del sonido en donde el individuo pueda marcar el azimut de donde piensa que escuchó el estímulo. Al ser quince sujetos de prueba, es obligatorio que su audición proceda a ser analizada mediante una audiometría para asegurar que estos tienen una audición normal. Mediante el análisis de personas con entrenamiento auditivo y personas sin entrenamiento auditivo se puede marcar una tendencia en la investigación. Para esto es necesario realizar audiometrías para verificar el funcionamiento normal del mecanismo de la audición de los participantes.

### **1.3 Justificación**

Se espera que esta investigación ayude a ser el primer desarrollo de un subtema psicoacústico del cual se conoce poco dentro de Ecuador, siendo que sus aplicaciones podrían llegar a ser muy importantes. Así como el desarrollo

de nuevas tecnologías para video juegos, el entendimiento acerca de la psicofísica auditiva en seres humanos, implementación de una nueva variable dentro del diseño de teatros para una mejor acústica, entre otros.

La meta de este estudio es el implementar un modelo de análisis de modo objetivo para la localización de fuentes sonoras mediante el uso de tecnología moderna y técnicas de procesamiento digital de señales. Con esto se podrá tener una referencia que beneficiará a estudiantes de la Universidad De Las Américas sobre nuevas incursiones y líneas de investigación que podrían servir de interés.

Mediante la implementación de nuevas técnicas de análisis que nacen a partir de los planteamientos iniciales de Wallach en 1949, la investigación promete ser un paso que acerca hacia un mundo que no ha sido explorado por la sociedad ecuatoriana.

#### **1.4 Objetivo general**

Evaluar psicoacústicamente el efecto de precedencia de una señal acústica con diferentes niveles de reverberación, mediante auralización y estímulos fusionados.

#### **1.5 Objetivos específicos**

Recolectar datos de tiempo de reverberación sobre tres tipos diferentes de salas.

Grabar estímulos impulsivos con el fin de capturar el tiempo de reverberación de los recintos arquitectónicos para posteriormente procesarlos digitalmente.

Auralizar señales acústicas grabadas mediante la elaboración de un código en la plataforma MatLab, con la finalidad de obtener los impulsos estereofónicos para la investigación con sujetos de prueba mediante diferentes estímulos.

Construir una base de datos con todos los estímulos fusionados, generando a parte de la auralización, señales generadas digitalmente.

Valorar la precedencia de una fuente sonora mediante experimentación psicoacústica con sujetos de prueba con y sin entrenamiento auditivo.

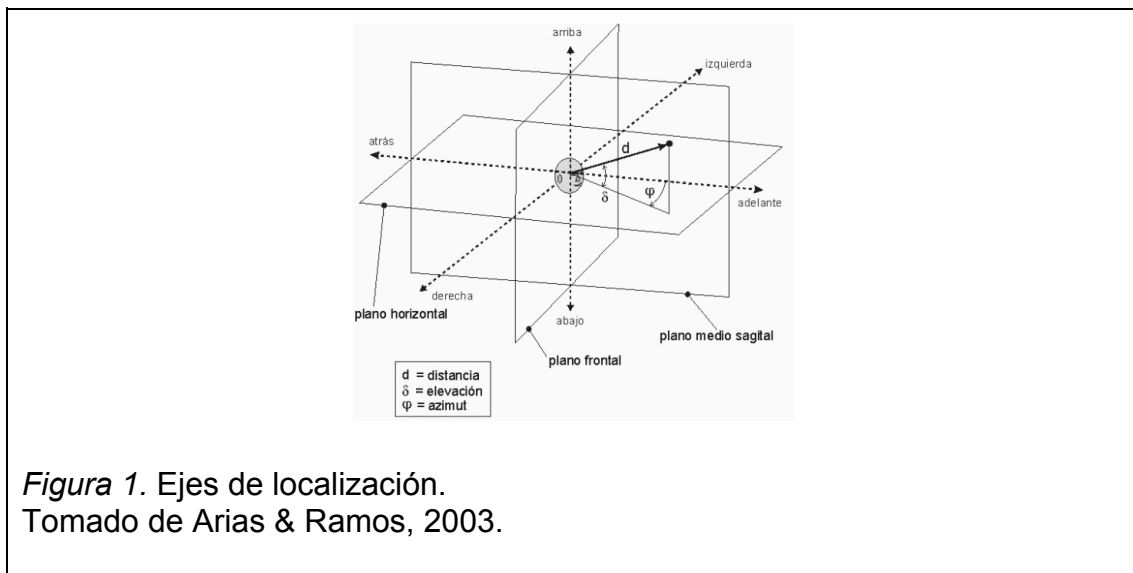
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Percepción sonora y efecto de precedencia.

En cuanto a la percepción sonora, el considerar lo significativo que llega a ser, tanto para animales como humanos, el identificar si un sonido proviene de arriba, abajo, izquierda, derecha, cerca o lejos es trascendental dentro de la ciencia y desarrollo tecnológico además de la vida diaria. Según Boothroyd (1997) la percepción auditiva es definida en términos de objetos y eventos que producen sonidos siendo esta en relación a la fuente sonora.

A razón del desarrollo tecnológico y científico, la habilidad que tanto animales como humanos poseen para localizar con exactitud un sonido es de importancia capital (Clarkson & Clifton, 1991).

En lo que se refiere a localización de fuentes sonoras, se reconoce que existen tres ejes por los cuales el mecanismo auditivo es capaz de identificar en el espacio un sonido, siendo estos la distancia, la elevación y el azimut. (Arias, 2003).



La investigación ha desarrollado múltiples teorías acerca de la evolución auditiva que recaban dentro de la localización sonora en los tres ejes. En el caso del azimut, la investigación realizada por Wallach en 1949, denomina al



fenómeno psicoacústico de reconocer una fuente sonora en el eje horizontal como '*efecto de precedencia*'.

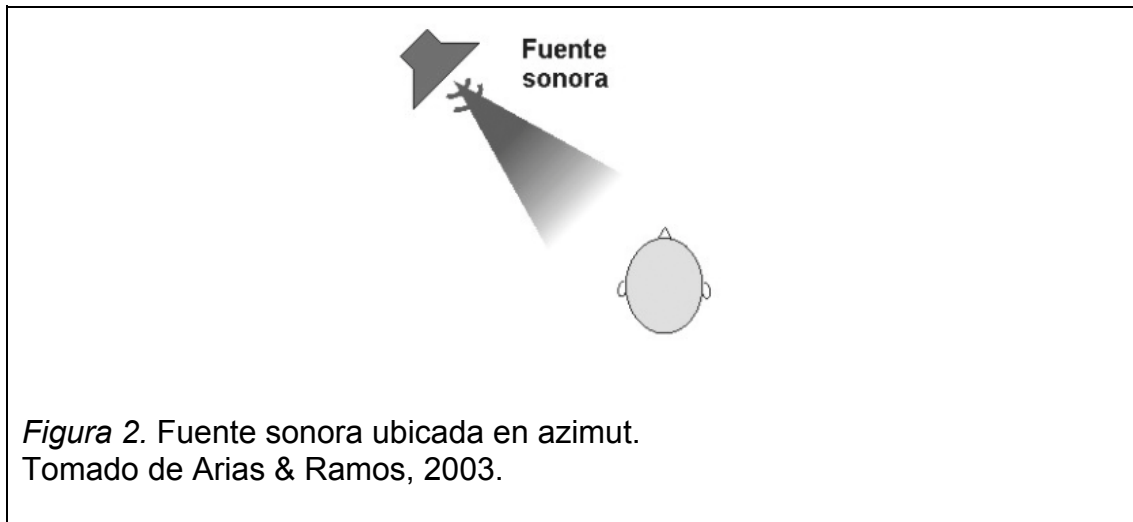
Según Moore (1995) el hombre es un excelente localizador en el plano horizontal, mucho más que en los otros ejes; los de elevación y la distancia. La razón por la que esto es posible recaba dentro de la diferencia de tiempo interaural (ITD) y la diferencia de nivel interaural (ILD).

## **2.2. Criterios psicoacústicos para la localización de sonidos.**

En 1949 Wallach demostró el efecto de precedencia mediante un paradigma que se ha empleado en diversas investigaciones. A través de la creación virtual de una fuente sonora mediante dos señales '*lead - lag*' las cuales poseen diferente tiempo de inicio de reproducción y diferente nivel energético en amplitud. Al tener los impulsos desasociados, el escucha es capaz de identificar si es un evento o dos, dependiendo de estos dos criterios: el ITD (Interaural Time Difference) y el ILD (Interaural Level Difference).

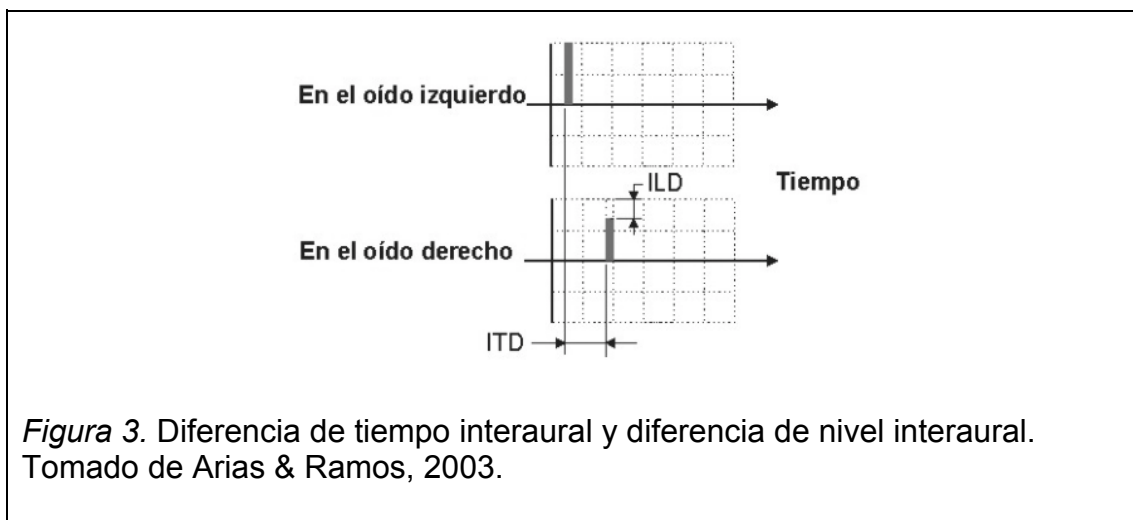
La diferencia espacial entre las orejas (la cual es de aproximadamente 17 centímetros), creará la variación de nivel y de tiempo en el cual un sonido llega a un oído y a otro en correlación a la dependencia de ubicación de cualquier fuente sonora (Brown, 2014).

Si bien existen otros factores físicos como la forma del pabellón de la oreja, forma de cráneo, torso y hombros, el factor más trascendente para el entendimiento del efecto de precedencia es la separación de los oídos y es la base para el entendimiento del fenómeno psicoacústico llamado '*efecto de precedencia*'. (Blauert, 1997)



### 2.2.1. ITD y ILD

La determinación de la posición percibida y la información espectral de cualquier fuente sonora en el azimut es definida por la diferencia de tiempo interaural (ITD), la cual hace referencia a la variación temporal en la que una señal llega a un oído y al otro. La diferencia de nivel interaural (ILD), que se refiere a la variación de nivel en amplitud sonora que tienen las señales al llegar al mecanismo de la audición. También existen otros factores tales como la experiencia, el aprendizaje, influencias visuales, entre otros; que también serán de ayuda en el proceso de la identificación o localización espacial de sonidos dentro del eje horizontal (Blauert, 1997; Grantham, 1995).

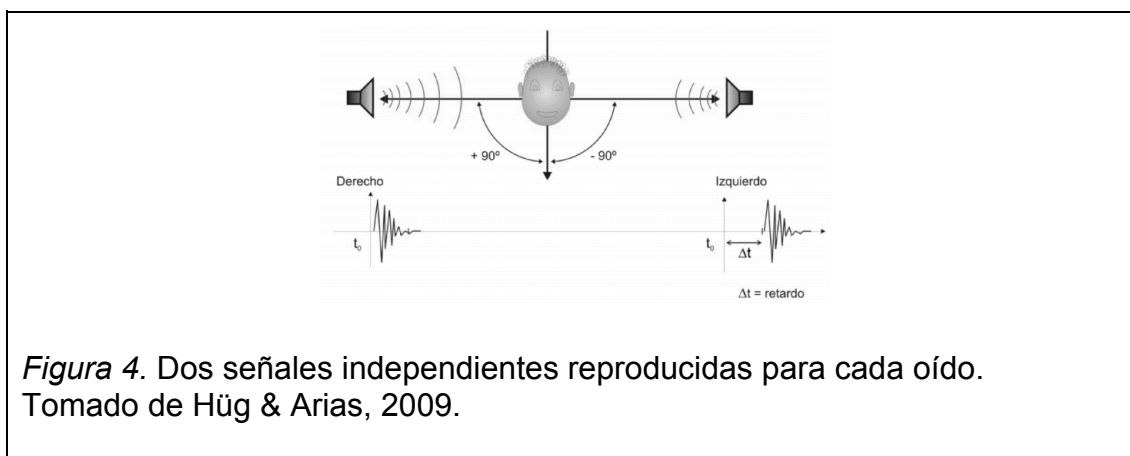


En la *Figura 3* se retrata el fenómeno en gráficos de amplitud versus tiempo y como esto es relevante para la localización de fuentes sonoras en el espacio. Según la investigación realizada en 2003 por Arias y Ramos los estudios experimentales que han sido realizados acerca de este tema se remontan a dos tipos:

1. Campo libre: En donde el estímulo atraviesa un conjunto de altavoces normalizados, es decir que las diferencias espectrales han sido corregidas, dispuestos en un arreglo espacial determinado para la reproducción de sonidos.
2. Binaural: El uso de auriculares como condición y presentación de estímulos en donde los parámetros del mismo pueden ser modificados fácilmente.

### 2.3. Preceptos de la localización de una fuente sonora

El ser humano acostumbra a estar la mayor cantidad de tiempo en salas con algún tipo de reverberación natural, en donde la percepción varía no solamente en la localización sino también en la sonoridad, espacialidad y altura tonal (Hüg & Arias, 2009). El efecto de precedencia se da cuando se tienen dos señales la '*Lead*' (líder en español) y '*Lag*' (Sonido retardado), la identificación de la señal más fuerte llegará a ser el principal indicio psicofísico de localización. Al poner en juego estos factores las pruebas de precedencia realizadas por Wallach en 1949 indican tres preceptos al usar señales Lead – Lag. Siendo estos fusión, dominancia de localización y discriminación supresiva.



*Figura 4.* Dos señales independientes reproducidas para cada oído. Tomado de Hüg & Arias, 2009.

En la *Figura 4* se puede denotar cómo se realiza la simulación virtual de una fuente sonora mediante dos señales iguales con diferente tiempo o retardo y amplitud.

### **2.3.1. Fusión**

Se refiere a la unificación de los sonidos '*Lead - lag*' mediante el método de primer frente de onda. Es decir que el tiempo en el que estos sonidos están separados sea tan corto que no se identifique por el escucha como sonidos independientes sino como solo un sonido coherente. (Wallach, 1949)

Una vez traspasado el tiempo en el cual se identifica cómo un solo sonido este pasa a denominarse '*umbral del eco*' (Hug & Arias 2009). Para adultos el tiempo para llegar a estar ubicado allí varía entre 35 ms para estímulos verbales y de 5 a 10 milisegundos para estímulos impulsivos. (Freyman, Clifton & Litovsky, 1991).

### **2.3.2. Dominancia de localización**

Es el procesamiento que tiene la información direccional, es decir en dónde se va a ubicar la imagen sonora y como el sonido líder domina en este aspecto de la percepción. Esta definición recaba netamente el localizar la señal fusionada mediante la reproducción de '*lead*'. (Arias & Ramos, 2003).

### **2.3.3. Discriminación supresiva**

Este precepto está correlacionado con la habilidad que el escucha posee para procesar información adicional dentro del sonido retardado. Es decir, que del sonido '*lag*' se adquiere más detalles acerca de la fuente sonora. En estudios realizados por Sabieri y Perrott en 1990 se concluye que es totalmente posible mediante el aprendizaje y entrenamiento el desactivar el mecanismo de supresión y extraer la información que puede ser proporcionada en los ecos de la señal, tales como la intensidad y el contenido espectral.

En un ambiente reverberante se tendrá un solo evento con múltiples retardos, sin embargo estas reflexiones influyen por sobre la sonoridad, la espacialidad y la altura tonal. (Hüg & Arias, 2009).

## **2.4. Reverberación**

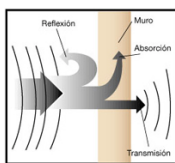
El tema de la reverberación con el pasar de los años ha sido más comprendido por la humanidad, a tal punto que hoy en el campo de la acústica existen varios métodos para medir o cuantificar su espectro frecuencial como la norma UNE en ISO 3382. Es de relevancia el conocer cuál es el rol que este juega dentro de los fenómenos acústicos que día a día interactúan con el mecanismo de la audición.

Siendo la reverberación un proceso físico y natural dentro de un espacio arquitectónico, este es trascendente para la percepción sonora dentro del azimut. Dado que tendrá reflexiones que están ubicadas algunas antes del umbral de eco y otras después. Esto afectaría la localización sonora o bien podría facilitarla.

En cuanto a las variables que definirán el tiempo en el que las reflexiones llegarán al oído y con qué intensidad o volumen, se identifican a los materiales y la superficie expuesta de los mismos que obstaculizan el paso de la onda. Siendo esta afirmación verdadera, el proceso radica a que incluso los cuerpos de los seres humanos presentes en la sala afectan en la reverberación de un recinto arquitectónico.

### **2.4.1. Definición de reverberación**

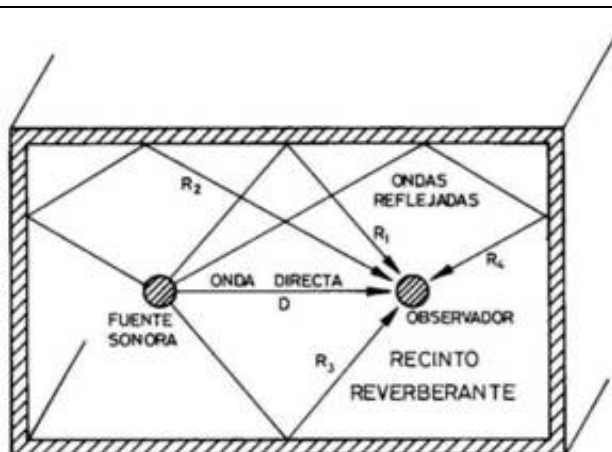
Una fuente sonora al vibrar y emitir ondas acústicas que se propagan por el aire a una velocidad determinada; al encontrar un obstáculo, una parte de la energía sónica será absorbida, otra parte será transmitida o traspasada mecánicamente por el obstáculo, y otra de las partes será reflejada. (Boschi, 2008).



*Figura 5.* Absorción, transmisión y reflexión de ondas.

Tomado el Sábado 18 de Junio de 2016 de <http://goo.gl/L041Uw>.

Las reflexiones que son determinadas por la naturaleza del material, rebotarán en las paredes, techo, piso, y todo tipo de superficie y material que se encuentre dentro de la sala. De manera que el nivel sonoro aumentará en relación a la onda original, siendo las ondas generadas por la reverberación señales superpuestas erráticamente en el tiempo.



*Figura 6.* Reflexiones en recinto reverberante.

Tomado de Acusticad, s.f.

En cuanto al momento en el que llega cada onda, es de relevancia recalcar que la primera onda que el oyente percibe es el sonido directo, siendo este el camino más corto entre la fuente sonora y el escucha. A partir de allí habrá un cúmulo de reflexiones que arribarán consecutivamente.

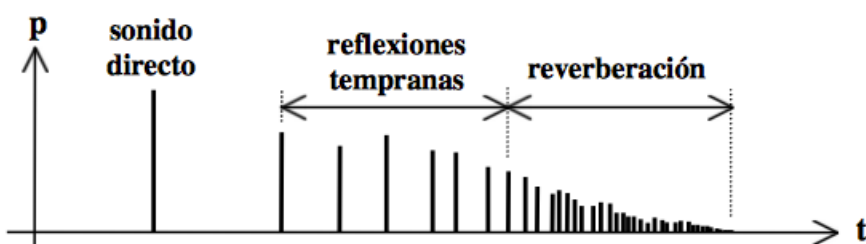


Figura 7. Amplitud versus tiempo.  
Tomado de Miyara, 2003, p.28.

El tiempo mínimo de retardo es lo que dictará si la señal 'lag' entra dentro del umbral de eco o es considerada como refuerzo al sonido directo.

#### 2.4.2. Cuantificación de la reverberación

Es muy complicado el enumerar y asignar un valor en amplitud a cada una de las reflexiones en una sala reverberante. Por lo que se ha normalizado la cuantificación de la reverberación para poder describir la cantidad de energía sonora que puede existir en una cámara reverberante y cuanto tiempo esta se demora en atenuarse total o parcialmente.

Por lo que ha sido definido el parámetro acústico TR60, según Boschi (2009), es el tiempo necesario para que el nivel de una señal acústica, cuya emisión se interrumpe, caiga 60 dB con respecto al nivel primitivo.

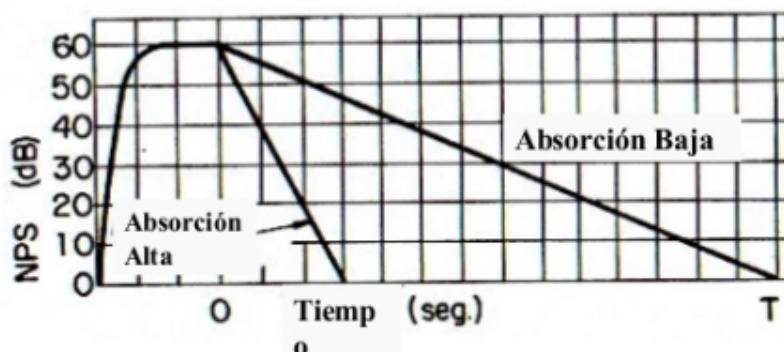


Figura 8. Ejemplo de TR60 en gráfica de nivel de presión sonora versus tiempo.  
Tomado de Gerges, 2000, p. 264.

La fórmula de Sabine proporciona un método mediante una relación matemática para cuantificar el tiempo en el que las reflexiones de un recinto arquitectónico decaen 60 decibelios, si bien existen otras relaciones matemáticas propuestas por otros científicos, tales como las fórmulas de Millington - Sette y Norris - Eyring, la fórmula de Sabine es la comúnmente utilizada por los ingenieros acústicos.

La ecuación de Sabine, en condiciones normales de temperatura es suscrita de la siguiente forma:

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{tot} + 4mV} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$V = \text{Volumen del recinto (en } m^3)$

$A_{tot} = \text{Absorción total del recinto en sabines.}$

$m = \text{Constante de atenuación del sonido en el aire (en } m^{-1})$

### 2.4.3. Inteligibilidad

En cuanto a la inteligibilidad de la palabra, las reflexiones o reverberación de salas con alto índice de TR60 ocasionan una pérdida del entendimiento de las ondas sonoras. Existen algunos criterios ligados a la cuantificación de la inteligibilidad tales como el %AICons, STI, RASTI, entre otros. (Isbert, 1998) Sin embargo no se han encontrado estudios que conecten directamente esto con la localización de fuentes sonoras.

### 2.4.4. Medición de reverberación

Para medir el tiempo de reverberación que se tiene en una sala, se ha normalizado el proceso para obtener los datos mediante normativas internacionales. La denominada Norma UNE en ISO 3382 dicta cómo deberá ser realizada una correcta medición dentro de cualquier sala regular o sala dedicada a espectáculos.



#### **2.4.4.1. Condiciones de la medición**

Las condiciones dictaminadas a modo de sumario de la Norma ISO 3382-2 (2008) son las siguientes:

- Tener un máximo de dos personas presentes en la sala durante la recolección de datos.
- La fuente debe ser lo más omnidireccional posible y cumplir las normativas de omnidireccionalidad dictaminadas en la norma ISO 3382-1.
- Los micrófonos utilizados deben ser omnidireccionales, la salida puede conectarse a un amplificador, un conjunto de filtros y un sistema en donde se evidencien las curvas de crecimiento o a un equipo de análisis de respuestas impulsivas. También es posible conectar a un registrador de datos para su análisis posterior.
- El micrófono deberá ser lo más pequeño posible en donde se tenga un diámetro máximo de 14mm y máximo de hasta 27mm. Los filtros de banda de octava deben cumplir la Norma IEC 61260.
- El equipo para evaluar los resultados del decrecimiento debe utilizar: a) promediado exponencial, con curva continua como salida, b) promediado exponencial, con puntos de muestreo discretos sucesivos, a partir del promedio continuo como salida, c) promediado lineal, con promedios lineales discretos sucesivos como salida.
- No debe existir sobresaturación en ninguna parte del proceso

En cuanto a las posiciones tanto de fuente como de micrófono la normativa explica mediante una tabla la cual se muestra a continuación:

Tabla 1. Números mínimos de posiciones y mediciones. Tomado de UNE en ISO 3382-1.

	<b>Control</b>	<b>Ingeniería<sup>a</sup></b>	<b>Precisión</b>
Combinaciones fuente-micrófono	2	6	12
Posiciones de la fuente <sup>b</sup>	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posiciones de micrófono <sup>c</sup>	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido)	1	2	3
<sup>a</sup> Cuando el resultado se utiliza para un término de corrección en otras mediciones del nivel de ingeniería, solo se requiere una posición de la fuente y tres posiciones de micrófono. <sup>b</sup> Para el método del ruido interrumpido, se pueden utilizar simultáneamente fuentes no correlativas. <sup>c</sup> Para el método del ruido interrumpido y cuando el resultado se utiliza para un término de corrección, se puede utilizar una percha de micrófono rotativo en lugar de múltiples posiciones de micrófono.			

*Nota:* Dentro de esta tabla se explica la cantidad de posiciones de micrófono que deberán existir dentro de la medición acústica a realizar.

Otra característica importante es la posición del micrófono en relación con la fuente sonora la cual es normalizada mediante la siguiente relación matemática:

$$d_{\text{mín.}} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$V$  = Es el volumen ( $m^3$ )

$c$  = Velocidad del sonido ( $\frac{m}{s}$ )

$T$  = Estimación de tiempo de reverberación

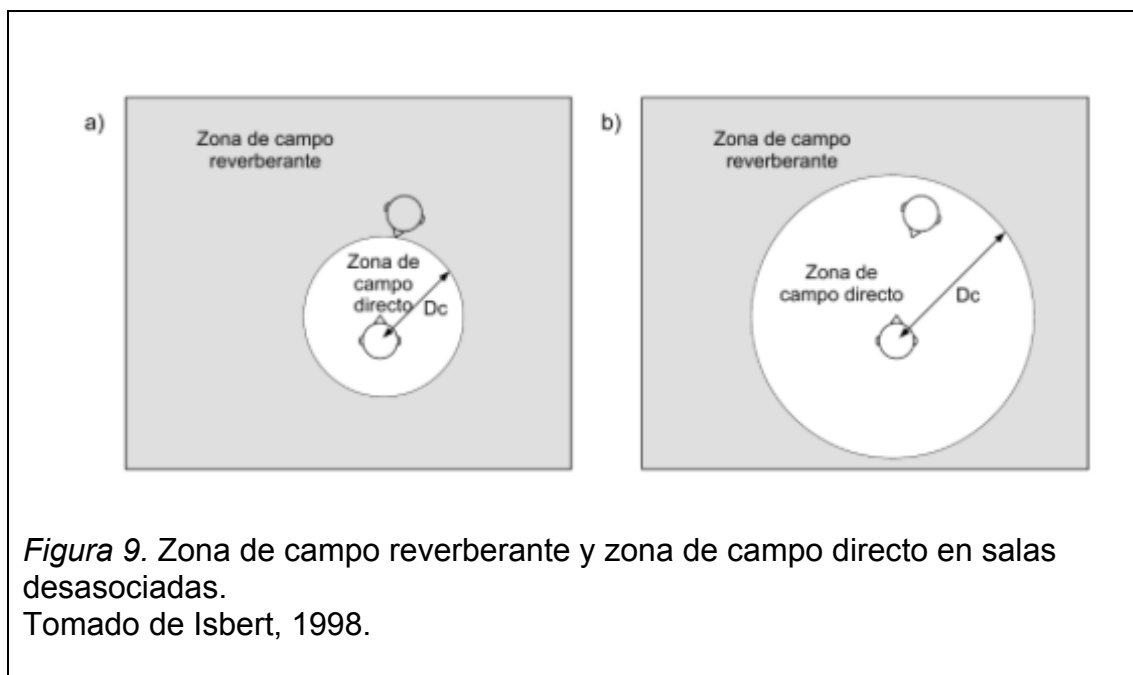
#### 2.4.5. Radio crítico

Según Isbert (1998) existen dos zonas dentro de un recinto arquitectónico, la zona de campo directo y la zona de campo reverberante. La primera siendo la zona en donde domina energéticamente la onda directa, y la segunda donde predomina el sonido reflejado. Al tener un alto índice de reverberación la comprensión de la palabra se ve afectada conforme la distancia entre el escucha y la fuente sonora aumenta. El radio crítico como tal es un criterio de

diseño en el cual es trascendental el impacto de la onda directa y marca una distancia que depende de las propiedades acústicas de los materiales del recinto.

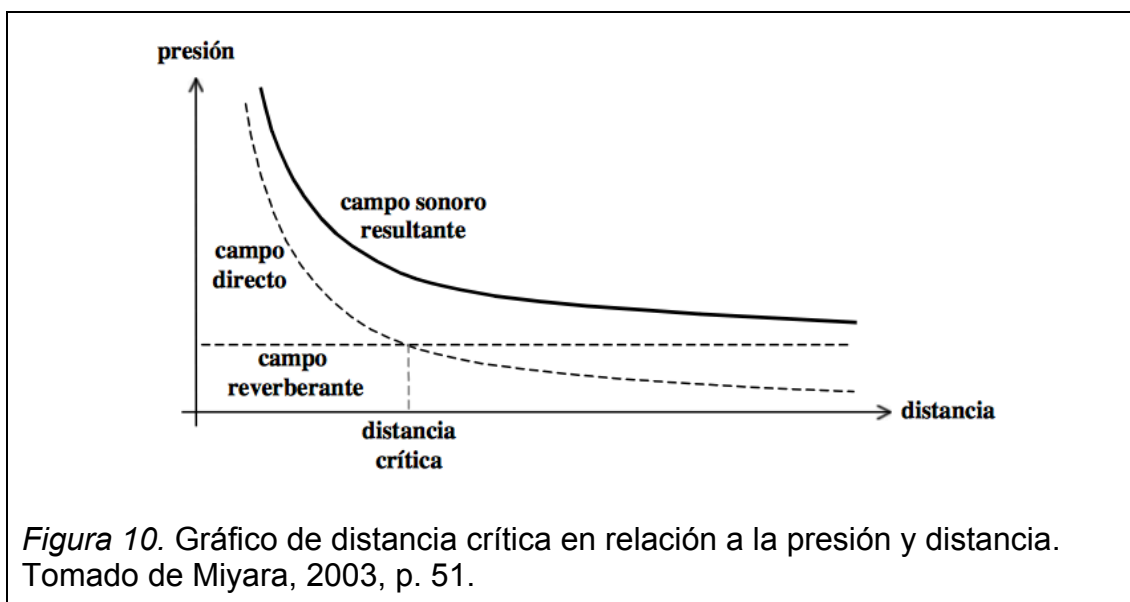
El radio crítico es un factor que dentro de la inteligibilidad abarca una distancia en la cual la energía del campo reverberante, que se refiere a las reflexiones de la onda sonora fundamental, tiene la misma energía que el campo directo. Es decir que una vez pasado el umbral de la distancia crítica se tendrá una predominancia de la energía de las reflexiones (Isbert, 1998).

En acústica arquitectónica y en diseño acústico de espacios dedicados al confort, es decir, que requieren tratamiento y acondicionamiento acústico, cuando se utilizan las salas para discursos y conferencias, se recomienda ubicar al radio crítico mas lejano que la distancia de interacción. Sin embargo, en el caso de sonidos musicales es recomendable tener mayor viveza en el recinto ubicando al radio crítico un poco mas cercano.



En relación a ambos campos se puede decir que el campo directo se atenuará de modo logarítmico conforme la distancia aumente, y en el caso del campo reverberado el valor es discreto y no se atenúa conforme la distancia, ya que

este se encuentra en función de las propiedades acústicas de materiales utilizados dentro de la sala.



En cuanto a la relación matemática de la cual se puede obtener este valor discreto, se parte desde las ecuaciones de propagación de ondas, siendo el resultado el siguiente:

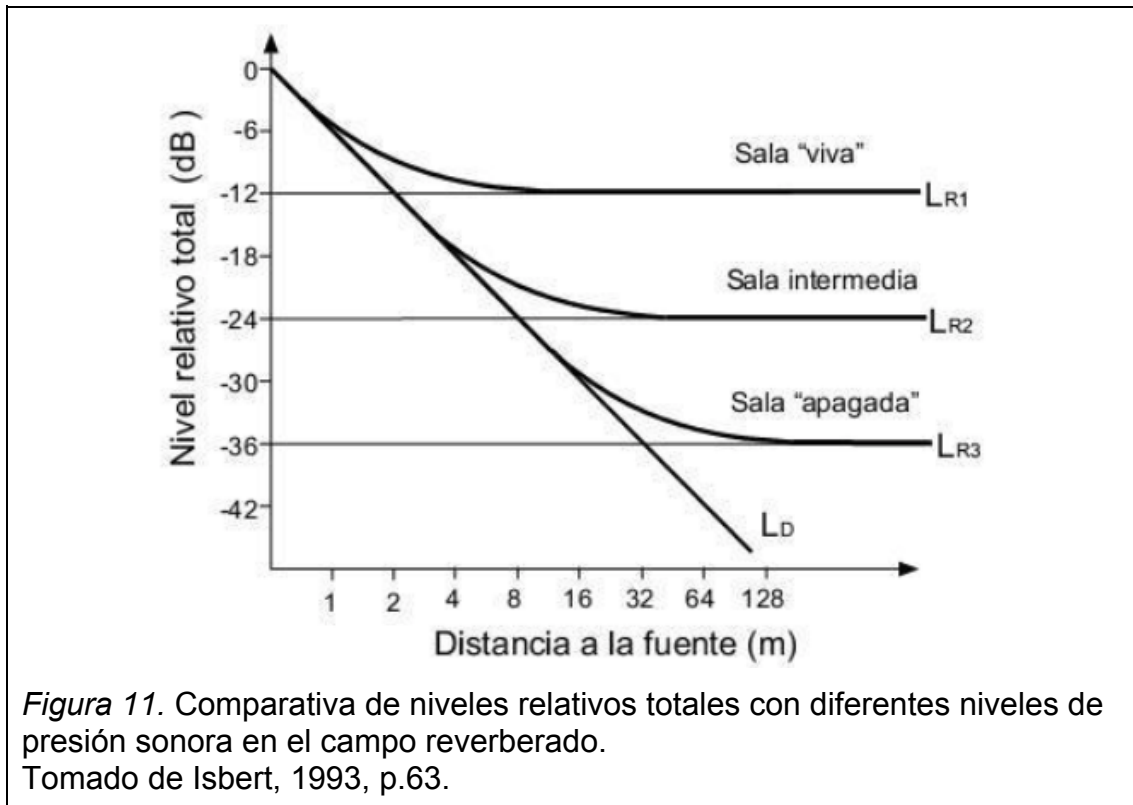
$$D_c = 0,14\sqrt{QR} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$Q$  = Factor de directividad

Las salas son más 'vivas' al tener más reverberación, esto quiere decir que el campo sonoro reverberante o las reflexiones ocasionadas a partir de los obstáculos que encuentra la onda directa, se combinan energéticamente y elevan los niveles de presión sonora del '*campo reverberante*'.

El tener una sala viva propiamente generará que el radio crítico sea menor, mientras que en una sala seca o con mayor influencia del campo sonoro directo se tendrá mayor distancia crítica respectivamente.



## 2.5. Procesamiento digital de señales

Es importante comprender dentro del trabajo con señales acústicas cómo estas son digitalizadas. De ese modo pueden ser modificadas o procesadas. Para esto primero se debe comprender la diferencia entre señales discretas y señales continuas.

### 2.5.1. Señales continuas y discretas

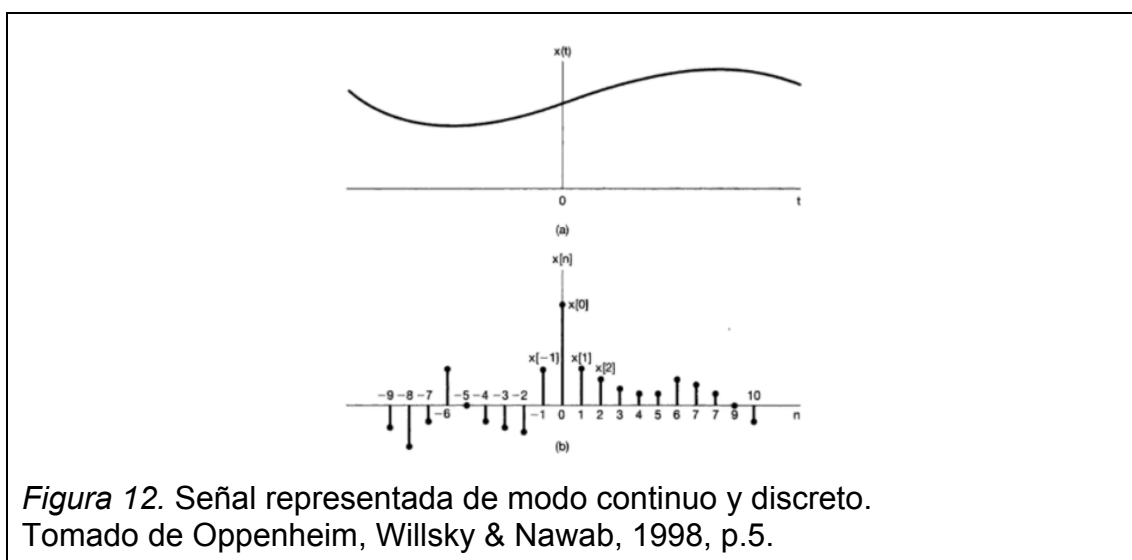
Las señales como tal pueden ser definidas como un concepto matemático el cual arraiga una o más variables independientes y las relaciona entre sí, una en función de la otra. En el caso de la ingeniería acústica las señales son analizadas de modo general como presión sonora, la cual está en función del tiempo.

Señal continua: La variable independiente es continua, por lo que estas señales se definen para una sucesión continua de valores de la variable independiente. (Oppenheim, Willsky & Nawab, 1998)

Señal discreta: Se definen en tiempos discretos y en consecuencia, para estas señales la variable independiente toma solamente un conjunto discreto de valores. (Oppenheim, Willsky & Nawab, 1998).

Las señales continuas podrían ser representadas de modo discreto asignando valores específicos ' $n$ ' para cada evento ' $t$ '. En el cual ' $n$ ' está en función de ' $t$ ' o en otra simbología:  $x[n]$ .

Para realizar la discretización de una señal continua se necesita realizar un muestreo para el cual los procesadores digitales contemporáneos tienen la capacidad de realizar la acción inclusive en tiempo real para audio profesional.



La diferencia matemática en la señal continua y discreta es que en la continua son integrales y en la señal continua sumatorias.

$$P \cong \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |X(t)|^2 dt$$

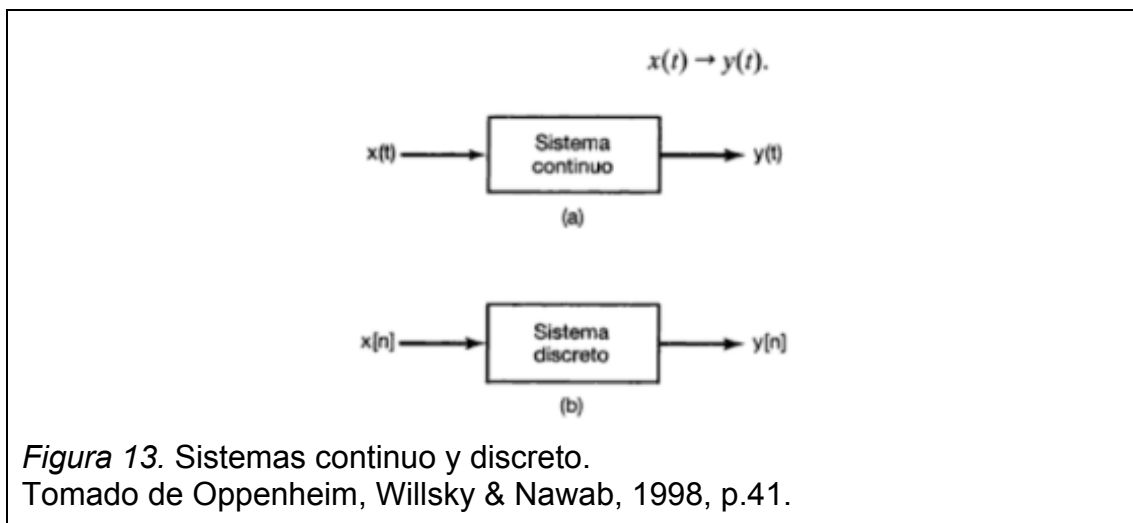
$$P \cong \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^{+N} |X(n)|^2 \quad (\text{Ecuación 4})$$

### 2.5.1.1. Sistemas

Los sistemas son capaces de transformar la señal original de entrada mediante componentes o dispositivos con la finalidad de modificar alguna o varias de las propiedades de onda y entregar en la salida una señal diferente a la original.

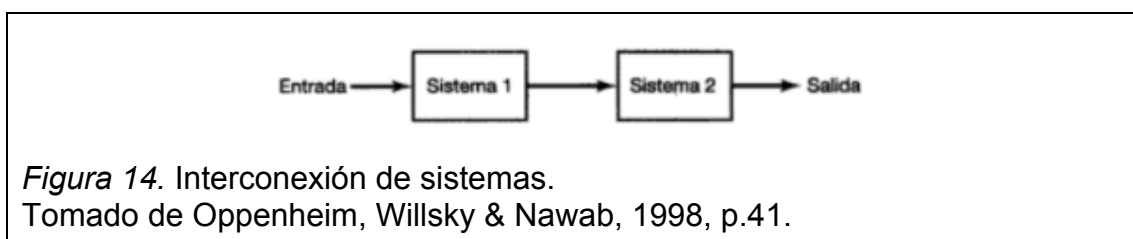
Esto es de suma importancia dado que el procesamiento de señales digitales se basa en los sistemas para modificar el audio u onda. En base a esta afirmación se tiene sistemas para señales discretas y sistemas para señales continuas.

En el sistema continuo las señales de entrada continuas tendrán una salida continua, del mismo modo la señal discreta tendrá en su salida una señal discreta diferente.



*Figura 13.* Sistemas continuo y discreto.  
Tomado de Oppenheim, Willsky & Nawab, 1998, p.41.

Sin embargo pueden existir muchos procesos que desembocan en una señal final resultante y para esto es posible la existencia de una interconexión de sistemas, en el cual la señal original será modificada algunas veces. Pueden existir algunas formas de llevar a cabo la interconexión, podría ser en retroalimentación, en serie, paralelo o combinaciones de esto.



*Figura 14.* Interconexión de sistemas.  
Tomado de Oppenheim, Willsky & Nawab, 1998, p.41.

### 2.5.2. Transformada de Fourier

El análisis mediante transformada de Fourier sin duda ha ampliado las fronteras de conocimiento tanto de la ciencia como del mundo tecnológico y el desarrollo de la humanidad. La transformada de Fourier dictamina una forma de ver las señales de modo diferente al usual, es decir a señales que no son periódicas, verlas como periódicas.

En cuanto al análisis digital de señales se debe considerar primero el análisis matemático del mismo, en el caso de las series de Fourier, se analiza un fenómeno cíclico o periódico. Mediante la extensión de las series Fourier hacia señales no periódicas sean discretas o continuas se puede crear un espectro frecuencial. Esta conversión es denominada 'Transformada de Fourier'; es decir, toda señal tiene un espectro que está determinado por su mismo espectro. Las señales pueden ser analizadas en dominio del tiempo o bien en el dominio frecuencial (Osgood, s.f.).

Ejemplificando una señal periódica que se repite en el tiempo de modo matemático y visual:

$$f(t) = \cos 2\pi t + \frac{1}{2} \cos 4\pi t,$$

(Ecuación 5)

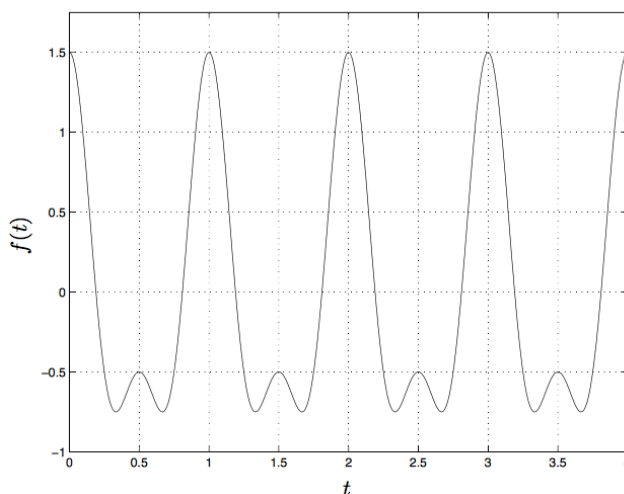


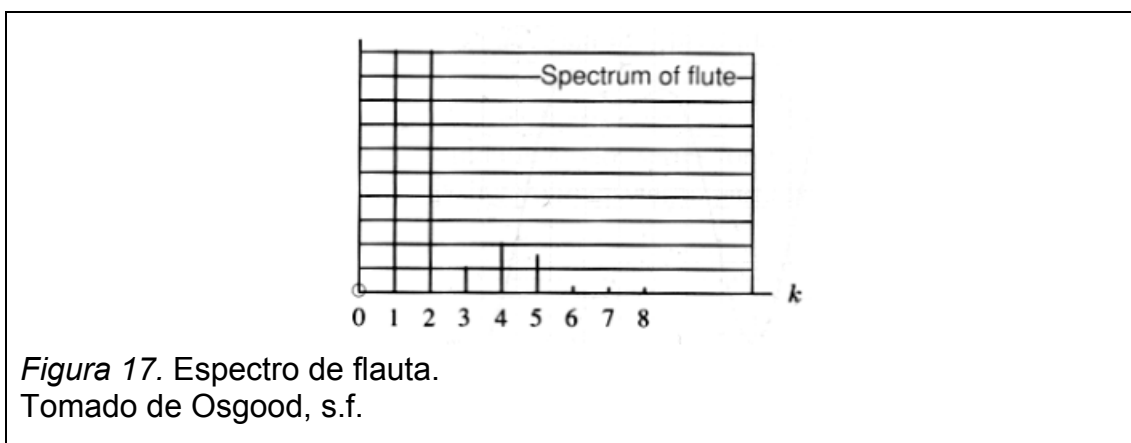
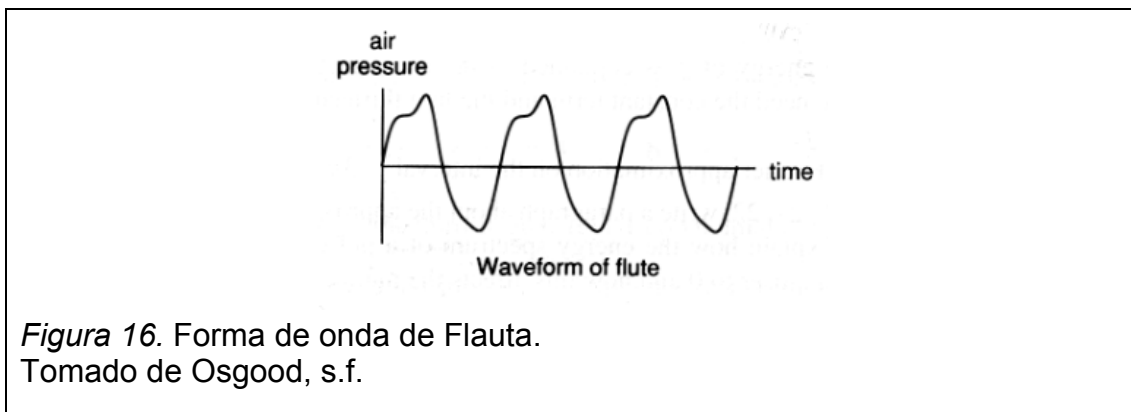
Figura 15. Gráfica de función periódica mostrada en Ecuación 5.

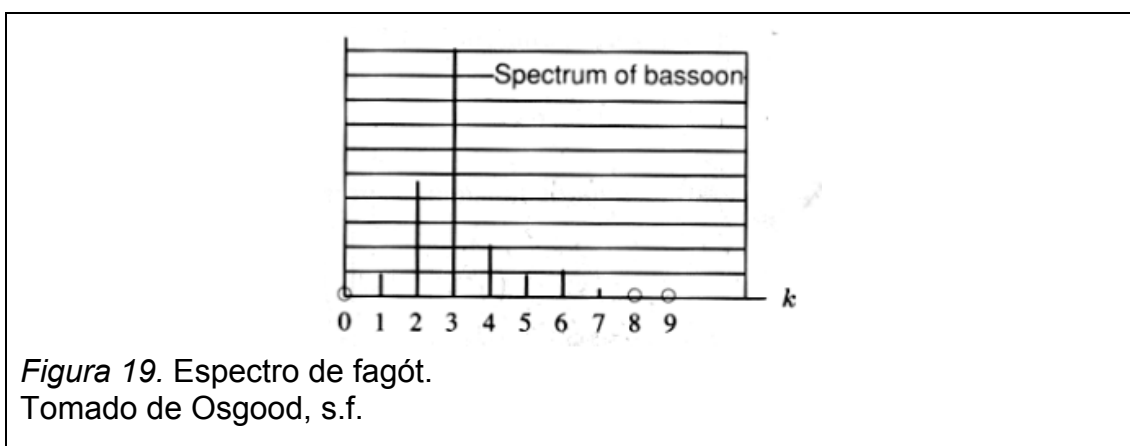
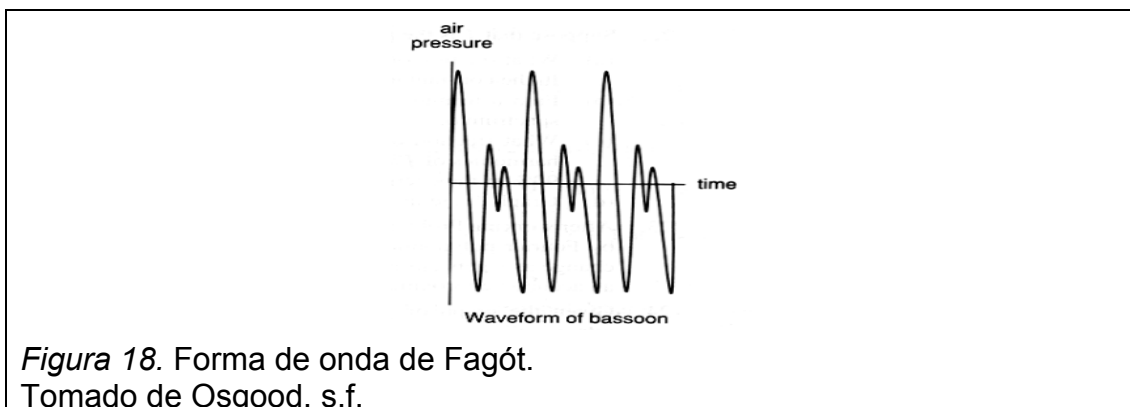
Tomado de Osgood, s.f.



En el ejemplo se clarifica la representación gráfica de una señal periódica continua, sin embargo esta posee dos tipos de frecuencias, la del coseno con una frecuencia de 1 Hertz y la de seno con una frecuencia de 2 Hertz. Por lo que se podría ver el gráfico tal como está presentado o bien, como el espectro frecuencial con amplitudes de uno y de 0.5 respectivamente para el coseno y el seno.

Por lo que el análisis del sonido tanto físico como digital es entendido como la suma de varios armónicos que se extienden a través de todo el rango frecuencial.





A partir de este análisis se explica la razón del timbre característico de cada instrumento musical, que cada nota a pesar de estar afinadas suenan diferente.

Para realizar la función de transferencia de Fourier, es decir convertir una señal no periódica en periódica, es necesario aplicar una fórmula matemática a continuación mostrada:

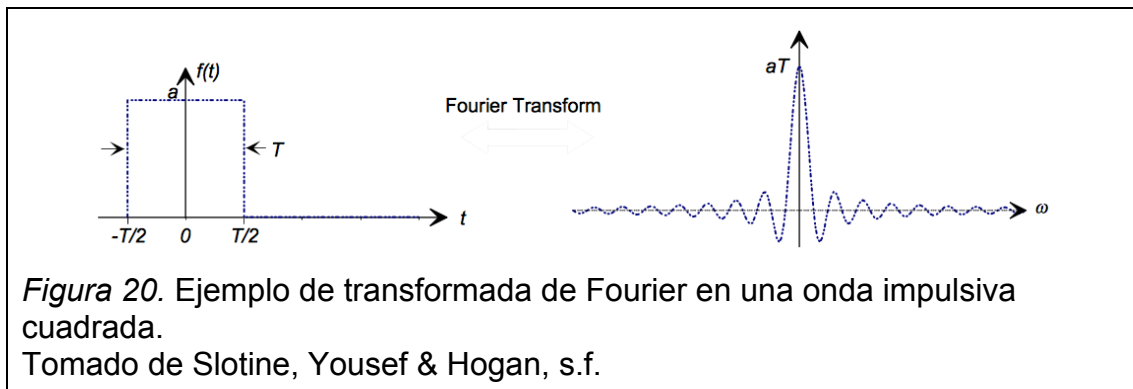
$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t))$$

(Ecuación 6)

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

(Ecuación 7)



### 2.5.2.1. Transformada Discreta de Fourier (DFT).

En el uso de equipos digitales, la transformada discreta de Fourier es de índole primaria. La DFT es en realidad un algoritmo que se genera a raíz de la transformada continua, y establece una versión discreta de la misma realizando cálculos artificiales. Se puede aproximar la definición a la realización de una transformada discreta de longitud finita planteando ecuaciones para una asimilación lo más natural posible.

### 2.5.2.2. Transformada Rápida de Fourier (FFT).

La Transformada Rápida de Fourier concede trabajar las series de Fourier con señales netamente discretas, permitiendo de este modo, mediante este algoritmo llegar a la DFT y respectivamente su inversa.

Siendo el FFT un algoritmo potente capaz de realizar la conversión de una señal que está dentro del dominio del tiempo hacia el dominio frecuencial, proporciona el análisis de modo más eficiente los armónicos de la señal. La importancia para el mundo de este paradigma es trascendental para la

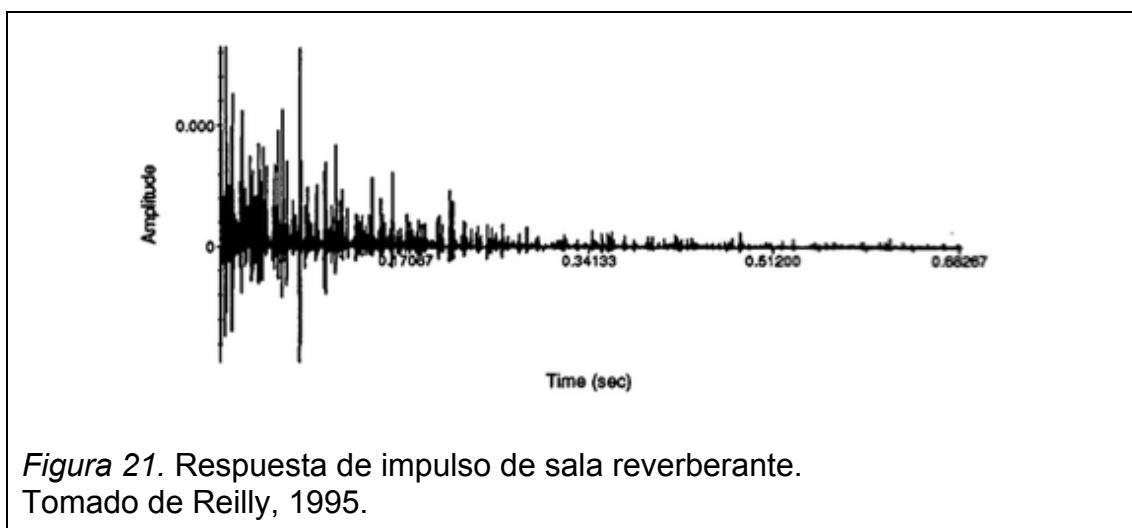
comprensión de fenómenos sónicos dentro del mundo digital como su procesamiento y manipulación discreta.

### 2.5.3. Convolución y auralización

La convolución es un proceso en el cual dos señales son multiplicadas entre sí y luego integradas en el cual una de ellas se desplaza en el tiempo, de modo que el resultado es la combinación superpuesta de las dos con una magnitud superpuesta de ambas. En el caso de la digitalización la convolución realizada es discreta y esto desemboca en que se realizará una aproximación matemática de índole numérica.

Según Tommasini (2010), es posible utilizar la convolución mediante FFT con el fin de representar al sonido original dentro de recintos arquitectónicos y de ese modo simular virtualmente la sala.

En cuanto a la reverberación que tiene una sala es posible observar toda la cola de reflexiones en un gráfico amplitud versus tiempo si se ha grabado un impulso o una señal que deja de ser reproducida repentinamente. El impulso al ser multiplicado con una grabación sin reverberación es capaz de simular el eco del recinto.



Para que la convolución se acerque a la realidad, se utiliza una cabeza y torso para realizar las grabaciones de los impulsos. A esto se lo puede denominar

HRIR por su siglas en inglés de '*Head Related Impulse Response*', al pasar esta señal del dominio del tiempo al dominio frecuencial, es decir al realizar la Transformada de Fourier; pasa a denominarse HRTF por las siglas en inglés de '*Head Related Transfer Function*'.

### 2.5.3.1. Convolución discreta y convolución en el dominio de la frecuencia.

La convolución de dos señales en el mundo digital debe ser realizado de modo discreto y atravesar un sistema en el cual la relación matemática utilizada es la siguiente:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k]x[n-k]$$

(Ecuación 8)

Es importante recalcar que la convolución discreta se realiza mediante HRIR. Para esto es sumamente necesario que el longitud de tiempo de reproducción de los archivos a convolucionar sean iguales y los retardos para la simulación perceptiva del azimut sean realizados mediante un sistema interconectado digital, en el cual se aplican retardos a una señal independiente. Pueden estos estar guardados en la memoria del sistema o pueden ser interpolados, pero no es posible que estos estén agregados al iniciar todo el conjunto (Tommasini, Araneda & Ramos, 2010).

Es posible que la señal sea procesada en el dominio del tiempo, para poder realizar la Transformada Rápida de Fourier dentro del entorno digital, utilizando la DFT (*Discrete Fourier Transform*). En donde se procesan segmentos de un número de muestras para luego el espectro del impulso y el espectro del impulso sean multiplicados. Se utiliza el HRTF para esta técnica de convolución.

## 2.6. Grabación Binaural

En la actualidad existen varias técnicas de microfonía dedicadas para la producción musical y audio para imagen. La grabación binaural principalmente

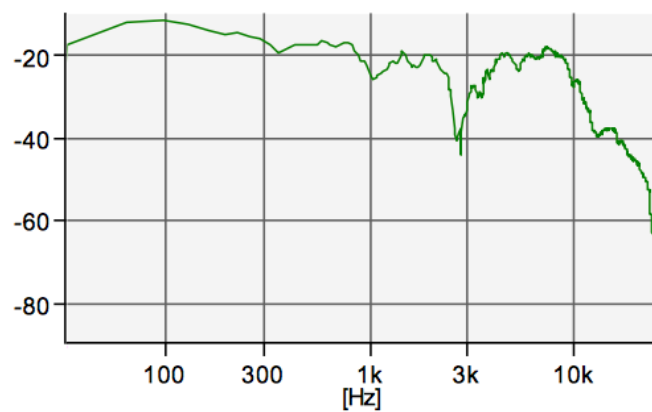
es usada de modo científico y para calibración de audífonos además de experimentos sobre localización de sonidos. La idea general de la grabación binaural es crear una técnica para tener la impresión de un auditorio en base a dos señales de entrada (Hammershøi & Möller, 2002).

Se realiza la grabación mediante una cabeza y torso con micrófonos ubicados en las orejas del maniquí, simulando así la realidad de un escucha verdadero. La ubicación de los micrófonos podría ser tanto en la entrada del oído como dentro (captando en la parte donde se ubicaría el tímpano), este factor no afectaría la dirección ni localización de la distancia (Hammershøi & Moller, 2002).

Es también posible sintetizar señales binaurales mediante mapeo para todas las posibles colocaciones de la fuente sonora, a través de computadoras en donde la transmisión se realiza a partir de una onda acústica a los oídos del escucha. (Hammershøi & Moller, 2002).

El mayor inconveniente en el uso de la técnica de grabación binaural es el no poder controlar los cambios a nivel frecuencial, es decir la coloración que sufre la señal como resultado del modelado. También existirá el problema de coloraciones producidas por la cabeza artificial. (Ordoyo, 2000).

El uso de cabezas binaurales facilita el estudio de la localización. Sin embargo hay que considerar que será algo aproximado a la realidad con un índice de incertidumbre por factores como los micrófonos y su directividad, las resonancias ocasionadas por la cabeza, la coloración o '*Shapping*' y la separación espacial de las orejas. La cual en los humanos no siempre será la misma. A pesar de todos estos factores que alejan a la grabación de la realidad sonora, la técnica binaural entre el resto de técnicas de microfonía actuales, es la que más nos acerca a la veracidad.



*Figura 22.* Espectro técnica de grabación binaural.

Tomado de Ordoyo, 2000.

### 3. MÉTODO Y DESARROLLO

#### 3.1 Equipamiento

El equipamiento utilizado para el desarrollo de este estudio se lo describirá mediante la división de los procesos en los que fueron usados.

Mediciones acústicas de los recintos:

- Sonómetro Cesva SC310.
- Calibrador de sonómetro Cesva SC310.
- Pedestal Sonómetro Cesva SC310.
- Fuente omnidireccional Cesva BP012.
- Generador de ruido amplificado Cesva AP602.
- Pedestal fuente omnidireccional Cesva BP012.

Grabación de impulsos:

- Micrófonos omnidireccionales Shure SM93.
- Interfaz de audio Presonus AudioBox USB.
- Maniquí de cabeza y torso para grabaciones binaurales.
- Computadora Apple MacBook Pro.
- Software de edición de audio Logic Pro X.

Codificación:

- Computadora Apple MacBook Pro.
- Software de programación MatLab 2013.

Pruebas con individuos reales:

- Computadora Apple MacBook Pro.
- Interfaz de audio Presonus AudioBox USB.
- Audífonos cerrados Panasonic RP - HTX7.



### 3.2. Enumeración y análisis de parámetros acústicos de recintos arquitectónicos participantes.

Al comenzar el proceso, la primera cuestión a verificar es que los recintos cumplan con tiempos de reverberación mayores a un segundo en su rango frecuencial. Se utilizaron tres diferentes salas con amplio rango reverberante siendo la primera un recinto de tamaño pequeño, la segunda un recinto de tamaño mediano y la tercera un recinto de tamaño grande.

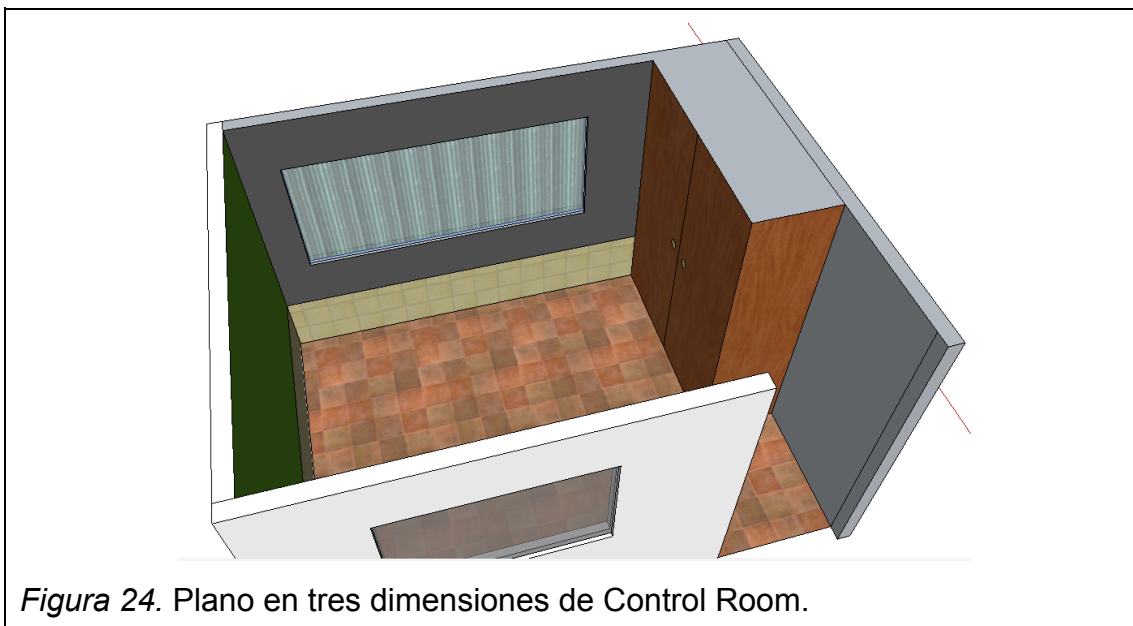
Para el caso que confiere la utilización de la norma UNE en ISO 3382 parte I. Se realizó la toma de muestras impulsivas mediante el sonómetro Cesva SC310 y de este modo conforme el lineamiento normativo se obtienen los datos de reverberación de las salas, el método utilizado para el efecto es el método interrumpido el cual se detalla claramente en la página 12 de la norma española nombrada anteriormente.

#### 3.2.1. Control Room

En el caso de la sala pequeña, que de ahora en adelante pasará a ser su dominación "*Control Room*" por el uso que el recinto tiene. Cabe recalcar que los paneles absorbentes y todo el acondicionamiento acústico fue retirado para el desarrollo de este estudio.



Figura 23. Foto real de *Control Room*.



Los valores obtenidos de tiempo de reverberación dentro del Control Room, siendo estos conforme a la medición sonora, siguiendo la normativa ISO 3382 parte I, son:

Tabla 2. Tiempos de reverberación cuantificados para Control Room.

CONTROL ROOM																
Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1 T20	1,31	1,84	2,2	2,68	2,28	1,43	1,67	1,15	1,76	1,14	0,97	0,95	0,99	1	0,93	0,84
2 T20	1,3	1,45	1,99	2,28	1,97	1,04	1,66	1,22	1,11	1,5	0,96	0,97	1,05	0,9	0,76	0,85
3 T20	1,29	1,72	1,82	1,54	2,23	1,74	1,37	1,35	1,15	1,16	1,08	0,89	0,97	0,91	0,81	0,85
4 T20	0,42	1,63	1,87	2,27	2,44	1,23	1	1,13	1,32	1,28	1,15	0,93	0,9	0,75	0,86	0,86
5 T20	1,71	0,91	1,74	0,86	2,97	2,13	1,6	1,24	0,82	1,02	1,09	0,45	0,81	0,89	0,9	0,78
6 T20	1,48	2,45	1,94	2,11	2,89	1,46	1,94	1,35	1,42	1,27	1,28	1,25	1,02	1,03	0,98	0,94
Prom. [dB]	1,25	1,67	1,93	1,96	2,46	1,51	1,54	1,24	1,26	1,23	1,09	0,91	0,96	0,91	0,87	0,85

*Nota:* Dentro de esta tabla se han resumido los resultados de la medición acústica de Control Room conforme a la UNE en ISO 3382.

En este estudio se utilizará el rango espectral de frecuencias de 400 Hertz hasta los 2500 Hertz dado que en este rango se ubica la información de la 'voz'. En la medición de reverberación realizada, se tiene que a partir de los 400 Hertz el tiempo de reverberación es de aproximadamente 1,3 segundos. Esta acentuación de reflexiones podría darse por el modo normal de la sala, sin embargo tal análisis arquitectónico no será parte de este estudio.

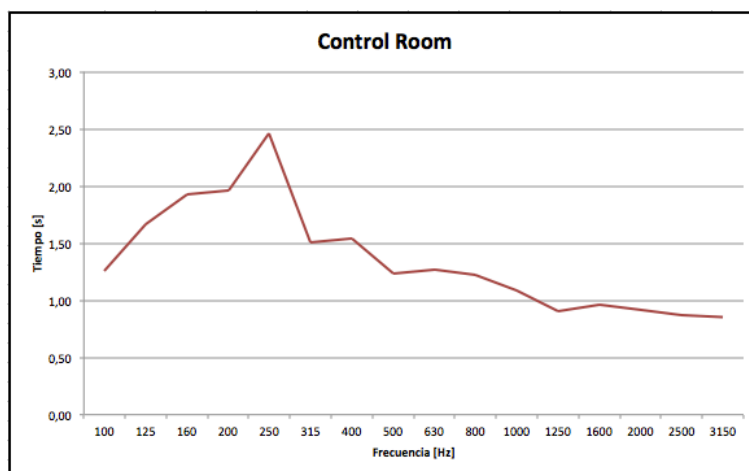


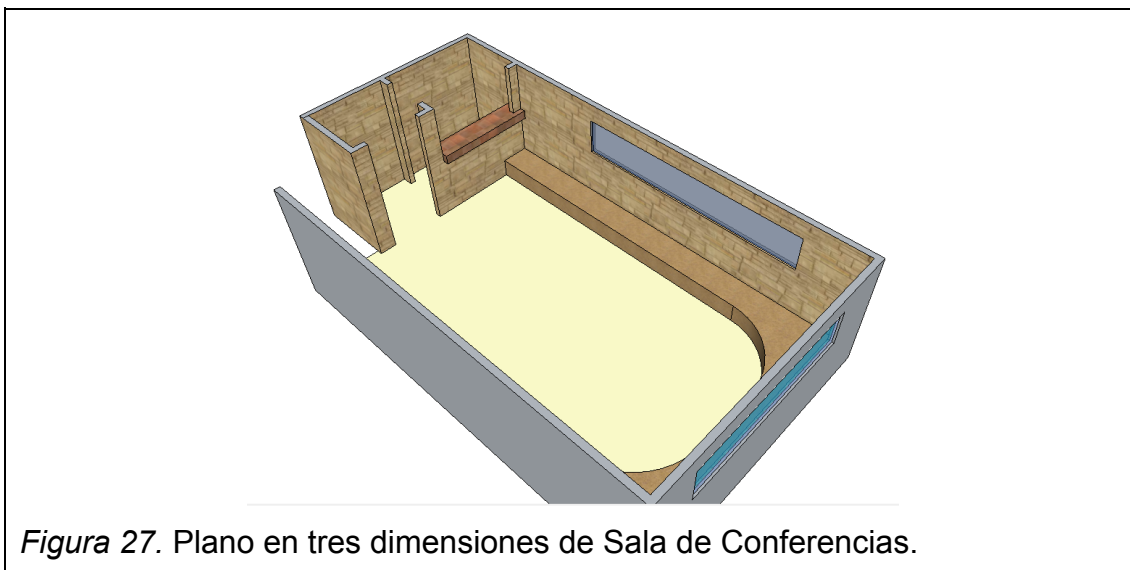
Figura 25. Gráfico de tiempo de reverberación de Control Room.

### 3.2.2. Sala de conferencias

El recinto mediano se denominará a partir de este punto '*Sala de conferencias*'. Las paredes de este recinto poseen mármol con superficie irregular el cual podría tener mas difusión sonora que una pared con superficie plana.



Figura 26. Foto real de Sala de Conferencias.



En esta sala se obtuvieron los siguientes valores de tiempo de reverberación:

Tabla 3. Tiempos de reverberación cuantificados para recinto mediano o sala de conferencias.

SALA DE CONFERENCIAS																
[Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
T20	1,89	2,11	0,86	1,65	0,96	1,36	1,25	1,08	1,44	0,58	1,21	0,86	0,92	1,02	0,97	0,83
T20	2,12	1,29	1,63	0,98	1,61	1,4	2,36	1,25	1,19	1,15	1,17	0,85	0,71	0,68	0,68	0,78
T20	2,78	1,81	1,47	1,46	1,58	1,61	1,38	0,9	0,95	1,17	1,07	0,92	0,93	0,94	0,89	0,85
T20	1,81	1,43	1,27	1,39	3,59	1,73	1,35	1,67	1,33	1,15	1,02	1,01	0,93	0,81	0,81	0,73
T20	1,23	1,34	0,93	2,1	3,95	1,71	1,27	1,16	1,1	0,99	1,17	0,87	1,08	0,92	0,82	0,79
T20	1,7	1,02	1,27	1,24	1,33	1,23	1,19	1,15	1,26	1,09	1,02	0,96	0,99	0,96	0,84	0,82
Prom. [dB]	1,92	1,50	1,24	1,47	2,17	1,51	1,47	1,20	1,21	1,02	1,11	0,91	0,93	0,89	0,84	0,80

*Nota:* Dentro de esta tabla se establece el resumen de las mediciones acústicas realizadas en la Sala de Conferencias conforme a la norma UNE en ISO 3382.

La sala de conferencias posee mucha difusión del sonido al estar refractado en muchas reflexiones por las características acústicas de las paredes, sin embargo de modo intrascendente, el impacto en la reverberación y su tiempo no tienen ligamentos ante tal difusión sónica.

En 400 Hertz en adelante se aprecia que la variación no sobrepasa de 0,5 segundos en el tiempo de reverberación.

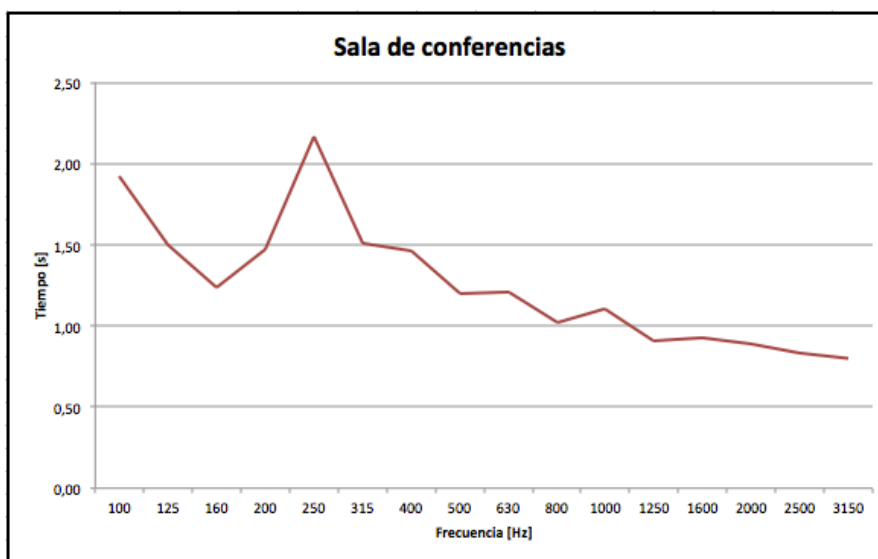


Figura 28. Gráfico de tiempo de reverberación de Sala de Conferencias.

### 3.2.3. Teatro

En cuanto al recinto grande, este pasará a denominarse '*Teatro*'.

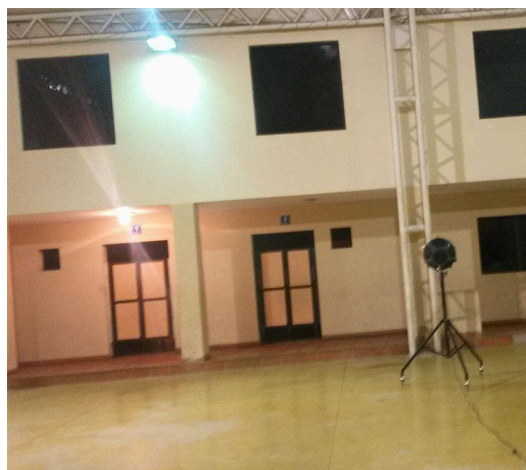


Figura 29. Foto real de Teatro.

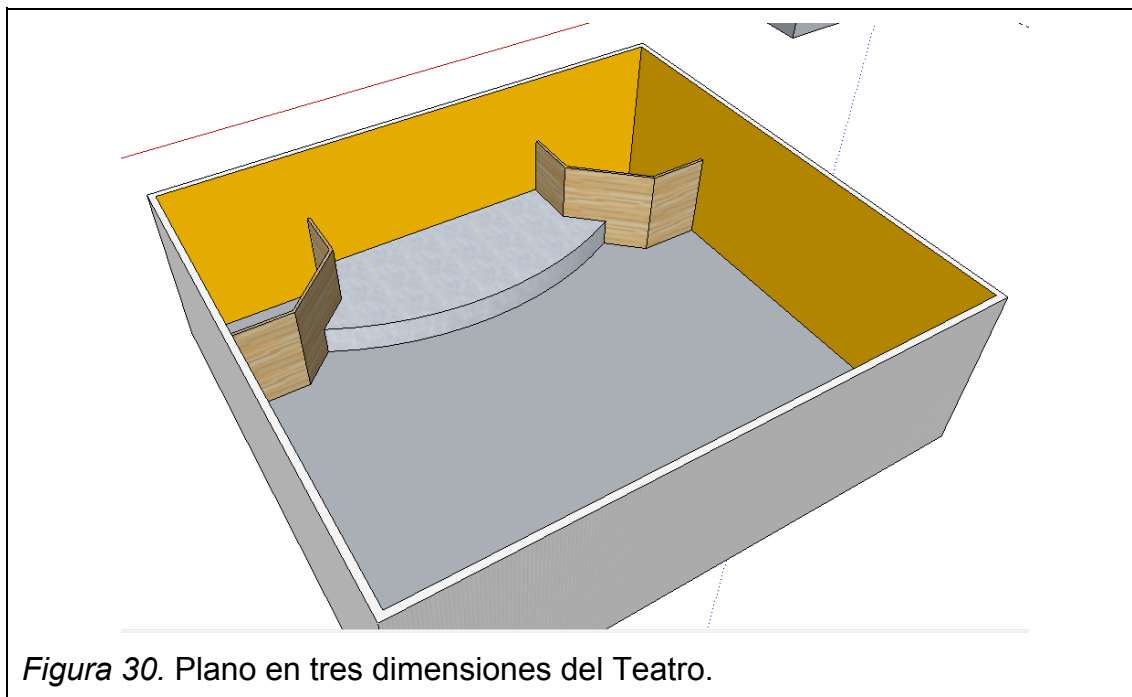


Figura 30. Plano en tres dimensiones del Teatro.

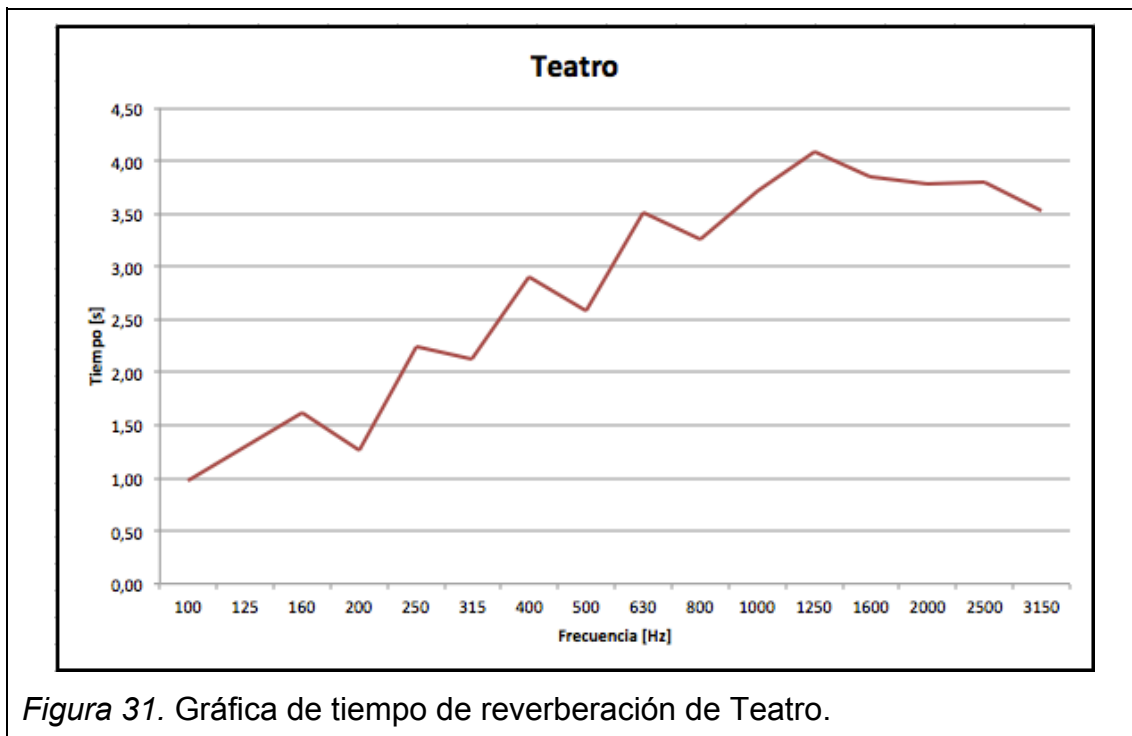
Para este recinto, los valores de tiempo de reverberación obtenidos respecto a los puntos de medición, son:

Tabla 4. Tiempos de reverberación cuantificados para recinto grande o teatro.

TEATRO																
Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
T20	1,46	1,27	1,65	2,02	2,63	4,08	4,95	3,37	3,7	3,1	3,66	4,04	3,41	3	3,82	3,55
T20	0,41	1,44	1,18	0,87	2,68	2,33	2,45	3,1	3,46	4,12	3,76	4,36	4,07	4,02	3,77	3,74
T20	1,11	1,62	2,38	0,98	0,91	2,23	3,8	3,03	3,6	2,69	3,62	3,98	4,01	3,79	3,51	3,25
T20	0,91	2,96	1,55	1,31	1,89	0,79	1,86	1,76	2,98	3,76	3,74	4,11	4,26	4,15	3,99	3,77
T20	0,86	0,21	1,9	0,81	3,32	1,55	1,79	2,35	4,18	2,91	3,68	4,01	3,99	3,98	3,94	3,41
T20	1,07	0,29	1,09	1,55	2,01	1,74	2,58	1,92	3,13	2,97	3,79	4,06	3,37	3,74	3,74	3,42
Prom. [dB]	0,97	1,30	1,63	1,26	2,24	2,12	2,91	2,59	3,51	3,26	3,71	4,09	3,85	3,78	3,80	3,52

*Nota:* Dentro de esta tabla se establecen los valores de tiempo de reverberación recolectados para el Teatro.

En cuanto a la reverberación del Teatro se puede identificar que en bajas frecuencias no se acentúa ninguna frecuencia a diferencia de las anteriores salas. Según los datos obtenidos, la reverberación aumenta conforme la frecuencia.



Como se puede notar, en todas las salas, se han tomado los valores correspondientes al T20 del recinto dado que no todos los valores de T30 han logrado ser capturados en el rango completo de frecuencias recomendadas por la norma.

Es importante considerar la gráfica de estos valores con el fin de identificar las frecuencias en las cuales la respuesta posee mayor cantidad de energía reverberante.

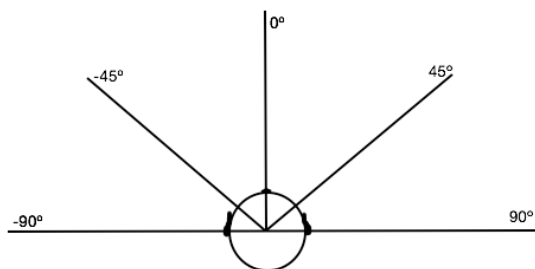
De modo que en este estudio, se tomará en cuenta para el análisis, las frecuencias relacionadas con el habla humana, esto quiere decir que el rango que abarca este estudio son a partir de los 400 Hertz hasta los 2500 Hertz. Dentro de este rango se busca que los valores del tiempo de reverberación por tercio de banda de octava no tengan una variación significativa entre sí.

### 3.3. Grabación de impulsos dentro de las salas.

Se realizó con una frecuencia de muestreo de 44100 Hz a una profundidad de bits de 24. Considerando que se realizarían pruebas con seres humanos de 22 a 24 años la grabación de impulsos realizada fue en cinco diferentes ángulos.

No se cubrieron los ángulos traseros dado que el tiempo de realización de la prueba hubiera sido aumentado significativamente y esto causaría fatiga auditiva en los participantes. Los ángulos utilizados son mostrados a continuación:

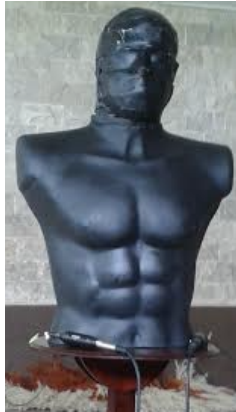
- -90
- -45
- 0
- 45
- 90



*Figura 32. Ángulos de azimut grabados.*

Con el fin de poder cubrir la localización del azimut dentro de la parte frontal del escucha y aproximarse a la realidad, la grabación fue realizada de modo binaural mediante un maniquí con cabeza y torso. La captación sonora se realizó mediante los micrófonos Shure SM93 ubicados dentro de los oídos del maniquí. En el teatro a una altura de 1,24 metros de distancia en relación al suelo. En el caso de la sala de conferencias y el Control Room la altura ocupada fue de 1,36 metros. En todos los casos la intención fue la aproximación del maniquí con la altura de una persona que se encuentra sentada dentro del plano frontal del azimut, a razón de que esta es la más comúnmente usada.





*Figura 33. Maniquí para la grabación 'Head Related Impulse Response'.*



*Figura 34. Grabación HRIR dentro de la sala.*

Los impulsos fueron generados a partir de globos de aproximadamente 12" de diámetro los cuales entregaron el nivel sonoro suficiente de modo espectral para el estudio.

Al momento de definir la separación espacial a la cual los impulsos serían generados en relación al escucha o al maniquí se tomó en consideración al radio crítico como criterio de diseño de la experimentación, en el caso de las grabaciones se procuró traspasar la distancia en el cual la predominancia yace dentro del sonido directo. Se buscó el tener aproximadamente 10 dB de diferencia entre la energía directa y la energía reverberante siendo las

reflexiones sonoras con mayor nivel, más adelante se detallará como fue realizado el cálculo conforme a la ecuación de radio crítico.

El Control Room al tener el menor volumen, físicamente es complicado el alejarse para generar el impulso, sin embargo en el caso de este recinto el tiempo es tan elevado que no hubo problemas al momento de ubicarse dentro de la zona del campo reverberado. En este caso a un metro se obtuvo aproximadamente una diferencia de 12 dB de energía entre el campo reverberante y el campo directo, siendo el predominante el contingente de las reflexiones.

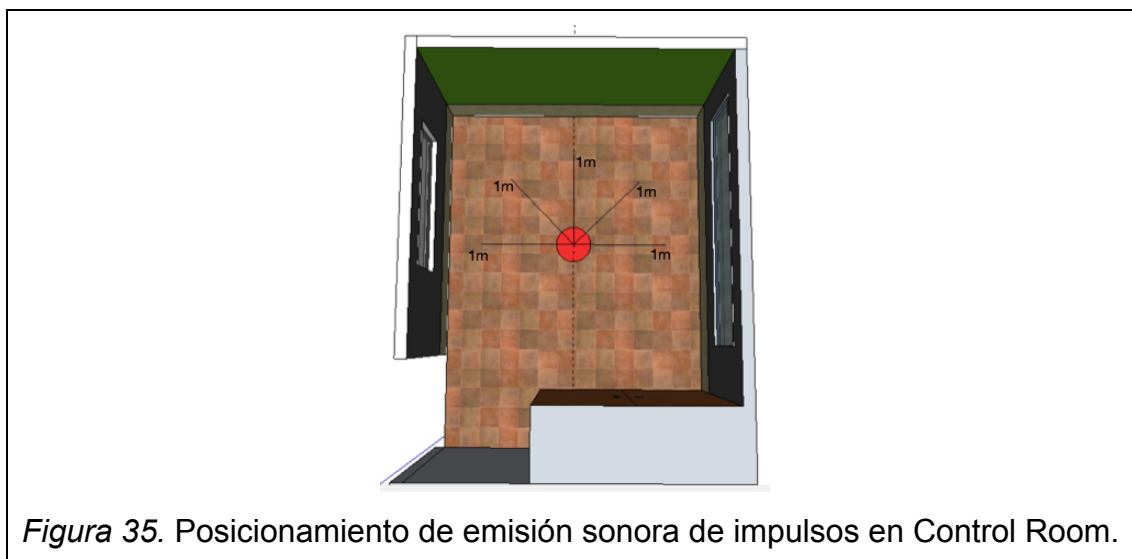


Figura 35. Posicionamiento de emisión sonora de impulsos en Control Room.

Tabla 5. Distancias críticas y energía de zona reverberante y energía directa de Control Room.

CONTROL ROOM																
Volúmen	19,7 m <sup>3</sup>															
Superficie total	46,2 m <sup>2</sup>															
Lw	60,0 dB															
	Distancia a calcular (Comprobar energía): 1 m															
Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Coefficientes de absorción	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08
Distancia crítica	0,20	0,20	0,18	0,17	0,16	0,20	0,21	0,22	0,22	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28
Energía directa (dB)	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01	49,01
reverberante (dB)	62,83	62,89	63,96	64,25	64,74	62,82	62,60	61,97	62,22	61,40	61,13	60,95	60,68	60,47	60,35	60,03
Diferencia en dB (Ed-Er)	13,82	13,88	14,96	15,25	15,73	13,81	13,59	12,96	13,21	12,39	12,13	11,94	11,68	11,46	11,34	11,02

Nota: En esta tabla se aprecian los valores del coeficiente de absorción, la distancia crítica y la energía sonora de cada campo sea este el reverberante y el directo referente al Control Room.

En la sala de conferencias, la generación de impulsos se realizó a 1,8 metros de distancia del escucha. En las frecuencias desde 1250 Hertz en adelante no se cumplió con el criterio de tener una diferencia mayor a diez decibelios, sin embargo desde 400 Hertz hacia 1000 Hertz esto si se cumple.

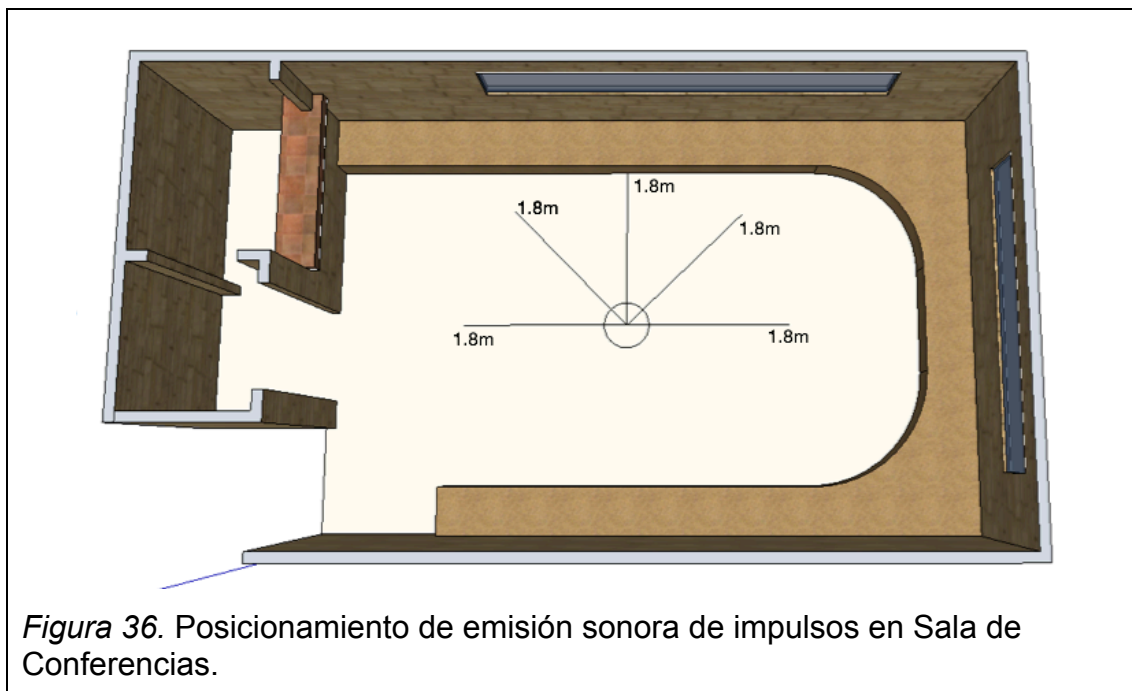


Figura 36. Posicionamiento de emisión sonora de impulsos en Sala de Conferencias.

Tabla 6. Distancias críticas y energía de zona reverberante y energía directa de Sala de Conferencias.

SALA DE CONFERENCIAS																		
Volúmen	77,9 m3																	
Superficie total	55,5 m2																	
Lw	60,0 dB																	
															Distancia a calcular (Comprobar energía):		1,8 m	
Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150		
Coefficientes de absorción	0,12	0,15	0,18	0,15	0,10	0,15	0,15	0,19	0,19	0,22	0,20	0,25	0,24	0,25	0,27	0,28		
Distancia crítica	0,38	0,44	0,49	0,44	0,36	0,44	0,45	0,50	0,50	0,56	0,53	0,60	0,59	0,61	0,64	0,65		
Energía directa (dB)	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90	43,90		
reverberante (dB)	57,33	56,09	55,09	55,99	57,92	56,11	55,97	54,93	54,97	54,04	54,50	53,40	53,49	53,25	52,88	52,63		
Diferencia en dB (Ed-Er)	13,43	12,19	11,19	12,08	14,02	12,21	12,07	11,03	11,07	10,14	10,60	9,50	9,59	9,35	8,98	8,72		

*Nota:* En esta tabla se aprecian los valores del coeficiente de absorción, la distancia crítica y la energía sonora de cada campo sea este el reverberante y el directo referente al Sala de Conferencias.

El Teatro posee una distancia crítica mucho mayor, sin embargo se utilizó también este criterio, dado que se aproxima mucho a los diez decibeles de diferencia y se estableció que este recinto es plausible para el estudio.

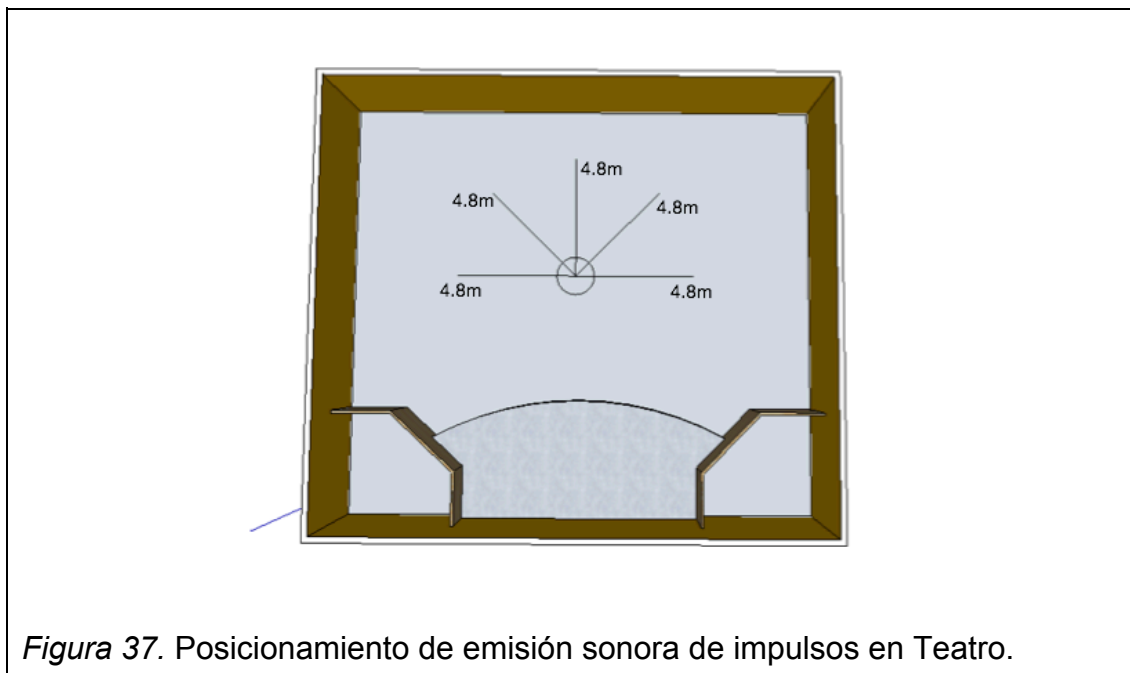


Tabla 7. Distancias críticas y energía de zona reverberante y energía directa de Control Room.

TEATRO																					
Volúmen	2291,4		m3														Distancia a calcular (Comprobar energía):		4,58		m
Superficie total	1019,6		m2																		
Lw	60,0		dB																		
Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150					
Coefficientes de absorción	0,37	0,28	0,22	0,29	0,16	0,17	0,12	0,14	0,10	0,11	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10					
Distancia crítica	3,45	2,78	2,39	2,84	1,96	2,03	1,69	1,80	1,52	1,58	1,47	1,39	1,44	1,45	1,45	1,51					
Energía directa (dB)	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79					
reverberante (dB)	38,19	40,07	41,37	39,87	43,09	42,80	44,41	43,83	45,33	44,97	45,60	46,07	45,78	45,69	45,71	45,35					
Diferencia en dB (Ed-Er)	2,40	4,28	5,58	4,08	7,30	7,01	8,61	8,04	9,54	9,18	9,81	10,28	9,99	9,90	9,92	9,56					

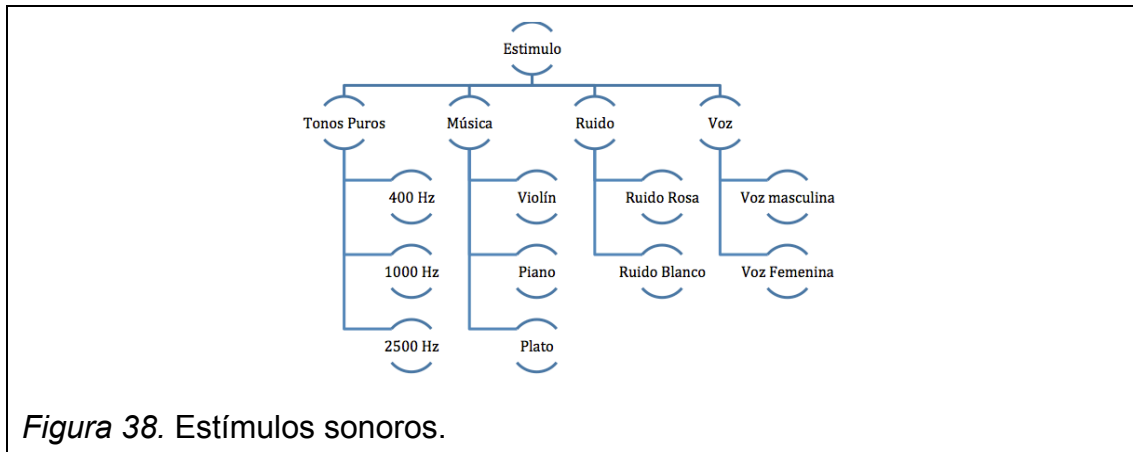
Nota: En esta tabla se aprecian los valores del coeficiente de absorción, la distancia crítica y la energía sonora de cada campo sea este el reverberante y el directo referente al Teatro.

### 3.4. Procedimiento para auralización

Al realizar la auralización de los sonidos grabados lo primero a considerar es el realismo que deberá existir para los resultados de la prueba. Mediante la convolución de señales en un par estéreo, es posible recrear la reverberación de las salas con diferentes sonidos.

Los sonidos que se ha seleccionado para la prueba se pueden agrupar en cuatro preceptos los cuales son: Tonos puros, Música, Ruido y Voz. Se

seleccionó a la Voz y Música por ser criterios de diseño dentro de espacios arquitectónicos. Se seleccionó al Ruido por cubrir todo el espectro frecuencial y a los Tonos puros por no poseer armónicos. Siendo los estímulos utilizados para cada sala por analizar, los cuales son subdivididos de la siguiente forma:



### 3.4.1. Convolución estereofónica

La convolución fue realizada en la plataforma MatLab, la cual fue una herramienta primordial para el procesamiento de audio en este estudio.

Para poder comprender el código realizado para la convolución estereofónica, este puede ser dividido en tres partes, la entrada, el procesamiento y la salida.

#### 3.4.1.1. Entrada

```

%CODIFICACIÓN PARA AURALIZACIÓN DE REVERBERACIONES ESTEREOFÓNICAS.
%CONVOLUCIÓN ESTEREOFÓNICA CON ESTÍMULOS.
clear;
clear global;
clear all;
clc;
%Entrada
fs=44100; %Frecuencia de muestreo; asignacion.
[senal,fs_senal]=wavread('C:\Users\Steven\Desktop\VocesBien\Mujer\Voz2MujerClock');%Se
ñal de entrada monofonica
[impulso,fs_impulso]=wavread('C:\Users\Steven\Desktop\Tito\Estimulos\impulsos\SalaDeCo
nferencias\ImpulsoConferenciasAtras'); %senal de entrada estereo.
%Respuesta Impulsiva en estéreo.
impulsoL=impulso(:,1); %Canal L izquierdo.
impulsoR=impulso(:,2); %Canal R derecho.
  
```

*Figura 39. Parte 'entrada' de codificación para convolución estereofónica.*

En las primeras líneas se distingue todos los comandos para borrar la información guardada y que está por sobre la ventana de resultados en MatLab, adyacente a esto se define la entrada, su frecuencia de muestreo y mediante la función '*Wavread*' se localiza el archivo monofónico, o en otras palabras el estímulo, del mismo modo la entrada del impulso grabado HRIR.

Se predisponen variables cada lado de la señal estereofónica para de ese modo dividir las y procesarlas de manera separada. En este caso pasamos a tener tres señales independientes entre ellas, estando estas en el dominio del tiempo.

### 3.4.1.2. Procesamiento

```
%PROCESO DE CONVOLUCIÓN
%Canal Izquierdo
Salida_L = length(signal) + length(impulseL)-1; %Longitud de la señal
%de salida.
Salida_L2 = pow2(nextpow2(Salida_L));
SENALFFT = fft(senal, Salida_L2); %Transformada de Fourier de la señal de entrada.
IMPULSOL= fft(impulsoL, Salida_L2); %Transformada de Fourier de la respuesta
impulsiva.
%Canal L
REVERBERACION1 = SENALFFT .* IMPULSOL ; %Convolución entre la señal de
%entrada y la respuesta Impulsiva.
reverberacion1 = real(ifft(REVERBERACION, Salida_L2)); %Transformada inversa de
Fourier del resultado de la convolución.
%'.....
%Canal R
Salida_R = length(senal) + length(impulsoR)-1; %Longitud de la señal de salida.
Salida_R2 = pow2(nextpow2(Salida_R));
SENAL= fft(senal, Salida_R2); %Transformada de Fourier señal de entrada.

IMPULSOR= fft(impulsoR, Salida_R2); %Transformada de Fourier respuesta Impulsiva.
%Canal R
REVERBERACION2=SENAL.*IMPULSOR; %Convolución entre la señal de entrada y la respuesta
Impulsiva.
reverberacion2 = real(ifft(REVERBERACION2, Salida_L2)); %Transformada inversa de
Fourier del resultado de la convolución.
```

Figura 40. Parte '*procesamiento*' de codificación para convolución estereofónica.

La primera parte, dentro de esta parte del código, es la identificación dentro de una variable la longitud del audio del estímulo y del impulso, tanto en izquierda como en derecha. Colindante a esto se utiliza la función '*pow2*' la cual ignora la parte imaginaria de las variables de entrada y '*nextpow2*' que entrega el exponente de la potencia más pequeña del valor absoluto de los valores de entrada, funciones cuyo papel radica dentro de un preparativo matemático para transformar la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante FFT, lo cual es hecho inmediatamente después tanto en la señal de los estímulos como del impulso.

Una vez que las dos señales pasan al dominio de la frecuencia, se procede a una multiplicación entre ambas y finalmente la señal obtenida se la convierte nuevamente al dominio del tiempo. Este proceso debe ser repetido para cada señal estereofónica es decir en '*R*' e '*L*'.

### 3.4.1.3. Salida

```
%SALIDA
reverberacion1 = reverberacion1/max(abs(reverberacion));%Normalización L.
reverberacion2 = reverberacion2/max(abs(reverberacion2)); %Normalización R.
ReverberacionEstereo(:,1)=reverberacion1; %Canal L.
ReverberacionEstereo(:,2)=reverberacion2; %Canal R.
sound(ReverberacionEstereo,fs);
wavwrite(ReverberacionEstereo,44100,24,'EstimuloConferenciasVozMujerClockAtras.wav');
```

*Figura 41. Parte 'salida' de codificación para convolución estereofónica.*

En lo que se refiere a la salida primero pasa por el proceso de normalización; es decir, el llevar la señal a un nivel objetivo, o el máximo nivel sin distorsión dentro del entorno digital. Consecuente a esto se realiza la unión de las señales dentro de la misma variable en este caso '*ReverberacionEstereo*', después de esto se reproduce la señal para verificar que está en orden y se procede a guardarla.

### 3.4.2. Cantidad de señales procesadas digitalmente.

Tras el traspaso por el sistema digital para convolucionar la señal de modo estereofónico se obtuvo una cantidad de señales discretas mostradas a continuación:

Tabla 8. Número de estímulos convolucionados por cada sala.

Estímulos									
Tonos puros			Música			Ruido		Voz	
400 Hz	1000 Hz	2500 Hz	Violín	Piano	Plato	Ruido Rosa	Ruido blanco	Voz Masculina	Voz femenina
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		Tonos puros	15						
		Música	15						
		Ruido	10			<b>TOTAL</b>	<b>50</b>		
		Voz	10						

Nota: Dentro de esta tabla se establecen los valores totales por cada sala, desglosando la cantidad de pruebas por estímulo.

En la figura expuesta se puede apreciar que por cada sub estímulo se cuentan cinco muestras, siendo estas las correspondientes a los cinco ángulos a analizar. La importancia de este dato es relevante porque refiere a la cantidad de sonidos que existirán por cada sala. Al tener en la prueba los tres tipos de sala y una totalmente seca, que hace referencia a los estímulos sin ningún tipo de procesamiento. De este modo se exterioriza finalmente 200 audios para la realización de la prueba que el participante deberá escuchar.

## 3.5. Prueba con individuos reales

### 3.5.1. Audiometrías

Se realizó una audiometría para de este modo normalizar la respuesta al espectro de las señales presentadas en mayor medida y que este no fuese un factor de afectación superior para la precedencia.

En cuanto a los valores máximos de degradación auditiva que se aceptarán en los individuos para realizar la prueba, será de 20 dB en cualquiera de las



frecuencias, el cual es el rango auditivo en el cual el ensayo clínico utilizado considera como audición normal.

Las audiometrías han sido realizadas dentro del software '*Online Hearing Test & Audiogram Printout*', el cual entrega resultados muy aproximados a las condiciones de laboratorios médicos. Para que la persona haya formado parte de los participantes de la prueba, este debió aprobar la audiometría con las respuestas por sobre las frecuencias dentro del rango de audición normal.

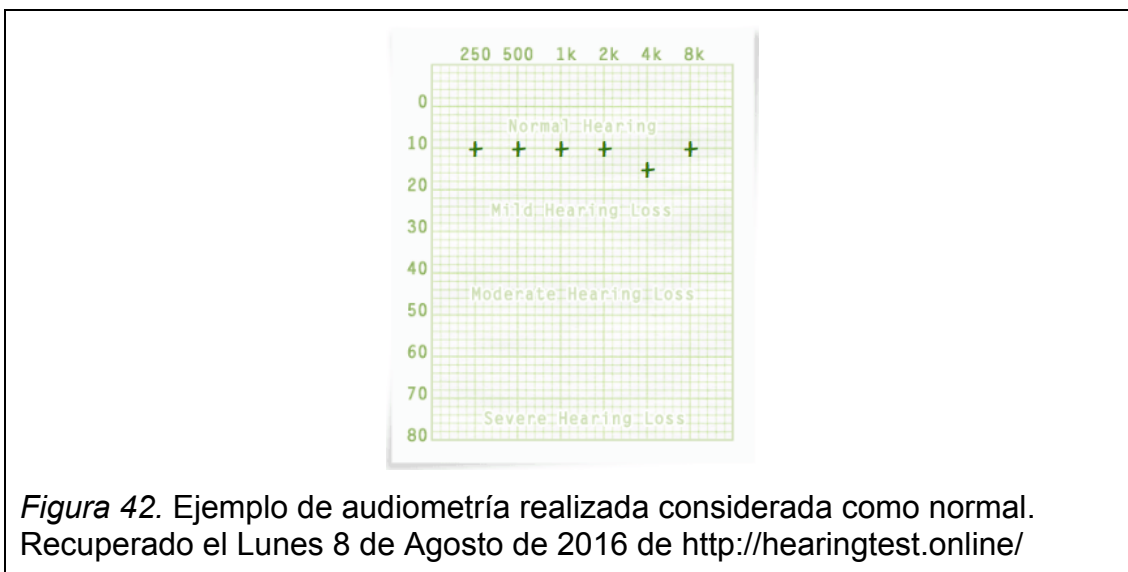


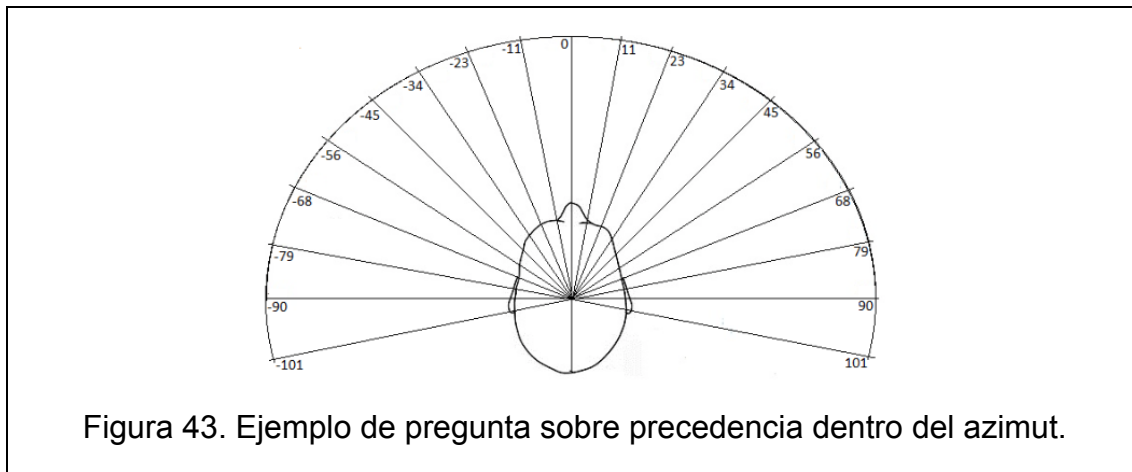
Figura 42. Ejemplo de audiometría realizada considerada como normal. Recuperado el Lunes 8 de Agosto de 2016 de <http://hearingtest.online/>

### 3.6. Pruebas psicoacústicas

Las pruebas realizadas constaron en marcar mediante una señal la precedencia dentro del azimut el cual estaba subdividido cada once grados lo que permite ubicar a las respuestas posibles en '19'. Se tomó en consideración tres grados de acierto, siendo estos '*Bien*', '*Regular*' y '*Mal*'. En el caso de que una respuesta se considere correcta el escucha debió localizar al sonido en el ángulo exacto o tener una desviación de  $\pm 11^\circ$ , en cambio para que una respuesta se considere regular esta debe estar en el rango de desviación de  $\pm 23^\circ$ , el resto de respuestas se consideraron como erróneas. Dado que esta angulación son las que se encuentran adyacentes a la respuesta correcta.

Ejemplificando lo dicho anteriormente, en el caso de que el sonido esté en los  $45^\circ$  dentro del azimut, para que la respuesta considerada esté '*Bien*' esta

podría estar ubicada en  $34^\circ$ ,  $45^\circ$  o  $56^\circ$ . Para que se considere 'Regular' las respuestas que abarcaría son  $23^\circ$  y  $68^\circ$ , para el resto de resultados el acierto se consideraría como 'Mal'.



La prueba fue realizada con 15 participantes, los cuales tenían entre 22 y 24 años de edad, siendo la duración de la prueba de 24 minutos sin considerar el tiempo de la audiometría.

El lugar donde se realizó la prueba es una sala dedicada a la mezcla de audio, en donde el ruido de fondo fue atenuado mediante técnicas de aislamiento y acondicionamiento acústico para el trabajo con audio.

Es importante también el considerar que las pruebas fueron realizadas a personas con oído afín o entrenado hacia el audio y sonido, así como a participantes sin entrenamiento auditivo con el fin de lograr tener una comparativa entre ambos tipos de personas.

La presentación de estímulos siguió el siguiente orden, el cual busca no repetir dos tipos de estímulos de manera consecutiva. De modo que alternando entre tonos puros, música, ruido y voz el participante no sea capaz de crear una memoria auditiva de ningún tipo:

1. 400 Hz
2. Violín
3. 2500 Hz
4. Ruido Blanco
5. 1000 Hz
6. Voz masculina
7. Piano
8. Voz femenina
9. Ruido Rosa
10. Plato

Por cada hoja el participante debía escribir cinco respuestas las cuales son ligadas a los cinco ángulos. Los estímulos fueron presentados de modo aleatorio y las salas en el orden siguiente: Seca, Control Room, Sala de Conferencias, Teatro. Dentro del audio que se reprodujo este anunciaba los estímulos para que el escucha este preparado para oír y marcar su respuesta. También se anunció el cambio de salas para que el escucha no pierda la conexión y el orden.



*Figura 44.* Foto real de participante tomando la prueba.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se referirá a las gráficas en relación a los resultados de las encuestas y como estas marcan tendencias conforme su análisis se hace de modo general hasta el modo más específico.

En lo que se refiere al principio del proceso de análisis este confiere en representar los resultados dentro de la plataforma digital seleccionada, en este caso Microsoft Excel.

Tabla 9. Tabla de datos obtenidos de las encuestas, estímulo: Violín.

		ESTÍMULO VIOLIN																					
DATOS GENERALES				SECA				CONTROL ROOM				SALA DE CONFERENCIAS				TEATRO							
Entr. Audi.	Edad	Sexo		-90	-45	0	45	90	-90	-45	0	45	90	-90	-45	0	45	90	-90	-45	0	45	90
1	Si	23	Masculino	-79	68	-23	56	79	-45	45	68	56	56	34	56	45	68	68	23	-23	56	56	56
2	Si	22	Masculino	-79	-45	0	28	90	-68	-56	11	45	45	-11	-45	45	79	101	-68	-79	11	45	45
3	Si	22	Femenino	-90	-56	0	45	79	11	34	0	34	34	0	23	-34	45	11	23	-45	N	45	N
4	Si	22	Femenino	-90	-34	0	79	68	-90	-68	23	N	45	-45	-90	34	68	90	-45	-11	34	79	56
5	Si	22	Masculino	-101	-56	-11	11	90	-79	-45	11	56	23	-56	23	56	34	68	-79	-56	-34	23	56
6	Si	24	Masculino	-79	-45	0	11	56	-79	23	56	0	-79	0	23	23	0	45	45	0	0	34	34
7	Si	23	Masculino	-79	-11	0	-11	56	-79	-23	11	11	23	-11	11	34	56	68	-45	-11	11	34	45
8	Si	24	Masculino	-79	-56	0	23	68	-101	-45	-68	34	34	-68	-68	68	68	56	-79	68	-68	45	68
9	No	24	Masculino	-101	-90	-11	0	90	-79	-90	101	90	90	-56	-101	56	56	56	-79	-68	-101	90	101
10	No	24	Masculino	-79	-56	90	-90	68	-68	-45	68	56	23	-23	-23	45	68	79	-45	-56	23	45	11
11	Si	24	Masculino	-68	-34	34	68	56	-45	11	34	56	45	-34	45	68	56	56	-11	-23	-11	68	45
12	No	22	Masculino	-90	-45	-11	34	79	-79	-45	68	68	34	-90	79	79	23	34	-56	-34	-45	79	45
13	No	22	Masculino	-79	-79	-56	56	79	-45	34	68	56	56	-45	-68	56	34	23	-56	-68	11	34	45
14	No	24	Masculino	-101	-90	79	90	101	-45	-56	68	23	34	-79	-56	79	34	34	-56	-23	68	56	23
15	No	23	Masculino	-90	-79	68	68	79	-68	-79	-68	-79	-79	-56	-68	79	79	79	-90	-56	-90	90	90

*Nota:* Dentro de esta tabla se esclarecen los resultados que los participantes anotaron dentro de la prueba psicoacústica, siendo estos los referentes al estímulo de violín.

En el lado izquierdo se indica la cantidad de personas a las que se realizó la encuesta junto a su edad, sexo y si posee algún tipo de entrenamiento auditivo o no. Después de esto se aprecia las respuestas referentes al ángulo en el azimut que han marcado dentro de la encuesta, en el caso de la letra 'N' que se aprecia, refiere a que la respuesta fue dejada en blanco.

Se procedió a tabular la información dentro de los tres aspectos mediante la condición 'SI()' de excel. Se realizó la normalización o ponderación de 'Bien' con 100, 'Regular' con 50 y 'Mal' con 0. Esto con la finalidad de realizar un gráfico en el cual se asigne un valor numérico en el cual se asocie de modo intuitivo el grado de aciertos dentro de la sala.

En el siguiente gráfico se puede apreciar la ponderación porcentual realizada para el ejemplo del gráfico anterior. Sin embargo, cabe recalcar que en el caso de marcar la letra 'N', es decir, el haber dejado la respuesta en blanco, la respuesta se pondera como 0.

Tabla 10. Normalización de datos obtenidos mediante encuestas.

		Estímulo: 400 Hz																													
DATOS GENERALES			SECA					CONTROL ROOM					SALA DE CONFERENCIAS					TEATRO													
Entr. Audi.	Edad	Sexo	-90	-45	0	45	90	-90	-45	0	45	90	-90	-45	0	45	90	-90	-45	0	45	90									
1	Si	23	Masculino	0	100	50	100	50	0	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	100	50	
2	Si	22	Masculino	0	0	100	100	50	0	0	100	50	0	0	100	100	100	0	50	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
3	Si	22	Femenino	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	
4	Si	22	Femenino	100	0	100	100	100	0	100	0	100	0	0	100	0	50	50	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	Si	22	Masculino	0	0	0	100	50	0	0	100	100	0	0	100	50	0	0	0	0	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	
6	Si	24	Masculino	0	0	100	100	50	0	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	Si	23	Masculino	0	0	100	50	100	0	50	0	100	0	0	0	0	100	0	50	50	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	Si	24	Masculino	100	100	0	100	100	0	100	100	100	0	50	100	0	100	0	0	0	50	50	50	50	0	0	0	0	0	0	
9	No	24	Masculino	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
10	No	24	Masculino	50	100	50	100	50	0	0	100	0	50	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	
11	Si	24	Masculino	50	100	0	100	50	0	50	50	100	0	0	100	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	
12	No	22	Masculino	100	100	0	50	100	0	0	0	100	0	0	0	0	100	100	0	100	0	100	0	0	0	0	0	0	100	0	
13	No	22	Masculino	100	0	0	0	100	100	50	0	100	100	100	0	0	0	100	100	0	0	0	0	0	0	100	100	0	0	50	100
14	No	24	Masculino	0	0	0	0	0	0	100	50	100	0	0	50	0	50	100	50	100	0	100	50	100	0	0	0	100	50	0	
15	No	23	Masculino	50	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	50	50	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

*Nota:* Dentro de estos valores que se aprecian dentro de la tabla se establece la asignación de notas, para realizar un análisis porcentual, en el caso de esta tabla se tomó al estímulo de 400 Hz tan solo como ejemplo.

Una vez realizada la ponderación es relevante la explicación de las variables que están dentro de la prueba con el fin de poder comprender las técnicas para relacionar estas entre sí. De modo que estas son:

- Ángulos: Ordinal
- Estímulos: Categórica
- Salas: Categórica
- Acierto: Categórica

Por lo que al comenzar a relacionar, se tomaron los datos independientemente para poder extender el análisis desde lo más general hacia lo más específico.

Los datos ponderados fueron ordenados para que de este modo sea más fácil analizarlos, y tener en una sola tabla todos los datos a analizar en vez de dividir estas por estímulos. Se coloreó las ponderaciones con el fin de poder

notar visualmente las variaciones. El conteo de muestras de esta tabla se extiende a 600 por cada ángulo, y el total de datos por analizar es de 3000.

Tabla 11. Extracto de tabla ponderada generalizada.

ÁNGULOS							
Estímulos	Salas	No.	-90	-45	0	45	90
	Seca	1	0	100	50	100	50
		2	0	0	100	100	50
		3	0	0	0	0	0
		4	100	0	100	100	100
		5	0	0	0	100	50
		6	0	0	100	100	50
		7	0	0	100	50	100
		8	100	100	0	100	100
		9	100	0	0	0	100
		10	50	100	50	100	50
		11	50	100	0	100	50
		12	100	100	0	50	100
		13	100	0	0	0	100
		14	0	0	0	0	0
		15	50	0	0	0	100
	Control Room	16	0	0	0	100	0
		17	0	0	100	50	0
		18	50	0	0	0	0
		19	0	100	0	100	0
		20	0	0	100	100	0
		21	0	100	100	0	0
		22	0	50	0	100	0
		23	0	100	100	100	0
		24	0	0	0	0	100
		25	0	0	100	0	50
		26	0	50	50	100	0
		27	0	0	0	100	0

*Nota:* Dentro de esta tabla se aprecia un extracto de todos los resultados que los participantes marcaron en las encuestas. Se han asignado las notas respectivamente.

Tras esta generalización se extraen las tablas en donde se resume cada una de las variables. En la siguiente tabla se especifica el conteo de resultados marcados como '*Bien*', '*Regular*' y '*Mal*'.

Se estableció al análisis de modo que a partir de todas las muestras se pueda conocer los resultados de modo general, en función a las diferentes variables del experimento.

Tabla 12. Conteo de resultados, ángulos.

RESUMEN ÁNGULOS					
Acierto	-90	-45	0	45	90
Mal	345	210	329	191	278
Regular	86	130	79	155	100
Bien	169	260	192	254	222
			Total muestras	600	

*Nota:* Se han contado las respuestas marcadas por los participantes en las encuestas psicoacústicas.

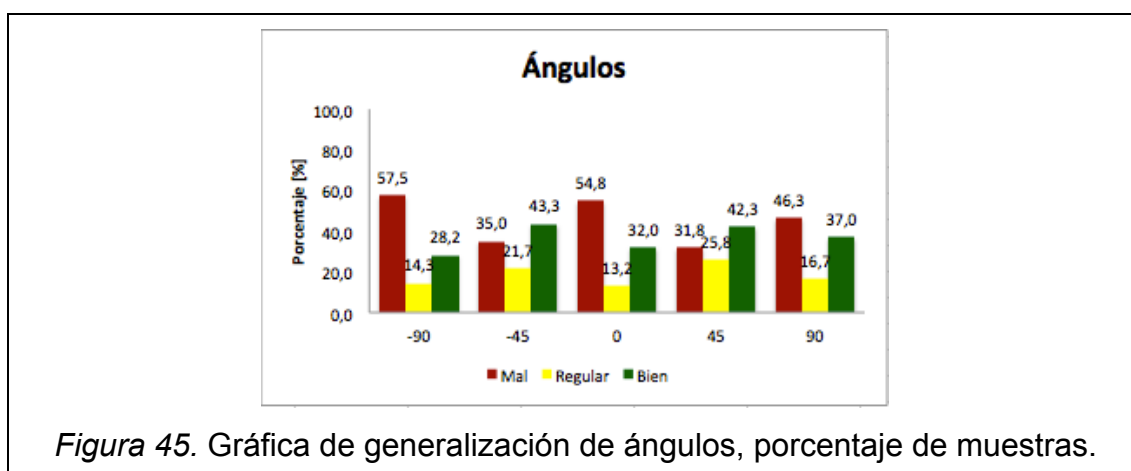
Para poder entender de mejor forma la relación que se tiene los resultados se mostrarán de forma porcentual a continuación:

Tabla 13. Resultados en porcentaje de muestras, ángulos.

RESUMEN ÁNGULOS					
Acierto	-90	-45	0	45	90
Mal	57,5	35,0	54,8	31,8	46,3
Regular	14,3	21,7	13,2	25,8	16,7
Bien	28,2	43,3	32,0	42,3	37,0
			Total muestras	600	

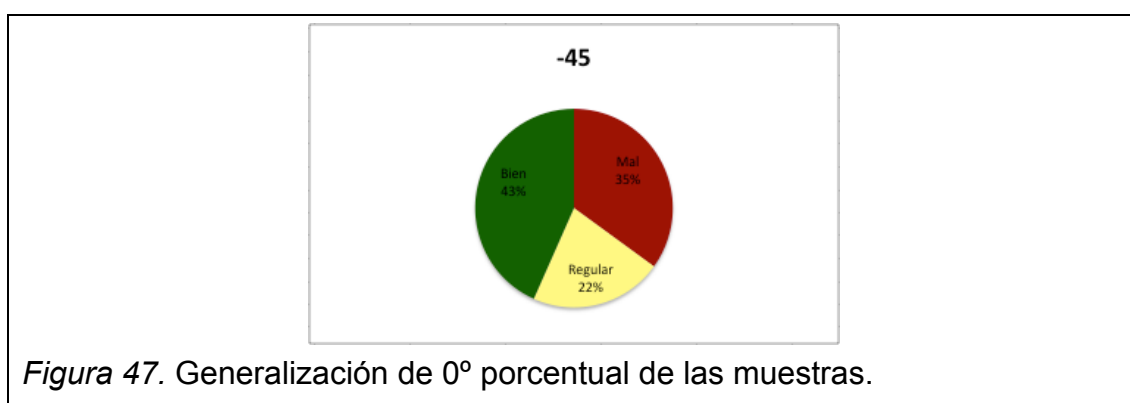
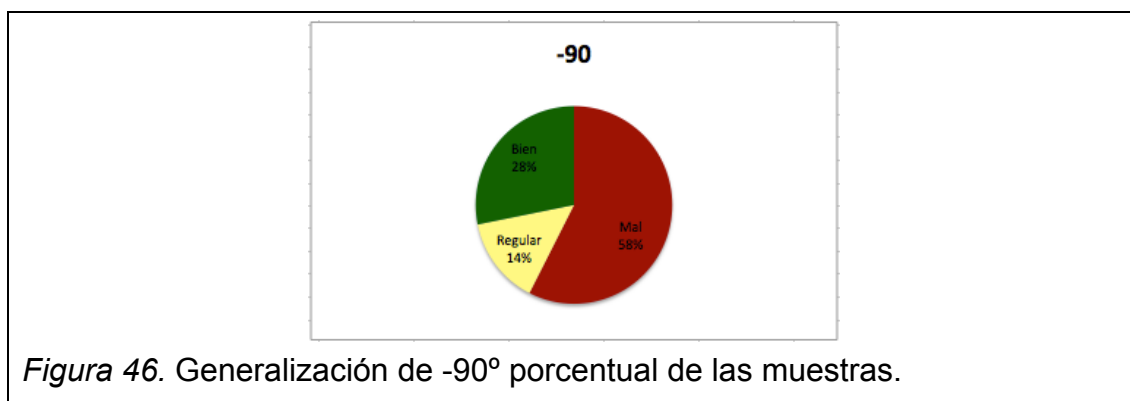
*Nota:* Se muestra el porcentaje de resultados dependiendo del total de muestras.

Mediante una gráfica se puede percibir de mejor forma la disertación de los ángulos y su conteo.



Para poder analizar profundamente el caso específico se decidió realizar un gráfico de  $-90^\circ$  y un gráfico de  $-45^\circ$  en donde se encuentran los resultados con mayor cantidad de aciertos y con menor cantidad de aciertos. De modo que se

comprenda la diferencia que existe entre la cantidad de respuestas erróneas para ambos casos.



Como se aprecia el 58% del total de muestras en  $-90^\circ$  están en la categoría de 'Mal' mientras que en  $-45^\circ$  es de 45%.

Se utilizó la ponderación como medida de cuantificar porcentualmente al acierto y poder diferenciar claramente el porcentaje correcto y erróneo respectivo. Es decir, si el ángulo posee una nota de 100%, significaría que todos los participantes localizaron con exactitud que el sonido provino desde esa ubicación.



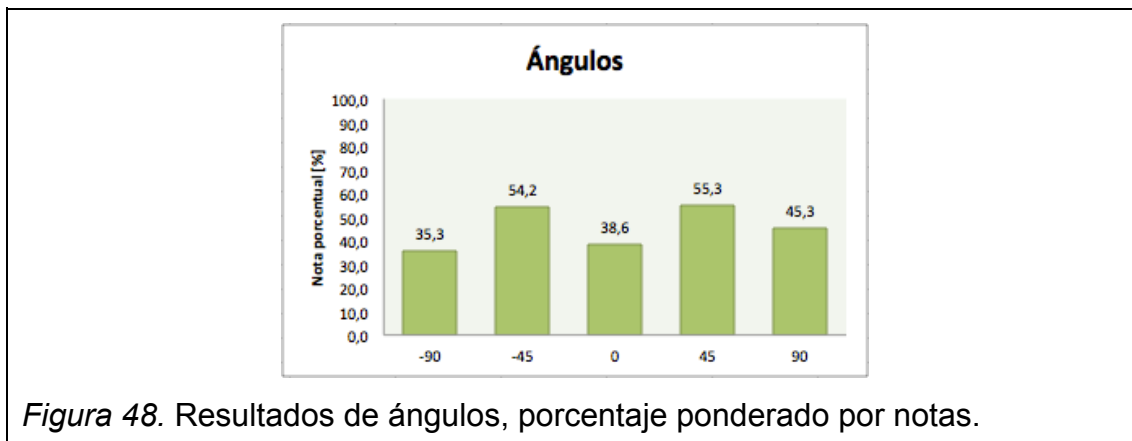


Figura 48. Resultados de ángulos, porcentaje ponderado por notas.

Mientras más nota porcentual posee el gráfico mostrado anteriormente, significará que este tiene mayor cantidad de respuestas marcadas como 'Bien' y/o 'Regular'. Dentro de los ángulos se puede notar que los ángulos de  $-45^\circ$  y  $45^\circ$  son los que predominan la mayor cantidad de grado de aciertos.

A continuación se presenta el conteo referente y el análisis porcentual de las salas:

Tabla 14. Conteo de resultados, salas.

RESUMEN SALAS				
	SECA	C. ROOM	S. CONF.	TEATRO
Mal	207	362	396	388
Regular	128	134	140	148
Bien	415	254	214	214
		Total muestras		750

Nota: El conteo de muestras ha sido realizado dentro de esta tabla, correspondientes a los resultados de las encuestas psicoacústicas.

Tabla 15. Resultados del porcentaje de muestras, salas.

RESUMEN SALAS				
	SECA	C. ROOM	S. CONF.	TEATRO
Mal	27,6	48,3	52,8	51,7
Regular	17,1	17,9	18,7	19,7
Bien	55,3	33,9	28,5	28,5
		Total muestras		100

Nota: El conteo de muestras ha sido realizado dentro de esta tabla, correspondientes a los resultados de las encuestas psicoacústicas.

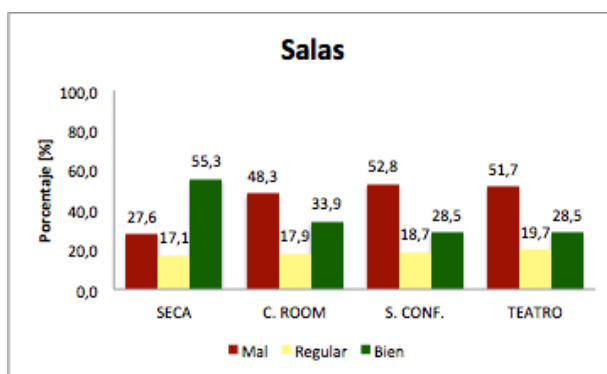


Figura 49. Generalización porcentual de resultados de encuestas, salas, porcentaje de muestras.

Es interesante el reconocer la cantidad de respuestas correctas que posee la sala seca dentro de estos resultados, esto nos indica la tendencia de que la reverberación influye directamente de modo negativo en la localización de sonidos.

Se comparará mediante gráficos circulares la Sala Seca y la Sala de Conferencias, para poder esclarecer el panorama de localización dentro de las salas.

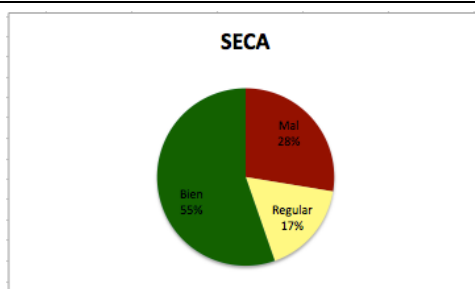


Figura 50. Global Sala Seca porcentaje de muestras.

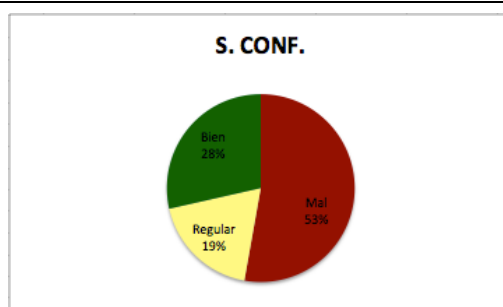
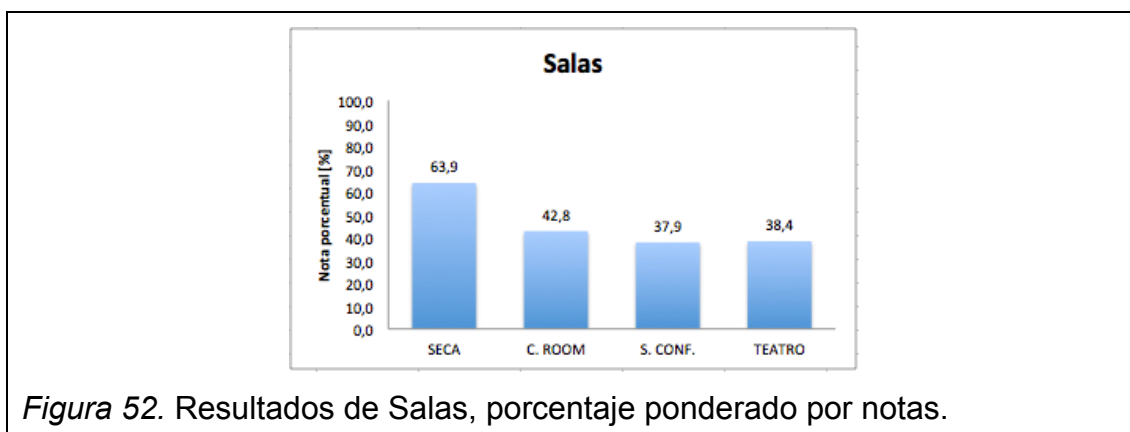


Figura 51. Global Sala de Conferencias porcentaje de muestras.

Las respuestas marcadas como 'Mal' se aprecian en la Sala Seca en un 28% mientras que en la Sala de Conferencias con 53%, esto quiere decir que difieren por un amplio rango de 25 puntos porcentuales.

A continuación se presenta las relaciones mediante las ponderaciones porcentuales mediante el otorgar una nota a cada sala para lograr identificar de mejor forma la tendencia.



Como se puede apreciar es notoria la diferencia entre las salas con reverberación y seca, por lo que la facilidad para localizar un sonido si depende directamente de la reverberación.

La siguiente variable general a analizar son los estímulos:

Tabla 16. Conteo de resultados, estímulos.

RESUMEN ESTÍMULOS										
Acierto	400 Hz	Violín	2500 Hz	Ruido Blanco	1000 Hz	Voz Hombre	Piano	Voz Femen	Ruido Rosa	Plato
Mal	166	149	142	125	149	115	138	122	122	125
Regular	51	40	50	62	48	57	54	69	52	67
Bien	83	111	108	113	103	128	108	109	126	108
Total muestras										300

*Nota:* El conteo de muestras ha sido realizado dentro de esta tabla, correspondientes a los resultados de las encuestas psicoacústicas.

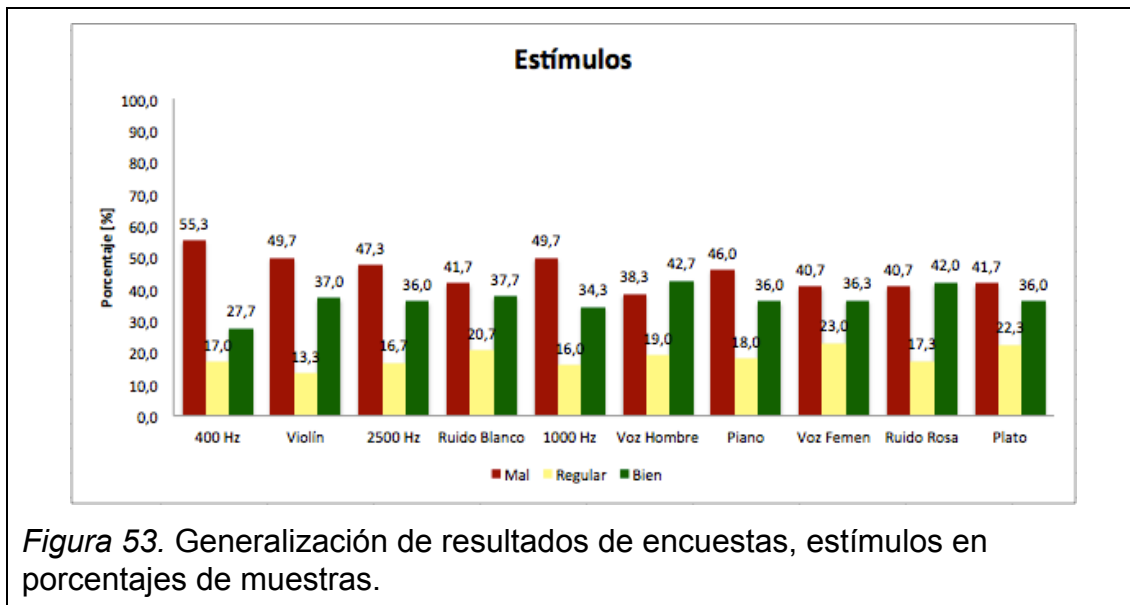
Visto esto de manera porcentual:

Tabla 17. Resultados de manera porcentual de las muestras, estímulos.

RESUMEN ESTÍMULOS										
Acierto	400 Hz	Violín	2500 Hz	Ruido Blanco	1000 Hz	Voz Hombre	Piano	Voz Femen	Ruido Rosa	Plato
Mal	55,3	49,7	47,3	41,7	49,7	38,3	46,0	40,7	40,7	41,7
Regular	17,0	13,3	16,7	20,7	16,0	19,0	18,0	23,0	17,3	22,3
Bien	27,7	37,0	36,0	37,7	34,3	42,7	36,0	36,3	42,0	36,0
										Total muestras 100

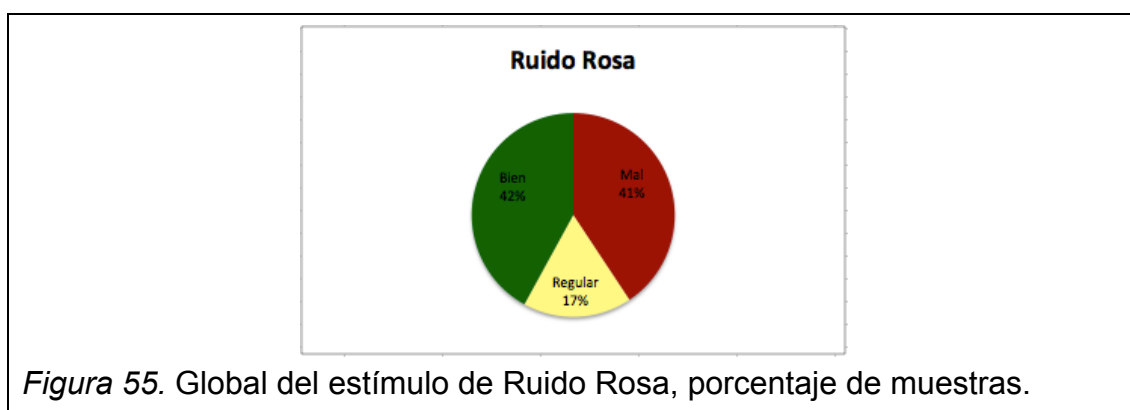
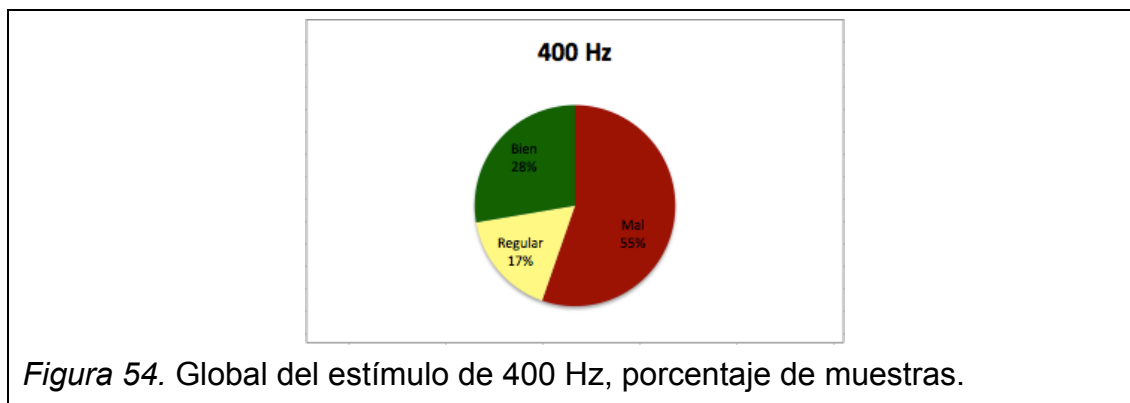
*Nota:* La relación porcentual del conteo de muestras ha sido realizado dentro de esta tabla, correspondientes a los resultados de las encuestas psicoacústicas.

En cuanto al resumen de los estímulos se podría decir que el primer estímulo, referente a 400 Hz tiene más respuestas incorrectas marcadas por los participantes.

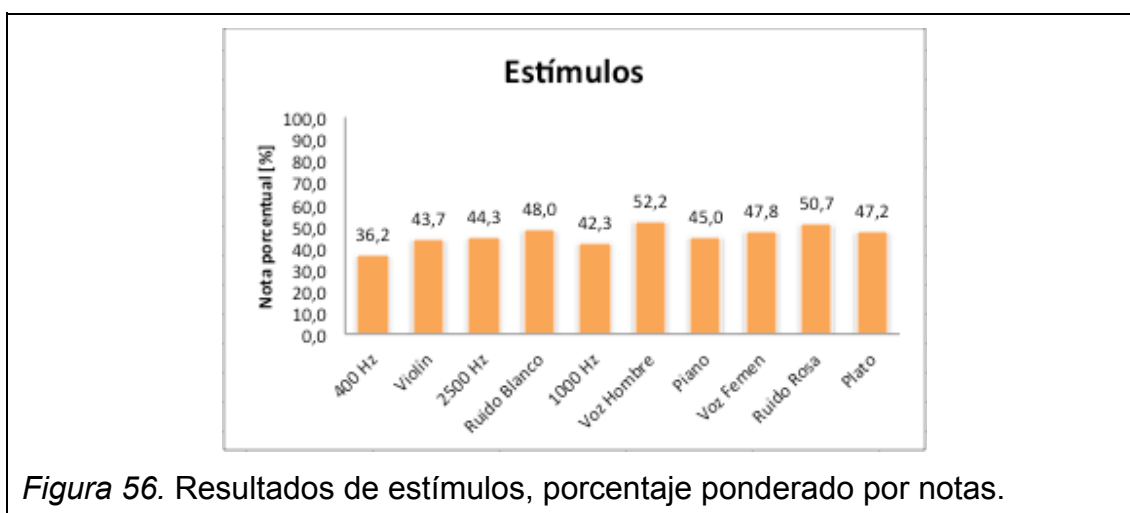


*Figura 53.* Generalización de resultados de encuestas, estímulos en porcentajes de muestras.

Como se puede observar los resultados mostrados entre los estímulos tienen una similitud y las diferencias no son exageradas, sin embargo para ilustrar más los 400 Hz en relación a otro estímulo se graficarán ambos.



Se utilizará la cuantificación por ponderación porcentual mediante la asignación de notas al acierto:



Como se aprecia, está claro que el estímulo de 400Hz es el que obtuvo más marcaciones incorrectas, esto pudo haberse dado a razón de que el escucha

logre acostumbrarse a la naturaleza de la prueba. Es también interesante notar que si bien no es muy acentuada la diferencia porcentual, los tonos puros tienen los valores más bajos.

Tras este análisis general es de interés relacionar otro tipo de variables a parte de los aciertos y el modo general.

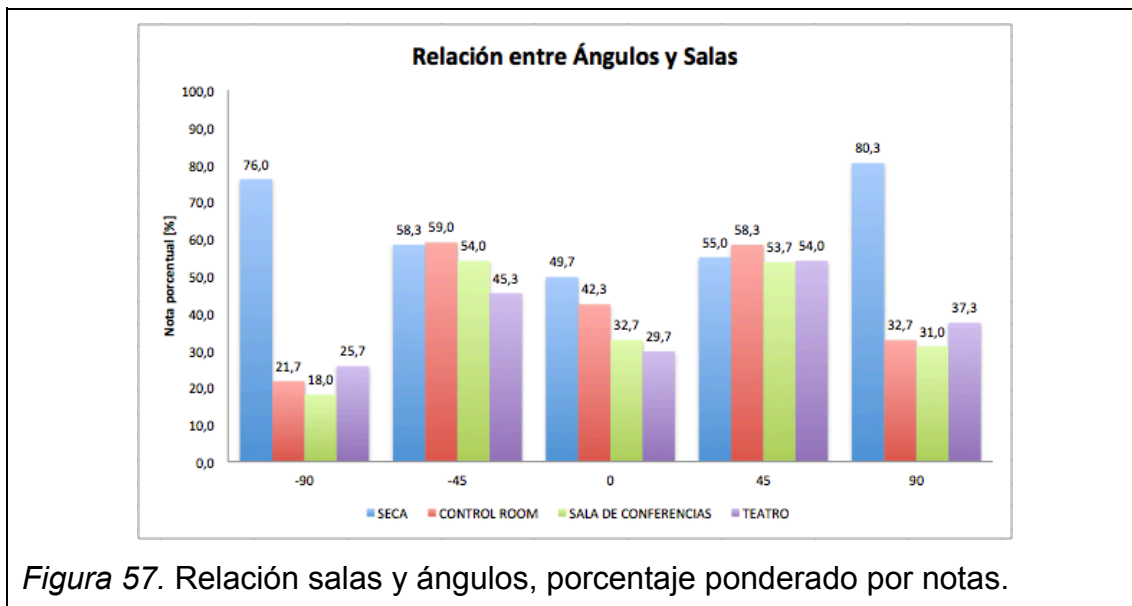
Por lo que en esta segunda parte del análisis se relacionarán a las salas con los estímulos, a los ángulos con las salas, y a los estímulos con los ángulos. Los resultados serán mostrados de manera porcentual directamente, obviando la parte del conteo.

Tabla 18. Relación de ángulos con salas, porcentaje de muestras.

		Relación ángulos - salas					
		Acierto	-90	-45	0	45	90
SECA	Mal	16,7	29,3	46,7	34,0	11,3	
	Regular	14,7	24,7	7,3	22,0	16,7	
	Bien	68,7	46,0	46,0	44,0	72,0	
CONTROL ROOM	Mal	71,3	32,0	48,7	28,7	60,7	
	Regular	14,0	18,0	18,0	26,0	13,3	
	Bien	14,7	50,0	33,3	45,3	26,0	
SALA DE CONFERENCIAS	Mal	76,7	35,3	58,0	32,7	61,3	
	Regular	10,7	21,3	18,7	27,3	15,3	
	Bien	12,7	43,3	23,3	40,0	23,3	
TEATRO	Mal	65,3	43,3	66,0	32,0	52,0	
	Regular	18,0	22,7	8,7	28,0	21,3	
	Bien	16,7	34,0	25,3	40,0	26,7	

*Nota:* Dentro de esta tabla se esclarece la relación entre ángulos y salas de modo porcentual.

En este gráfico es mucho más sencillo el marcar las tendencias y como la reverberación influye en el acierto de localización de los participantes. Se realizó la ponderación porcentual de las notas asignadas a los aciertos de las muestras, el cual se muestra a continuación:



En este gráfico se observa una influencia mucho más acentuada de la reverberación en la localización y cómo esta influye para que el acierto se vea cada vez más comprometido.

Dentro del gráfico se puede analizar que la cantidad de aciertos 'Bien' y/o 'regular' yacen dentro de la sala sin ningún tipo de reverberación, en cambio en el resto de salas se posee mayor grado de respuestas incorrectas por el grado de aciertos. Siendo esto importante para entender el comportamiento para los otros ángulos la localización es mucho más errática al incluir las reflexiones auralizadas.

Es también de importancia recalcar la cantidad de aciertos dentro de los ángulos  $-90^\circ$  y  $90^\circ$  dentro de la sala seca. Esto podría indicar que la tendencia de la localización es hacia el centro con salas reverberantes, o bien el escucha no comprendió de dónde provino exactamente la localización y marcó una respuesta de todas formas.

En el siguiente análisis se pondrá en cuestión la relación que los ángulos tienen con los estímulos. Se han agrupado los estímulos nuevamente dentro de las cuatro categorías principales (Tonos puros, Música, Ruido, Voz):

Tabla 19. Relación de ángulos con estímulo, porcentaje por muestras.

		Relación ángulos - Estímulos					
		Acierto	-90	-45	0	45	90
TONOS PUROS	Mal		58,5	43,1	55,9	38,5	46,7
	Regular		12,3	17,4	12,8	24,6	15,4
	Bien		29,2	39,5	31,3	36,9	37,9
MÚSICA	Mal		50,6	33,9	62,2	32,2	50,0
	Regular		16,7	21,7	8,9	26,1	16,1
	Bien		32,8	44,4	28,9	41,7	33,9
RUIDO	Mal		54,2	30,0	50,8	27,5	43,3
	Regular		13,3	25,8	15,8	23,3	16,7
	Bien		32,5	44,2	33,3	49,2	40,0
VOZ	Mal		65,0	24,2	44,2	25,8	38,3
	Regular		14,2	25,0	16,7	30,0	19,2
	Bien		20,8	50,8	39,2	44,2	42,5

*Nota:* Dentro de esta tabla se esclarece la relación entre ángulos y estímulos de modo porcentual.

En la figura 86 se aprecia de modo ponderado porcentual mediante la asignación de las notas para la relación entre ángulos y estímulos, basado en un valor máximo posible de 100%.

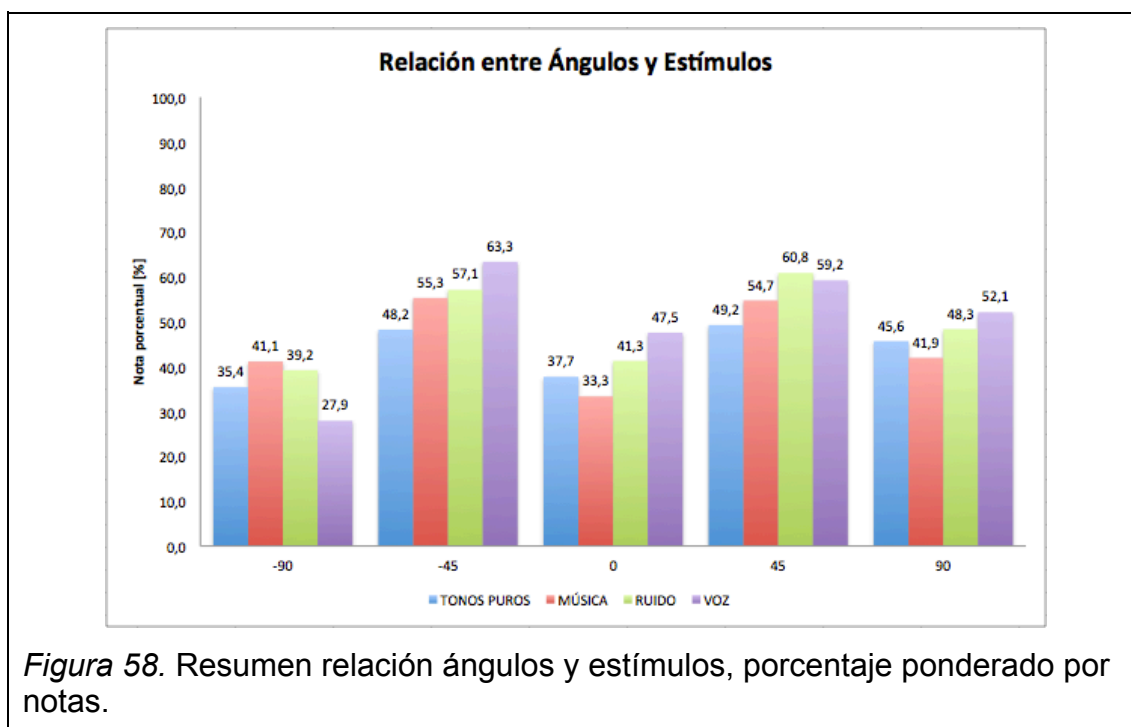


Figura 58. Resumen relación ángulos y estímulos, porcentaje ponderado por notas.



Tras este análisis se denota que los tonos puros de modo general tienen más respuestas incorrectas, a pesar de que existió participantes con entrenamiento auditivo. Esto pudo darse por la dificultad de reconocer sonidos sin ninguna cantidad de armónicos, contrario al ruido rosa o blanco los cuales tienen una mayor cantidad de espectro frecuencial. Coincide que estos últimos sonidos poseen mas cantidad de aciertos dentro de este estudio.

En el caso de la voz, con excepción del ángulo de  $-90^\circ$ , posee una gran cantidad de aciertos en la localización. Esto puede darse por la familiarización del ser humano con el rango frecuencial.

En cuanto al análisis de salas con los estímulos se logra denotar en la siguiente tabla:

Tabla 20. Relación entre estímulos y salas, porcentaje de muestras.

		Relación estímulos - salas				
		Acierto	TONOS P.	MÚSICA	RUIDO	VOZ
SECA	Mal	34,7	28,0	20,0	24,0	
	Regular	16,9	16,0	16,7	19,3	
	Bien	48,4	56,0	63,3	56,7	
CONTROL ROOM	Mal	54,2	51,1	42,0	41,3	
	Regular	15,6	17,3	20,0	20,0	
	Bien	30,2	31,6	38,0	38,7	
SALA DE CONFERENCIAS	Mal	56,4	52,9	49,3	50,7	
	Regular	13,3	16,4	21,3	24,7	
	Bien	30,2	30,7	29,3	24,7	
TEATRO	Mal	57,8	51,1	53,3	42,0	
	Regular	18,7	21,8	18,0	20,0	
	Bien	23,6	27,1	28,7	38,0	

*Nota:* Dentro de esta tabla se esclarece la relación entre estímulos y salas de modo porcentual.

Con la respectiva gráfica ponderada porcentualmente mediante la asignación de notas a los aciertos:

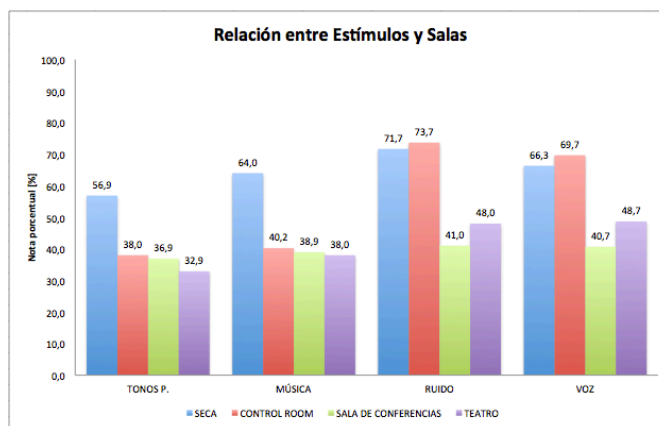


Figura 59. Relación Salas - Estímulos, porcentaje ponderado por notas.

Dentro de la gráfica se puede denotar mucho más la influencia que tiene el ruido y la voz en el Control Room dentro de la localización en esta prueba, y tenuemente se puede notar una tendencia correcta en el teatro de estos mismos estímulos.

La última relación se refiere a las salas, ángulos y estímulos relacionados entre sí, sin embargo esta se representará mediante un gráfico radial ponderado porcentualmente mediante la asignación de notas a los aciertos.

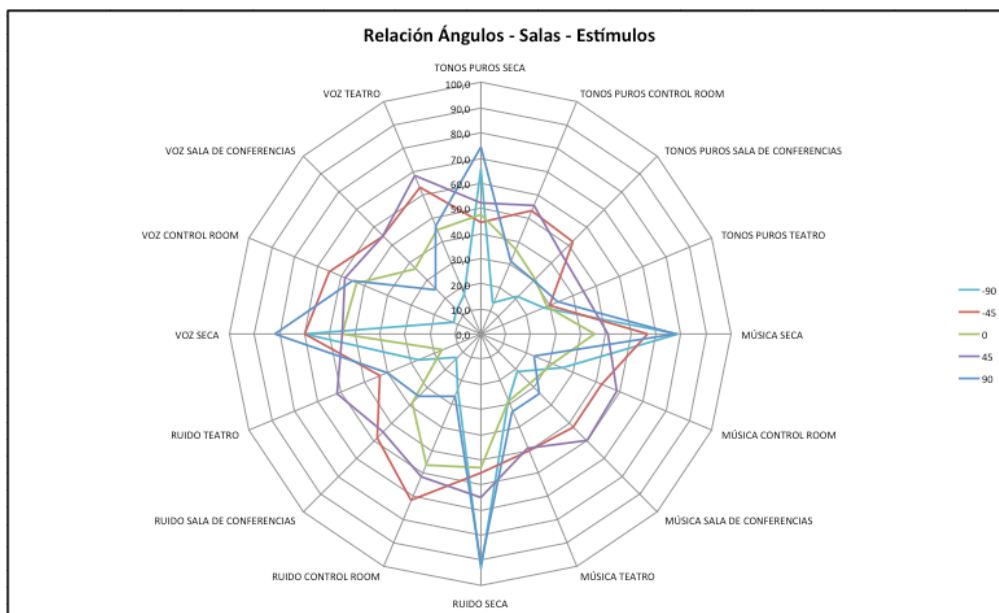


Figura 60. Relación entre ángulos, salas y estímulos, porcentaje ponderado por notas.

Para poder analizar este gráfico es importante reconocer que si el resultado es más circular las respuestas son equilibradas, sea sala seca o alguna reverberante tendrá las respuestas similares, caso de  $-45^\circ$  y  $45^\circ$ . En el caso de ser como una estrella, significará que la tendencia es a que el número de aciertos se concentra más en una sala, como se puede ver  $-90^\circ$  y  $90^\circ$  en la sala seca. En el caso del ángulo de  $0^\circ$  el resultado arrojado es interesante dado que no posee una forma en específico, lo cual representa que algunos participantes lo escuchaban y marcaban sin embargo otros no lo localizaron y marcaron la respuesta aleatoriamente.

Para el efecto de tener un resumen desde otra perspectiva, se realizó la gráfica mediante puntos de dispersión para tener claro el panorama en cuanto a la diferencia. Se tomó en cuenta a las respuestas marcadas '*Regular*' como '*Mal*', para tener un grado más limitado de respuestas correctas.

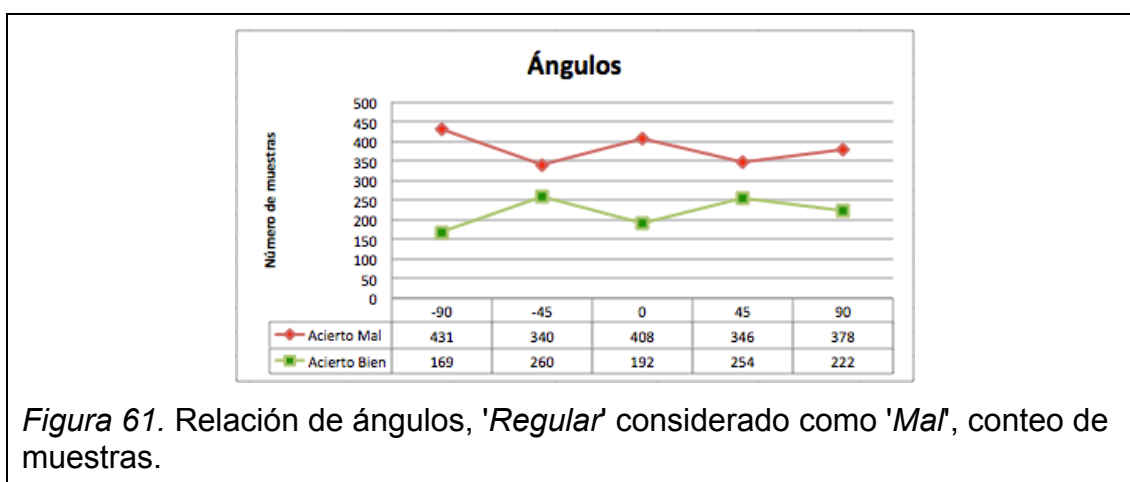


Figura 61. Relación de ángulos, '*Regular*' considerado como '*Mal*', conteo de muestras.

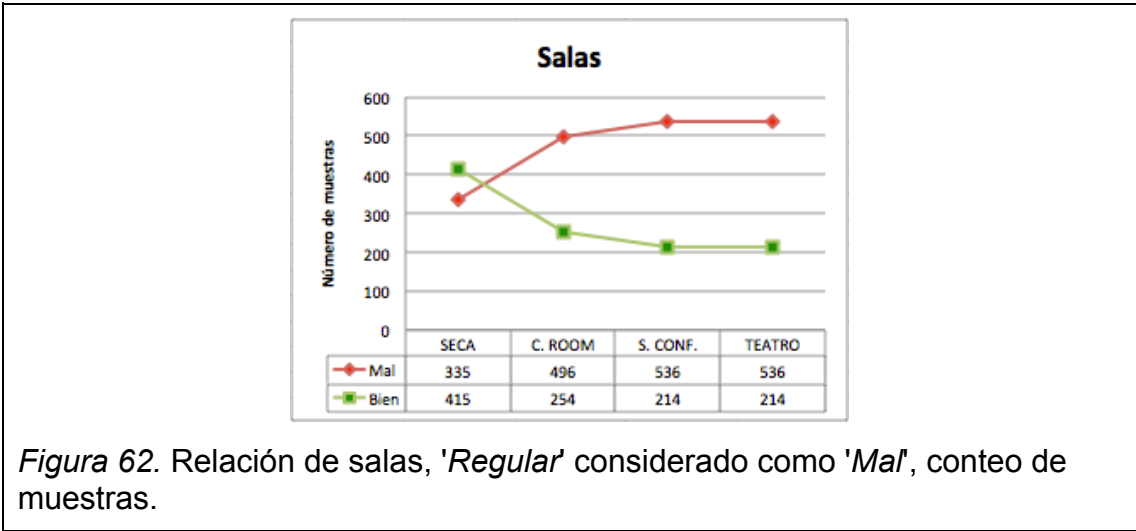


Figura 62. Relación de salas, 'Regular' considerado como 'Mal', conteo de muestras.

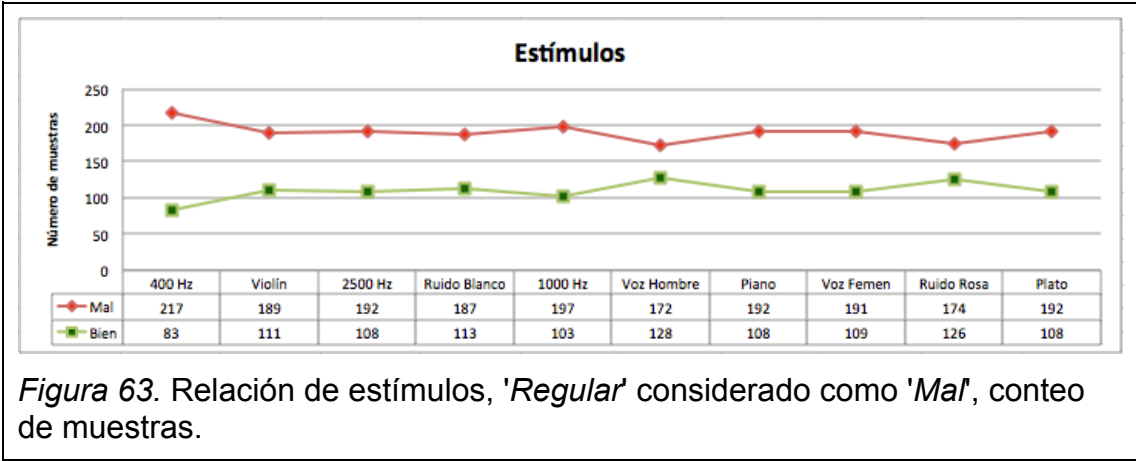


Figura 63. Relación de estímulos, 'Regular' considerado como 'Mal', conteo de muestras.

También se realizó la inversa, asignando las respuestas marcadas 'Regular' al campo de 'Bien', de modo que se obtiene los siguientes resultados:

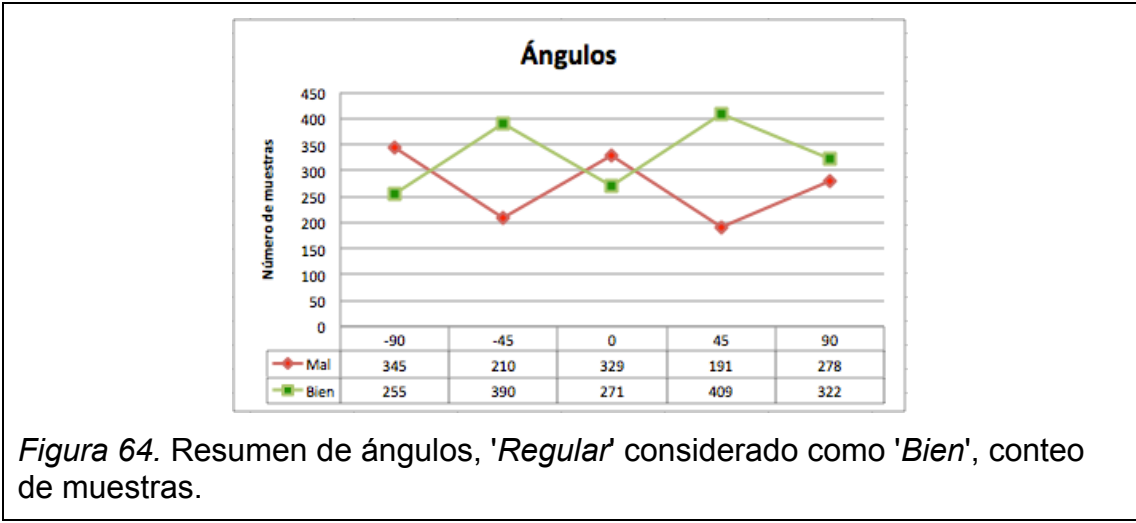
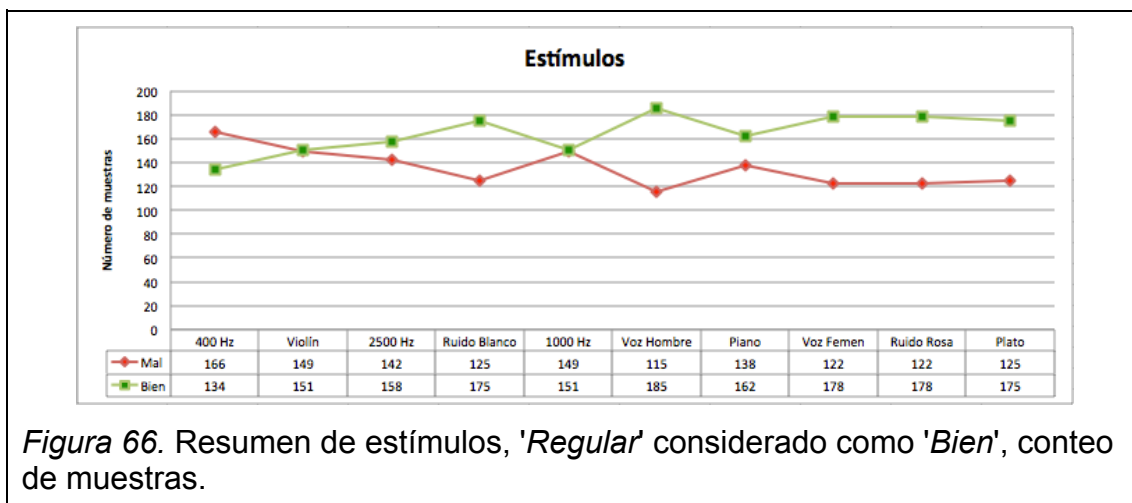
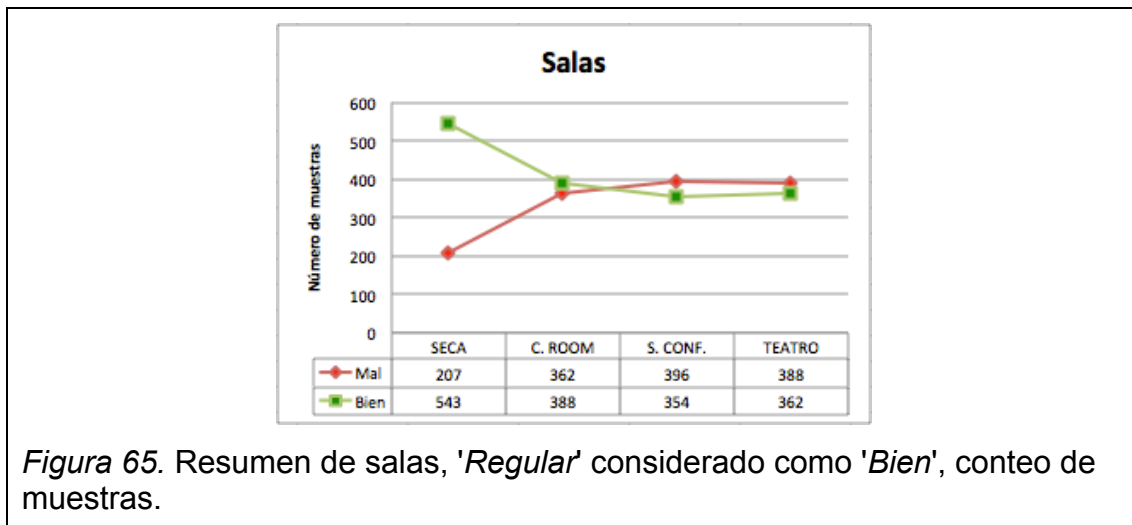


Figura 64. Resumen de ángulos, 'Regular' considerado como 'Bien', conteo de muestras.



## 5. ANALISIS ECONÓMICO

En el caso de este proyecto de titulación, el análisis económico se refiere a valores que representarán tres aspectos, siendo estos: horas de alquiler de equipamiento, horas laborales de mano de obra y transportación de equipos. Los precios son tomados tras un estudio realizado acerca de las empresas acústicas en el sector y precios fijados de salarios dentro del país de análisis.

Dentro de lo que respecta al alquiler del equipamiento se ha desarrollado el cálculo en base a la depreciación que este tiene al ser usado dentro de los experimentos. Para esto se utilizó el método de cálculo de depreciación de la línea recta, el cual consta de dividir el valor total del activo para su vida útil, en el caso del equipamiento acústico se consideró una vida útil de cinco años, según el diario oficial de la federación, por ser equipamientos electrónico - tecnológicos. (SEGOB, 2016). Es importante recordar que se tomará en cuenta dentro de esta depreciación al sonómetro, la fuente dodecaédrica y el generador de ruido, incluidos sus accesorios.

En cuanto a los valores salariales de la mano de obra se consideró que a raíz del comunicado oficial emitido por la '*Dirección de comunicación social*' del ministerio del trabajo de Ecuador que el sueldo básico sería de \$366 dólares americanos para el año 2016. Por lo que dentro de este estudio se considerará a este valor como salario para realizar los cálculos de costos para todo el talento humano. Cabe recalcar que esta aproximación se debe considerar como el costo mínimo, los valores podrían ser mayores a los indicados. Las personas que se tomaron en cuenta son dos técnicos acústicos encargados de realizar las mediciones correspondientes, un programador, y un investigador y analítico que realice las pruebas con los individuos y se encargue de analizar los resultados.

Para el tiempo que se puso en consideración, estos corresponden a una semana de medición acústica, una semana de programación y un mes de investigación y análisis.

Para esto se ha considerado que dentro de la duración práctica, transporte, desarrollo de software e implementación de las pruebas psicoacústicas los valores que a continuación se revelan mediante un gráfico que muestra los costos económicos tomados en cuenta:

Tabla 21. Desglose económico total.

Detalle	Precio total equipamiento	Vida útil (Años)	Depreciación /costo anual	Depreciación /costo diaria	Costo de uso TOTAL
Sonómetro Cesva SC310 (Mas tripode y calibrador.)	\$ 7.058,97	5	\$ 1.411,79	\$ 3,87	\$ 27,08
Fuente Cesva BP012 (Mas generador de ruido y pedestal)	\$ 7.626,64	6	\$ 1.271,11	\$ 3,48	\$ 24,38
Transportación de equipamiento	-	-	-	-	\$ 150,00
Técnicos acústicos			\$ 8.784,00	\$ 24,07	\$ 168,46
Técnico de programación			\$ 4.392,00	\$ 12,03	\$ 84,23
Investigador y análisis de resultados			\$ 4.392,00	\$ 12,03	\$ 373,02

*Nota:* Los resultados mostrados corresponden al desglose de lo referente a horas de alquiler de equipamiento, mano de obra y transportación.

Siendo el total de costo fijado para la realización de este estudio en 827 dólares americanos con 16 centavos sin la inclusión del '*Impuesto sobre el valor agregado*'.

Tabla 22. Resumen del costo total.

Subtotal	\$827,16
IVA 14%	\$115,80
<b>TOTAL</b>	<b>\$942,97</b>

*Nota:* Se muestran los totales mas el Impuesto sobre el Valor Agregado.

## 6. PROYECCIONES

En cuanto a los estudios futuros que pueden nacer a partir de este trabajo, son muchos dado que es un tema que abarca muchos temas científicos y tecnológicos. Las pruebas psicoacústicas que pueden ser realizadas podrían abarcar los otros dos ejes no considerados en este trabajo, siendo éstos distancia y elevación.

Los estudios podrían desembarcar dentro del audio tridimensional para videojuegos, películas y aplicaciones móviles mediante audífonos, en donde la localización de sonidos es cuestión primordial.

Intrínsecamente también se podría relacionar a la localización de sonidos con la ubicación visual y analizar hasta qué punto el ser humano es capaz de identificar que la fuente sonora provino de un determinado gráfico. Es decir, podría resultar interesante el indagar la conexión que tiene el cerebro respecto al sonido con la imagen, dentro de los de los tres ejes de localización sonora.

En el caso de los ángulos, este estudio abarcó la parte frontal del azimut por razones de duración de la encuesta. Sin embargo, en investigaciones posteriores se podría abarcar los 360° del azimut mediante la implementación de orejas en el maniquí, de este modo se puede tener una respuesta más global de todas las direcciones de localización dentro del eje horizontal.

Un ámbito de trabajo independiente al realizado podría ser el cambio de percepción en la localización mediante procesamiento digital de señales. Por ejemplo, a través de un sensor y audífonos que identifiquen la posición de la cabeza respecto a la fuente sonora fija y que al girar la cabeza varíe la localización y por lo tanto la percepción sonora de la misma.



## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tras el análisis estadístico general realizado en cuanto a los ángulos de  $90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $-90^\circ$  existe resultados más erráticos en comparación con los de  $-45^\circ$  y  $45^\circ$ . Esto indica que es complicado tener un detalle específico para la localización dentro del azimut, es decir la mayoría de personas dentro de la encuesta identifican si el sonido viene de la izquierda o la derecha pero específicamente el ángulo desde donde proviene.

Se recomienda que se realice la prueba con una mayor muestra de participantes y así aminorar la incertidumbre. De ese modo es posible tener datos más significativos para el estudio.

En cuanto a los resultados entre la sala de Control Room o Sala pequeña y Sala de Conferencias o Sala mediana, al tener niveles de reverberación casi idénticos, es interesante el notar que la Sala de Conferencias posee mayor cantidad de resultados erráticos en la prueba de localización. Esto puede darse por las condiciones geométricas de la sala y la cantidad de difusión sonora que se tiene dentro de la Sala de Conferencias.

Es importante reconocer que en el tono de 400 Hz la tendencia es a errar. Esto podría darse por ser el primer estímulo reproducido dentro de la prueba y el participante aún no se familiariza con la naturaleza de las preguntas ni los sonidos, de modo que en estudios futuros se debería cuidar mucho más el acondicionar al escucha para la prueba. En el análisis comparativo se logra identificar que sumando el '*Regular*' con '*Bien*', los resultados de '*Mal*' son superiores en todas las salas.

La percepción es más acertada en los sonidos sin reverberación o sin ser auralizados. A pesar de que las respuestas fueron incorrectas en las salas con alto índice reflectivo, todas coincidían en tener un nivel elevado de más de 1 segundo de tiempo de reverberación en todo su rango frecuencial. Para estudios futuros se podría tomar en cuenta agregar salas con reverberación

baja y reverberación media con TR60 de 0,4 y 0,8 segundos aproximadamente, para de esta forma comparar de forma independiente salas con diferente tamaño y reverberación.

Al momento de analizar los resultados marcados por el participante de modo independiente por encuesta, se percibe que el escucha identifica la tendencia en angulación de los estímulos, mediante la relación entre los sonidos anteriores y posteriores. A pesar de que muchas de estas respuestas no llegaban a situarse dentro del rango '*Bien*' o '*Regular*', es importante reconocer que si identifican que un ángulo es mas '*abierto*' que otro de modo correcto.

Los estímulos poseen menos impacto dentro de la localización de fuentes sonoras en el eje horizontal que la cantidad de reverberación con la cual la prueba es realizada, es decir estos podrían ser de diferente naturaleza y las respuestas no variarán significativamente contrario a lo que sucede al variar la reverberación en donde la localización se ve notoriamente afectada.

Los tonos puros tienden a tener más dificultad al momento de ser percibidos en el ángulo correcto, esto podría darse por la falta de sonidos sin armónicos dentro de la naturaleza y el entorno común del humano. Así mismo, en referencia a la voz y al ruido rosa o blanco, estas fueron mejor identificadas dentro del azimut, sea por el espectro frecuencial amplio que a su vez posee información de las frecuencias más importantes de la palabra.

En algunos participantes en los cuales sus respuestas no fueron tomadas, se notó un desgano por realizar la prueba a pesar de haber accedido a hacer la misma. Se recomienda que en estudios futuros de psicoacústica los escuchas sean remunerados económicamente para de ese modo tengan un incentivo físico y las pruebas sean realizadas lo más conscientemente posible.

En el caso de las personas que poseían entrenamiento auditivo, en comparación con aquellas que no tenían, se denota una leve diferencia en el

acierto de las salas. Dentro de los sonidos sin reverberación alguna los participantes con oído entrenado tuvieron más respuestas correctas que quienes no poseen entrenamiento auditivo. En cuanto a la reverberación ambos mostraron una tendencia que podría ser considerada dentro del mismo análisis.

Se recomienda para los próximos estudios el realizar una normalización espectral mediante plataformas digitales y filtros FIR, de los audífonos a utilizar en la prueba. Esto es trascendental para disminuir la incertidumbre dentro de estudios de índole psicoacústica.

Dentro de este estudio se puede apreciar que la reverberación afecta a la localización sonora. Sin embargo, es probable que un poco de reverberación dentro de un recinto ayude a identificar la posición de un sonido. Se recomienda ampliar este estudio para considerar estos factores acústicos.

## REFERENCIAS

- Arias, C. & Ramos, O. (2003). Audición espacial en ambientes reverberantes. *Revista Interamericana de Psicología*. 37(2). 373-378.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2008). *UNE en ISO 3382: Medición de parámetros acústicos en recintos*. Madrid, España: AENOR.
- Beranek, L. (2006). Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 120(3), 1399. doi:10.1121/1.2221392
- Boothroyd, A. (1997). Auditory Development of the Hearing Child. *Scand Audiol*. 26(46), 9-10.
- Boschi, C. (2008). Método para medir el tiempo de reverberación en recintos. *Proyecto Leonardo*. 4(3).1-10
- Brown, A., Stecker, G. & Tollin, D. (2014). The Precedence Effect in Sound Localization. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*. 16(1). 1-28. doi:10.1007/s10162-014-0496-2
- Cetta, P. (2003). Modelos de localización espacial del sonido y su implementación en tiempo real. *Altura Timbre-Espacio*.
- Cremer, L. (1977). Law of the first wave form. *Journal of the Audio Engineering Society*. 25(6), 420-422.
- D' Aula, E., Zamora, J. (2008). Índice de la calidad acústica de la arquitectura interior. *Universidade de Coimbra*.

- Freyman, R., Clifton, R. & Litovsky, R. (1991). Dynamic processes in the precedence effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*. doi:10.1121/1/401955
- Guiguere, C. & Sharon, A. (1993). Sound localization: Effects of reverberation time, speaker array, stimulus frequency, and stimulus rise/decay. *The Journal of the Acoustical Society of America*. doi:10.1121/1.408206
- Haas, H. (1949). The Influence of a Single Echo in the Audibility of Speech. *Journal of the Audio Engineering Society*. 20(2), 146-159.
- Hammershøi, D., & Møller, H. (2002). Basic Methods for Recording, Synthesis, and Reproduction. *Communication Acoustics*. doi:10.1007/3-540-27437-5\_9
- Huang, J., Ohnishi, N., & Sugie, N. (1997). Sound localization in reverberant environment based on the model of the precedence effect. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 46(4), 842-846. doi:10.1109/19.650785
- Hüg, M., Arias, C. (2009). Studies about auditory localization in early stages of the child development. *Revista latinoamericana de Psicología*. 41(2), 225-242.
- Hüg, M., Arias, C., Tommasini, F., & Ramos, O. (2014). Auditory localization and precedence effect: An exploratory study in infants and toddlers with visual impairment and normal vision. *Research in Developmental Disabilities*. 35(9), 2015-2025. doi:10.1016/j.ridd.2014.04.022
- Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. México: Alfaomega.

- Litovsky, R. (1994). Sound localization precision under conditions of the precedence effect: Effects of azimuth and standard stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 96(2), 752. doi:10.1121/1.411390
- Litovsky, R. & Colburn, S. (1999). The precedence effect. *Journal Acoustics Society of America*. 106(4).
- Litovsky, R., & Shinn-Cunningham, B. (2001). Investigation of the relationship among three common measures of precedence: Fusion, localization dominance, and discrimination suppression. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 109(1), 346-358. doi:10.1121/1.1328792
- Massachusetts Institute of Technology. (s.f). *Introduction to frequency domain processing*. Massachusetts, USA: Department of mechanical engineering.
- Macpherson, E. & Middlebrooks, J. (2002). Listener weighting of cues for lateral angle: The duplex theory of sound localization revisited. *The Journal of the Acoustical Society of America*. doi:10.1121/1.1471898
- Miyara, F. (2003). *Acústica y sistemas de sonido*. Buenos Aires, Argentina: UNR editorial.
- Rakerd, B. & Hartman, W. (2005). Localization of noise in a reverberant environment. *Auditory Signal Processing*.
- Reilly, A. & McGrath, D. (1995). Convolution Processing for Realistic Reverberation. *Audio Engineering Society*. 3977(13).
- Secretaría de Gobernación. (2016). Parámetros de estimación de vida útil. Diario oficial de la federación. Recuperado de [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012)

- Oppenheim, A. Willsky, A. Young, I. & Hernández, G. (1994). *Señales y sistemas*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Ordoyo, F. (2000). Estudio comparativo de las técnicas estéreo y la técnica binaural en la grabación de ruido interior de vehículos. *TecniAcústica*.
- Osgood, B. (s.f.). *The Fourier Transform and its Applications*. Estados Unidos: Stanford University.
- Tommasini, F., Araneda, M. & Ramos, O. (2010). Auralización en tiempo real: Implementación del Modelo del oyente. *2do Congreso Internacional de Acústica UNTREF*.
- Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (s.f). *Fast Fourier Transform*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Wallach, H., Newman, E. B., & Rosenzweig, M. R. (1949). A Precedence Effect in Sound Localization. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 21(4), 468. doi:10.1121/1.1917119
- Wightman, F. & Kistler, D. (1992). The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization. *The Journal of the Acoustical Society of America*. doi:10.1121/1.402445
- Young, R. (1959). Sabine reverberation equation and Sound Power Calculations. *The Journal Of the Acoustical Society of America*. 31(7).

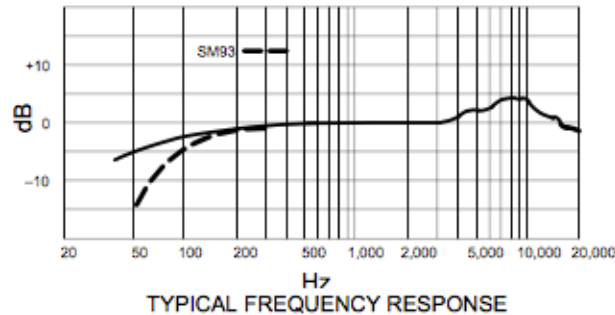
## **ANEXOS**



## ANEXO 1. Especificaciones técnicas de Shure SM93.

SPECIFICATIONS	WL93 MICROPHONE (with standard test circuit shown in Figure 3)	SM93 MICROPHONE (with preamplifier)
Type	Condenser (electret bias)	Condenser (electret bias)
Frequency Response (Figure 4)	50 to 20,000 Hz	80 to 20,000 Hz, 12 dB/octave rolloff below 100 Hz
Polar Pattern	Omnidirectional, uniform with frequency	Omnidirectional, uniform with frequency
Output Impedance	3000 $\Omega$	Rated at 150 $\Omega$ (90 $\Omega$ actual) Recommended minimum load impedance: 800 $\Omega$ (May be used with loads as low as 150 $\Omega$ with reduced clipping level)
Output Level (1 Pascal = 94 dB SPL)	Open Circuit Voltage: -38 dBV/Pa (13 mV)	Open Circuit Voltage: -43 dBV/Pa (7.0 mV)
Output Clipping Level (at 1,000 Hz)	0.25 V at 120 dB	-18 dBV (0.13 V) minimum
Total Harmonic Distortion	Less than 1% at 120 dB	Less than 1% at 120 dB
Maximum SPL	120 dB	120 dB
Dynamic Range (maximum SPL to A-weighted noise level)	102 dB	98 dB
Output Noise (equivalent SPL)	18 dB typical, A-weighted	22 dB typical, A-weighted 26 dB, weighted per DIN 45 405
Hum Pickup (electromagnetic)	N/A	-4 dB equivalent SPL in a 1 mOe field (60 Hz)
Signal-to-Noise Ratio	76 dB at 94 dB SPL (IEC 651)	72 dB at 94 dB SPL (IEC 651)
Polarity	Positive pressure on microphone diaphragm produces positive voltage on pins 3 and 4 with respect to pin 1 (ground)*	Positive pressure on microphone diaphragm produces positive voltage on pin 2 relative to pin 3 of preamplifier output cable connector
Recommended Operating Voltage	2 to 10 V; 5 V nominal (pin 2 to pins 3 and 4)	11 to 52 Vdc phantom. Protected against reverse voltage application
Current Drain	40 mA typical	0.33 mA
Environmental Conditions	Operating Temperatures: -18° to 57° C (0° to 135° F) Storage Temperatures: -29° to 74° C (-20° to 165° F)	Operating Temperatures: -18° to 57° C (0° to 135° F) Storage Temperatures: -29° to 74° C (-20° to 165° F)
Cable	Black 1.27 m (4.17 ft), attached, two-conductor, shielded, terminated by miniature connector type TA4F (WL93T: Tan 1.27 m [4.17 ft])	Black 1.27 m (4.17 ft), attached, two-conductor, shielded, terminated by miniature connector type (TA4F)
Case	Microphone: Black ABS thermoplastic case with stainless-steel-mesh grille	Microphone: Black ABS thermoplastic case with stainless-steel-mesh grille Preamplifier: Steel case with non-reflective black finish, black-chrome belt clip
Net Weight	Microphone: 16 g (0.57 oz)	Microphone: 16 g (0.57 oz) Preamplifier: 118 g (4.17 oz)

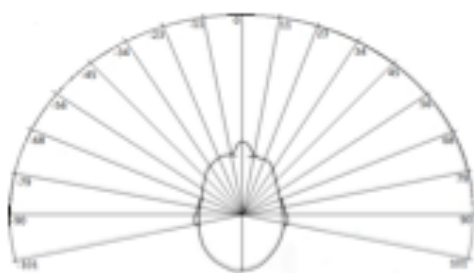
\*Produces positive voltage at pin 2 of Shure L4/EC4 wireless receiver three-pin connector.



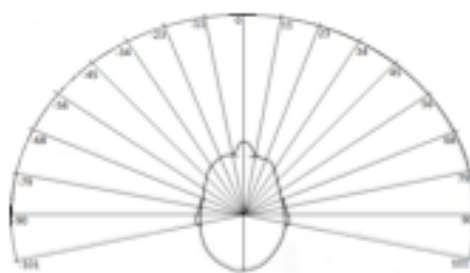
## ANEXO 2. Página de encuesta.

### 1. Estimulo: 400 Hz

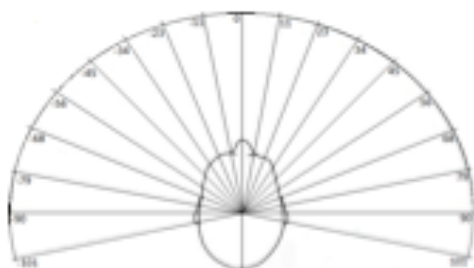
A) Tipo de reverberación: Seca



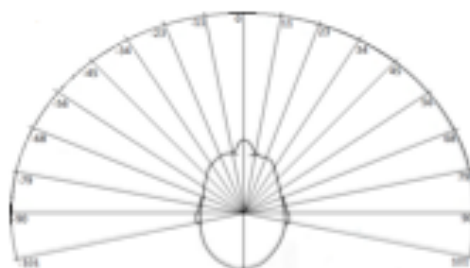
Seca 1



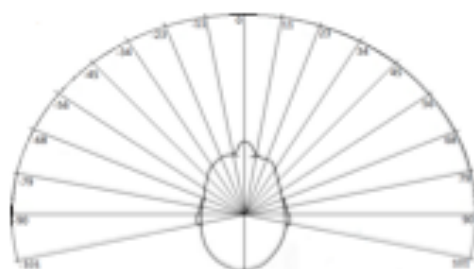
Seca 2



Seca 3



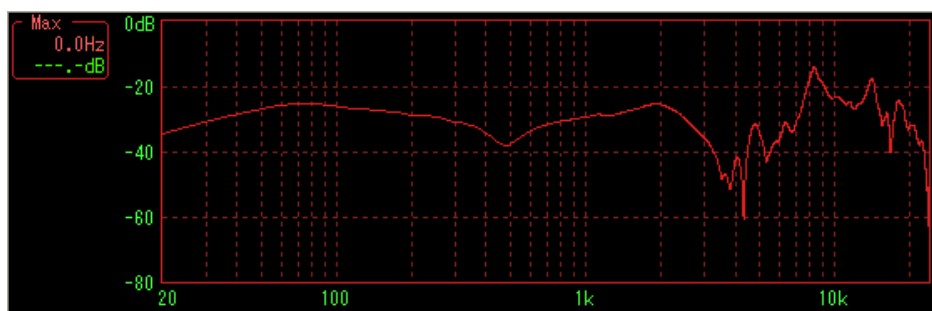
Seca 4



Seca 5

### ANEXO 3. Especificaciones de audífonos Panasonic RP HTX7.

Drive Unit (diam. in mm)	40
Impedance (ohm/1kHz)	40
Sensitivity (dB/mW)	99
Max. Input (mW)	1000
Frequency Response (Hz-kHz)	7-22
Cord Length (ft./m.)	3.9/1.2
Plug Adaptor (6.3mm in diam.)	Yes
Plug Type	Gold
Magnet Type	Neodymium
Wide Head-band	Yes
Large Foam Earpads	Yes
Single-side Cord	Yes
Ergonomic Design	Yes
Single-side Monitoring	Yes
Color	Black
Weight(g./oz.) without Cord	153/5.4



Respuesta de frecuencia Panasonic RP HTX7