



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“VALIDACIÓN MEDIANTE ÍNDICES
ACÚSTICOS DE MATERIAL DE VOZ PARA
MEDIR INTELIGIBILIDAD”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA MECÁNICA ELECTRICISTA**

PRESENTA:

GIZELLE AYLIN SALINAS ARRUTI

ASESOR: SANTIAGO JESÚS PÉREZ RUIZ



**UNAM
CUAUTITLÁN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U.N.A.M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

"Validación mediante índices acústicos de material de voz para medir inteligibilidad".

que presenta la pasante: Gizelle Aylin Salinas Arruti
con número de cuenta: 9136429-2 para obtener el título de :
Ingeniera Mecánica Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 30 de Octubre de 2006.

PRESIDENTE

Ing. José Luis Rivera López

VOCAL

M.C. Santiago Jesús Pérez Ruíz

SECRETARIO

Ing. José Antonio Barrera Rodríguez

PRIMER SUPLENTE

Ing. Angel Hilario García Bacho

SEGUNDO SUPLENTE

Ing. Víctor Hugo Alvarez Juárez

AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a DIOS por haber puesto en mi camino personas maravillosas
que me guiaron por el mágico mundo de la Acústica.*

Gracias a todos ustedes por confiar en mi y estar a mi lado en este trayecto del viaje

Maestro Santiago

*Usted es especialmente maravilloso... gracias por ser tan paciente y
compartir conmigo su sabiduría además de brindarme su amistad... mi eterna
gratitud y cariño.*

Sin usted no hubiese podido cumplir este sueño.

A todo el equipo del Laboratorio de Acústica

*Ha sido maravilloso conocerlos y tenerlos cerca de mi compartiendo sus
conocimientos y sobre todo su amistad.*

Mami

Eres ... lo más hermoso de mi vida... gracias a ti yo estoy aquí...

TE AMO

Titi

Mi amada Titi gracias por ser parte de mi vida y mi gran motivo.

DIOS los bendiga.

INDICE

| | |
|--|------------|
| PROLOGO | II |
| INTRODUCCIÓN..... | III |
| CAPITULO 1 | 6 |
| FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA..... | 6 |
| 1.1 EL SONIDO | 6 |
| 1.1.1 PROPAGACIÓN DEL SONIDO..... | 6 |
| 1.1.2 PRESIÓN SONORA..... | 7 |
| 1.1.3 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA SONORA | 8 |
| 1.1.4 INTENSIDAD SONORA | 8 |
| 1.1.5 IMPEDANCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA | 9 |
| 1.1.6 CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS SONORAS | 10 |
| 1.2 ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA..... | 12 |
| 1.2.1 REFLEXIÓN DEL SONIDO..... | 12 |
| 1.2.2 ABSORCIÓN DEL SONIDO Y COEFICIENTE DE ABSORCIÓN..... | 13 |
| 1.2.3 DIFRACCIÓN..... | 15 |
| 1.2.4 REVERBERACIÓN..... | 15 |
| 1.2.5 PARÁMETROS SUBJETIVOS QUE DEFINEN LA CALIDAD | |
| ACÚSTICA DE UN RECINTO..... | 16 |
| 1.3 PSICOACÚSTICA | 18 |
| 1.3.1 SISTEMA AUDITIVO | 18 |
| 1.3.2 UMBRALES AUDITIVOS..... | 20 |
| 1.3.3 RECEPCIÓN BINAURAL | 20 |
| 1.3.4 EFECTO DE PRECEDENCIA..... | 21 |
| CAPITULO 2 | 23 |
| MATERIAL DE VOZ | 23 |
| 2.1 PRODUCCIÓN Y PERCEPCIÓN DEL HABLA..... | 23 |
| 2.1.1 PRODUCCIÓN DEL HABLA | 23 |
| 2.1.2 PERCEPCIÓN DEL HABLA | 24 |
| 2.1.3 NIVELES DE PROCESAMIENTO Y PERCEPCIÓN DEL HABLA..... | 25 |
| 2.1.4 HEMISFERIOS CEREBRALES | 26 |
| 2.2 MATERIAL DE VOZ | 28 |
| 2.2.1 DISEÑO DEL MATERIAL DE VOZ | 29 |
| 2.2.2 LISTAS SON LAS SIGUIENTES: | 30 |
| 2.2.2.1 PALABRAS..... | 30 |
| 2.2.2.2 LOGATOM | 31 |
| 2.2.3 GRABACIÓN DEL CD CON EL MATERIAL DE VOZ | 32 |
| CAPITULO 3 | 34 |
| METODOLOGÍA MEDICIÓN PARA EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN DEL | |
| MATERIAL DE VOZ | 34 |
| 3.1 EVALUACIÓN SUBJETIVA..... | 35 |
| 3.1.1 DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN SUBJETIVA..... | 35 |
| 3.2 EVALUACIÓN OBJETIVA | 37 |
| 3.2.1 RESPUESTA IMPULSO..... | 37 |
| 3.2.2 DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN OBJETIVA..... | 41 |
| 3.2.2 ÍNDICES ACÚSTICOS | 43 |

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO 4 | 45 |
| MEDICIONES Y RESULTADOS..... | 45 |
| 4.1 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA IMPULSO | 45 |
| 4.2 RESULTADOS OBJETIVOS Y SUBJETIVOS DE CADA UNO DE LOS RECINTOS..... | 47 |
| 4.2.1 RESULTADOS AULA 1 | 48 |
| 4.2.1.1 RESULTADOS SUBJETIVOS | 48 |
| 4.2.1.2 RESULTADOS OBJETIVOS..... | 48 |
| 4.2.2 RESULTADOS AULA 2..... | 49 |
| 4.2.2.1 RESULTADOS SUBJETIVOS..... | 49 |
| 4.2.2.2 RESULTADOS OBJETIVOS | 50 |
| 4.2.3 RESULTADOS AULA 3..... | 51 |
| 4.2.3.1 RESULTADOS SUBJETIVOS..... | 51 |
| 4.2.3.2 RESULTADOS OBJETIVOS..... | 52 |
| 4.2.4 RESULTADOS AULA 4..... | 53 |
| 4.2.4.1 RESULTADOS SUBJETIVOS..... | 53 |
| 4.2.4.2 RESULTADOS OBJETIVOS..... | 53 |
| CAPITULO 5 | 55 |
| CONCLUSIONES..... | 55 |
| 5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS SUBJETIVAS | 55 |
| 5.2 CORRELACIÓN ENTRE LAS PRUEBAS..... | 58 |
| 5.2.1 % DE ACIERTOS DE PALABRAS VS TIEMPO DE REVERBERACIÓN | 58 |
| 5.3 CONCLUSIÓN POR ÍNDICE DE CLARIDAD C50..... | 59 |
| 5.3.1 REPRESENTACIÓN EN LA GRÁFICA DE LOS VALORES C50 OBTENIDOS EN LAS FRECUENCIAS ANTES MENCIONADAS. | 60 |
| APÉNDICE A..... | 65 |
| APÉNDICE B..... | 66 |
| APÉNDICE C..... | 70 |

PROLOGO

El lenguaje humano requiere del uso de un sistema de comunicación que permita un intercambio de información confiable y sin distorsiones entre individuos. Un sistema de información esta formado por elementos que interactúan entre si: emisor, mensajero, código, canal, contexto y receptor. En el caso que nos ocupa el emisor es el hablante, el mensaje es la idea a transmitir, el código son las emisiones acústicas correspondientes a la lengua del habla; el canal es el medio por el que se transmite el código (aire); el contexto es la serie de elementos subjetivos u objetivos que afectan al proceso de comunicación.

El ruido afecta de tres maneras la percepción de la palabra hablada: por alteración de espectro, por enmascaramiento y por confusión de patrones temporales.

El espectro es la representación en frecuencia de la señal de la voz.

El fenómeno de enmascaramiento consiste en que la percepción de dos tonos sonando simultáneamente se ve modificado por la distancia en frecuencia de los dos tonos; llegándose incluso a no percibirse uno si esta distancia en frecuencia es muy pequeña.

La confusión por patrones temporales se refiere a la influencia de ruidos intermitentes que se llegan a superponer a una emisión vocal y por lo tanto pueden alterar su mensaje.

Estas condiciones se presentan en prácticamente en cualquier situación, pero deben evitarse en las situaciones donde la comunicación oral es de central importancia, como en un salón de clase.

En el presente trabajo de tesis se valida un material de voz; que consiste en listas de palabras y fragmentos de palabras fonéticamente balanceadas;(es decir; que dentro de estas listas se encuentran representados estadísticamente todos los sonidos fonéticos del idioma español hablado en México), para emplearse como una valoración de la calidad de la comunicación oral (pruebas de inteligibilidad) en salones de clase y poder calificarlo.

INTRODUCCIÓN

El material de voz a validar en el presente trabajo; se utilizará para realizar evaluaciones subjetivas de inteligibilidad en recintos; es decir, determinar si un recinto dado tiene las condiciones adecuadas para lograr una buena inteligibilidad en su interior.

Para realizar la validación se hizo lo siguiente:

Primero, se invitó a 4 grupos de personas a cada uno de los 4 diferentes salones de clases. Se les pidió escuchar la grabación con el material de voz; ellos anotaron lo que escucharon, en una hoja diseñada especialmente para esta prueba. Se llevo registro de todos los lugares donde son colocaron las personas.

Después de realizar esta prueba, se calificaron los aciertos y se dio un puntaje en porcentaje (50 aciertos igual 100%). Con esto se logró un punto de vista subjetivo tanto de la inteligibilidad del material de voz, como del recinto.

La segunda evaluación, por el contrario, fue una valoración objetiva y consistió en evaluar el recinto mediante los índices acústicos (tiempo de reverberación, reflexiones tempranas, y claridad). Estos índices se eligieron principalmente porque se determinan a partir de la respuesta impulso del recinto. Para obtener la respuesta al impulso se utilizó la técnica de correlación de secuencias de máximas longitud (MLS, por sus siglas en ingles).

Una vez obtenidos estos resultados, se determinó el coeficiente de correlación entre los puntajes de la evaluación subjetiva y los valores de los índices acústicos medidos mediante la evaluación objetiva. Finalmente, estos coeficientes de correlación se compararon con los que se han publicado y utilizando anteriormente en otros idiomas. Si los coeficientes de correlación son parecidos, el material del habla utilizado tendrá un comportamiento similar y por lo tanto podrá ser validado.

Capítulo 1

Fundamentos de Acústica

En este capítulo se definirán algunos conceptos básicos de Acústica, con el fin de facilitar la comprensión de los temas que serán abordados posteriormente. [1]

1.1 El Sonido

1.1.1 Propagación del sonido

Para que el sonido pueda propagarse en un medio, éste debe cumplir con dos condiciones fundamentales: tener masa y ser elástico.

Para nuestro caso, cuando hablemos de un medio, y a no ser que se indique específicamente otra cosa, nos estaremos refiriendo al aire. Esto se debe a razones prácticas, en la medida en que el aire es el medio más usual en el que se realiza la propagación del sonido entre seres humanos, ya sea mediante el habla o la música.

La propagación del sonido tiene lugar cuando un objeto que vibra pone en movimiento a las partículas de aire que lo rodean. Estas, a su vez, transmiten ese movimiento a las partículas vecinas y así sucesivamente. Cada partícula de aire entra en oscilación en torno a su punto de reposo permitiendo que la energía de vibración se propague a través de ellas.

La sensación de sonido es el resultado de la estimulación nerviosa de la corteza auditiva en el cerebro, debida a la vibración que llega a nuestro tímpano.

En este capítulo se definirán algunos conceptos básicos de Acústica, con el fin de facilitar la comprensión de los temas que serán mencionados en los capítulos siguientes.

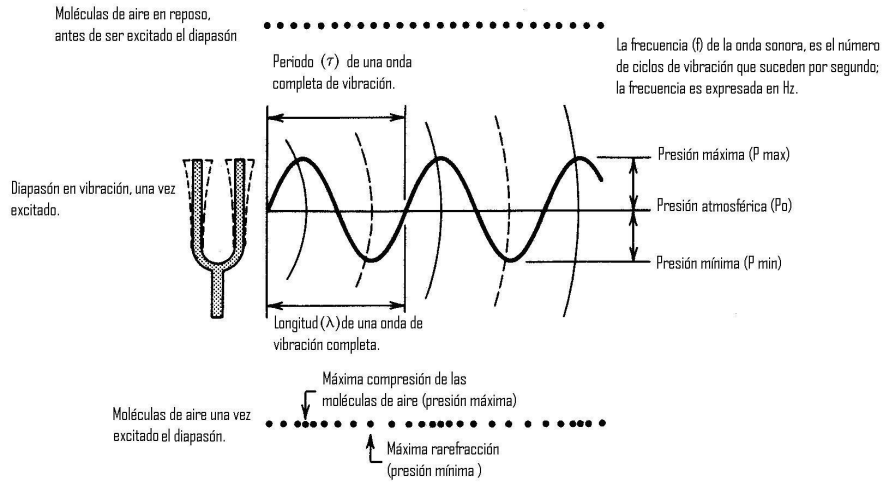


Figura 1.1 Comportamiento de las moléculas aire excitadas por el diapasón

1.1.2 Presión Sonora

Se conoce como presión sonora a la energía de vibración que viaja con la onda sonora. La variación de presión que se produce en una onda sonora es muy pequeña en comparación a la presión atmosférica que es de un 9.869×10^7 dina/cm². Por ejemplo, compárese con la presión mas pequeña para generar una sensación auditiva (presión mínima audible) que es de 20μ Pascales (pero como $1 \text{ Pascal} = 10 \text{ dina/cm}^2$), 10^{-10} veces mas pequeña.

La presión mínima audible es la presión de referencia para la escala logarítmica que se emplea comúnmente en acústica, esto significa que:

$$NPS = 20 \log \frac{P}{P_0} = NPS = 20 \log \frac{P}{20 \times 10^{-6} \text{ Pa}} \quad (1.1)$$

Donde:

NPS Nivel de Presión Sonora

1.1.3 Velocidad de propagación de la onda sonora

La velocidad de propagación de la onda sonora en el aire, depende de las características elásticas así como las variables termodinámicas, temperatura, presión y densidad del medio en el que se realiza dicha propagación. Por esto, la velocidad de propagación no permanece constante ante los cambios de presión o densidad del medio.

La expresión para velocidad del sonido en el aire en función de la temperatura es:

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}} = c_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (1.2)$$

donde:

T Temperatura en grados Kelvin

t Temperatura en grados centígrados

c_0 Velocidad del sonido a cero grados centígrados

Es decir, cuanto mayor es la temperatura del aire, mayor es la velocidad de propagación.

La ecuación (1.2) se puede aproximar, por la serie del binomio, a:

$$c = c_0 + 0.6t = 331.6 + 0.6t$$

La velocidad del sonido en el aire aumenta 0,6 m/s por cada 1° C de aumento en la temperatura. La velocidad del sonido en el aire es de 343.6 m/s a 20° C de temperatura, lo que equivale a unos 1.200 km/h (1.238,4 km/h, para ser precisos). Es decir que necesita unos 3 s para recorrer 1 km.

1.1.4 Intensidad Sonora

La intensidad es la cantidad de energía, por unida de tiempo, que fluye de una fuente sonora y que pasa través de un área unitaria en dirección perpendicular a dicha área; es fácil determinar que la intensidad también es igual a producto de la presión por la velocidad, a partir de:

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Área}} = \frac{\text{Energía}}{\text{Área} \cdot \text{Tiempo}} = \frac{\text{Fuerza} \cdot \text{Distancia}}{\text{Área} \cdot \text{Tiempo}} = \text{Presión} \cdot \text{Velocidad} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.3)$$

1.1.5 Impedancia Acústica Específica

La impedancia acústica específica es la oposición que pone el medio para que la onda sonora se desplace; esta resistencia esta asociada a las características propias del medio, se expresa como la relación de la presión sonora y la velocidad de la partícula, para una onda plana:

$$Z = \frac{p}{u} \quad (1.4)$$

Donde:

p es la presión acústica en un punto

u es la velocidad de la partícula.

La impedancia acústica específica en un medio por donde se propaga la onda es determinada por la siguiente ecuación:

$$r = \pm \rho_0 c \quad (1.5)$$

Donde:

ρ es la densidad del aire

C temperatura en grados centígrados

En las condiciones de referencia, temperatura a 20° C y presión atmosférica a nivel del mar, la densidad del aire (ρ) es de 1.21 kg/m³ y la velocidad del sonido es 343.6 m/seg, en consecuencia la impedancia característica del aire, en estas condiciones de referencia, es de:

$$(\rho_0 c)_{20} = 415 \quad (1.6)$$

1.1.6 Características de las ondas sonoras

Cualquier sonido puede ser descrito con tres características físicas: la frecuencia, la amplitud y la forma de onda (o composición armónica).

Frecuencia

La frecuencia es el número de oscilaciones que una onda efectúa en un determinado intervalo de tiempo. El número de ciclos por segundo se llama hercio (Hz), y es la unidad con la cual se mide la frecuencia.

La frecuencia de un sonido se calcula a partir de la siguiente formula:

$$F = \frac{c}{\lambda} \tag{1.7}$$

Donde:

c es la velocidad del sonido

λ representa la longitud de onda

La longitud λ de una onda sonora es la distancia entre dos compresiones o dos rarefacciones, esta depende del número de oscilaciones por segundo de la frecuencia y de la velocidad del sonido.

La frecuencia también puede ser calculada de la siguiente manera:

$$F = \frac{1}{\tau} \tag{1.8}$$

Donde:

τ es el periodo de una onda completa de vibración.

Amplitud

La amplitud es la extensión del movimiento ondulatorio de las partículas de aire. Cuanto más grande es la amplitud de la onda, con mayor energía las moléculas golpean el tímpano y el sonido se percibe más fuerte.

La amplitud mínima para que un sonido se perciba se llama umbral de audición. Cuando la amplitud aumenta excesivamente, llega un momento en que produce molestias en el tímpano, a eso se le llama umbral del dolor.

Forma de onda

La forma de onda es la característica que nos permite distinguir una nota de la misma frecuencia e intensidad producida por instrumentos diferentes. La forma de onda viene determinada por el número y amplitud de los armónicos.

Los armónicos son un conjunto de señales senoidales de diferentes amplitudes y frecuencias que representa la forma de onda de la señal (equivalente a la serie de Fourier de esta forma de onda)

Una onda senoidal no tiene armónicos y puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$g(t) = A \sin(2\pi ft) \tag{1.9}$$

dónde:

f= frecuencia del sonido.

A= Amplitud.

Armónicos

Los armónicos contribuyen a la percepción auditiva de la calidad de sonido o timbre.

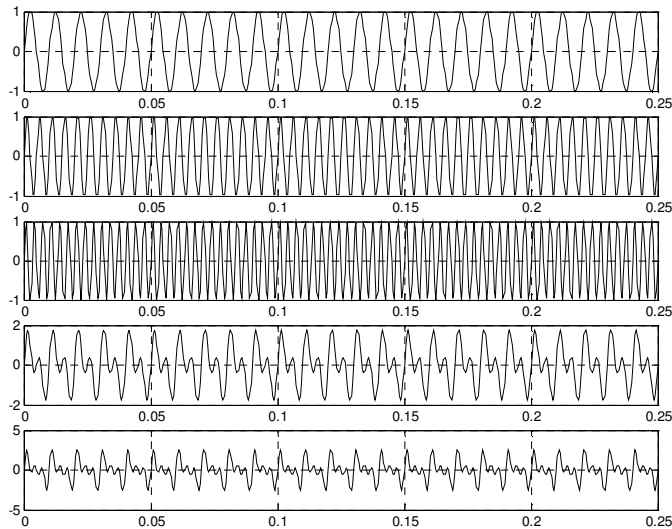


Figura 1.2 Comportamiento de las ondas armónicas

1.2 Acústica Arquitectónica

La Acústica Arquitectónica estudia la propagación de las ondas sonoras dentro de recintos cerrados o semiabiertos, en esta propagación se presentan fenómenos de reflexión, refracción, absorción y difracción.

Es necesario conocer el comportamiento de estos fenómenos físicos para hacer un diseño correcto de las salas de audición (salas de concierto, auditorios, sala conferencias, etc.). [2]

1.2.1 Reflexión del sonido

El comportamiento del sonido alrededor de una fuente en un espacio cerrado, como un salón de clases, es distinto de lo que sería si la misma fuente estuviera localizada al aire libre, lejos de cualquier superficie reflejante. Esto se debe a que el sonido se refleja sobre las paredes y sobre los objetos en su interior. En las paredes, parte de la energía sonora incidente se refleja, parte se absorbe y parte se transmite a través de las paredes del mismo.

Las ondas sonoras viajan en todas direcciones a partir de la fuente. Cuando chocan con un obstáculo, como una pared, su dirección de propagación cambia.

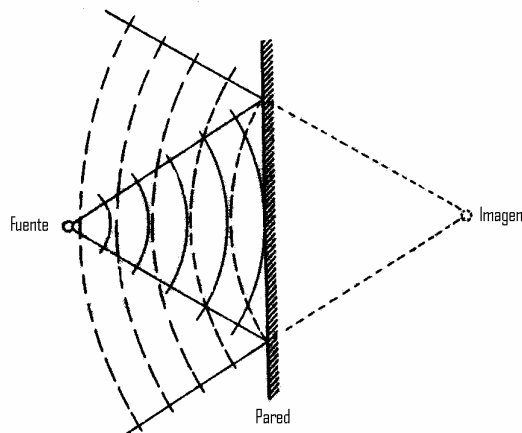


Figura 1.3 En la figura se muestra la reflexión de las ondas originadas en una fuente sonora, al chocar con un muro plano. Las líneas continuas curvas representan ondas expandiéndose hacia fuera a partir de la fuente; las líneas discontinuas curvas representan las ondas después de que se han reflejado en la pared. Las líneas rectas con flechas indican la dirección de propagación de las ondas sonoras. El ángulo de sonido reflejado es igual al ángulo de sonido

incidente; a esto se le denomina ley de reflexión. Las ondas sonoras reflejadas se transmiten como si se hubieran originado a partir de la "imagen" de la fuente de sonido. Una imagen es una fuente imaginaria de sonido localizada a la misma distancia detrás de la pared que la fuente real delante de ella.

1.2.2 Absorción del sonido y coeficiente de absorción

Como se ha mencionado, si una onda sonora se encuentra con una superficie dura, se reflejará en ella, pero si choca contra un material suave y poroso, este material absorberá una cantidad considerable de energía. A este hecho se le llama absorción del sonido.

Coeficiente de absorción

El coeficiente de absorción es la cantidad de la energía acústica absorbida, cuando las ondas sonoras chocan con un determinado material.

El coeficiente de absorción de un material varía dependiendo de la frecuencia y el ángulo de incidencia de la onda sonora.

Se considera que un material es un absorbente perfecto cuando el sonido pasa a través de él y jamás regresa, este tipo de materiales tiene un coeficiente de absorción de 1.

Uno de los métodos para medir el coeficiente de absorción es utilizando un recinto especial denominado cámara reverberante, en este procedimiento se mide el tiempo de decaimiento (tiempo de reverberación) del sonido dentro del recinto con y sin la muestra de material a medir y el coeficiente se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{0.16V}{S} \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} \right) \quad (1.10)$$

Donde:

V Volumen en m³

S Área de la muestra en m²

T' Tiempo de reverberación de la cámara con la muestra, en seg.

T Tiempo de reverberación de la cámara sin la muestra, en seg.

El coeficiente de absorción también denominado de Sabine, usualmente se consigna en tablas en función de la frecuencia.

En cualquier caso el coeficiente de absorción esta relacionado con el coeficiente de reflexión mediante la siguiente formula:

$$\alpha = 1 - R^2 \quad (1.11)$$

Donde:

R Coeficiente de reflexión

En muchos recintos (salas de concierto, cines, etc.), la principal contribución a la absorción es la debida a las sillas; habitualmente se presentan 2 valores: a) la absorción del sonido por silla ocupada y b) por silla vacía. El uso de estos valores permiten el cálculo del tiempo de reverberación que presenta el recinto para cualquier cantidad de ocupación. De igual manera el tratamiento de las superficies del recinto, como las paredes, piso, cortinas, alfombras, etc. contribuyen a la absorción del sonido.

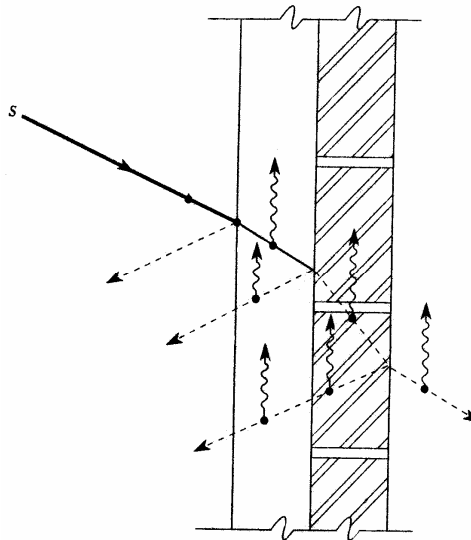


Figura 1.4 Representación de la absorción y refracción de un rayo sonoro al momento de chocar con un material absorbente.

1.2.3 Difracción

La difracción es el fenómeno en donde la sonora puede rodear un obstáculo. Aunque este fenómeno es general, su magnitud depende de la relación que existe entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo. Si una abertura (u obstáculo) es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño, y la onda se propaga en líneas rectas o rayos, de forma semejante a como lo hace un haz de partículas. Sin embargo, cuando el tamaño de la abertura es comparable con la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la onda no se propaga simplemente en la dirección de los rayos rectilíneos, sino que se dispersa como si procediese de una fuente puntual localizada en la abertura. Esto se ilustra en la siguiente figura.

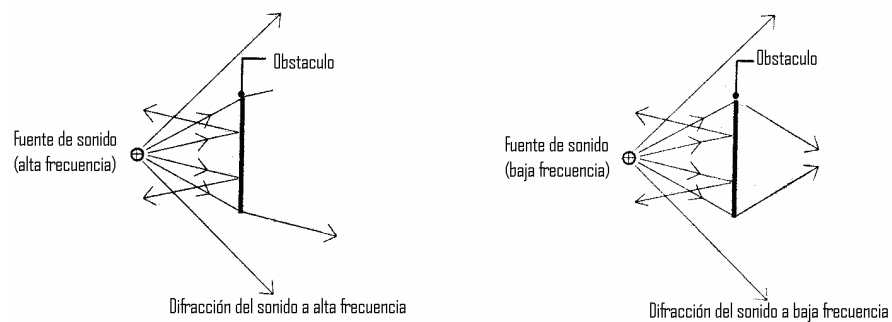


Figura 1.5 Fenómeno de Difracción

1.2.4 Reverberación

Tiempo de reverberación

La reverberación es el tiempo que tarda la intensidad sonora en decaer hasta una millonésima de su valor (60 dB), después de que la fuente se ha apagado. Se considera como la característica más importante para determinar la respuesta acústica en un espacio destinado al habla o/y música.

En un recinto, el tiempo de reverberación (T_R) y se calcula por la ecuación de Sabine definida como:

$$T_R = 0.16 \frac{V}{A} \quad (1.12)$$

Donde:

V= Volumen del recinto en m³.

A= Área equivalente de absorción m²

Como se puede observar el tiempo de reverberación está determinado principalmente por el volumen total del recinto, y las características de absorción de las superficies (incluyendo piso y techo); y varía para las diferentes frecuencias, contribuyendo a mejorar la respuesta de estímulos como el lenguaje y la música en un recinto; esta respuesta dependerá de la naturaleza de la del cuarto y del estímulo.

1.2.5 Parámetros subjetivos que definen la calidad acústica de un recinto

Los parámetros subjetivos que definen la calidad de un recinto están basados esencialmente en la percepción subjetiva que tenemos de las reflexiones del sonido dentro de un recinto; como el tiempo de reverberación puede ser medido, estos parámetros pueden ser descritos de forma matemática.

La descripción matemática de estos se explicara ampliamente en el Capítulo 3; por ahora solo se describirá la sensación subjetiva de los mismos.

A continuación se describen algunos de estos parámetros subjetivos

“Vivacidad”

Es un término que equivale a tiempo de reverberación. Cuando hay un tiempo de reverberación muy largo se dice que el cuarto está “vivo” (es decir, existe poca absorción). Por el contrario un recinto “muerto” es un recinto con un tiempo de reverberación muy corto (es decir, hay mucha absorción).

Entre estos dos extremos (vivo o muerto) se elegirá el tiempo de reverberación aceptable para un recinto; esto dependerá del tipo de utilidad que se le de.

"Intimidad"

Se refiere a la cantidad de sonido que se encuentra encerrado en una habitación; y que es percibido por el escucha.

La intimidad se logra si el sonido es reflejado alcanza los oídos del escucha antes de que transcurran 20ms después del sonido directo. Generalmente esto sólo se logra para recintos pequeños, como por ejemplo salas de teatros donde se procura que el espectador se involucre en su totalidad con el escenario.

"Claridad"

La claridad en acústica es lo opuesto plenitud, esta se obtiene cuando la intensidad del sonido reflejado es relativamente menor a la intensidad del sonido directo.

En lugares donde el uso principal es a base de la comunicación hablada se requiere de en mayor medida de la claridad. La claridad implica tiempos de reverberación cortos.

"Calidez"

La calidez se obtiene cuando el tiempo de reverberación para bajas frecuencias un algo grande a comparación del tiempo de reverberación para altas frecuencias.

Para obtener la calidez en un recinto el tiempo de reverberación debe ser aproximadamente constante por arriba de 500 Hz, pero por debajo de estas frecuencias el sonido debe incrementarse 1.5 veces el tiempo de reverberación para altas frecuencias.

"Eco "

Un ejemplo comúnmente conocido por todos , de reflexión de ondas sonoras , es el denominado eco, que consiste en que una reflexión queda retrasada después de la onda directa, con una intensidad suficiente para que pueda percibirse con claridad por el oído. Una reflexión la escuchamos normalmente como un eco cuando esta retrasada respecto al sonido directo alrededor de 70milisegundos y con suficiente intensidad para poder escuchar con claridad.

1.3 Psicoacústica

La Psicoacustica estudia la relación entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que el cerebro hace de ellas.

Es fundamental entender la manera como percibimos el sonido, en específico el habla y para entender como es este proceso, es necesario primero saber como funciona el sistema auditivo. [3]

A continuación se hará una breve explicación del mismo.

1.3.1 Sistema auditivo

La onda acústica que incide sobre el pabellón auditivo penetra por el canal y pone en vibración al tímpano. Dicha vibración se transmite al oído interno por medio del movimiento

de una cadena de huesecillos (oído medio). El oído interno transforma los impulsos mecánicos en excitaciones nerviosas que llegan al cerebro, el cual decodifica la información recibida en función de las referencias previas.

El mecanismo auditivo transforma la onda acústica, (variaciones de presión), en sensaciones de sonido. Estas variaciones de sonido tienen que producirse con cierta rapidez (frecuencia) para ser oídas, usualmente entre 20 Hz y 20 000 Hz. Por lo tanto, en la percepción del sonido van a influir, tanto la amplitud de las variaciones de la presión (energía, intensidad), como la frecuencia con la que se producen.

El sistema auditivo periférico (el oído) está compuesto por el oído externo, el oído medio y el oído interno.

El sistema auditivo periférico cumple funciones en la percepción del sonido, esencialmente la transformación de las variaciones de presión sonora que llegan al tímpano en impulsos eléctricos (o electroquímicos), pero también desempeña una función importante en nuestro sentido de equilibrio.

Oído externo

El oído externo está compuesto por el pabellón, que concentra las ondas sonoras en el conducto, y el conducto auditivo externo que desemboca en el tímpano

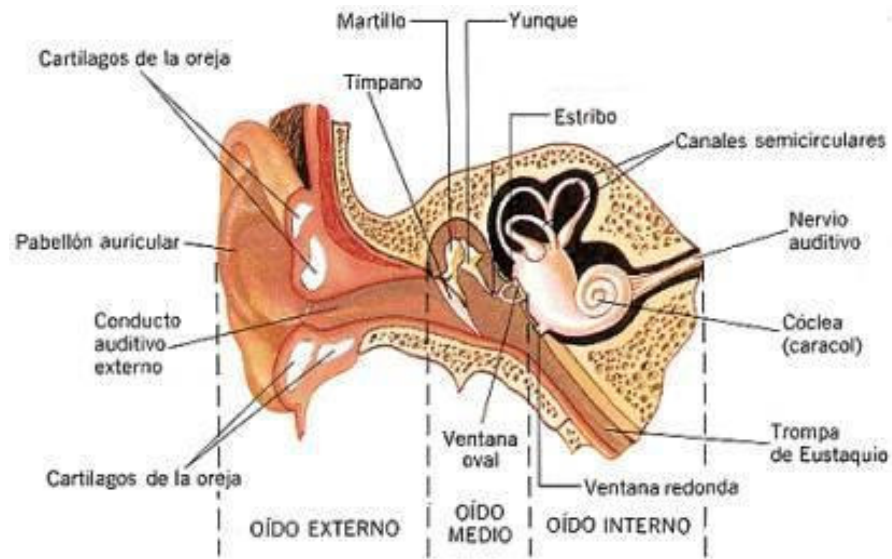


Figura 1.6 Corte transversal de oído medio

Oído medio

El oído medio está lleno de aire y está compuesto por el tímpano (que separa el oído externo del oído medio), los ósículos (martillo, yunque y estribo, una cadena ósea denominada así a partir de sus formas) y la trompa de Eustaquio.

El tímpano es una membrana que se pone en movimiento por la onda que la alcanza.

Los osículos (martillo, yunque y estribo) tienen como función transmitir el movimiento del tímpano al oído interno a través de la membrana conocida como ventana oval.

Oído interno

Si en el oído externo se canaliza la energía acústica, en el oído medio se la transforma en energía mecánica transmitiéndola hasta el oído interno, es en éste en donde se realiza la transformación en impulsos eléctricos y donde se procesa la información recibida y se le asignan significados a los sonidos percibidos, ya sea que pertenezcan a la música, al habla u otros.

1.3.2 Umbrales auditivos

El umbral de audibilidad está definido por la mínima intensidad o presión necesarias para que un sonido pueda percibirse.

La presión acústica mínima que el oído puede detectar se denomina umbral de audición. La experiencia confirma que el umbral varía con la frecuencia.

Cuando las presiones sonoras crecen, la sonoridad crece hasta producir una sensación de molestia. A este umbral se le denomina umbral de molestia y se encuentra próximo a los 120 dB. Es prácticamente dependiente de la frecuencia aunque varía según la sensibilidad de las personas; cuando se llega a 140 dB se produce sensación de dolor pudiendo ocasionar incluso daño permanente en la audición.

Entre el umbral de audición y el de molestia se ubica la gama posible de sonido percibidos sin que éstos causen molestia.

1.3.3 Recepción binaural

La audición binaural hace posible determinar la posición de la fuente sonora, ya que permite observar pequeñas diferencias de dirección, por la diferencia de tiempo de llegada de las dos señales a ambos oídos. Las personas estamos acostumbradas a asociar cada diferencia de tiempo intrauditivo con la dirección particular de llegada de la onda sonora y por lo tanto localizar la situación de la fuente.

Además de la diferencia de tiempo, la diferencia de intensidades en los dos oídos, contribuye a la sensación direccional a altas frecuencias.

Dirección

La dirección de una fuente sonora, a su vez, se establece a partir de la determinación de un ángulo lateral y de un ángulo de elevación.

Lateralización

Para la ubicación lateral de una fuente sonora el sistema auditivo utiliza pistas provenientes principalmente de las diferencias de intensidad y tiempo con que las ondas sonoras llegan a cada uno de nuestros oídos.

Localización

La localización define la capacidad del individuo de determinar la ubicación de una fuente sonora en el espacio.

La localización sólo es posible a partir de la audición biaural. Con un solo oído no es posible localizar fuentes sonoras.

El sistema auditivo utiliza un conjunto de pistas para determinar la ubicación de la fuente sonora en el espacio.

Por lo general se establecen tres planos característicos en los experimentos destinados a estudiar la localización por parte del ser humano.

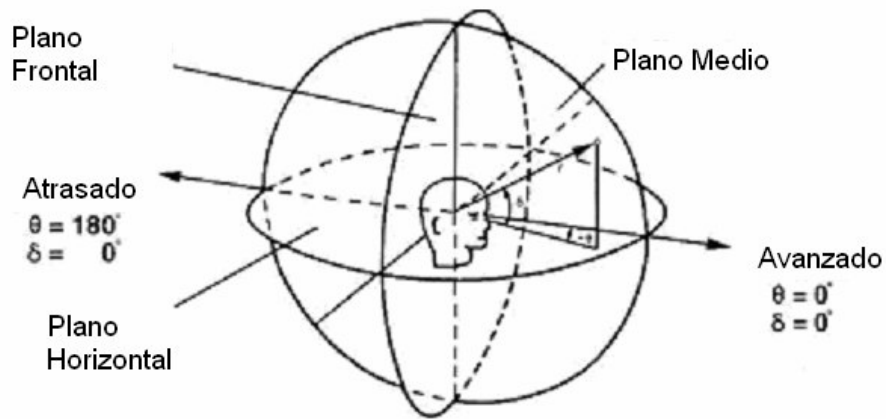


Figura 1.7 Planos de percepción del oído.

1.3.4 Efecto de precedencia

En situaciones normales nuestra audición se produce en espacios sonoros difusos, en los cuales los sonidos llegan a nuestros dos oídos de todas partes y con distintos retardos.

Si dos sonidos (cortos) llegan a nuestros oídos con una diferencia de tiempo muy corta, los sonidos son percibidos como un solo sonido. El tiempo de retardo varía según las características del sonido mismo, pero pueden encontrarse en el rango de entre 5 ms (para sonidos de tipo impulsos) y 40 ms (para sonidos más complejos, como los encontramos en la música o el habla).

Si dos sonidos (cortos) se fusionan en un solo sonido, la localización del sonido depende mayormente de la localización del primero que llegue a nuestros oídos.

Esto ha recibido los nombres de "efecto de precedencia", "efecto Haas", o "ley del primer frente de onda" (Blauert).

El sonido retardado influye en el resultado total de la localización. Si la ubicación del sonido retardado se diferencia mucho de la del sonido que llega primero a nuestros oídos, provoca un desplazamiento en la localización del sonido de hasta 7°, a partir de lo cual se hace cada vez menos efectivo.

También si el sonido retardado es suficientemente más intenso que el primero (10 - 15 dB) se cancela el efecto de precedencia.

El efecto de precedencia sólo se produce en sonidos con carácter transitorio y disminuye si el retardo entre los dos sonidos es igual o menor que 1 ms.

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

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

Capítulo 2

Material de voz

Para entender como funciona el material de voz es necesario tomar en cuenta y estudiar los procesos que tiene el cerebro cuando percibe una señal; es por eso que parte de este capítulo se enfoca brevemente a explicar el funcionamiento del cerebro en cuanto a comunicación hablada se refiere.

Analizaremos como el cerebro capta el lenguaje y da sentido, esta información nos dará la pauta para entender la importancia del diseño material de voz y la utilidad del mismo para hacer pruebas de inteligibilidad. [3]

2.1 Producción y percepción del habla

2.1.1 Producción del habla

El habla constituye una función exclusivamente humana y de gran complejidad, que nos permite, además de comunicarnos, poner de manifiesto nuestra personalidad y expresar nuestros sentimientos.

El lenguaje es un proceso muy complejo que involucra muchos mecanismos de la percepción.

El sujeto que toma el papel de orador, debe de ordenar sus pensamientos y seleccionar las palabras y frases que enuncien correctamente lo que quiere expresar, además de colocarlas en el orden gramatical requerido para transmitir de manera adecuada sus ideas al escucha.

Todos estos procesos suceden en el cerebro del orador; de esta forma el cerebro del orador manda las instrucciones necesarias en forma de impulsos nerviosos que activan los músculos vocales (pulmones, cuerdas vocales, lengua y labios). El movimiento de estos órganos vocales produce cambios de presión; estos cambios de presión se conocen como sonido del habla; el habla viaja a través del aire entre el orador y el escucha.

Los cambios de presión (habla) activan en el escucha el mecanismo de audición, que por medio de impulsos nerviosos que viajan a lo largo del cerebro decodifica los sonidos e interpreta la información de acuerdo a los conocimientos adquiridos con anterioridad, este proceso se muestra de forma grafica en la figura 2.1

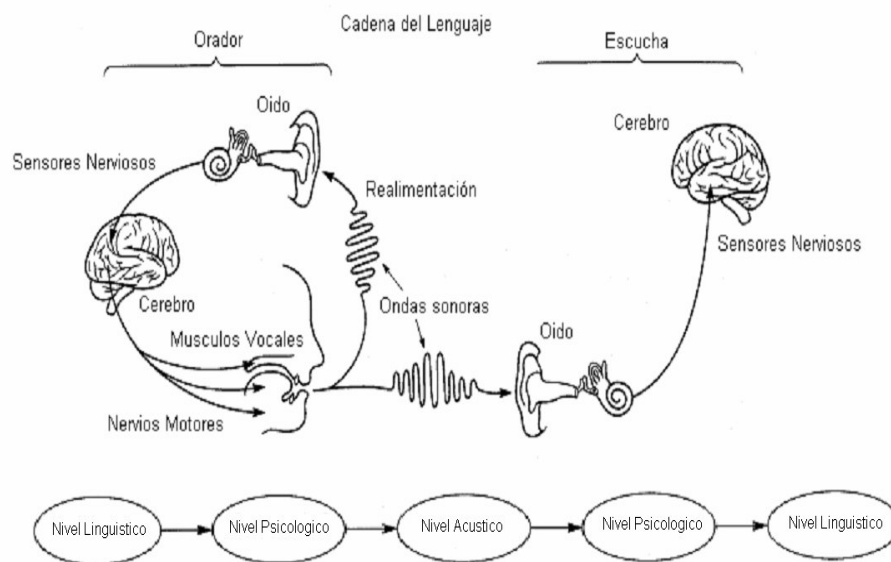


Figura 2.1 Cadena del lenguaje

2.1.2 Percepción del habla

Cuando hablamos, nuestros órganos vocales producen sonidos con diferentes características; diferente intensidad, diferente duración, diferentes frecuencias fundamentales y diferentes componentes espectrales. Todas estas características son las que el cerebro analiza, para dar un sentido y una interpretación.

La percepción del lenguaje es el proceso de extracción de información de la señal acústica. Por tanto se ocupa, tanto de los procesos iniciales de análisis de la señal, como de los procesos más complejos.

La percepción del lenguaje se refiere, habitualmente, a los procesos iniciales, incluido el reconocimiento de la palabra para después, integrar los estímulos recibidos con la información previamente almacenada teniendo como resultado la percepción y la comprensión de la palabra o mensaje.

Es un proceso de contextualización, es decir: el mensaje se interpreta a partir de conocimiento y marcos de referencia obtenidos con anterioridad.

Las vocales tienen más energía y las consonantes menos, pero lo que realmente hace inteligible una palabra es la correcta pronunciación de las consonantes. Podemos decir que a mayor claridad en consonantes mayor inteligibilidad.

2.1.3 Niveles de procesamiento y percepción del habla

El nervio auditivo contiene alrededor de 30.000 neuronas y su función principal es la de transmitir los impulsos eléctricos al cerebro para su procesamiento

En el cerebro hay miles de millones de neuronas, que son esencialmente similares a todas las demás células, pero que tienen la particularidad de recibir y transmitir impulsos eléctricos.

A partir de la deformación de las células ciliares en el órgano de Corti (el órgano de Corti genera impulsos eléctricos que las fibras nerviosas (nervios acústicos) transmiten al cerebro) y a través de los nervios acústicos, el cerebro recibe patrones que contienen la información característica de cada sonido y los compara con otros almacenados en la memoria (la experiencia pasada) a efectos de identificarlos. Aparentemente, si el patrón recibido difiere de los patrones almacenados, el cerebro intentaría igualmente adaptarlo a alguno de los conocidos, al que más se le parezca. Esto es notable por ejemplo en la percepción de series armónicas. Si recibimos un número determinado de frecuencias aisladas, nuestro cerebro intentará relacionarlas, identificándolas como parte de una serie armónica (aún cuando no lo sean), generando incluso la percepción de la altura determinada por su frecuencia fundamental, aunque ésta no esté físicamente presente y aunque la membrana basilar no esté oscilando en el punto correspondiente a dicha frecuencia.

La memoria es una de las funciones más importantes de nuestro cerebro. Cada hecho al ser almacenado en la memoria se separa en partes y se guarda de manera asociativa (modelos asociativos) en diferentes conjuntos de neuronas interconectadas entre sí, de manera que su ubicación física está distribuida a lo largo de diversas partes de nuestro cerebro.

Si el patrón recibido no existe y no es posible encontrar alguno que se le parezca, el cerebro tendrá la opción de desecharlo o de almacenarlo (funciones de las memorias de corto, mediano y largo plazo) convirtiéndolo en un nuevo patrón de comparación.

Aparentemente existen en el cerebro al menos tres niveles diferenciados de procesamiento de los datos que transmiten los nervios acústicos. En un primer nivel el cerebro identifica el lugar de procedencia del sonido (asociación de lugar, localización). En un segundo nivel el cerebro identifica el sonido propiamente dicho, es decir, sus características tímbricas. En un nivel posterior se determinan las propiedades temporales de los sonidos, es decir su valor funcional, a partir de su ubicación en el tiempo y su relación con otros sonidos que lo preceden y lo suceden, hecho de particular importancia en sistemas acústicos de comunicación como el habla (la lengua hablada) o la música.

2.1.4 Hemisferios cerebrales

El cerebro está dividido en los semi hemisferios derecho e izquierdo. Los nervios se cruzan en la médula espinal de manera que cada hemisferio del cerebro controla esencialmente el lado opuesto del cuerpo. Cada hemisferio se especializa en la realización de funciones determinadas. Todo parecería indicar que en el hemisferio izquierdo se localizan los centros que controlan el lenguaje y las funciones lógicas, mientras que en el derecho se concentran aquellas funciones no verbales, las actividades artísticas y las funciones emotivas.

De igual manera cada uno de los hemisferios cumple funciones diferenciadas en el procesamiento de los sonidos recibidos. El cerebro es capaz de distinguir las características estructurales de los sonidos y, básicamente, el predominio de uno u otro hemisferio dependen precisamente de la estructura de dicho sonido.

En el caso de la música el procesamiento se llevaría a cabo en el hemisferio derecho. Sin embargo, hay quienes afirman que esto sólo sería cierto en el caso de los individuos que no son músicos. Las personas con formación y entrenamiento musical, al tener la capacidad de acceder al fenómeno musical desde un punto de vista más analítico, procesarían esta información en el hemisferio izquierdo, que es el que se especializa en las funciones del razonamiento lógico.

hemisferio izquierdo

lengua
consonantes

cálculo
logos

hemisferio derecho

vocales
voces humanas
sonidos de animales e insectos
sonidos mecánicos
música
sonido de los instrumentos musicales

naturaleza

La audición consta de un cierto número de procesos distintos cuya complicación, no permite encontrar una relación simple y única entre las magnitudes físicas de la onda sonora y su percepción por medio del mecanismo auditivo. Para que este transforme una onda acústica (variaciones de presión de un medio) en una sensación de sonido, es necesario que la frecuencia de estas variaciones de presión esté comprendida en una determinada banda y que la amplitud de estas fluctuaciones sea superior a un determinado valor para cada frecuencia. Existe además una a-linealidad en la respuesta del oído, tanto en frecuencia como en amplitud.

Un sonido puro se caracteriza físicamente por la frecuencia y la amplitud de las variaciones de presión acústica. A estas magnitudes físicas corresponden sensaciones distintas:

El tono o sensación de agudeza, propia de la frecuencia, de modo que un sonido parece más agudo cuanto mayor sea su frecuencia.

La sonoridad o *sensación de intensidad*, propia de la presión acústica, cuanto más alta es la presión, mas fuerte parece el sonido.

De hecho el tono de un sonido no solo depende de la frecuencia sino también, aunque en menor medida, de la amplitud de la presión y correlativamente la sonoridad de un sonido depende también de la frecuencia.

El timbre es el atributo que nos permite diferenciar dos sonidos con igual sonoridad, altura y duración. Como se ve, el timbre se define por lo que no es. Se podría afirmar que el timbre es una característica propia de cada sonido, de alguna manera identificatoria de la fuente sonora que lo produce.

2.2 Material de voz

El lenguaje hablado es rico en información prosódica; la duración de las palabras, la localización y duración de las pausas y el tono, informan de la organización estructural de la frase, aun cuando en ocasiones algunas de las palabras no son escuchadas con claridad, *no sean inteligibles*, el contexto de la frase, ayuda a nuestro cerebro a comprender el mensaje aún cuando este no sea del todo claro.

El material de voz fue diseñado en un inicio, para realizar pruebas de logo audiometría; el propósito de esta tesis es validar este material para saber si son apropiadas para hacer pruebas de inteligibilidad.

Para esta prueba, se utilizaron 8 listas; 4 de palabras y 4 de fragmentos de palabras sin sentido llamadas logatom.

Una logatom es una unidad del lenguaje monosilábica o polisilábica que no significa nada para el escucha y que no tiene sentido; el que sean sin sentido nos da la certeza de que el sujeto no tiene la posibilidad de hacer ninguna correlación y de esta manera se evitan errores en el desarrollo de la prueba.

2.2.1 Diseño del material de voz

El material fue tomado del artículo Análisis fonético de listas de palabras de uso extendido en logó audiometría. [4]

El diseño del material de voz está construido a partir de las propiedades acústicas y fonéticas del idioma español; basados en estas características, el material de voz fue seleccionado y diseñado poniendo énfasis principalmente en el balance fonético contenido en cada lista.

La fonética es una rama de la lingüística que estudia la unidad fónica mínima del lenguaje y la capacidad que tiene para asociarse con significados específicos: cómo se pronuncian las letras, que características acústicas poseen y cómo se diferencian.

Cuando se menciona que el material está fonéticamente balanceado se quiere decir que en cada lista están representados, aproximadamente todos los sonidos o fonemas del idioma español característico de la Ciudad de México.

Para el análisis fonético de las palabras se consideraron 22 fonemas descartando el fonema "X" que es de origen Nahuatl.

2.2.2 Listas son las siguientes:

2.2.2.1 Palabras

| | Lista 1 | Lista 2 | Lista 3 | Lista 4 |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | nube | cedros | Corea | radio |
| 2 | deio | qose | Dulce | mide |
| 3 | crios | meta | Siglo | sello |
| 4 | cuales | sella | Yeso | mini |
| 5 | beca | duda | taches | irma |
| 6 | clavo | pluma | Pura | alqun |
| 7 | surco | fierro | Vino | cano |
| 8 | pleno | lina | niquel | dieta |
| 9 | flaca | pista | monte | trige |
| 10 | torno | duelo | Nilo | hombro |
| 11 | grasa | nombre | canción | unos |
| 12 | neta | cumbres | Reto | reto |
| 13 | medios | disco | tecleo | freno |
| 14 | miden | cieqa | Tarde | cerca |
| 15 | reno | Trenza | flanes | sudo |
| 16 | nina | Manto | busto | diego |
| 17 | botes | Cebra | Turco | seda |
| 18 | perros | Timbre | viernes | jaque |
| 19 | calor | Dije | quepa | pisen |
| 20 | duna | Norte | celtas | prensa |
| 21 | ellos | Perla | Hacia | Pili |
| 22 | siqo | Cena | cama | Calle |
| 23 | piano | Celo | Lloro | Lila |
| 24 | choca | Tira | Luces | cardo |
| 25 | llenos | Lince | premios | hambre |
| 26 | suela | Jalan | damas | braso |
| 27 | duque | Nuca | paies | Sebo |
| 28 | mino | Noche | Cabe | Lacre |
| 29 | cita | Codo | carmen | Plato |
| 30 | diosa | Nena | Corta | Tapia |
| 31 | selva | Miope | Cieqa | senda |
| 32 | caro | Puse | Libre | clame |
| 33 | cierta | Viena | deme | Liso |
| 34 | crean | Cero | mismo | curas |
| 35 | une | Pacto | Surco | sones |
| 36 | gestor | Laca | Tina | control |
| 37 | listo | Niño | vienen | tape |
| 38 | pera | Himno | Reqla | carmen |
| 39 | cifra | Cera | Zuela | lista |
| 40 | prima | Alla | dardo | feria |
| 41 | simple | Talco | Fino | dante |
| 42 | presa | Seda | Cielo | dones |
| 43 | toro | conde | necios | seta |
| 44 | deme | Tiro | Dota | nave |
| 45 | veinte | Seco | trance | nulo |
| 46 | dime | dique | padre | buque |
| 47 | lenta | Lista | pardo | queso |
| 48 | celda | Seso | Onda | esos |
| 49 | tiendas | Siqo | Nadie | siete |
| 50 | cada | Cura | Pica | asno |

2.2.2.2 Logatom

| | Lista 1 | Lista 2 | Lista 3 | Lista 4 |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | boy | Ne | or | si |
| 2 | se | Las | sar | ol |
| 3 | ta | Co | re | so |
| 4 | juez | uba | un | aca |
| 5 | ver | oma | ero | ani |
| 6 | sus | Sa | am | ada |
| 7 | ari | Yo | ene | Por |
| 8 | dot | una | bel | Lir |
| 9 | era | İpa | co | Ven |
| 10 | con | Odi | de | Ine |
| 11 | don | İta | ka | men |
| 12 | ma | Bic | po | Su |
| 13 | dec | sor | de | Fos |
| 14 | eni | Un | si | Ek |
| 15 | sed | mos | kir | Gris |
| 16 | ti | pom | an | traz |
| 17 | tres | Ta | bial | Les |
| 18 | flan | tres | osi | At |
| 19 | ser | del | tres | İr |
| 20 | lor | noc | dad | Pal |
| 21 | ol | nes | fo | Ya |
| 22 | go | cual | Ar | Ito |
| 23 | tam | re | ko | Alo |
| 24 | po | ime | ga | juez |
| 25 | an | nes | ici | buen |
| 26 | eg | lod | tal | Una |
| 27 | tes | ten | dep | Oco |
| 28 | ci | por | son | Ten |
| 29 | co | ene | Es | Mir |
| 30 | mo | jos | Jit | Ur |
| 31 | ca | fi | en | Ler |
| 32 | les | sid | To | Pie |
| 33 | buen | de | les | Des |
| 34 | dios | ad | igo | Ran |
| 35 | om | ase | La | Se |
| 36 | ran | sit | apa | Aci |
| 37 | adi | ate | So | emo |
| 38 | sil | par | bien | Ets |
| 39 | una | vo | mil | Ona |
| 40 | li | er | nos | Olo |
| 41 | pan | ari | esa | Ke |
| 42 | aca | le | Ta | Tec |
| 43 | pie | cur | no | Dad |
| 44 | em | ara | car | Oda |
| 45 | ero | ser | Er | Eba |
| 46 | et | oni | ame | mos |
| 47 | epa | les | una | Tez |
| 48 | ise | te | du | Eg |
| 49 | ada | gaz | muy | Dar |
| 50 | lo | log | Te | con |

2.2.3 Grabación del CD con el material de voz

Para hacer la evaluación del material de voz fue necesario hacer una grabación con las listas de palabras; esto con varios propósitos

- Que el escucha no tenga referencia de lectura de labios al momento de escuchar la palabra
- Que la grabación tenga una intensidad en volumen sin variaciones
- Que la voz sea la misma en todas las grabaciones
- Las palabras fueron grabadas sin ninguna entonación o intención.

Para que la grabación del material de voz fuese la idónea se tomaron en cuenta varios aspectos; el aspecto mas importante fue que el lugar donde se realizara la grabación tuviera características específicas en cuanto a control de ruido (bajo nivel del ruido de fondo);[5] por tanto, estas fueron realizadas en la cámara de transmisión del Lab. de Acústica CCADET;

Otro aspecto que se cuidó fue el seleccionar una voz que contara con buena dicción, tono, nivel, además de bien definida para que las palabras fueran pronunciadas de forma clara y sin ningún tipo de intención que pudiera confundir al escucha o darle información adicional.

La grabación del material fue realizada con el siguiente equipo:

Micrófono de condensador cardioide AT3525 de Audio-Technica ;
Consola digital Yamaha 03D
Tarjeta de sonido Echo Layla
PC Pentium 4

Una vez digitalizado el material de voz en la computadora se le dio forma, de acuerdo al las especificaciones explicadas en los artículos especializados en el tema [6] Se colocó una frase introductoria, que pone sobre aviso al escucha para, de esta manera, capturar su completa atención. También se introdujo un silencio para dar el tiempo indispensable para que el escucha haga sus anotaciones y se prepare para escuchar la siguiente palabra.

Para grabar el material de voz, editarlo y organizarlo de manera adecuada se utilizaron los programas Sound Forge 6 y Cool Edit Pro.

Una vez terminada la estructura del material y verificando que tuviese un buen nivel y tiempo; se grabaron en 2 CDs y para identificarlos de una mejor manera; en el primer disco se grabaron las 4 listas de palabras y en el otro las 4 listas de logatom.

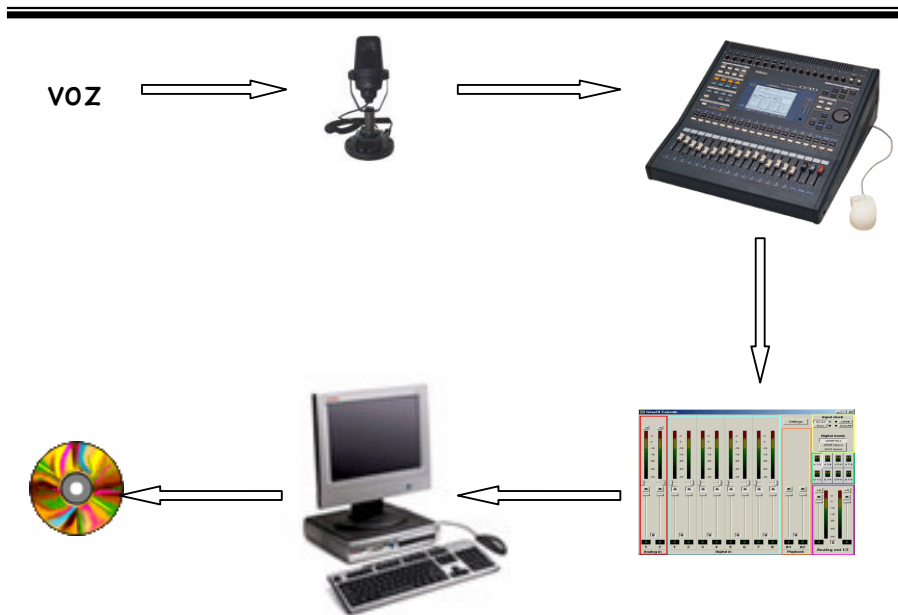


Figura 2.2 Esquema con los pasos con el desarrollo de la grabación.

Una vez terminada la grabación se distribuyo el material entre los investigadores del CCADET Sección Acústica para que aportaran su punto de vista acerca del material para verificar que no hubiera ningún tipo de error en cuanto a claridad, dicción y ritmo, que pudiese producir alguna confusión en el escucha así como para corregir posibles errores.

Las opiniones en resumen respecto al material de voz fueron las siguientes:

- Algunas palabras no se entendían claramente.
- El tiempo de espera entre frase introductoria y palabra es muy largo.
- El tono de voz no es uniforme.
- Variaciones en el nivel de volumen de la grabación.
- Tiempo de sobra para escribir la palabra o logatom.

Tomando en cuenta estas opiniones; se repitió la grabación poniendo mas atención en que el tono de voz fuera uniforme y con buena calidad en cuanto a la dicción; además se modificaron los tiempos, por lo que entre la frase y palabra se dejo un espacio de tiempo de un segundo, una vez mencionada la palabra o logatom, el escucha tiene alrededor de 3 segundos para escribir lo que escucho. Es importante señalar que al inicio de cada una de las lista se grabo una frase introductoria conindicaciones precisas para el desarrollo de la prueba y se solicito una respuesta escrita (no verbal) del escucha.

Capítulo 3

Metodología medición para evaluación y validación del material de voz

Para validar el material de voz es necesario tener un parámetro de referencia y comparación; para poder hacer esta comparación es necesario realizar 2 tipos de evaluaciones; una subjetiva y otra objetiva y los resultados obtenidos de cada prueba se compararon con artículos ya publicados de estudios similares.

La prueba subjetiva se realiza con un grupo de personas, a las que se les hace escuchar una grabación con el material de voz. Los sujetos, anotan lo que escuchan en una hoja diseñada especialmente para la realización de esta prueba. Esta parte de la evaluación nos da un punto de vista subjetivo de la inteligibilidad del material de voz en el recinto.

La segunda prueba es objetiva y se realiza por medio de secuencias MLS. Estas señales nos proporcionan información acerca de la respuesta acústica del recinto. La información obtenida a partir de las secuencias MLS se procesa con programas diseñados en MatLab; estos programas ayudan a desglosar la información que esta contenida en las señales y de esta forma se puede hacer la comparación entre los resultados objetivos y subjetivos.

Estas evaluaciones se realizaron en recintos donde la inteligibilidad de la voz tiene un papel importante; debido a que los salones de clases son espacios que solo existen con el propósito de la comunicación hablada.

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

3.1 Evaluación subjetiva

La evaluación subjetiva consiste en saber como es la percepción del material de voz en condiciones reales.

Esto salones cuentan con diferentes dimensiones y por lo tanto con características acústicas diferentes; esto con el propósito de exponer el material de voz a diversas condiciones y así probar su eficacia.

La razón por la cual se hizo la prueba en salones de clases fue porque estos requieren un alto grado de calidad acústica, para que los estudiantes puedan comprender integra y correctamente el mensaje del profesor.

Los principales problemas que presentan algunos salones de clases es que no tiene desde el inicio un diseño acústico adecuado para la actividad que son construidos, es por eso que el mensaje se ve afectado por el ruido de fondo y por el tiempo de reverberación del recinto.

La evaluación se realizó 4 salones que se encuentran dentro del CCADET; cada uno de ellos cuenta con ventanas que colindan con el estacionamiento o con el taller; por lo que cada uno se ve afectado de diferentes maneras por ruido de fondo. Apéndice A

3.1.1 Desarrollo de la evaluación subjetiva

Para cada uno de los salones se hizo un plano (Apéndice B); y se ubicaron los lugares donde se colocaron a las personas para tenerlo como referencia y colocar los micrófonos para la evaluación objetiva en el mismo sitio.

Se solicitó la ayuda de estudiantes que acuden a las aulas que se encuentran en el CCECADET a tomar clases de licenciatura o maestría; todos ellos aparentemente con buena audición.

A cada uno de ellos se les pidió que se sentaran en los lugares en donde comúnmente lo harían para tomar clase; solo se despidió que no estuvieran uno muy cerca de otro.

Se procuro que las pruebas fueran hechas bajo las condiciones típicas y cotidianas con las que se enfrentan los estudiantes en un día normal de clases.

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

Antes de iniciar la prueba se les explico que consistía en escuchar dos listas, una de palabras y otra de logatoms, cada una con 50 reactivos se les proporcionaron 2 hojas especialmente diseñadas para esta prueba y se hizo énfasis en que debían anotar las palabras tal como las escucharan sin tomar en cuenta reglas gramaticales y tratando de no completar las palabras, para no restar validez a la prueba [7, 13, 15].

Posteriormente escucharon las 2 grabaciones, la primera es una lista de palabras y la segunda, una lista de logatom.

Cabe destacar que después de cada palabra se da un tiempo aproximado de 3 seg. para que anoten lo que escucharon.

En el capitulo anterior (Cap 2) se mencionó que las listas con el material de voz fueron grabadas en 2 CD´s; la grabación de este material tiene características específicas para realizar este tipo de pruebas. En el frente del salón se colocó un reproductor de CD´s, un amplificador y un altavoz en una posición que similar a la posición típica de un profesor.

Las listas fueron reproducidas a un mismo nivel en todos los salones; este nivel se calibró con un sonómetro a 65 dB que es el nivel de voz de la mujer hablando en público.

Se utilizaron diferentes combinaciones de listas para que las 8 fueran evaluadas.

La siguiente tabla muestra el orden que se llevó para la evaluación de cada lista.

| | # | # Lista de | # Lista de |
|---------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | Personas | Palabras | Logatom |
| Salón 1 | 5 | 1 | 1 |
| Salón 2 | 5 | 4 | 4 |
| Salón 3 | 5 | 2 | 2 |
| Salón 4 | 5 | 3 | 3 |

Después de realizar la prueba, se calificaron los aciertos y se dio un puntaje en porcentaje (50 aciertos igual 100%). Con esto se logró un punto de vista subjetivo tanto de la inteligibilidad del material de voz, como del recinto.

Los resultados de las pruebas se muestran en el capitulo 4.

3.2 Evaluación objetiva

La evaluación objetiva, consiste en evaluar el recinto mediante los índices acústicos (tiempo de reverberación, reflexiones tempranas, tiempo de decaimiento, ruido de fondo, claridad, etc.). [7,8, 16]

La inteligibilidad del lenguaje en un salón esta determinada por el ruido de fondo y por las características acústicas del mismo.

Las características acústicas de un recinto son tradicionalmente evaluadas a partir del tiempo de reverberación (RT); este se obtiene de la respuesta impulso del mismo.

Una vez conociendo el tiempo de reverberación; se pueden obtener los índices acústicos del salón, estos, nos darán información que podrá ser comparada con los resultados arrojados por la prueba subjetiva.

Para obtener la respuesta al impulso se utiliza la técnica de correlación de secuencias de máximas longitud (MLS, por sus siglas en ingles).

3.2.1 Respuesta impulso

La principal descripción acústica de un cuarto nos la proporciona la respuesta impulso; para medir la respuesta impulso de un cuarto la mejor forma es excitarlo con una señal impulsiva y obtener la respuesta del cuarto a esta excitación.

La respuesta impulso nos permite representar gráficamente la amplitud, tiempo de arribo de la señal, componentes en frecuencia, y dirección de arribo del sonido directo y todas las reflexiones subsecuentes.

Existen algunas dificultades básicas para que estas mediciones sean correctas. La primera es generar la excitación impulsiva y el segunda obtener el adecuado rango dinámico.

Para generar la excitación impulsiva acústica existen varias técnicas como por ejemplo generar una chispa electrónicamente, un disparo o el sonido de la explosión de un globo; pero es difícil asegurar que con este método se obtiene la misma cantidad de energía distribuida en todo el sistema sobre todo en las frecuencias de interés, esto se debe a que la duración del impulso

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

es muy corto y por lo mismo es difícil generar suficiente energía para superar el ruido de fondo.

Otra manera de excitar un sistema es por medio de ruido; ya que la excitación es aplicada por un largo periodo de tiempo, por lo tanto mas energía es liberada al sistema para dar una aptitud de señal. Además, con este método es más fácil asegurar la uniforme distribución de la energía sobre todas las frecuencias.

Uno de los métodos modernos para la obtención de la respuesta impulso son las secuencias de máxima longitud (Maximal Length Sequence), estas son generadas con un programa de computadora: también son llamadas secuencias de pseudoruido (PN) o secuencias m.

Son secuencias periódicas binarias de longitud $2^m - 1$ con una relación señal a ruido igual a

$$10 \log_{10}(2^m - 1). \quad (3.1)$$

La respuesta del impulso obtenida de las secuencias MLS, puede estar representada fácilmente en el dominio de tiempo esto con el objeto de ver claramente cuales son los datos que son de utilidad y rechazar los datos que no lo son.

A partir de la respuesta impulso obtenida de las secuencias MLS y teniendo un representación grafica de la misma, se puede calcular el tiempo de reverberación del cuarto y tomando este dato como base se pueden calcular los índices acústicos que nos ayudaran a caracterizar el recinto.

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

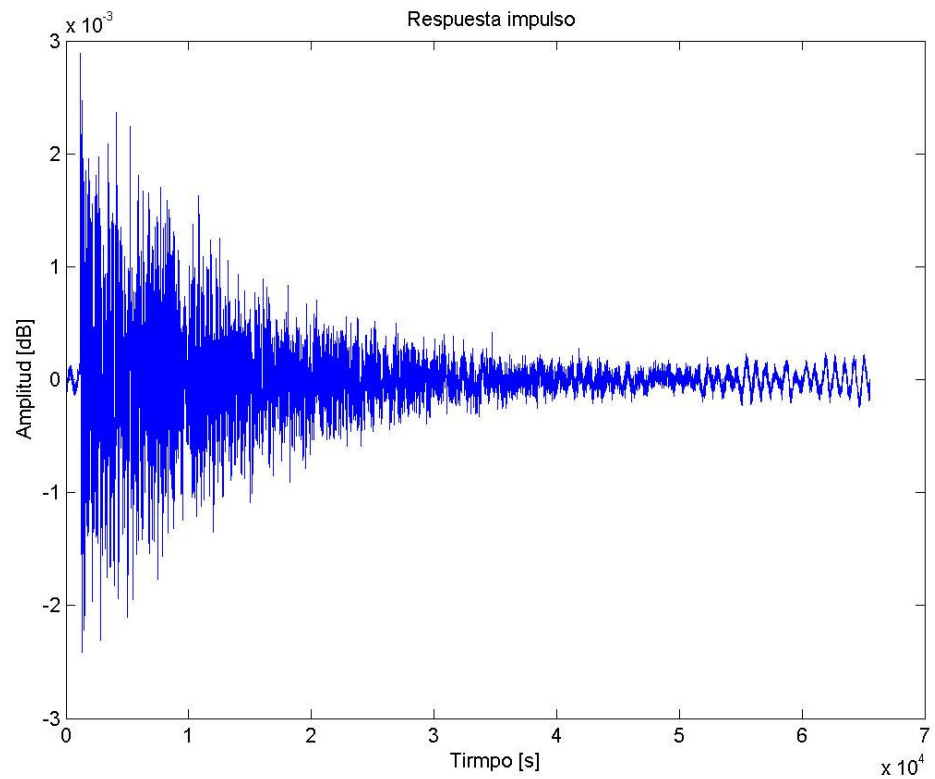


Figura 3.1 Respuesta impulso de un cuarto representación en tiempo y amplitud

La respuesta impulso de un recinto se determina al excitar un recinto con una señal y la correlación que existe entre el sonido generado y el obtenido a partir de la respuesta del recinto.

Señal de excitación

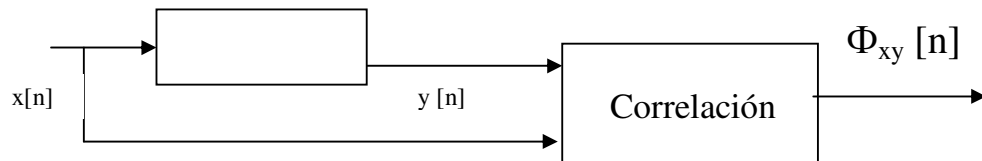


Figura 3.2 Metodo para medir la respuesta impulso a partir de una función de correlación entrada-salida

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

Los métodos de obtención de la respuesta impulso se basan en el mismo principio:

- Excitación de la sala con una fuente de sonido;
- Grabación de la respuesta del recinto;
- Cálculo de la respuesta impulso;

Para obtener la respuesta impulso, el sistema fue excitado por una señal de ruido aleatorio compuesto por secuencias de máxima longitud (MLS); la autocorrelación de esta señal es casi un impulso.

El cálculo de la correlación se efectúa por medio de la transformada de Hadamard. Este método resulta bastante eficiente en lo que se refiere al tiempo de procesamiento; además varios autores han mostrado que las mediciones con secuencias de máxima longitud son prácticas, puesto que se generan fácilmente y generalmente proveen de una alta inmunidad al ruido.

A fin de obtener respuestas a impulso con una relación de señal a ruido grande y un espectro rico, ciertas condiciones referentes a la señal de la fuente se deben cumplir:

- La señal generada debe contener suficiente energía de manera que se tengan altas relaciones de señal a ruido en todas las componentes de las frecuencias de interés,
- Deberá abarcar todas las frecuencias de interés para tener un espectro rico
- La señal debe ser repetible a lo largo del tiempo y espacio.

Para la mayoría de los propósitos de medición, la fuente deberá radiar el sonido de manera uniforme en todas las direcciones, para las mediciones de reverberación los requerimientos referentes a la omnidireccionalidad de la radiación no son tan estrictos, ya que en cualquier caso los distintos componentes del sonido se mezclan en el transcurso del tiempo.

En cuanto al detector; generalmente se emplean micrófonos sensibles a la presión con características omnidireccionales como receptores de sonido; también deberá tener una respuesta en frecuencia que abarque el ancho de banda de interés.

Las secuencias de máxima longitud (Maximal Length Sequence) que también son llamadas de pseudoruido (PN) o secuencias m; son secuencias periódicas

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

binarias de longitud $2^m - 1$ con una relación señal a ruido igual a $10\log(2^m - 1)$.

3.2.2 Desarrollo de la evaluación objetiva

Se procuró que las condiciones para realizar la prueba objetiva fueran las mismas bajo las que se realizó la prueba subjetiva.

En el frente del salón se colocó una computadora personal para generar las secuencias MLS mediante un programa desarrollado en el Laboratorio de Acústica del CCADET, UNAM [9]

Para generar las secuencias fue necesario conectar un amplificador y un altavoz a la computadora; a la vez se conectó el micrófono a la una de las entradas de la computadora para así poder captar y grabar la señal captada por el micrófono y de esta manera hacer la correlación entre la señal generada y la obtenida a partir de la respuesta del recinto.

El micrófono se colocó en cada una de las posiciones donde se ubicaron a los sujetos, (estos puntos fueron señalados en los mapas de los salones con el objeto de captar respuesta del recinto en esos puntos en específico); cuando se realizó la prueba escrita.

Para cada una de estas posiciones se generó una secuencia MLS desde el frente del salón; el micrófono captó la respuesta del recinto en ese punto y cada una de las señales fueron guardadas en la computadora.

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

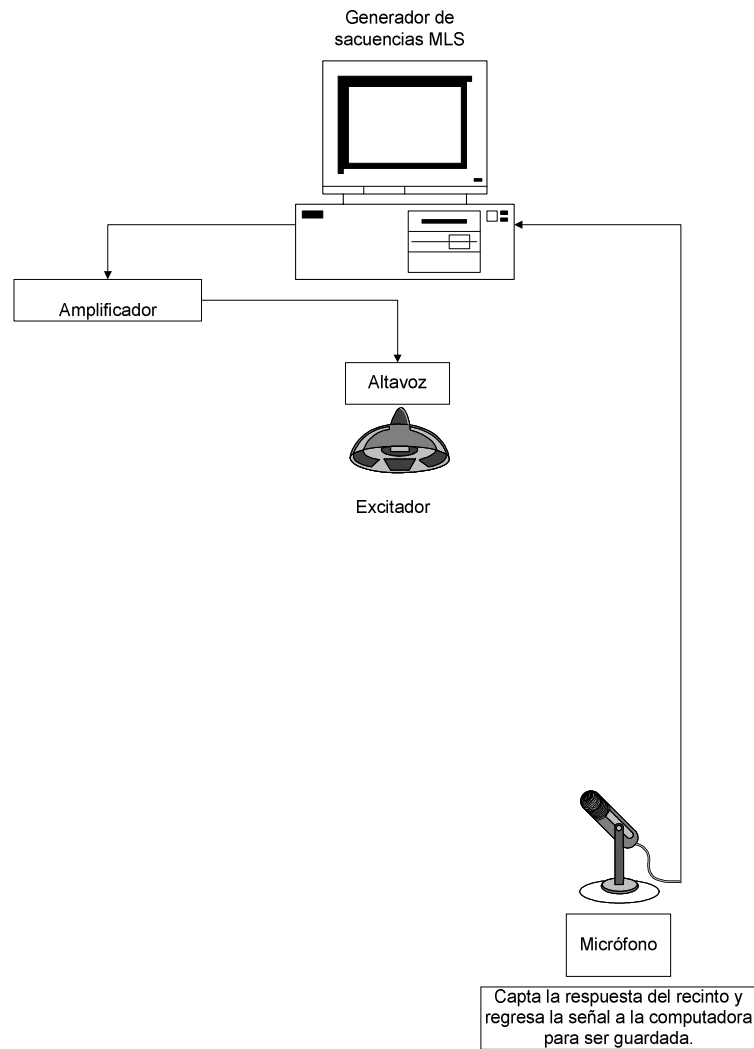


Figura 3.3 Diagrama de las conexiones del equipo.

La señal obtenida por el micrófono de medición nos proporciona información acerca de la respuesta acústica del recinto para después procesarla y obtener los índices acústicos.

Estos programas son diseñados con las formulas de los índices acústicos y nos ayudan a desglosar la información que esta contenida en las señales y de esta forma poder hacer la comparación entre los resultados objetivos y subjetivos.

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

Una vez obtenidos estos resultados, se determinará el coeficiente de correlación entre los puntajes de la evaluación subjetiva y los valores de los índices acústicos medidos mediante la evaluación objetiva. Finalmente, estos coeficientes de correlación se comparan con los que se han publicado y utilizando anteriormente en otros idiomas [10, 11, 14]. Si los coeficientes de correlación son parecidos, el material del habla utilizado tendrá un comportamiento similar y por lo tanto podrá ser validado.

3.2.2 Índices acústicos

Los índices acústicos pueden ser calculados a partir de la respuesta impulso. Algunos de los más utilizados para evaluar un recinto son los siguientes:

Tiempo de Reverberación

El tiempo de reverberación es el tiempo que tarda en decaer el sonido hasta la inaudibilidad después de que la fuente del sonido ha parado; es el tiempo requerido para que un sonido caiga 60 dB.

El tiempo de reverberación dependerá del tamaño del recinto y del uso para el cual está diseñado.

Tiempo de Decaimiento Temprano (EDT)

El tiempo de decaimiento temprano depende del tiempo de reverberación. El tiempo de decaimiento temprano es el tiempo que tarda en decaer el sonido los primeros 10dB equivalentes a la pendiente de la curva de energía medida dentro de los primeros 500ms; este se puede calcular a partir de las curvas de decaimiento [14] pero se toma un intervalo entre los 0 a -10 dB. Este es uno de los criterios más importantes para la evaluación de un recinto.

Claridad (C50)

Son las reflexiones del sonido más cortas que se generan después del sonido directo.

Es una medida de relación expresada en dB; en el caso del lenguaje se compara la energía temprana (antes de 50ms) y la energía tardía (posterior a 50ms).

En el caso de la música el parámetro es de 80ms.

Metodología para evaluación y validación del material de VOZ

$$C80 = 10 \log \frac{\text{energíatemprana}}{\text{energíatardia}} = \left[\frac{\int_0^{50} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right] \quad (3.2)$$

Definición D50

Es la relación entre la energía temprana con un tiempo límite de 50ms y la energía total, comúnmente se expresa como porcentaje.

$$D50 = \frac{\int_0^{50} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (3.3)$$

Tiempo Central TC

Propuesto por Cremer, tiene la ventaja de no asumir cualquier límite arbitrario entre las reflexiones tempranas y las tardías como en C80 y D50. Indica el momento de primer orden del cuadrado de la respuesta al impulso en nivel de presión, expresada en milisegundos.

$$T_c = \frac{\int_0^{\infty} t * h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (3.4)$$

Capítulo 4

Mediciones y resultados

En el capítulo anterior se describió la metodología para realizar las pruebas al material de voz y así poderlo validar; se hizo mención de los índices acústicos, dando una breve explicación y haciendo mención a las formulas con las cuales se definen dichos índices.

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos tanto de la prueba subjetiva como de la prueba objetiva y de igual manera se explica la utilidad de los índices acústicos y como de ellos se obtienen los datos necesarios para tener un parámetro de comparación entre una prueba y otra.

4.1 Análisis de la respuesta impulso

Para desglosar la información contenida de cada una de las respuestas impulso capturadas, se hicieron programas en MATLAB basados en las formulas que definen tanto el tiempo de reverberación como los índices acústicos mencionados en el capítulo anterior.

Estos programas se pueden consultar a detalle en el Apéndice D.

Para iniciar el desglose de información; cada una de las respuestas impulso fue recortada para analizar solo la parte útil de la señal para después filtrarla en octavos de banda y así saber como responde el recinto a cada una de estas frecuencias.

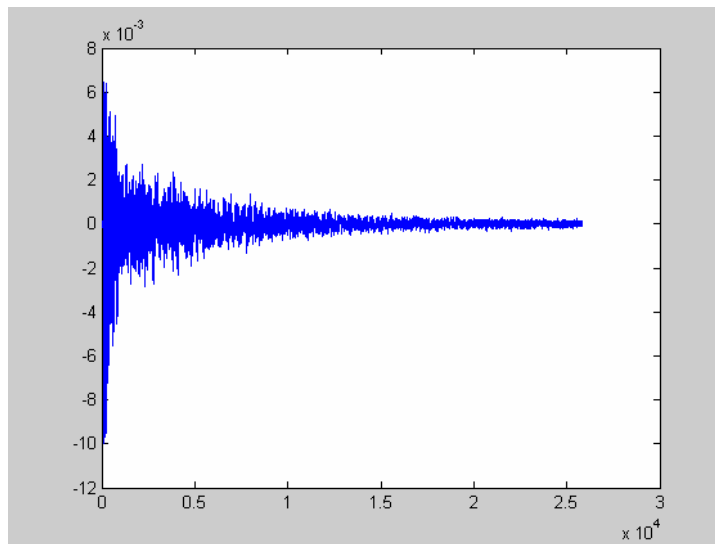


Figura 4.1 Respuesta impulso recortada

Al separarse por octavos de banda se puede conocer la respuesta del salón en aquellas frecuencias que forman parte del rango útil para la inteligibilidad del lenguaje.

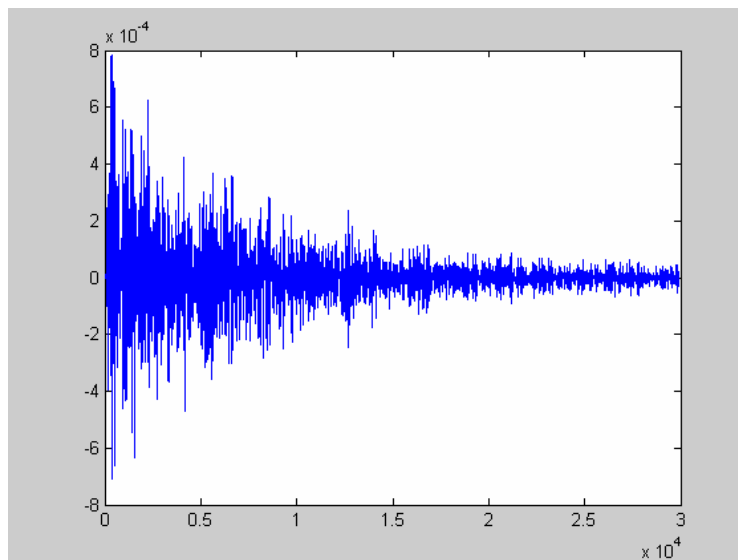


Figura 4.2 Respuesta impulso filtrada a 1000 Hz.

A partir de la señal filtrada se puede conocer la curva de decaimiento de cada señal y procesarlas con los programas de los índices acústicos; tiempo de reverberación, tiempo de decaimiento temprano (EDT) y la claridad (ELR).

Los resultados arrojados por cada programa nos dan información importante acerca de cómo responde el recinto a la señal impulsiva.

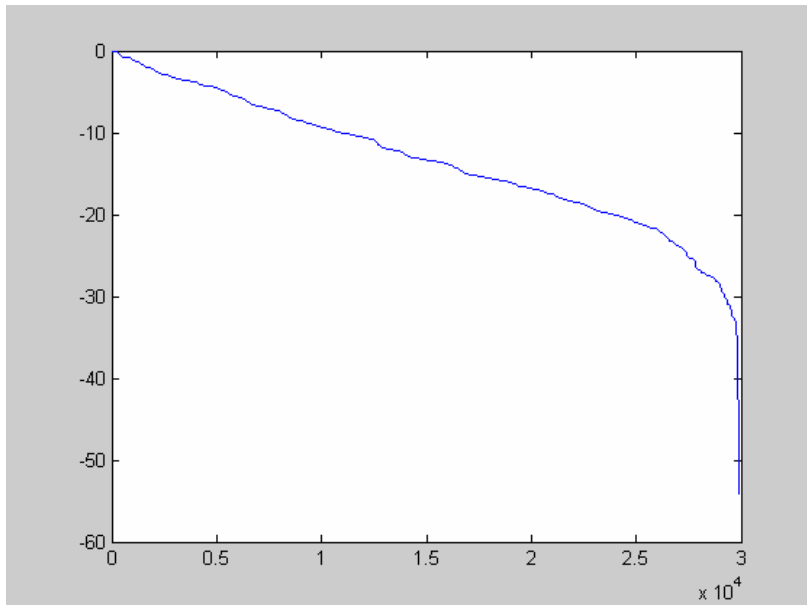


Figura 4.3 Curva de decaimiento de la respuesta impulsiva filtrada a 1000 Hz.

4.2 Resultados objetivos y subjetivos de cada uno de los recintos

Se mostrarán los resultados subjetivos y objetivos de cada uno de los salones; las primeras 2 tablas muestran los resultados subjetivos de las evaluaciones, las tablas de la respuesta objetivas

4.2.1 Resultados Aula 1

4.2.1.1 Resultados subjetivos

Lista de palabras

| Posición | Reactivos | Errores | Porcentaje % |
|----------|-----------|-----------------|--------------|
| 1 | 50 | 4 | 92 |
| 2 | 50 | 5 | 88 |
| 3 | 50 | 2 | 96 |
| 4 | 50 | 5 | 90 |
| 5 | 50 | 4 | 92 |
| | | Promedio | 91.6 |

Tabla A1.1

Lista de logatoms

| Posición | Reactivos | Errores | Porcentaje % |
|----------|-----------|-----------------|--------------|
| 1 | 50 | 11 | 78 |
| 2 | 50 | 9 | 82 |
| 3 | 50 | 9 | 82 |
| 4 | 50 | 15 | 70 |
| 5 | 50 | 9 | 82 |
| | | Promedio | 78.8 |

Tabla A1.2

4.2.1.2 Resultados objetivos

En las siguientes tablas se mostraran los resultados obtenidos en cada uno de los índices acústicos.

Tiempo de Reverberación

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHz | 4KHz |
|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 0.82 | 1.13 | 1.50 | 1.45 | 1.21 | 1.12 |
| 2 | 1.80 | 2.00 | 1.50 | 1.55 | 1.06 | 1.21 |
| 3 | 4.19 | 1.25 | 1.74 | 1.35 | 1.30 | 1.09 |
| 4 | 1.85 | 2.29 | 1.22 | 1.60 | 1.20 | 1.24 |
| 5 | 1.41 | 1.21 | 1.75 | 1.15 | 1.42 | 1.14 |
| Promedio | 2.01 | 1.58 | 1.54 | 1.42 | 1.24 | 1.16 |
| Desv.estandar | 1.28 | 0.53 | 0.22 | 0.18 | 0.13 | 0.06 |

Tabla A1.3

EDT

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHz | 4KHz |
|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 1.43 | 0.98 | 1.61 | 1.40 | 1.08 | 0.97 |
| 2 | 2.20 | 1.18 | 1.40 | 1.64 | 1.02 | 1.09 |
| 3 | 3.30 | 1.80 | 1.90 | 1.75 | 1.30 | 1.15 |
| 4 | 3.10 | 2.90 | 1.10 | 1.47 | 1.36 | 1.04 |
| 5 | 1.86 | 2.15 | 1.88 | 1.23 | 1.25 | 1.24 |
| Promedio | 2.38 | 1.80 | 1.58 | 1.50 | 1.20 | 1.10 |
| Desv.estandar | 0.80 | 0.77 | 0.34 | 0.20 | 0.15 | 0.10 |

Tabla A1.4

Claridad

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHz | 4KHz |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | -10.00 | -5.70 | 2.31 | -0.71 | 1.18 | 2.28 |
| 2 | -7.00 | -4.00 | 0.54 | -1.05 | -1.54 | -0.36 |
| 3 | -7.50 | -3.44 | 3.53 | -1.29 | -3.40 | 1.43 |
| 4 | -4.36 | -2.75 | -0.60 | -1.51 | -1.29 | -0.24 |
| 5 | -4.00 | 2.42 | -1.64 | 0.54 | -0.10 | -1.36 |
| Promedio | -6.57 | -2.69 | 0.83 | -0.80 | -1.03 | 0.35 |
| Desv.estandar | 2.46 | 3.06 | 2.10 | 0.81 | 1.71 | 1.47 |

Tabla A1.5

4.2.2 Resultados Aula 2

4.2.2.1 Resultados Subjetivos

Lista de palabras

| Posición | Reactivos | Errores | Porcentaje % |
|----------|-----------|----------|--------------|
| 1 | 50 | 7 | 86 |
| 2 | 50 | 3 | 94 |
| 3 | 50 | 6 | 88 |
| 4 | 50 | 2 | 96 |
| 5 | 50 | 5 | 90 |
| | | Promedio | 90.8 |

Tabla A2.1

Lista de logatom

| Posición | Reactivos | Errores | Porcentaje % |
|----------|-----------|----------|--------------|
| 1 | 50 | 5 | 90 |
| 2 | 50 | 3 | 94 |
| 3 | 50 | 8 | 84 |
| 4 | 50 | 3 | 94 |
| 5 | 50 | 8 | 84 |
| | | Promedio | 89.2 |

Tabla A2.2

4.2.2.2 Resultados objetivos

Tiempo de Reverberación

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHZ | 4KHz |
|------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 5.00 | 1.47 | 1.14 | 0.90 | 1.00 | 0.80 |
| 2 | 5.00 | 3.40 | 1.12 | 0.95 | 1.00 | 0.82 |
| 3 | 2.00 | 1.28 | 1.20 | 0.97 | 1.00 | 0.78 |
| 4 | 1.77 | 1.70 | 1.00 | 1.23 | 0.90 | 1.00 |
| 5 | 1.32 | 1.18 | 1.17 | 1.22 | 0.95 | 0.93 |
| Promedio | 3.02 | 1.81 | 1.13 | 1.05 | 0.97 | 0.87 |
| Desv. Est. | 1.83 | 0.91 | 0.08 | 0.16 | 0.04 | 0.09 |

Tabla A2.3

EDT

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHZ | 4KHz |
|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 1.98 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0.83 |
| 2 | 0.67 | 3.37 | 1 | 1 | 0.86 | 0.83 |
| 3 | 2.5 | 1.17 | 0.8 | 1 | 1.05 | 0.7 |
| 4 | 1.65 | 2.6 | 1 | 1 | 0.9 | 0.92 |
| 5 | 1.75 | 1.27 | 1 | 1.6 | 1 | 0.9 |
| Promedio | 1.71 | 2.08 | 0.96 | 1.12 | 0.96 | 0.84 |
| Desv.estandar | 0.67 | 0.93 | 0.09 | 0.27 | 0.08 | 0.09 |

Tabla A2.4

Claridad

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHZ | 4KHz |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1 | -6.57 | -1.95 | 4.00 | 0.67 | 0.08 | 3.08 |
| 2 | -12.50 | -6.90 | -2.00 | -0.86 | 1.86 | 2.40 |
| 3 | 0.94 | 2.96 | -1.73 | 2.14 | 1.60 | 5.00 |
| 4 | -7.64 | -0.36 | -2.00 | 3.50 | -0.31 | 0.00 |
| 5 | -7.30 | -7.06 | -0.80 | -2.44 | 0.00 | 0.83 |
| Promedio | -6.61 | -2.66 | -0.51 | 0.60 | 0.65 | 2.26 |
| Desv. Est. | 4.83 | 4.32 | 2.57 | 2.35 | 1.00 | 1.96 |

Tabla A2.5

4.2.3 Resultados Aula 3

4.2.3.1 Resultados Subjetivos

Lista de palabras

| Posición | Reactivos | Errores | Porcentaje % |
|----------|-----------|----------|--------------|
| 1 | 50 | 10 | 86 |
| 2 | 50 | 4 | 94 |
| 3 | 50 | 3 | 88 |
| 4 | 50 | 13 | 96 |
| 5 | 50 | 10 | 90 |
| | | Promedio | 84 |

Tabla A3.1

Lista de logatom

| Posición | Reactivos | Errores | Porcentaje % |
|----------|-----------|----------|--------------|
| 1 | 50 | 15 | 70 |
| 2 | 50 | 28 | 88 |
| 3 | 50 | 8 | 82 |
| 4 | 50 | 12 | 76 |
| 5 | 50 | 16 | 74 |
| | | Promedio | 69.2 |

Tabla A3.2

4.2.3.2 Resultados Objetivos

Tiempo de Reverberación

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHZ | 4KHz |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1 | 1.66 | 2.3 | 1.4 | 1.8 | 1.7 | 1.6 |
| 2 | 1.5 | 3 | 1.37 | 1.4 | 1.3 | 1.4 |
| 3 | 2.2 | 1.4 | 0.85 | 0.92 | 0.86 | 0.85 |
| 4 | 1.53 | 2.39 | 1.55 | 1.2 | 1.5 | 1.5 |
| 5 | 1.96 | 1.4 | 1.5 | 1.8 | 1.6 | 1.5 |
| Promedio | 1.77 | 2.098 | 1.334 | 1.424 | 1.392 | 1.37 |
| Desv.estandar | 0.30 | 0.69 | 0.28 | 0.38 | 0.33 | 0.29 |

Tabla A3.3

EDT

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHZ | 4KHz |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2.3 | 1 | 1.37 | 1.88 | 1.4 | 1 |
| 2 | 2.5 | 2.44 | 1.57 | 1.2 | 1.28 | 1.22 |
| 3 | 1.68 | 1.6 | 1.6 | 1.4 | 1.17 | 0.99 |
| 4 | 2.12 | 2.58 | 1.3 | 1.2 | 1.36 | 1 |
| 5 | 1.7 | 2 | 1.47 | 1.7 | 1.33 | 1 |
| Promedio | 2.06 | 1.924 | 1.462 | 1.476 | 1.308 | 1.042 |
| Desv.estandar. | 0.36 | 0.64 | 0.12 | 0.30 | 0.08 | 0.09 |

Tabla A3.4

Claridad

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHZ | 4KHz |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | -5.60 | -4.50 | -2.35 | -1.76 | 0.03 | 0.25 |
| 2 | -0.24 | -2.73 | -3.53 | -1.80 | -0.52 | 0.70 |
| 3 | -2.78 | -3.26 | 1.11 | 1.16 | 0.08 | 1.09 |
| 4 | -5.15 | -0.04 | -1.94 | 0.44 | -0.37 | 1.24 |
| 5 | -7.54 | -2.35 | -0.53 | -2.60 | -2.53 | -1.51 |
| Promedio | -4.26 | -2.58 | -1.45 | -0.91 | -0.66 | 0.35 |
| Desv.estandar | 2.81 | 1.63 | 1.79 | 1.62 | 1.08 | 1.11 |

Tabla A3.5

4.2.4 Resultados Aula 4

4.2.4.1 Resultados Subjetivos

Lista de palabras

| Posición | Reactivos | Errores | Porcentaje % |
|----------|-----------|----------|--------------|
| 1 | 50 | 1 | 98 |
| 2 | 50 | 2 | 96 |
| 3 | 50 | 8 | 84 |
| 4 | 50 | 5 | 90 |
| 5 | 50 | 5 | 90 |
| | | Promedio | 91.6 |

Tabla A4.1

Lista de logatom

| Posición | Reactivos | Errores | Porcentaje % |
|----------|-----------|----------|--------------|
| 1 | 50 | 5 | 90 |
| 2 | 50 | 7 | 86 |
| 3 | 50 | 10 | 80 |
| 4 | 50 | 10 | 80 |
| 5 | 50 | 10 | 80 |
| | | Promedio | 83.2 |

Tabla A4.2

4.2.4.2 Resultados Objetivos

Tiempo de Reverberación

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHz | 4KHz |
|----------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 2.00 | 1.40 | 1.00 | 0.86 | 1.14 | 1.00 |
| 2 | 1.72 | 1.12 | 1.00 | 1.26 | 1.00 | 0.87 |
| 3 | 5.45 | 1.00 | 1.21 | 1.40 | 1.50 | 1.30 |
| 4 | 2.00 | 1.20 | 1.10 | 1.23 | 1.26 | 0.95 |
| 5 | 2.00 | 1.12 | 1.65 | 1.30 | 1.14 | 1.00 |
| Promedio | 2.63 | 1.17 | 1.19 | 1.21 | 1.21 | 1.02 |
| Desv. estandar | 1.58 | 0.15 | 0.27 | 0.21 | 0.19 | 0.16 |

Tabla A4.3

EDT

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHZ | 4KHz |
|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.29 | 1.11 | 0.94 |
| 2 | 2.70 | 1.17 | 1.11 | 1.30 | 1.00 | 0.98 |
| 3 | 1.60 | 2.00 | 1.13 | 1.61 | 1.20 | 1.00 |
| 4 | 2.00 | 1.16 | 1.30 | 1.40 | 1.22 | 0.98 |
| 5 | 2.40 | 1.30 | 1.80 | 1.10 | 1.10 | 0.93 |
| Promedio | 2.14 | 1.53 | 1.27 | 1.34 | 1.13 | 0.97 |
| Desv.estandar | 0.42 | 0.44 | 0.32 | 0.19 | 0.09 | 0.03 |

Tabla A4.4

Claridad

| Micrófono | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1KHz | 2KHZ | 4KHz |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1 | -5.87 | -0.85 | 0.59 | 0.61 | 1.26 | 1.58 |
| 2 | -4.30 | 1.75 | 1.00 | -0.57 | -1.02 | 0.67 |
| 3 | -6.12 | -3.00 | 9.00 | 0.03 | 1.63 | 1.80 |
| 4 | -9.00 | -2.00 | 0.59 | 0.20 | 0.94 | 1.50 |
| 5 | -3.90 | -1.78 | -1.50 | 2.37 | 1.20 | 2.30 |
| Promedio | -5.84 | -1.18 | 1.94 | 0.53 | 0.80 | 1.57 |
| Desv.estandar | 2.01 | 1.81 | 4.07 | 1.11 | 1.05 | 0.59 |

Tabla A4.5

Capitulo 5

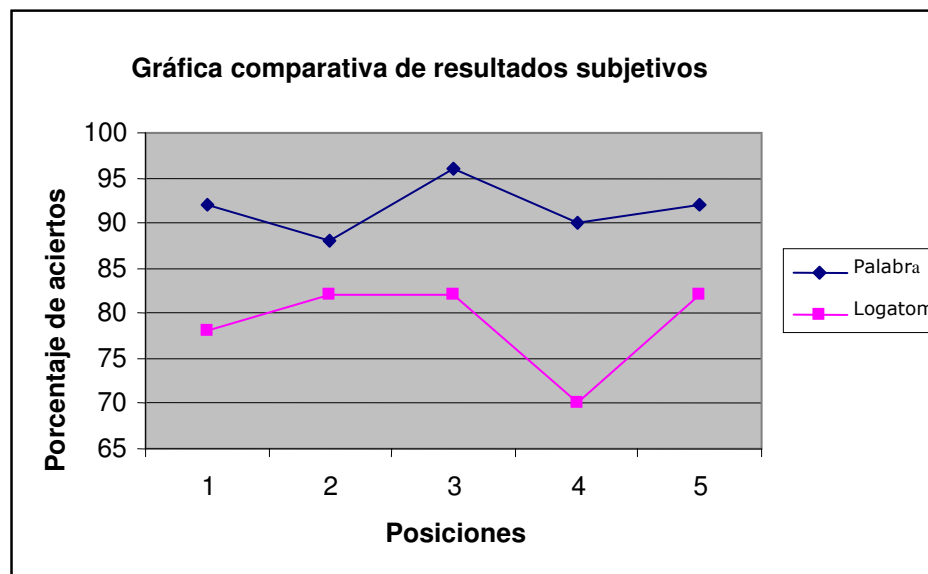
Conclusiones

En este capitulo se analizaran los resultados objetivos y subjetivos y la correlación que hay entre ellos.

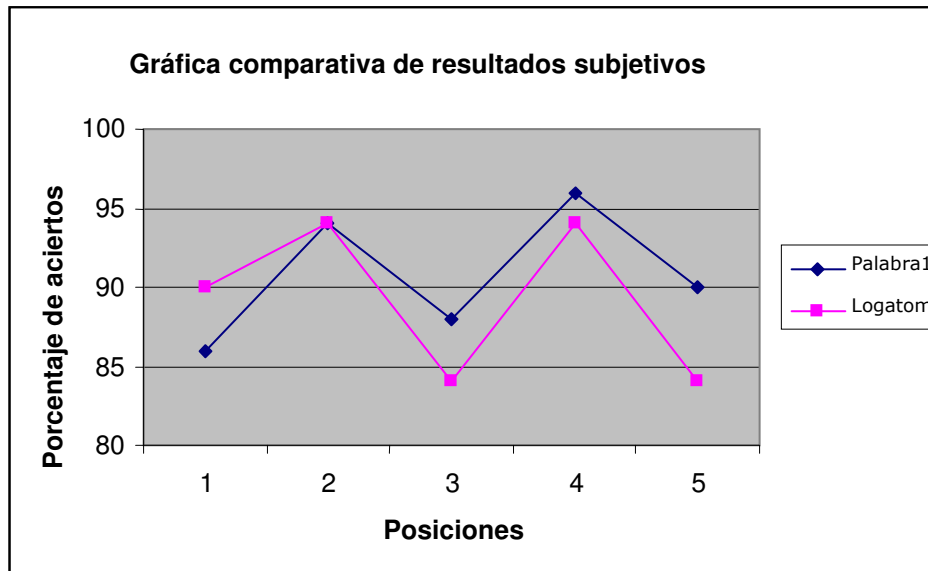
5.1 Resultados de las pruebas subjetivas

Graficas comparativas de aciertos entre pruebas con listas de palabras y de pruebas logatom.

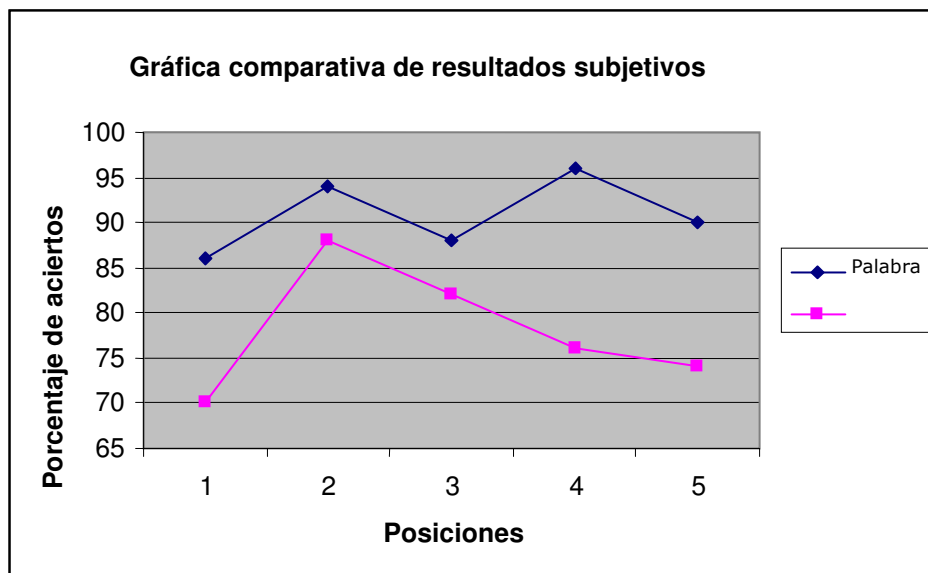
Aula 1



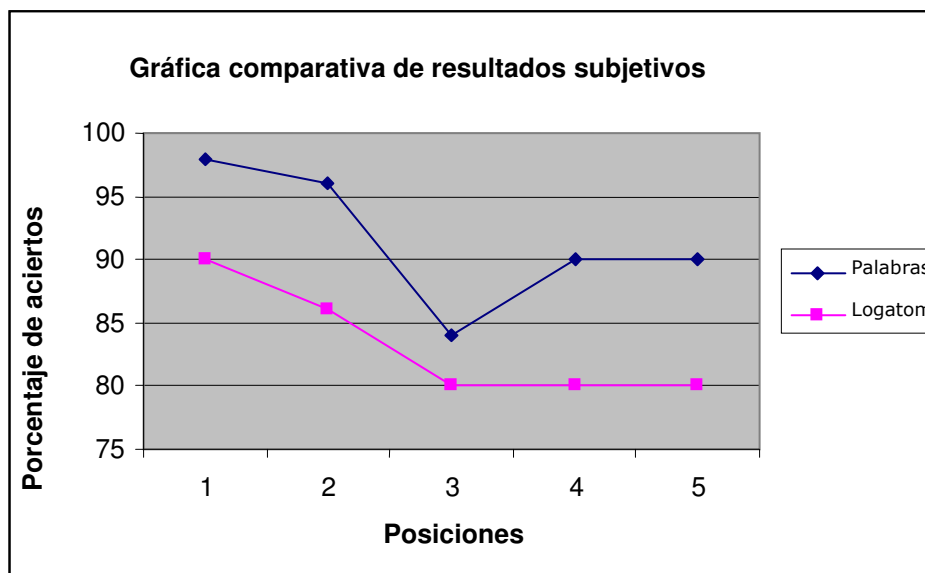
Aula 2



Aula 3



Aula 4



Como se puede observar el puntaje de logatom es mas bajo en todos los casos; esto refleja que es un material más difícil de identificar que las palabras, por lo que se forzar al sujeto escuchar cada uno de los fonemas que integran el mensaje, sin el efecto de memorización que puede permitir adivinar la palabra.

Por lo tanto el material de logatom cumple su fin y es el apropiado para esta prueba.

Observe que la posición de los escuchas tiene mucho que ver el la percepción de las palabras, esto se refleja de la misma manera en los resultados; obteniendo puntajes mas altos para aquellos escuchas que se encuentran más cerca de la fuente y que reciben el estímulo de manera directa.

Por lo anterior podemos decir que el material de voz, constituido por logatom, si puede ser utilizado para evaluar inteligibilidad en salones de clase.

5.2 Correlación entre las pruebas

Para saber si existe correlación entre los resultados de las pruebas subjetivas y objetivas; debemos hacer una correlación entre ambos resultados obtenidos; esto ayudará a determinar que tan confiable es la prueba subjetiva en comparación con la objetiva.

Este coeficiente determina que tanto coinciden los resultados de las pruebas tomando como una correlación aceptable cuando esta es mayor de "0.50".

Este procedimiento se realizará con MATLAB y se calculó tomando en consideración alimentando la los datos del tiempo de reverberación obtenidos en cada frecuencia y los porcentaje de aciertos de las listas de palabras.

5.2.1 % de aciertos de palabras vs Tiempo de Reverberación

Aula 1

| Frecuencia | Coef. de Correlación |
|------------|----------------------|
| 125 | 0.65 |
| 250 | 0.7 |
| 500 | 0.62 |
| 1000 | 0.55 |
| 2000 | 0.66 |
| 4000 | 0.86 |

Aula 2

| Frecuencia | Coef. de Correlación |
|------------|----------------------|
| 125 | -0.18 |
| 250 | 0.54 |
| 500 | -0.77 |
| 1000 | 0.54 |
| 2000 | -0.65 |
| 4000 | 0.67 |

Aula 3

| Frecuencia | Coef. de Correlación |
|------------|----------------------|
| 125 | -0.55 |
| 250 | -0.57 |
| 500 | 0.84 |
| 1000 | -0.61 |
| 2000 | -0.57 |
| 4000 | 0.81 |

Aula 4

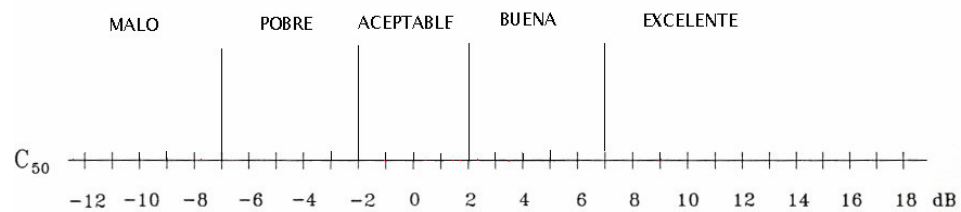
| Frecuencia | Coef. de Correlación |
|------------|----------------------|
| 125 | -0.78 |
| 250 | 0.78 |
| 500 | -0.47 |
| 1000 | -0.8 |
| 2000 | -0.85 |
| 4000 | -0.77 |

De acuerdo a los coeficientes de correlación obtenidos en esta prueba se concluye que existe semejanza en los resultados obtenidos de ambas pruebas por lo tanto se considera que el material de voz esta validado por el índice de tiempo de reverberación.

5.3 Conclusión por índice de claridad C50

En el artículo "Speech intelligibility prediction from calculate C50 values" de L. Gerald Marshall. El índice de claridad C50 se utiliza para cuantificar la inteligibilidad del lenguaje en espacios cerrados para este propósito Marshall utilizó la siguiente escala; la cual nos servirá para definir el nivel de claridad obtenido en las aulas; en las frecuencias que son mas representativas para el oído humano. En esta gráfica se representan los valores de claridad obtenidos en las frecuencias que van desde los 500 hz hasta los 40000 Hz; ya que como se mencionó anteriormente estas son las mas representativas para el oído humano.

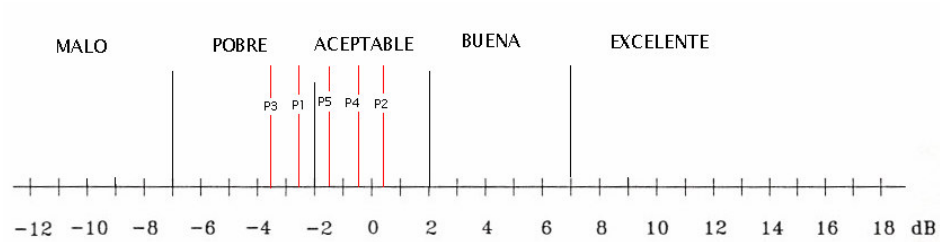
Escala de Marshall



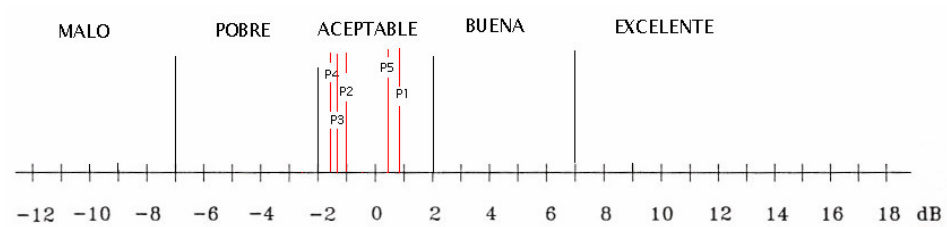
5.3.1 Representación en la gráfica de los valores C50 obtenidos en las frecuencias antes mencionadas.

Aula 1

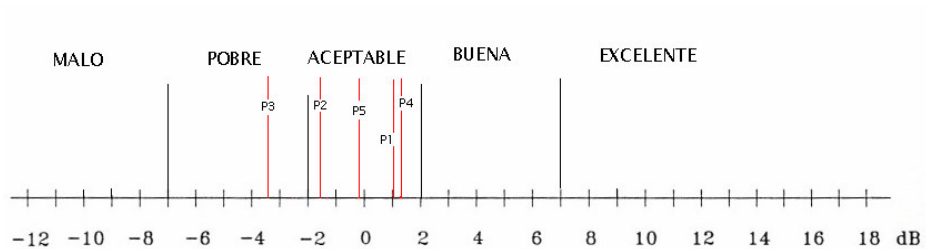
Claridad 500 Hz



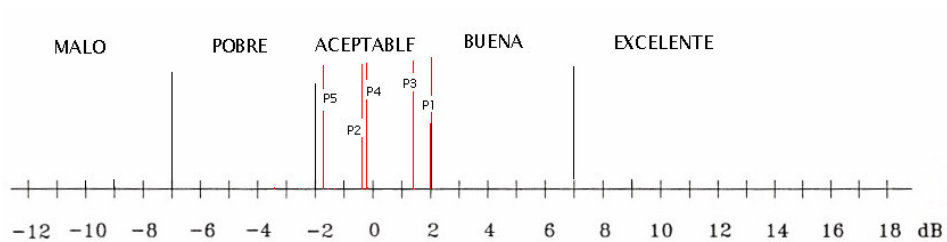
Claridad 1000Hz



Claridad 2000 Hz

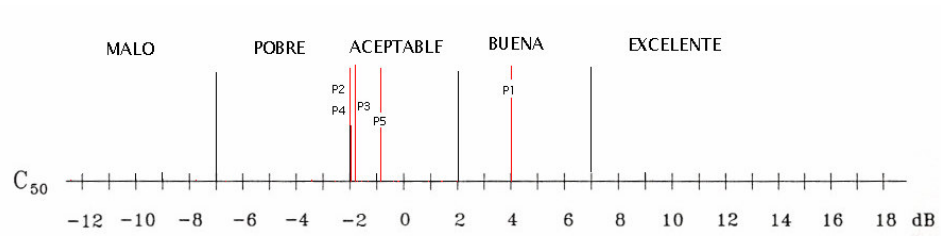


Claridad 4000 Hz

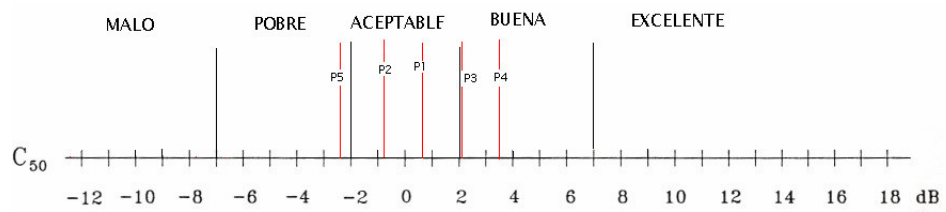


Aula 2

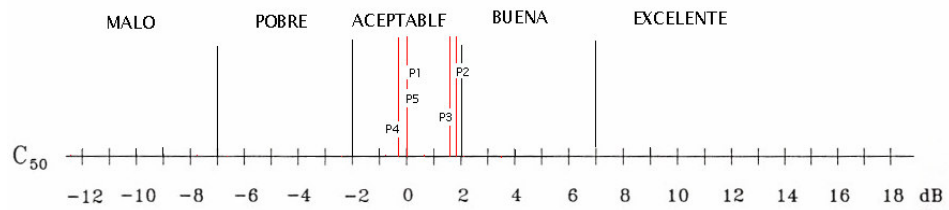
500 Hz



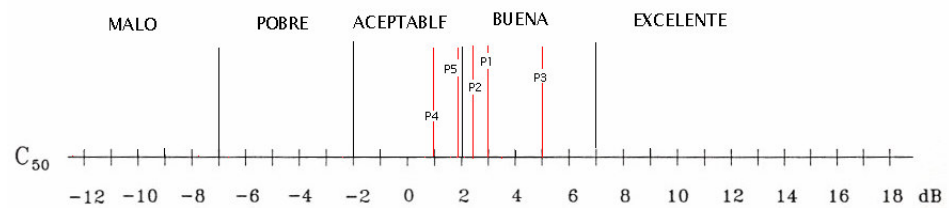
1000 Hz



2000 Hz

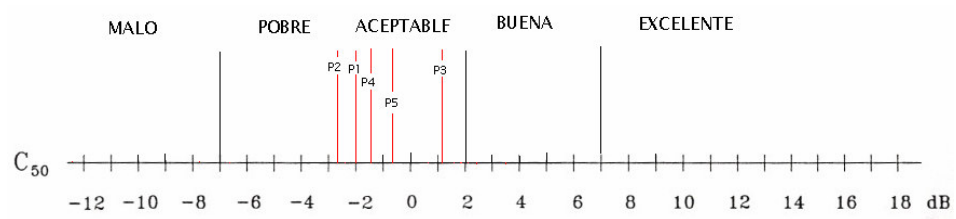


4000 Hz

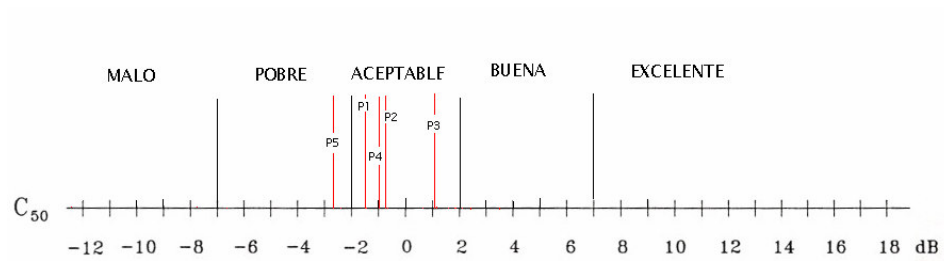


Aula 3

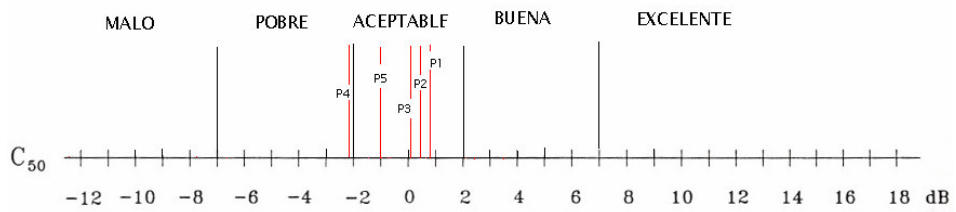
500 Hz



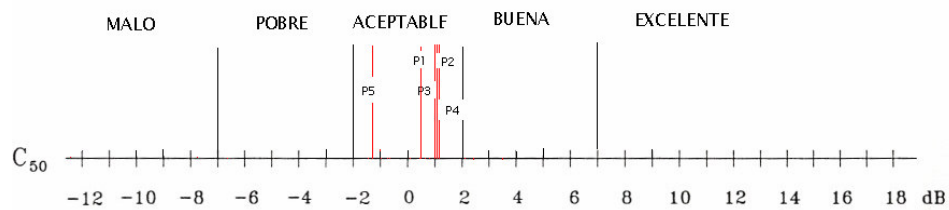
1000Hz



2000 Hz

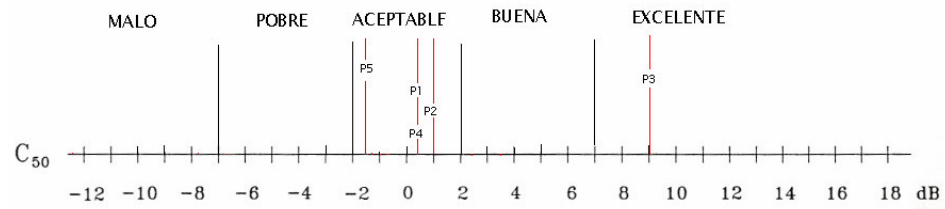


40000 Hz

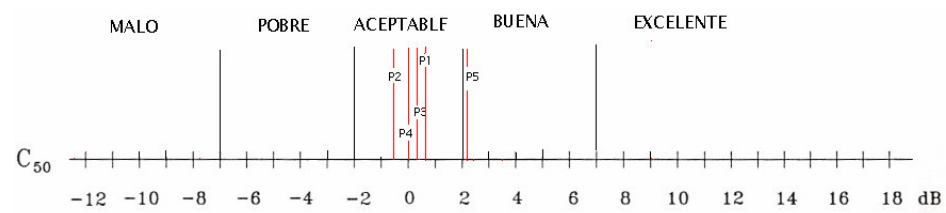


Aula 4

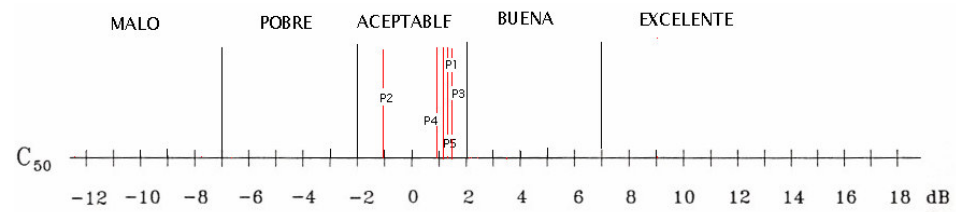
500 Hz



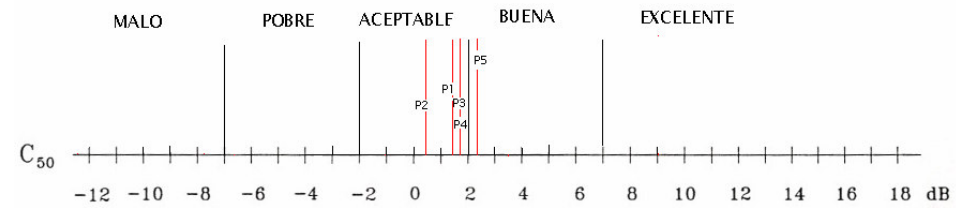
1000 Hz



2000 Hz



4000 Hz

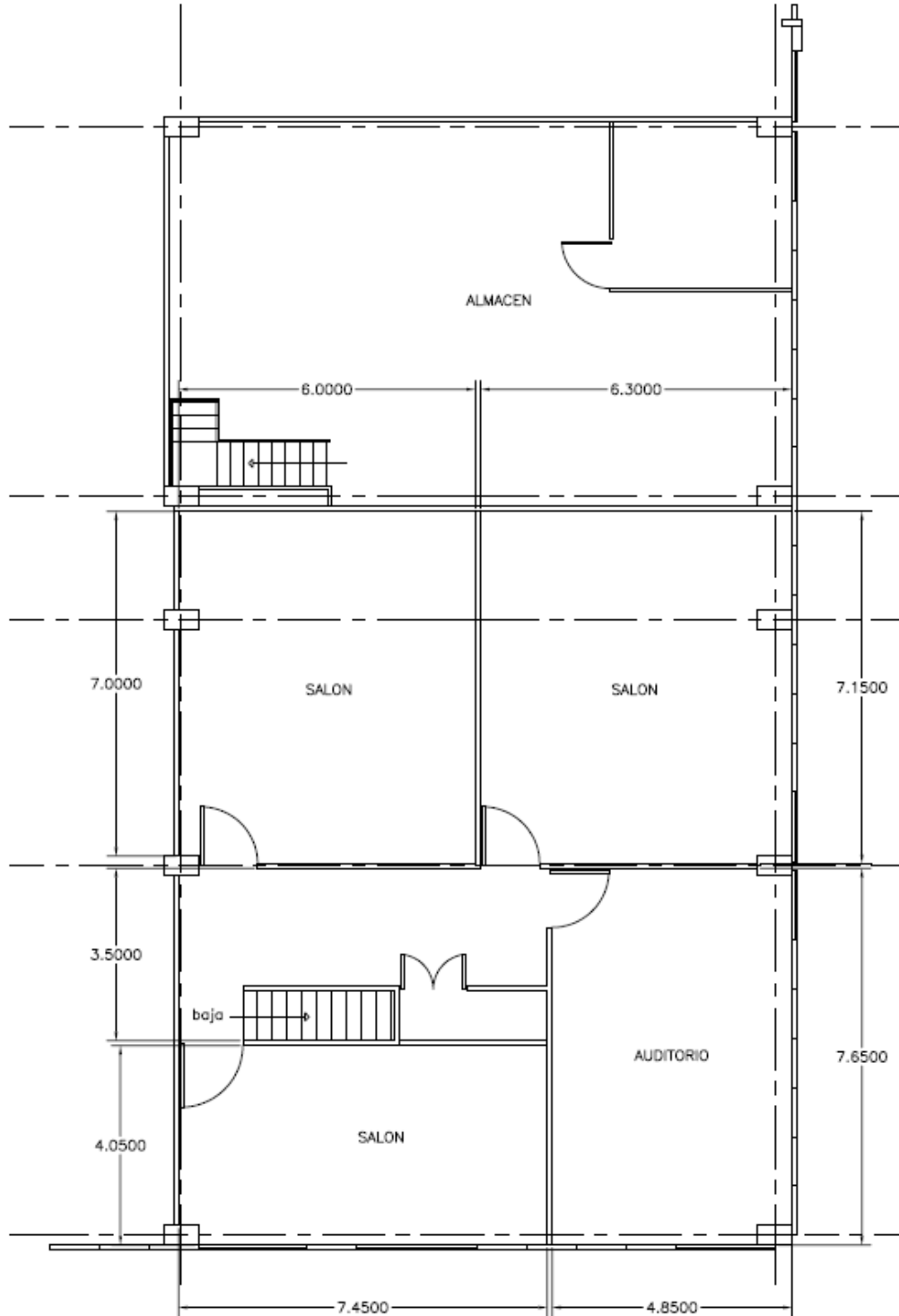


De acuerdo a la localización que tuvieron los valores de Claridad obtenidos se concluye que existe semejanza con los resultados subjetivos por lo tanto se considera que el material de voz esta validado suficientemente por el índice Claridad C50.

Es un hecho que la localización de los sujetos durante la prueba subjetiva y su porcentaje de aciertos corresponde a los valores de Claridad obtenidos; esto se puede verificar al revisar los esquemas que señalan la posición donde estaban situados los sujetos en relación con el estímulo. Apéndice B

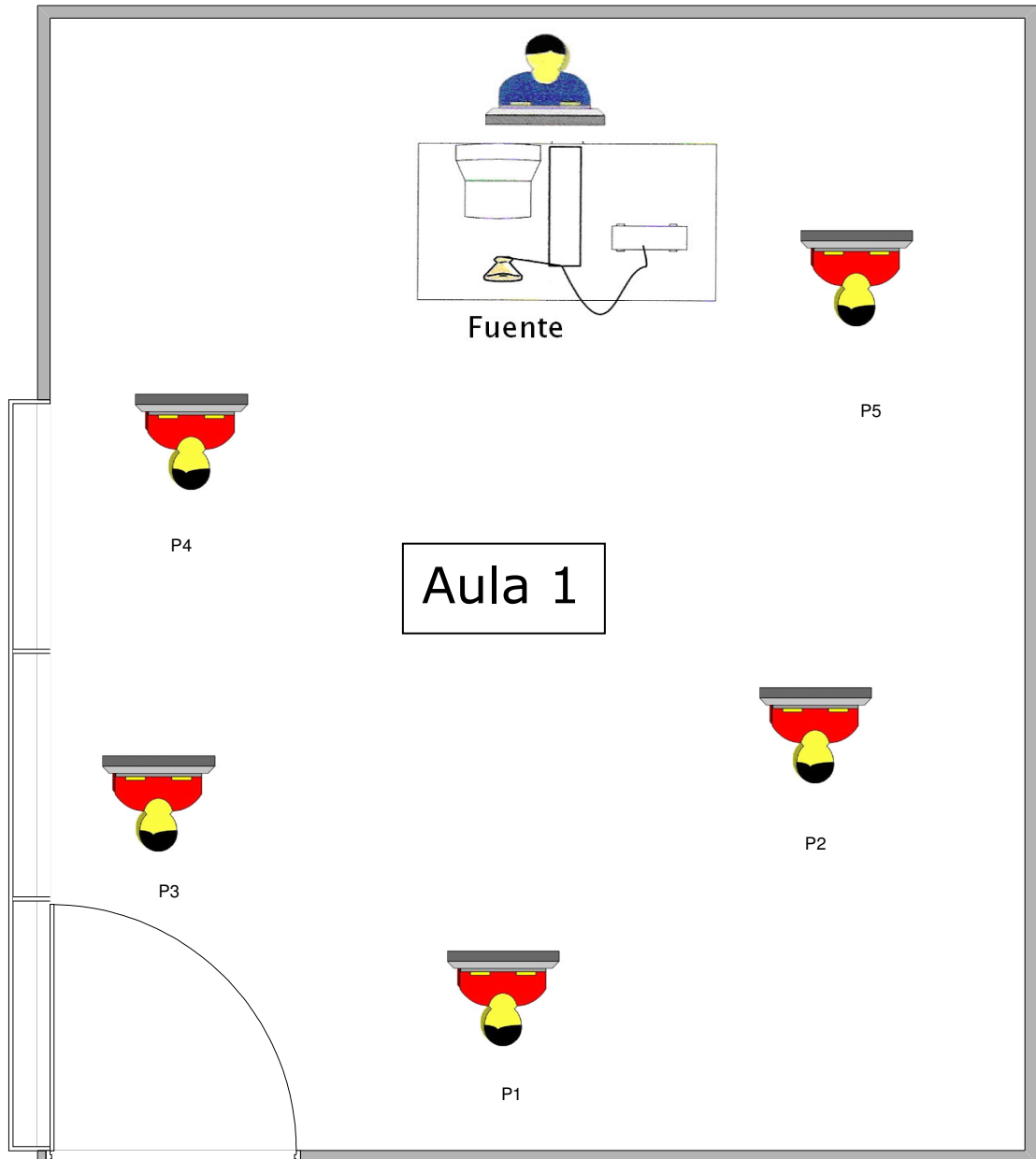
Apéndice A

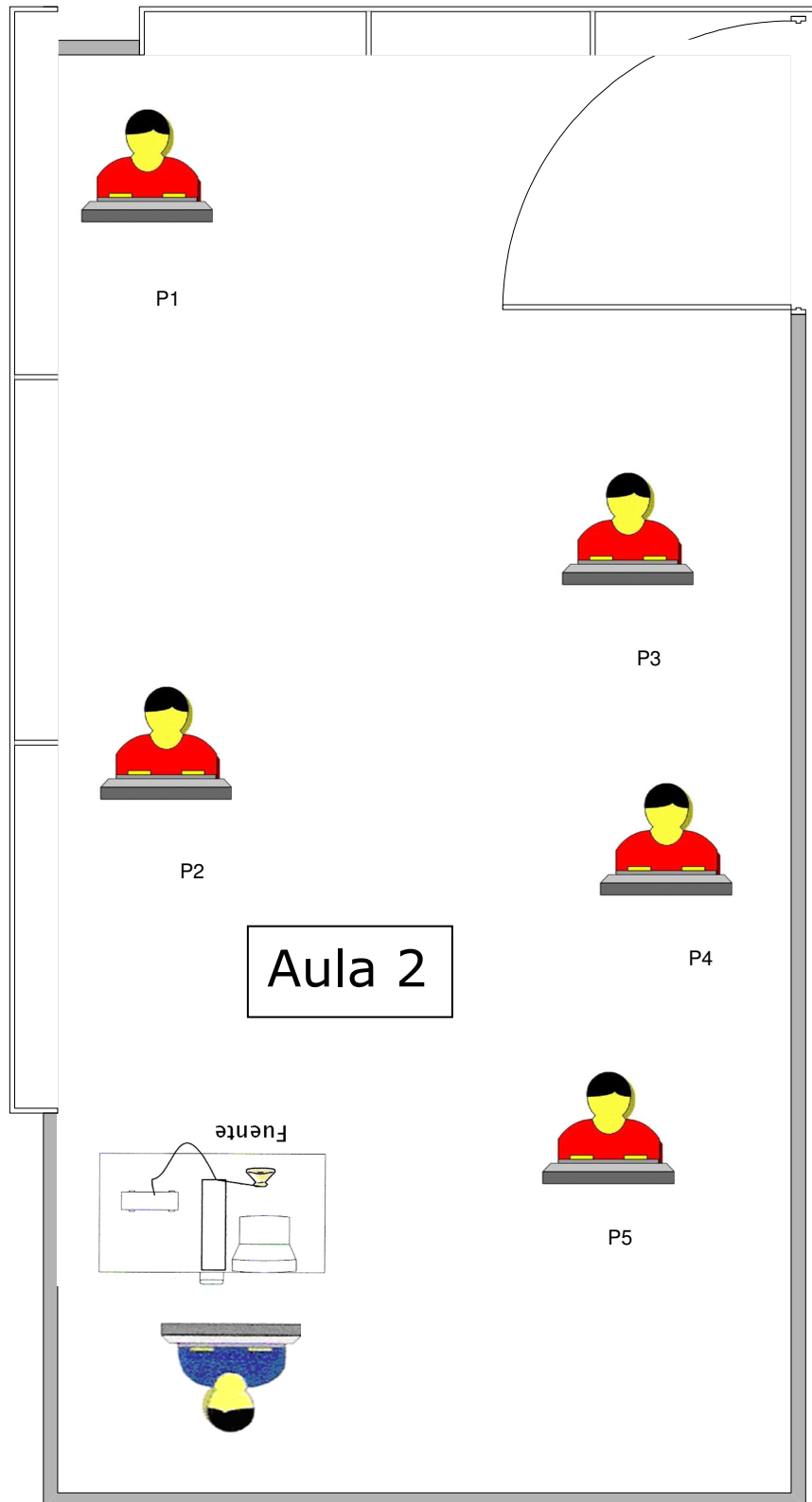
Plano de aulas

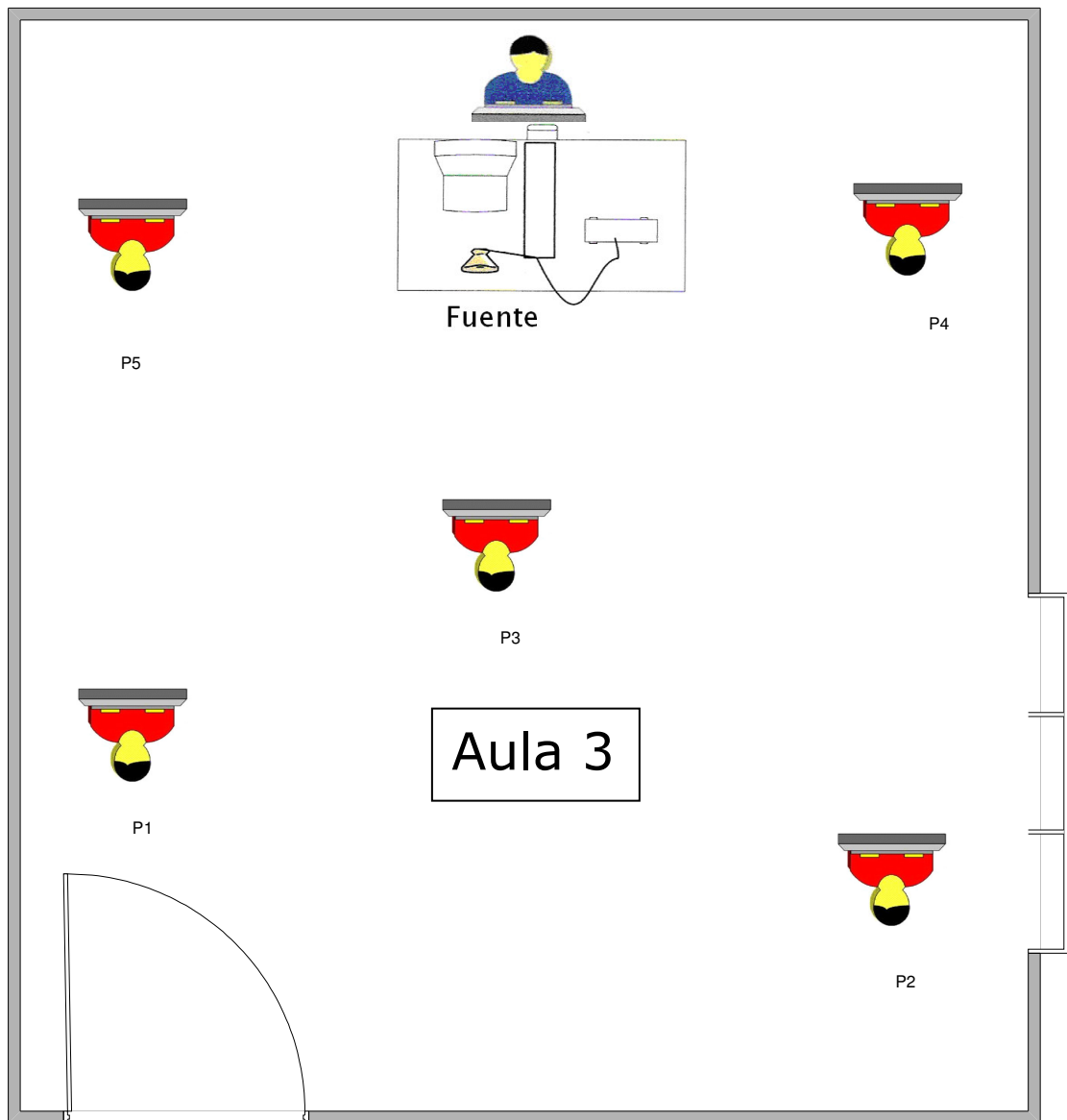


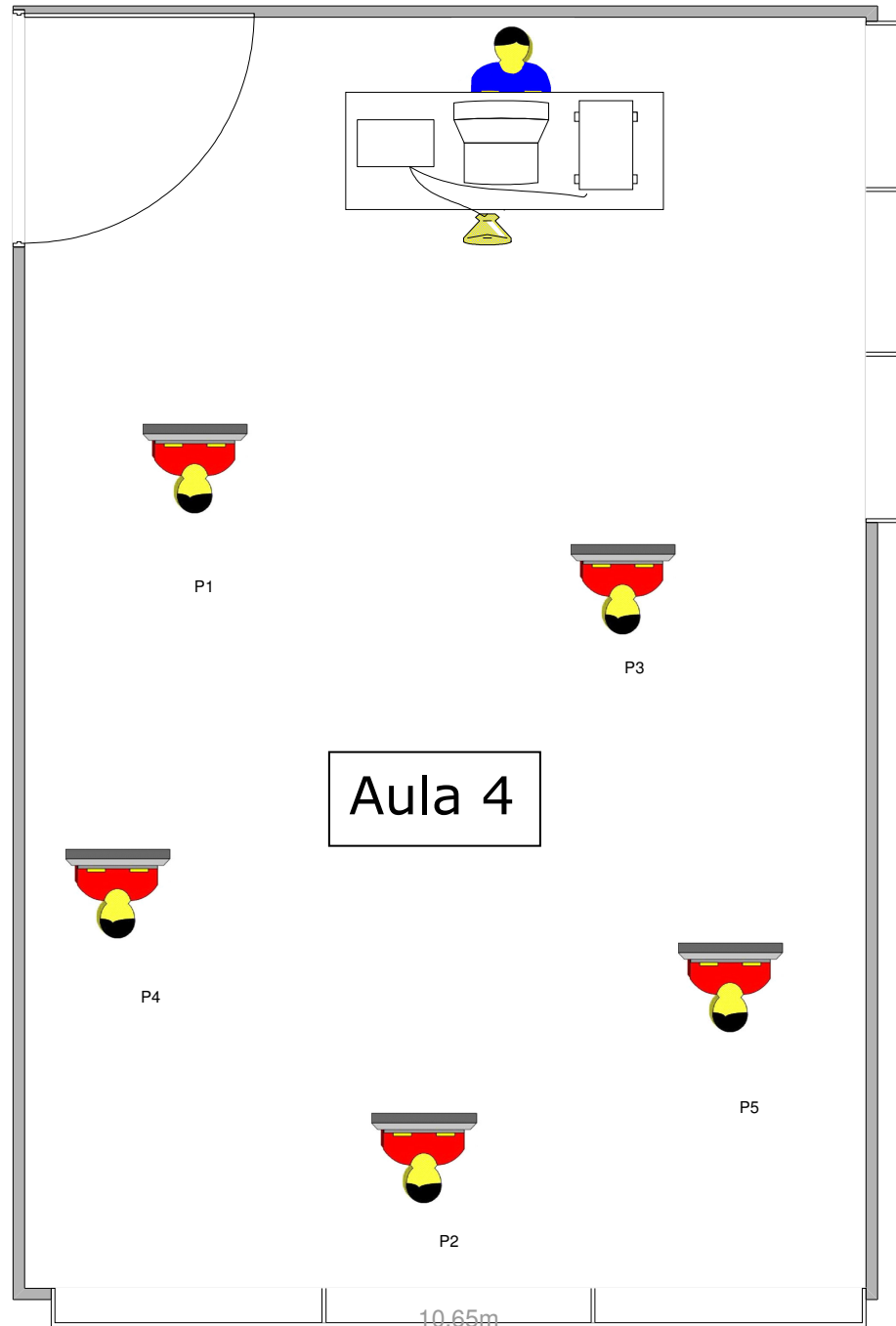
Apéndice B

Esquemas de los salones evaluados y posición de los sujetos dentro de ellos.









Apéndice C

Listado de programas de índices acústicos realizados en MATLAB

D.1 Tiempo de Reverberación

```
function [y,ok]=rt_x(x,li,fs)
% tiempo de reverberacion en segundos
% fs frecuencia de muestreo en hz
% li= limite inferior en dB
% x curva de decaimiento en dB
n=length(x);
t_5=x<=-5;
t_li=x<=-(li+5);
if min(x)<=-(li)
    ok=1;
    [p_5,i_5]=max(t_5);
    [p_li,i_li]=max(t_li);
    t=(i_5:i_li)/fs;

    coef=polyfit(t',x(i_5:i_li),1);
    factor=60/li;
    y=factor*abs(li/coef(1));
else
    ok=2;
end
```

D.2 Tiempo de decaimiento temprano

```
function [y,ok]=EDT(x,fs)
% tiempo de decaimiento temprano (EDT) en (s) EDT (x,fs)
%x=curva de decaimiento calculada con respuesta impulso
%fs=frecuencia de muestreo en Hz

n=length(x);
Ts=1/fs;
t_5=x<=-5;
t_15=x<=-15;
if min (x)<=-15
    [p_5,i_5]=max(t_5);
    [p_15,i_15]=max(t_15);
    t=Ts*i_5:Ts:Ts*i_15;
    coef=polyfit(t',x(i_5:i_15),1);
    y=abs(60/coef(1));
    ok=1;
else
    ok=2
```

end

D.3 Tiempo Central

```
function [y,ok]=Tc(ir,fs)
%tiempo central (Tc) en (s)
%ir  respuesta impulso
%fs frecuencia de muestreo en HZ
```

```
Ts=1/fs;
n=length(ir);
if min(ir)>=0
    xx=ir;
else
    xx=ir.*ir;
end
HH=trapz(xx);
t=(0:Ts:(n-1)*Ts)';
y=trapz(t.*xx);
y=y/HH;
end
```

D.4 Claridad C50

```
function [y,ok]=clar50(ir,fs)
%Claridad (C50) en [dB]
%[y,ok]=clar50(x,fs)
%fs frecuencia de muestreo en [Hz]
%y  curvs de decaimiento
%clear
%fs=44100;

%load mic1_r_500;

%ir=y;

limite=.05;
n=length(ir);
t=limite*fs;
if t <= n
    if min(ir)>= 0
        xx=ir;
    else
        xx=ir.*ir;
    end
    ok=1;
y=10*log10(trapz(xx(1:t))/trapz(xx(t:n)));
else
    ok=2;
end;
```

D.5 Curva de decaimiento

```

function mcdecaya(fs,no)

%mcdecaya(fs,mic) programa que determina las curvas de decaimiento
%de las señales filtradas de cada microfono
%fs : frecuencia de muestreo
%no : numero de microfono

ts=1/fs;
%frecuencias centrales de los filtros de octava utilizados

fcen=[ 125 250 500 1000 2000 4000];

for v=1:1:length(fcen)
    y=0;
    s1='mic';
    s2='_r_';
    nom_arch=[s1,num2str(no),s2,num2str(fcen(v))];
    instruct=['load ',nom_arch];
    eval(instruct);
    %cambio de variable para compatibilidad de fil_octa con mcdecay
    x=y;

    t=size(x,2);

    for m=1:1:t
        im=x(:,m);
        n=length(im);
        if min(im)>=0
            xx=im;
        else
            xx=im.*im;
        end
        xx=xx/max(xx);
        f(n)=0.0;
        for i=n-1:-1:1;
            f(i)=f(i+1)+0.5*(xx(i)+xx(i+1));
        end
        y=f(1:n-1);
    y=ts*y;
    y=10*log10(y/max(y));
    aux(m,:)=y;
    end
    y=aux';

    s3='_cd_';
    nom_arch2=[s1,num2str(no),s3,num2str(fcen(v))];
    instruct=['save ',nom_arch2, ' y'];
    eval(instruct)
end

```

- [1] F. Alton Everest "Master Handbook of Acoustics" 3ra Edición, 1994 McGraw-Hill.
- [2] M. Mehta, J. Johnson, J. Rocafort "Architectural acoustics: principles and design" 1999 Prentice-Hall, Inc.
- [3] Peter B. Denes. Elliot N. Pinson "The Speech Chain: The Physics and Biology of Spoken Language" Second Edition.
- [4] Rosalba Castañeda "Análisis fonético de las listas de palabras de uso más extendido el logaudiometría" Anales de la Sociedad Mexicana de Otorrinolaringología vol. XXXVI pp.23-30 (1991).
- [5] H. Wilson Richard, PhD "Development and use of Auditory Compact Discs in Auditory Evaluation" (1993)
- [6] ISO "Acoustics-The construction and calibration of speech intelligibility test"(1991)
- [7] J.S. Bradley "Speech intelligibility studies in classrooms" IRC, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada (1986).
- [8] J.S. Bradley "Relationships among Measures of Speech Intelligibility in Rooms" IRC, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada (1986).
- [9] F. Orduña-Bustamante Informe técnico CIUNAM PI-072002 "Programa para determinar la respuesta impulso utilizando secuencias MLS, 2002-08-26.
- [10] L. Gerald Marshall "Speech intelligibility prediction from calculated C_{50} values"
- [11] L. Gerald Marshall "An acoustic measurement program for evaluating auditoriums based on early/late sound energy ratio" KMK Associates, 7 Holland Avenue, White Plains, New York (1994).
- [12] Howard G. Latham "The Signal Noise Ratio For Speech Intelligibility an Auditorium Acoustic Design Index"
- [13] American National Standard "Method for Measuring the Intelligibility of Speech Over Communication System"
- [14] L. Gerald Marshall "An Acoustic measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio" New York 1994
- [15] J.S. Bradley "Predictors of speech intelligibility in room" Ottawa Canada 1986
- [16] J.S. Bradley "Objective measures of listeners envelopment" Ottawa Canada 1985.