



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DE LA INTELIGIBILIDAD DEL HABLA  
EN LAS AULAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA,  
CAMPUS CU.**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

PRESENTA:

**OSMAR ESPINOSA CIGARROA**

DIRECTOR DE TESIS:

**ING. DANIEL MARTÍNEZ GUTIÉRREZ**



VI - 2015

## **Agradecimientos**

### **A mi madre:**

Por haberme apoyado en los momentos difíciles y en los momentos de alegría, por ser la persona más fuerte que he conocido en mi vida, por ser siempre el más grande apoyo para cumplir todos mis sueños y los retos que me ha puesto la vida. Por ese amor incondicional que nunca desaparece y se encuentra presente en cualquier momento y en cualquier circunstancia.

### **A mi padre:**

Por haberme educado en los valores de honradez, humildad, justicia, responsabilidad, amor por el trabajo y el estudio, libertad, tolerancia y respeto a las opiniones de los demás y las opiniones propias, por ser siempre esa voz y ese apoyo necesario para guiar mi vida por el mejor camino posible. Por amarme incondicionalmente y sin límites.

### **A mi hermana y mi sobrino:**

Por ser esa amiga y hermana que siempre ha querido lo mejor para mi y por su amor incondicional. A Demian por haberme permitido ser tío y ser el sobrino más hermoso, con mucha energía y vida.

### **A mi familia y amigos:**

A todas esas personas incondicionales que siempre han estado conmigo y que forman parte de cada uno de los momentos más importantes de mi vida.

### **A los Ingenieros Daniel Martínez y Abel Villanueva.**

Por su apoyo incondicional para realizar este trabajo, la confianza brindada y por haber creído en mi. Los momentos que hemos pasado en el cubículo de trabajo y todas las enseñanzas y conocimientos que han aportado a mi persona y a mi carrera.

**Al Departamento de Acústica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET):**

Por el apoyo en el préstamo del equipo para realizar este trabajo, en especial al Dr. Jesús Santiago, el Dr. Felipe Orduña, al Ing. Ricardo Dorantes y al Maestro en Ingeniería, Antonio Pérez. Gracias por el apoyo, el conocimiento y la paciencia brindados.

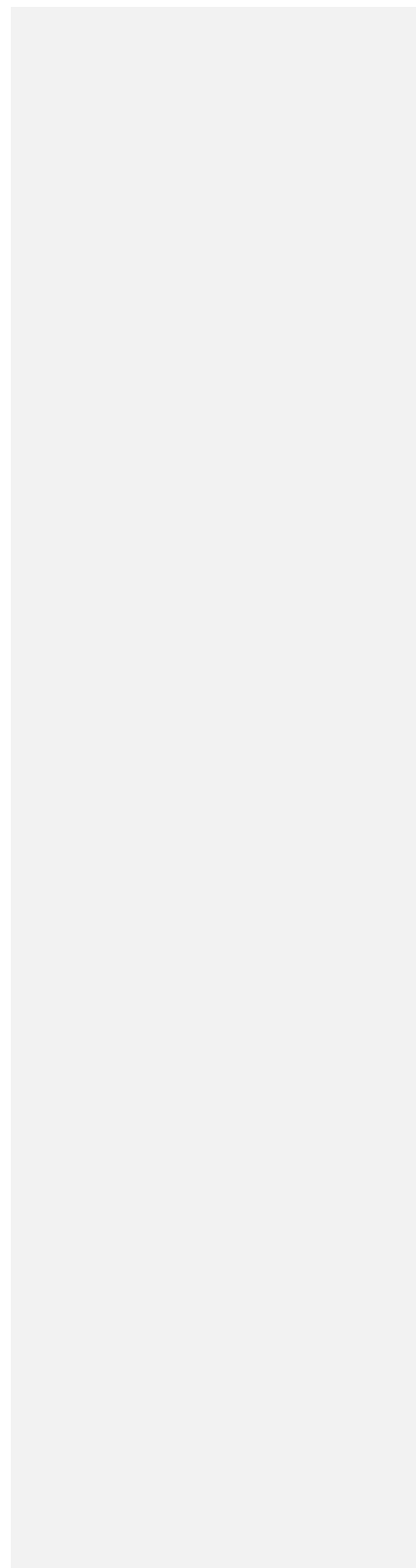
También quiero agradecer especialmente al Maestro en Arquitectura Antonio Bautista Kuri, por el apoyo para realizar este trabajo, su compañía, su amabilidad, su disposición, su entrega y su experiencia fueron elementos clave para poder realizar un trabajo de calidad. Por el tiempo que estuvo conmigo y la manera en que sacamos este problema adelante. Muchas gracias profesor.

### **Dedicatoria**

Esta tesis la dedico con todo mi cariño y amor a la memoria de mi padrino y el mejor tío que alguien pudiera tener; Agustín López Hernández y a mi sobrino Hernán Hernández López que se nos adelantaron en el camino y seguro están en el cielo con Dios. También quiero dedicar este trabajo a mis padres Consuelo Cigarroa García, Osmar Espinosa Bonino, a mi tío Ademir Cigarroa García, a mi tía Sonia Cigarroa García, a mi abuelo Santiago Cigarroa y a Lorena Cofradía Diez Barroso quienes siempre me han apoyado en todo, aún cuando las circunstancias no han sido las mejores, me gustaría dejarles estas palabras:

*Son lo mejor que he podido tener en esta vida que es tan suya, siempre los llevo en mi mente y en mi corazón y cada paso que dé, quiero hacerlo a lado suyo.*

# Índice



## **Introducción**

### **Capítulo 1 Marco teórico**

Respuesta al impulso y función de transferencia de sistemas lineales  
Acústica de recintos  
Reverberación y tiempo de reverberación  
Espectro y nivel del habla  
Inteligibilidad del habla  
Índice de Transmisión del Habla (STI, Speech Transmission Index)

### **Capítulo 2 Instrumentación acústica y técnicas de medición**

Obtención de la respuesta al impulso  
Barridos Sinusoidales Exponenciales (E-Sweeps o ESS)  
Secuencias de Máxima Longitud (MLS)  
Valoración acústica de los salones de la Facultad de Ingeniería  
Medición del tiempo de reverberación  $T_{30}$ .  
Curva de decaimiento  
Obtención del parámetro STI  
Obtención de los niveles de ruido de fondo en puntos aleatorios exteriores y cercanos a las aulas  
Grabaciones  
Procesamiento de las señales obtenidas

## **Capítulo 3**

### **Resultados**

Características dimensionales y condiciones actuales de las aulas de la Facultad de Ingeniería

Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería

Edificio A, salón A107

Edificio B, salón B305

Edificio D, salón D004

Edificio D, salón DS01

Conjunto sur de la Facultad de Ingeniería de la UNAM

Edificio I, salón I306

Edificio J, salón J110

Edificio U, salón U203

Edificio Q “Luis G. Valdés Vallejo”, Laboratorio de Computación, 1er piso

Edificio P, Laboratorio de Computación de la División de Ingeniería Industrial

Edificio H, Laboratorio de Óptica y Acústica

Auditorio Javier Barros Sierra

Aula Magna

Resultados generales

Análisis de ruido

### **Conclusiones y recomendaciones**

### **Bibliografía**

## Índice de figuras y gráficas.

- Figura 1.1 Representación del principio de superposición
- Figura 1.2 El sonido proveniente desde la fuente y primeras reflexiones
- Figura 1.3 Las reflexiones del sonido en el aula
- Figura 1.4 Espectro de frecuencias del habla masculino y femenino
- Figura 2.1 Ecograma o espectograma
- Figura 2.2 Sistema lineal en invariante en el tiempo
- Figura 2.3 Barrido Senoidal
- Figura 2.4 Relación S/N con sweep y con ruido
- Figura 2.5 Método para medir la respuesta al impulso a partir de la función de correlación entrada-salida
- Figura 2.6 Respuesta al impulso y algunos parámetros acústicos del recinto calculados con el software DIRAC
- Figura 2.7 Fuente omnidireccional y micrófono omnidireccional
- Figura 2.8 Selección de opción *Medición*
- Figura 2.9 Ventana de configuración de las características del sonido producido por la fuente en la medición del tiempo de reverberación  $T_{30}$
- Figura 2.10 *Gráficas y Estadísticas*
- Figura 2.11 Parámetros que se pueden determinar en DIRAC a partir de la respuesta al impulso
- Figura 2.12 Gráfica de los valores del INR con valores mayores a 45 dB
- Figura 2.13 Detección del inicio de la respuesta al impulso
- Figura 2.14 Opción *Parameters, Reverberation*
- Figura 2.15 Tiempo de reverberación a partir de la respuesta al impulso obtenida
- Figura 2.16 Frecuencias principales de la voz humana y su tiempo de reverberación
- Figura 2.17 Curva de decaimiento de una fuente de ruido interrumpida en el tiempo  $t = 0$
- Figura 2.18 Respuesta al Impulso, Curva de energía y Curva de decaimiento
- Figura 2.19 Curva energía – tiempo
- Figura 2.20 Curva de decaimiento
- Figura 2.21 Relación entre la inteligibilidad del habla y la profundidad de la modulación.
- Figura 2.22 Señal MLS con el filtro *Pink + Blue* para medición del parámetro STI
- Figura 2.23 Respuesta plana del recinto
- Figura 2.24 Medición del parámetro STI
- Figura 2.25 Primeros ajustes para la ecualización de la señal MLS en *System Architect 3.4*
- Figura 2.26 Ecualización de la señal MLS por bandas de octava en *System Architect 3.4*
- Figura 2.27 Selección de filtros *Male* y *Female* en la medición del parámetro STI
- Figura 2.28 Posición del micrófono omnidireccional a 1m y frente del simulador de boca para realizar el aplanamiento de la señal MLS
- Figura 2.29 Posición 1 del micrófono omnidireccional, al centro
- Figura 2.30 Posición 2 del micrófono omnidireccional, lateral trasera derecha
- Figura 2.31 Posición 3 del micrófono omnidireccional, lateral trasera izquierda
- Figura 2.32 Respuesta al impulso del punto 1 en la medición de STI, filtro *Female*
- Figura 2.33 Respuesta al impulso del punto 2 en la medición de STI, filtro *Female*
- Figura 2.34 Respuesta al impulso del punto 3 en la medición de STI, filtro *Female*
- Figura 2.35 Selección opción *Speech* para obtener el parámetro STI en el punto 1 del salón A107

Figura 2.36 Resultados de STI *Female* y la pérdida porcentual de articulación de consonantes, %ALC

Figura 2.37 Grabación del tono de calibración a 94dB – 1kHz en *Adobe Audition*

Figura 2.38 Calibración del sonómetro a 94 dB – 1kHz

Figura 2.39 Posición del sonómetro y micrófono a 1.50 m de altura y por lo menos 1m de separación de cualquier superficie reflejante

Figura 3.1 Salón A107

Figura 3.2 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón A107

Figura 3.3 Salón B305

Figura 3.4 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón B305

Figura 3.5 Clases impartidas enfrente del salón B305

Figura 3.6 Clase de termodinámica impartida en frente del salón B305

Figura 3.7 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón D004

Figura 3.8 Puerta del salón D004 sin aislamiento acústico

Figura 3.9 Salón DS01

Figura 3.10 Posición del sonómetro y micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI en el salón DS01

Figura 3.11 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón DS01

Figura 3.12 El micrófono omnidireccional se coloca a la altura del oído de una persona que se encuentra sentada dentro del salón de clases

Figura 3.13 Salón I306 en el Anexo de Ingeniería

Figura 3.14 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón I306

Figura 3.15 Salón J110

Figura 3.16 Posiciones del micrófono omnidireccional del Salón J110

Figura 3.17 Ventanas del salón J110

Figura 3.18 Puerta del salón J110 sin aislamiento acústico

Figura 3.19 Salón U203

Figura 3.20 Posiciones del micrófono omnidireccional del salón U203

Figura 3.21 Laboratorio de Computación, Edificio Q

Figura 3.22 Posiciones del micrófono omnidireccional del Laboratorio de Computación del Edificio Luis G. Valdés Vallejo

Figura 3.23 Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial

Figura 3.24 Posiciones del micrófono omnidireccional del Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial

Figura 3.25 Laboratorio de Óptica y Acústica, Edificio H del Anexo de Ingeniería

Figura 3.26 Techo del laboratorio de forma irregular

Figura 3.27 Puerta del laboratorio sin aislamiento acústico

Figura 3.28 Posiciones del micrófono omnidireccional del Laboratorio de Óptica y Acústica

Figura 3.29 Auditorio Javier Barros Sierra en el Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería

Figura 3.30 Aula Magna

Figura 3.31 Posiciones del micrófono omnidireccional del Aula Magna

Figura 3.32 Interfaz gráfica del programa en *Matlab* que calcula el nivel de ruido

Figura 3.33 Nivel de ruido equivalente de la grabación realizada en *Adobe Audition*. ( $L_{eq}$  grabación)

Figura 3.34 Nivel de ruido equivalente grabado por el sonómetro. ( $L_{eq}$  sonómetro)

Figura 3.35 Nivel equivalente de ruido de fondo  $L_{eq}$  obtenido con el software *Adobe Audition* y el sonómetro

Figura 3.36 Conjunto norte de la Facultad de Ingeniería

Figura 3.37 Conjunto sur de la Facultad de Ingeniería



## Índice de tablas

- Tabla 1.1 Tiempo de reverberación óptimo para diversos fines en recintos con audiencia
- Tabla 1.2 Promedio del esfuerzo vocal y nivel de sonido
- Tabla 1.3 Límites acústicos recomendados por la Organización Mundial de la Salud
- Tabla 2.1 Rango de frecuencias de la voz humana
- Tabla 2.2 INR con valores mayores a 45 dB principalmente en el rango de frecuencias de la voz humana
- Tabla 2.3 Relación entre la inteligibilidad de la palabra y el parámetro STI
- Tabla 3.1 Dimensiones de los salones en los que se realizó la medición
- Tabla 3.2 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón A107
- Tabla 3.3 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula A107
- Tabla 3.4 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón B305
- Tabla 3.5 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula B305
- Tabla 3.6 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón D004
- Tabla 3.7 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula D004
- Tabla 3.8 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón DS01
- Tabla 3.9 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula DS01
- Tabla 3.10 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón I306
- Tabla 3.11 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula I306
- Tabla 3.12 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón J110
- Tabla 3.13 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula J110
- Tabla 3.14 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón U203
- Tabla 3.15 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula U203
- Tabla 3.16 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Lab. de Computación del edificio Luis G. Valdés Vallejo
- Tabla 3.17 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el Laboratorio de Computación del edificio Luis G. Valdés Vallejo
- Tabla 3.18 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial
- Tabla 3.19 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial
- Tabla 3.20 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Laboratorio de Óptica y Acústica
- Tabla 3.21 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el Laboratorio de Óptica y Acústica
- Tabla 3.22 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Auditorio Javier Barros Sierra
- Tabla 3.23 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el Auditorio Javier Barros Sierra en el Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería
- Tabla 3.24 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Aula Magna
- Tabla 3.25 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el Aula Magna en el Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería
- Tabla 3.26 Resultados generales de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$
- Tabla 3.27 Nivel equivalente de ruido de las grabaciones con el software *Adobe Audition* y el sonómetro.

## **Introducción.**

Un recinto escolar es un espacio arquitectónico donde las características acústicas (como se propaga el sonido en su interior), son uno de los elementos más importantes a considerar en su diseño. En estos recintos la comunicación oral es la principal vía de transmisión del conocimiento, de modo que los factores que afecten esta transmisión deben examinarse con cuidado. La inteligibilidad del habla, es decir, la comprensión del mensaje oral en un recinto, se puede evaluar directamente, interrogando a las personas que escuchan el mensaje que emite un orador. Para facilitar la tarea, el mensaje que transmite el orador es una lista de cierto número de palabras sueltas; para calificar el recinto, solo se contabiliza el porcentaje de palabras correctamente comprendidas. Este procedimiento, subjetivo, es lento y tiene el inconveniente adicional que no ofrece información sobre las características acústicas del recinto, de modo que no hay indicios para una posible acción de mejoría. Por esta razón se han desarrollado varios parámetros acústicos que valoran la inteligibilidad del habla, mediante mediciones y proporcionan información útil para mejorar las condiciones acústicas del recinto.

Pese a su importancia, en nuestro país, los espacios escolares frecuentemente no consideran en su diseño arquitectónico las características acústicas. El resultado es tener espacios escolares donde, al dificultarse la comunicación oral, se obstaculiza el proceso de aprendizaje. Esta situación no solo se presenta en espacios escolares de educación básica, sino en todos los niveles incluyendo los espacios universitarios.

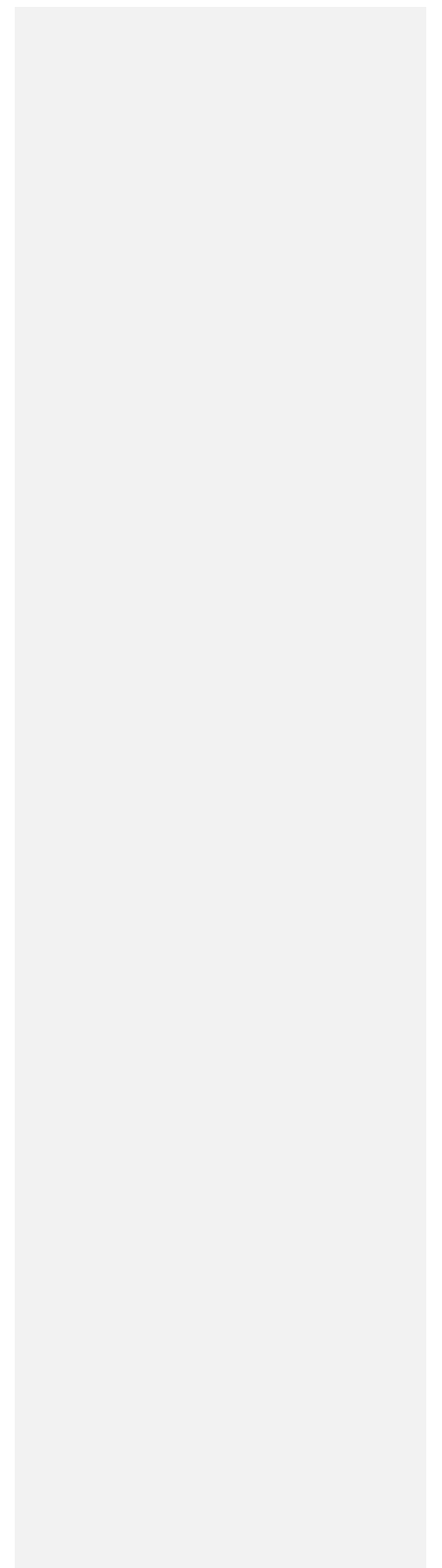
El objetivo de la presente tesis, es evaluar acústicamente algunos espacios escolares de nuestra Universidad, para saber si en su diseño arquitectónico se tomo en cuenta el factor de inteligibilidad y determinar si cumplen con el

objetivo principal de su construcción, recintos para la transmisión del conocimiento.

Debido a que las aulas presentan diferentes características físicas, acústicas y de ruido; este trabajo brindará información para estimar la inteligibilidad del habla mediante la determinación del Índice de Transmisión del Habla (STI, *Speech Transmission Index*) en ciertos salones de la Facultad de Ingeniería. Para evaluar si el aula es adecuada para la actividad de clase regular. Se toma como referencia el criterio establecido en la norma [1].

# **Capítulo 1**

## **Marco teórico**

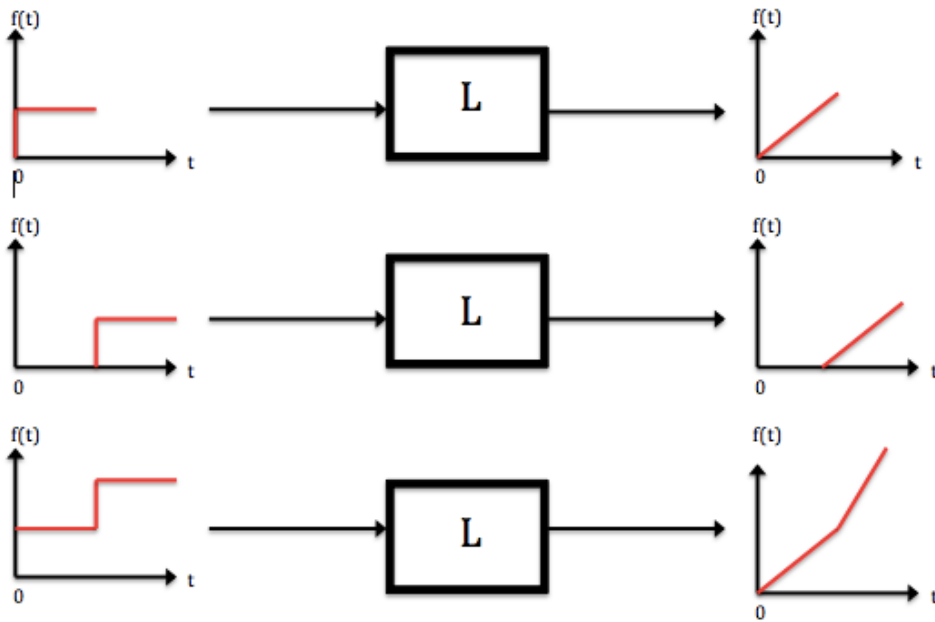


## **Respuesta al impulso y función de transferencia de sistemas lineales**

Los sistemas lineales e invariantes en el tiempo se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes.

Los sistemas lineales e invariantes en el tiempo cumplen con el principio de superposición, el principio de proporcionalidad y el principio de respuesta a una senoide. El principio de superposición establece que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones de entrada distintas, es la suma de las dos respuestas individuales si se aplica cada una por separado. Por tanto, para el sistema lineal, la respuesta a varias entradas se calcula tratando cada entrada a la vez y sumando la función resultante con el resto de las funciones obtenidas.

Si la entrada de un sistema es multiplicada por un factor, la salida del sistema también será multiplicada por el mismo factor, éste es el principio de proporcionalidad. El principio de respuesta a una senoide se cumple si la señal de salida del sistema es una señal senoidal cuando la entrada es también una senoide, la respuesta puede variar en amplitud y fase, sin embargo, la señal de salida debe ser una señal senoidal de la misma frecuencia.



**Figura 1.1 Representación del principio de superposición**

El principio de superposición permite desarrollar soluciones complejas para la ecuación diferencial lineal a partir de soluciones simples.

Una forma de modelar sistemas lineales es utilizar el concepto de función de transferencia. En él se representa la relación entrada – salida entre variables y a partir de ella se puede obtener la respuesta al impulso.

Sus características se pueden resumir como se muestra a continuación [2]:

Daniel 10/6/15 17:00

Comentario [1]: Referencia

- Es un modelo matemático que relaciona la variable de salida con la variable de entrada.
- Es una propiedad del sistema, independiente de la magnitud de la naturaleza de la entrada o la función de excitación.
- Incluye las unidades necesarias para relacionar la entrada con la salida, sin embargo, no proporciona información acerca de la estructura física del sistema. (Las funciones de transferencia de muchos sistemas físicamente diferentes pueden ser idénticas).
- Si se conoce, se puede estudiar la salida o respuesta para varias formas de entrada, con la intención de conocer la naturaleza del sistema.
- Si se desconoce, puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema. Una vez establecida una función de transferencia, proporciona las características dinámicas del sistema a diferencia de su descripción física.

Una vez que se conoce la respuesta al impulso del sistema lineal, la salida del sistema,  $y(t)$ , ante cualquier entrada,  $u(t)$ , se puede calcular mediante la convolución de la función de transferencia y dicha entrada.

## Acústica de recintos

La acústica de recintos estudia la propagación del sonido en ellos incluyendo el aislamiento acústico, así como el tratamiento acústico con diferentes materiales. [3]

Para explicar cómo actúa el sonido en un recinto de forma simplificada, es necesario verificar la existencia de reflexiones y a partir de ellas conformar el campo sonoro, evaluar la reverberación y la intimidad, determinar la existencia de ecos, calcular los modos de resonancia, predecir la cobertura sonora de las fuentes y cuantificar los niveles de ruido de fondo.

### Reverberación y tiempo de reverberación

En cada reflexión, una parte del sonido es absorbida y otra reflejada, la parte absorbida puede propagarse a otra aula colindante o transformarse en pequeñas partículas de calor. La parte reflejada del sonido mantiene sus características de sonido y se trasladará en el aula hasta encontrarse con una superficie, en la cual se repetirá el proceso de absorción y reflexión; así hasta que el sonido se extinga.

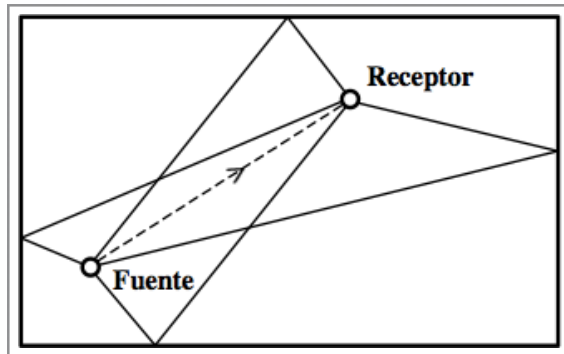


Figura 1.2 En línea de puntos, el sonido directo desde la fuente. En líneas continuas, algunas de las primeras reflexiones tempranas



El tiempo de reverberación  $T_{60}$  se define como el tiempo que tarda en decaer la energía sonora a una millonésima de su nivel sonoro inicial, es decir, el decaimiento en 60 dB del nivel de presión sonora. Suponiendo que existe un sonido de 100 dB, y se presenta en él una reducción sonora de 40 dB en 5s, el tiempo de reverberación será  $T = 5s$ .

El tiempo de reverberación depende de qué tan absorbentes sean las superficies del aula. Si las superficies donde incide el sonido son muy rígidas o reflectoras, mayor será la cantidad de reflexiones para que el sonido se extinga, y en consecuencia  $T_{60}$  será grande; por el contrario, si son muy absorbentes, existirá absorción en cada reflexión y en pocas reflexiones el sonido desaparecerá, entonces,  $T_{60}$  será pequeño.

Para calcular el tiempo de reverberación de un recinto, se puede emplear la fórmula de Sabine:

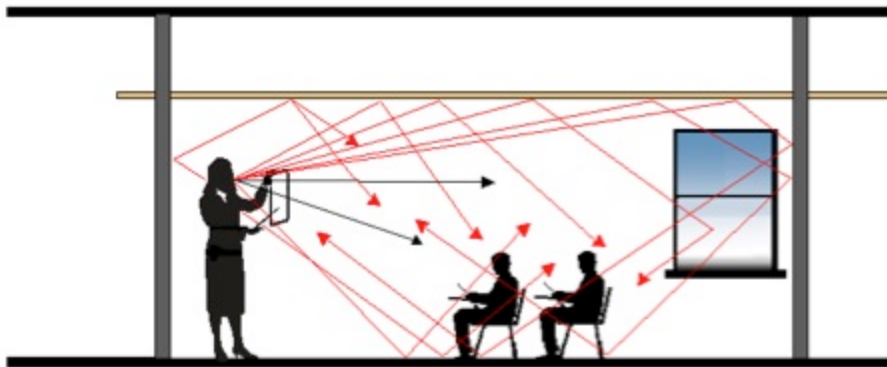
$$T = 0.161 \frac{V}{\alpha S} \quad 1.1$$

Donde  $V$  es el volumen del recinto en  $m^3$ ,  $S$  es el área de la superficie interior en  $m^2$  y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción sonora promedio de los materiales que conforman el interior del recinto. Si el tiempo de reverberación es prolongado, existirá una disminución notable en la comprensión del habla.

En la figura 1.3 se muestra la distribución del sonido en un aula común. Las flechas negras representan el sonido emanado de su fuente directa: es el sonido que proviene directamente del maestro hacia los alumnos.

Debido a que este sonido no se ve afectado por la arquitectura o la construcción del recinto, es el sonido más claro y nítido, por tanto, el más importante para la comprensión y aprendizaje del alumno.

Las flechas rojas muestran el fenómeno físico de reverberación del sonido en sus múltiples y diferente direcciones, también llamado *campo de sonido reverberante*.



**Figura 1.3** Las flechas negras indican el sonido emanado de su fuente original, las flechas rojas indican el sonido reflejado, las reflexiones tempranas y el sonido que rebota en las superficies del recinto

Existe un balance que equilibra la energía disipada por la absorción y la transmisión proveniente de la energía transmitida por la fuente, llamado *estado estable*.

Si la fuente sonora ha emitido energía y el recinto ha alcanzado su estado estable en el tiempo  $t = 0$ , continuarán las reflexiones hasta que alcance el estado estable anterior a la emisión, es decir, habrá un balance entre la energía emitida con la energía absorbida y transmitida, hasta que el sonido se extinga. El comportamiento de la presión y la energía sonora se basa en un

decaimiento exponencial que en escala logarítmica se identifica como un comportamiento lineal, a esto se le llama *curva de decaimiento*.

El tiempo de reverberación óptimo depende del propósito de las actividades que se realizan en el recinto. Es importante determinar el volumen de la sala y analizar materiales con propiedades absorbentes con el fin de obtener el tiempo de reverberación adecuado para los requerimientos. En las escuelas, las aulas deben tener un tiempo de reverberación entre 0.6 s y 0.9 s en el rango de frecuencias de 100 a 4000 Hz, con el fin de obtener buenas condiciones acústicas para el habla según lo establecido en la norma [1].

A continuación se mencionan los tiempos óptimos de reverberación para distintas situaciones acústicas. [4]

<b>Uso del recinto</b>	<b>Tiempo de Reverberación Óptimo [s]</b>
Cines	0.4 – 1
Conciertos al aire libre	0.8 – 1.1
Lectura y conversación	0.6 – 0.9
Teatro	1 – 1.2
Opera	1.3 – 1.7
Orquesta Sinfónica	1.5 – 2.2
Conciertos de cuerda	1.7 – 2.5
Música de Órgano	2 – 3

**Tabla 1.1** Tiempo de reverberación óptimo para diversos fines en recintos con audiencia

## Espectro y nivel del habla

El espectro del habla se basa en la media de 18 muestras de voz en 12 idiomas. Es independiente del lenguaje. En la figura 1.4, el espectro se construye con base en los idiomas: inglés, español, sueco, danés, alemán, francés (canadiense), japonés, cantonés, mandarín, ruso, gales, singalés y vietnamita. El espectro de la voz de la mujer cae por debajo de los 200 Hz, debido a que la frecuencia fundamental es alrededor de 250 Hz. El máximo valor se encuentra alrededor de 500 Hz para ambos sexos. La pendiente que se encuentra cerca de los 500 Hz es aproximadamente -10 dB por década (ó -3 dB / octava). [5]

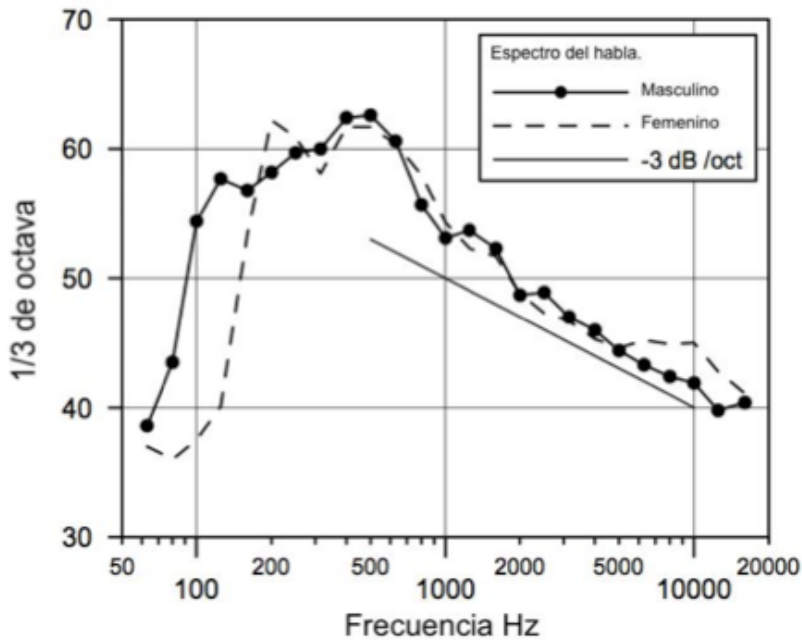


Figura 1.4 Espectro de frecuencias del habla masculino y femenino [5]

## Inteligibilidad del habla

La inteligibilidad del habla es la comprensión del mensaje oral. El nivel de inteligibilidad del habla puede definirse como el porcentaje de palabras correctamente comprendidas en un conjunto de ellas emitidas al mismo nivel sonoro.

La inteligibilidad del habla depende de:

- La distancia desde el orador al oyente.
- Volumen de la voz (intensidad de la señal).
- Espectro de la voz.

Además, se deben considerar también los siguientes factores que la demeritan:

- El hecho de utilizar vocablos monosílabos o bisílabos los cuales puedan tener sentido o no en un idioma determinado.
- Que el sujeto receptor se encuentre en un ambiente ruidoso o de silencio, el tipo de ruido y su nivel sonoro debido a que enmascara el mensaje.
- De las características del medio de transmisión, especialmente de la respuesta en frecuencia del medio que interviene.
- Del acento y pronunciación del locutor del mensaje sonoro.

Para lograr la inteligibilidad del habla en una frase completa destinada a oyentes con audición normal, la relación señal a ruido debe ser al menos 15 dB.

La naturaleza de los sonidos del habla determina el mecanismo de la pérdida de la inteligibilidad de la palabra. Las vocales y consonantes transmiten diferentes niveles de energía sonora. Las consonantes se pronuncian más suave que las vocales, y tienden a ser enmascaradas en ambientes ruidosos. El nivel medio de las consonantes es 10 a 12 dB por debajo del nivel de las vocales. [6]

La tabla 1.2 muestra el nivel sonoro de diferentes situaciones de la voz.

<b>Esfuerzo vocal</b>	<b>dB(A)</b>
Susurro	32
Suave	37
Relajado	42
Normal (privado)	47
Normal (público)	52
Elevado	57
Fuerte	62
Muy fuerte	67
Gritos	72
Máy. gritos	77

**Tabla 1.2 Promedio del esfuerzo vocal y nivel de sonido [6]**

Las consonantes tienen mayor importancia que las vocales en la comprensión del habla, transmiten la mayor parte de la información. Las consonantes tienen mayores cantidades de energía sonora a frecuencias altas mientras que las vocales se representan en las bandas de las frecuencias medias y bajas.

La banda de frecuencias del habla se encuentra en la gama de frecuencias entre 125 Hz – 8 kHz, con un notorio realce en la energía sonora entre 300 Hz y 3000 Hz, con una envolvente de forma de onda que varía en amplitud. Estas fluctuaciones de potencia en tiempo y frecuencia son llamadas modulaciones. La inteligibilidad de la palabra tiene como base esta lenta modulación y a pesar de su complejidad acústica, las palabras habladas siguen siendo inteligibles después de degradaciones drásticas en el tiempo o en frecuencia. La frecuencia fundamental del habla es de alrededor de 125 Hz para los hombres, 250 Hz para la mujer y 300 Hz para los niños, aunque existen variaciones individuales.

### **Índice de Transmisión del Habla (STI: Speech Transmission Index)**

El STI se basa en la relación entre la percepción de la inteligibilidad del habla y las modulaciones de intensidad en la voz de la persona que habla. La metodología para realizar el cálculo del STI se describe en la norma [7].

Es importante mencionar que la norma [7] exige que la prueba para el cálculo del STI se debe realizar sin personas dentro del recinto, pues éstas alteran la precisión de los resultados al funcionar como elementos absorbentes de sonido.

Por otro lado también, la inteligibilidad se expresa como un porcentaje de las palabras, frases o fonemas identificados correctamente por un oyente o un grupo de oyentes. Realizar una prueba de inteligibilidad subjetiva de este tipo emplea mucho tiempo en realizarse.

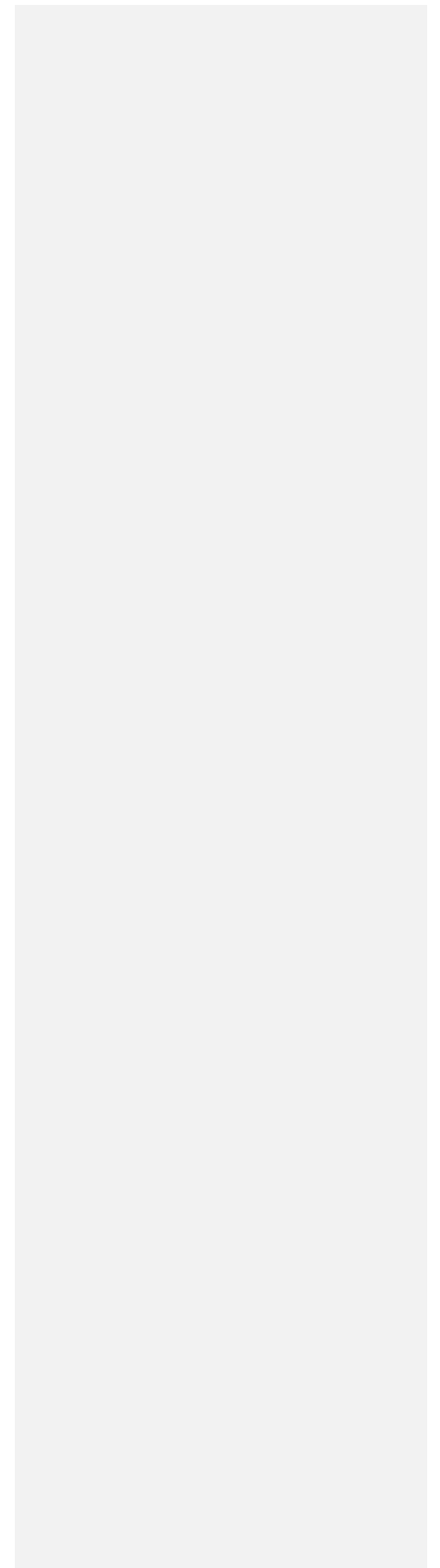
Actualmente es posible estimar la inteligibilidad del habla a partir de mediciones físicas y prescindir de los oyentes y oradores que requiere la prueba subjetiva.

Las técnicas no subjetivas de medición hacen uso de una forma de onda del habla sintetizada a través de un dispositivo de voz artificial, o pequeño altavoz, para actuar como fuente de sonido durante la prueba.



# **Capítulo 2**

**Instrumentación acústica y  
técnicas de medición**



## Obtención de la respuesta al impulso

En el caso específico del comportamiento acústico de los recintos, es importante obtener información que permita predecir el comportamiento del sonido y el ruido en los salones. Los parámetros acústicos que pueden obtenerse son: tiempo de reverberación  $T_{30}$ , definición  $D_{50}$ , claridad  $C_{80}$ , inteligibilidad de la palabra, índice de transmisión del habla (STI), entre otros.

Estos parámetros varían según los materiales usados en la construcción del recinto, por ejemplo, el tiempo de reverberación será diferente entre un aula, un auditorio, una sala de conferencias, una sala musical, etc.

El salón de clases, bajo ciertas consideraciones, es un sistema lineal e invariante en el tiempo. Una de las propiedades básicas de los sistemas lineales e invariantes en el tiempo es la superposición. El impulso es una función primaria y cualquier función primaria puede construirse mediante la superposición de múltiples impulsos. De esta manera, se pueden determinar los parámetros acústicos de un recinto a través de la obtención de la respuesta al impulso.

Si trasladamos esta teoría a un diagrama que nos brinde información sobre el nivel de presión sonora respecto al tiempo, estaremos hablando de un impulso seguido de picos y valles correspondientes a la variación en tiempo de la densidad de energía sonora con una tendencia decreciente. Este diagrama también es llamado reflectograma o ecograma.

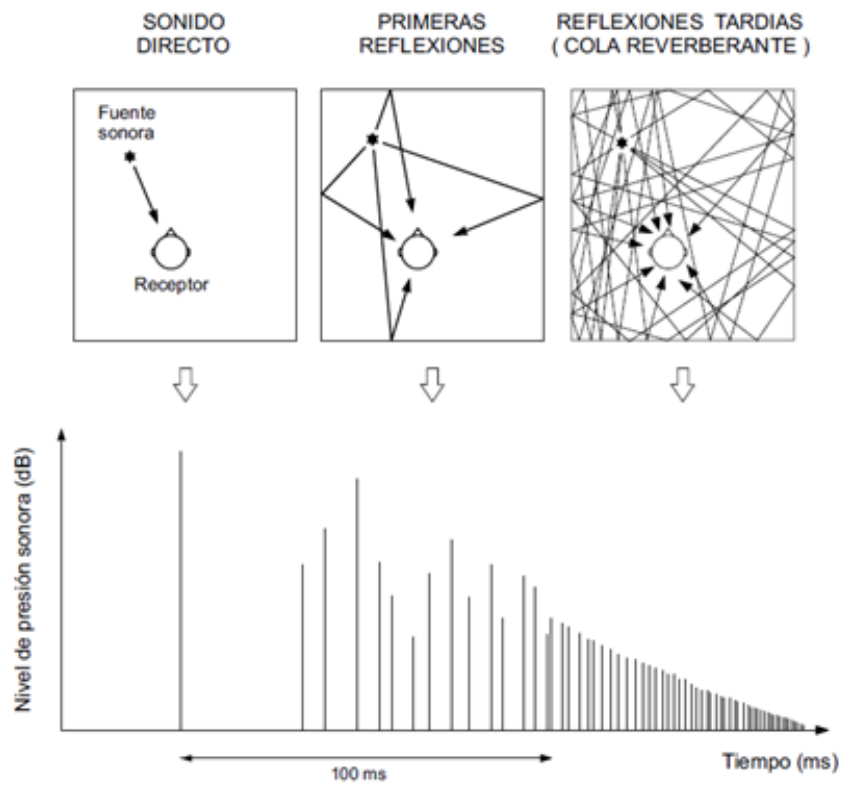


Figura 2.1 Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las reflexiones tempranas y las reflexiones tardías

## Barridos sinusoidales exponenciales (E-Sweeps o ESS)

La técnica de medición de barridos sinusoidales exponenciales proviene de una técnica antigua de medición llamada “*barridos lineales*”. El barrido lineal es la generación de ondas senoidales en las que la frecuencia crece linealmente con el tiempo.

La teoría de señales y Sistemas establece que: cualquier sistema lineal e invariante en el tiempo puede ser totalmente descrito mediante su respuesta al impulso  $h(t)$ . Se entiende como sistema a un componente que realiza un proceso a una señal de entrada  $x(t)$  y entrega una señal de salida  $y(t)$ . Este proceso puede analizarse en tiempo, es decir con la variable  $t$ ; o en frecuencia, con la variable  $\omega$  que equivale a  $2\pi$  veces la frecuencia.

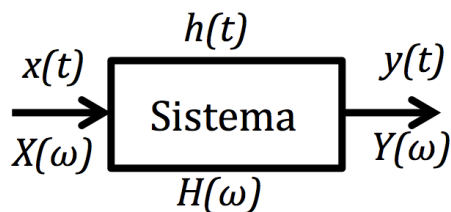
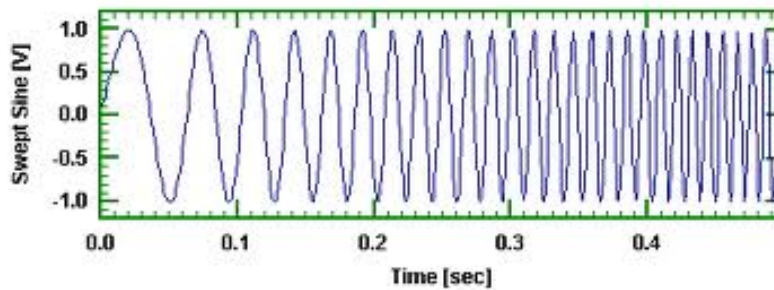


Figura 2.2 Sistema lineal e invariante en el tiempo

Si suponemos que la señal de entrada es la salida de un amplificador, el sistema es un altoparlante y la salida es la señal acústica, entonces podremos aplicar la Teoría de Señales y Sistemas a un altoparlante y describirlo por completo mediante su respuesta al impulso. De este modo se obtiene, entre otras cosas, la respuesta en frecuencia del sistema  $H(\omega)$ , también conocida como función de transferencia.

Existen diversos métodos para obtener la respuesta al impulso de un sistema y diversas dificultades para llevarlos a la práctica. Cuando se mide un sistema electroacústico es necesario interactuar con el campo acústico que rodea al sistema. Esto incluye el ruido de fondo, las reflexiones y los modos normales de vibración propios del recinto en donde se está midiendo. El mejor método será el que pueda contrarrestar las desventajas de las condiciones de medición sin exigir excesivo costo computacional.

Un barrido en frecuencia tiene la característica de excitar sólo una frecuencia a la vez. Excitar una frecuencia a la vez permite concentrar toda la energía de la señal en un ancho de banda estrecho.

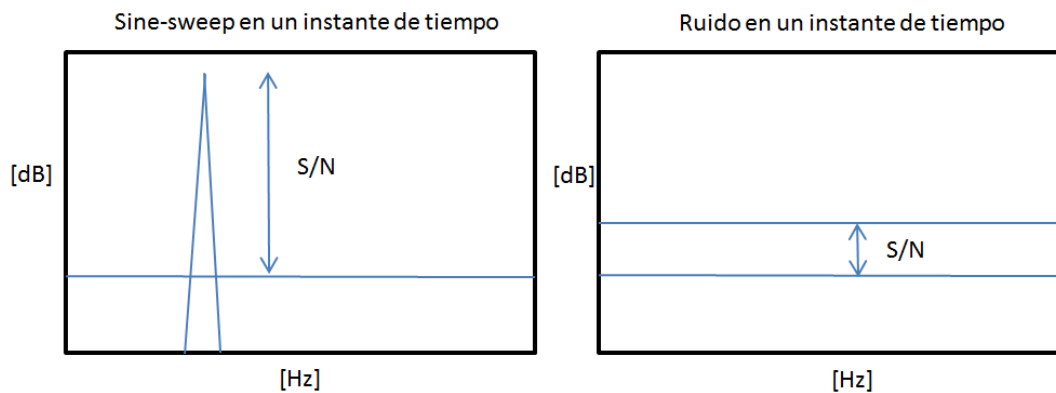


**Figura 2.3 Barrido senoidal**

La principal ventaja de utilizar barridos sinusoidales para obtener la respuesta al impulso es separarse del ruido de fondo.

El ruido generalmente es de banda ancha, es decir, tiene su energía distribuida en un amplio rango de frecuencias. Si se trata de superar el ruido con una señal de banda ancha, como ruido blanco o rosa, se estará

compitiendo de igual a igual en todo el espectro; sin embargo, si se concentra la energía de toda la señal en un rango estrecho se logra una relación señal ruido mucho mejor con igual cantidad de energía.



**Figura 2.4 Relación S/N con sweep y con ruido. En ambos casos la cantidad de energía es la misma, se observa mayor S/N cuando la energía está concentrada en un rango estrecho de frecuencias**

El proceso necesario para obtener la respuesta al impulso a partir de un barrido senoidal involucra una operación matemática llamada convolución que, de cierta forma, representa la correlación entre dos funciones, o sea, cuanto se parecen. Gracias a los avances en procesamiento digital de señales hoy en día es posible utilizar este método para realizar mediciones acústicas en recintos no ideales.

Los beneficios de este método no se limitan a la relación señal ruido. Una vez obtenido el impulso se puede analizar sólo una ventana temporal e ignorar los efectos de reflexiones y modos normales analizando sólo el sonido directo.

De este modo se logran mediciones “anecoicas” en recintos no ideales. Sin embargo, siempre existe una relación de compromiso, mientras más desfavorables las condiciones de medición menor será la información certera que se pueda extraer.

### Secuencias de máxima longitud (MLS)

Las secuencias de máxima longitud (Maximum Length Sequences, MLS) son básicamente una secuencia de pulsos con patrón pseudo-aleatorio, que se repiten en un periodo:  $L = 2^n - 1$ . Donde  $n$  es número entero.

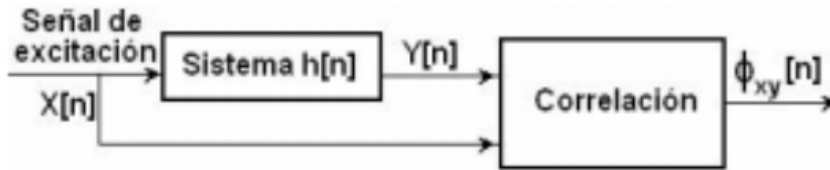
Utilizando las técnicas MLS se puede obtener la respuesta al impulso sin los problemas de una relación señal a ruido baja, como es característico al emplear impulsos de corta duración. Una vez obtenida la respuesta al impulso, se puede separar, mediante ventaneo, la señal directa de los reflejos y de este modo la medición puede hacerse en un recinto parcialmente reverberante.

Estas señales de excitación tienen como característica principal que la autocorrelación es aproximadamente una señal delta. Si tomamos en cuenta esta propiedad y de acuerdo con la teoría de los sistemas lineales, la correlación de entrada salida  $\Phi_{xy}[n]$  de un sistema lineal invariante en el tiempo se define como:

$$\Phi_{xy}[n] = \Phi_{xx}[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x(k-n)y(k) \quad 2.1$$

Dónde:  $\Phi_{xx}[n]$  corresponde a la autocorrelación de la señal de entrada  $x[n]$ ,  $h[n]$  es la respuesta al impulso y  $*$  indica la convolución. Ahora, si  $\Phi_{xx}[n]$  es

igual a una señal delta, se tiene que la respuesta al impulso es proporcional a la función de correlación entre la entrada y la salida  $\Phi_{xy}[n]$ . En la figura 2.5 se muestra el método para medir la respuesta al impulso a partir de la función de correlación entrada – salida.



**Figura 2.5 Método para medir la respuesta al impulso a partir de la función de correlación entrada-salida**

Así la respuesta al impulso de un sistema puede obtenerse calculando la correlación cruzada entre las señales de entrada y salida; después se puede procesar la señal en tiempo, multiplicando la respuesta al impulso por una ventana Hanning. Las ventanas son funciones matemáticas usadas con frecuencia en el análisis y el procesamiento de señales para evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados.

Las técnicas MLS tienen ventajas comparadas con otras formas de medición, como son:

- Presenta un espectro de potencia prácticamente plano.
- Desecha las componentes de DC de la señal muestreada.
- La relación señal a ruido es muy alta.
- Al utilizar la correlación cruzada en el cálculo de la respuesta al impulso, se elimina el ruido de fondo (no correlacionado con MLS) así que las medidas pueden ser realizadas también en ambientes relativamente ruidosos.
- Al promediar se incrementa la relación señal a ruido.



Dentro de las precauciones que se deben tomar al utilizar MLS son:

-La duración de la MLS debe ser mayor que la respuesta al impulso del sistema por analizar. De otro modo, el error de circularidad de la convolución introducirá un error significativo.

-El sistema bajo estudio debe ser invariante en el tiempo, al menos durante el intervalo de la medición.

### **Valoración acústica de los salones de la Facultad de Ingeniería**

Se puede evaluar las condiciones acústicas de las aulas de la Facultad de Ingeniería si se determina el tiempo de reverberación y el índice de transmisión del habla.

Mediante software y un método computacional se obtuvo el parámetro que define directamente el tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ).

Para obtener el tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ) se utilizó la instrumentación siguiente:

- ❖ Fuente sonora omnidireccional tipo dodecaedro.
- ❖ Computadora personal.
- ❖ Micrófono omnidireccional de condensador para medición Berhinger modelo ECM8000.
- ❖ Sonómetro programable TES 1352A.
- ❖ Interfaz USB de audio Tascam US-122
- ❖ DIRAC 3.0
- ❖ Amplificador de potencia Crown XTi 1000.
- ❖ Cable de conexión Fuente-amplificador (SpeakON de cuatro polos).

- ❖ Cables de conexión RCA-XLR. (RCA-Canon).
- ❖ Tripie para la fuente omnidireccional
- ❖ Atril para el micrófono.

Para obtener la respuesta al impulso de la medición acústica el procedimiento a seguir utilizando el software DIRAC es el siguiente:

Se genera la señal que excita al recinto en DIRAC y a través de la interfaz de sonido se alimenta al amplificador de potencia para reproducirse en la fuente omnidireccional, ésta, debe estar en la posición del profesor y mínimo a 1 m de distancia de cualquier superficie reflejante. La función de la fuente omnidireccional es producir un campo sonoro difuso en el aula.

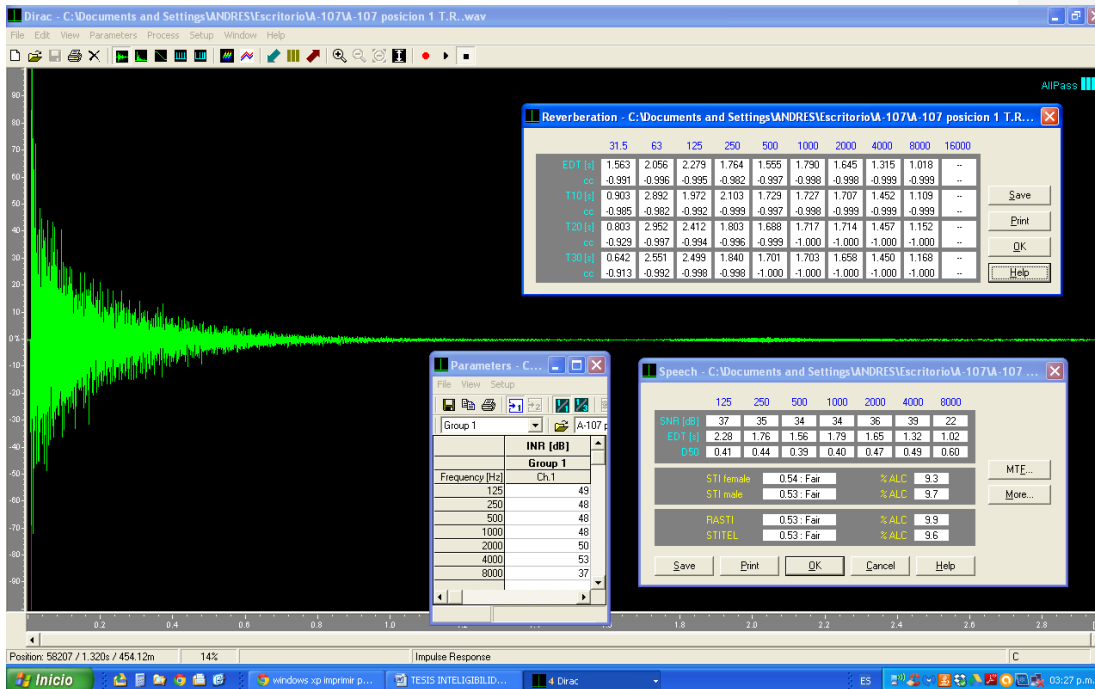
Se coloca el micrófono en la posición de un oyente para captar una señal eléctrica equivalente a la presión sonora generada por la fuente omnidireccional y mediante la interfaz de audio se registra en la computadora usando DIRAC. El software calcula la respuesta al impulso, la cual se puede analizar posteriormente para determinar  $T_{30}$ .

La relación señal/ruido (*Signal to Noise Ratio* SNR o *S/N*) medida en dB, se define como la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe.

Se debe comprobar, previamente con el sonómetro, que la presión sonora en el recinto debido a la fuente omnidireccional, sea por lo menos 30 dB SPL re a 20  $\mu$ Pa por encima del nivel de presión sonora de ruido de fondo (SNR = 30 dB).

El proceso general de medición del parámetro  $T_{30}$  se realiza en varios puntos del recinto, por lo general 3 puntos distintos, con el propósito de analizar distintas condiciones acústicas dentro del recinto, por tanto, distintos tiempos de reverberación.

La figura 2.6 muestra la respuesta al impulso de un recinto y algunos parámetros acústicos también calculados con el software DIRAC, como lo son: La Relación Respuesta al Impulso – Ruido, (INR, *Impulse Response to Noise Ratio*), el Índice de Transmisión del habla (STI, *Speech Transmission Index*) y el tiempo de reverberación  $T_{30}$ .



**Figura 2.6 Respuesta al impulso y algunos parámetros acústicos del recinto calculados con el software DIRAC**

La figura 2.7 muestra la posición del micrófono direccional, el sonómetro y la fuente al momento de medir el tiempo de reverberación en un salón.

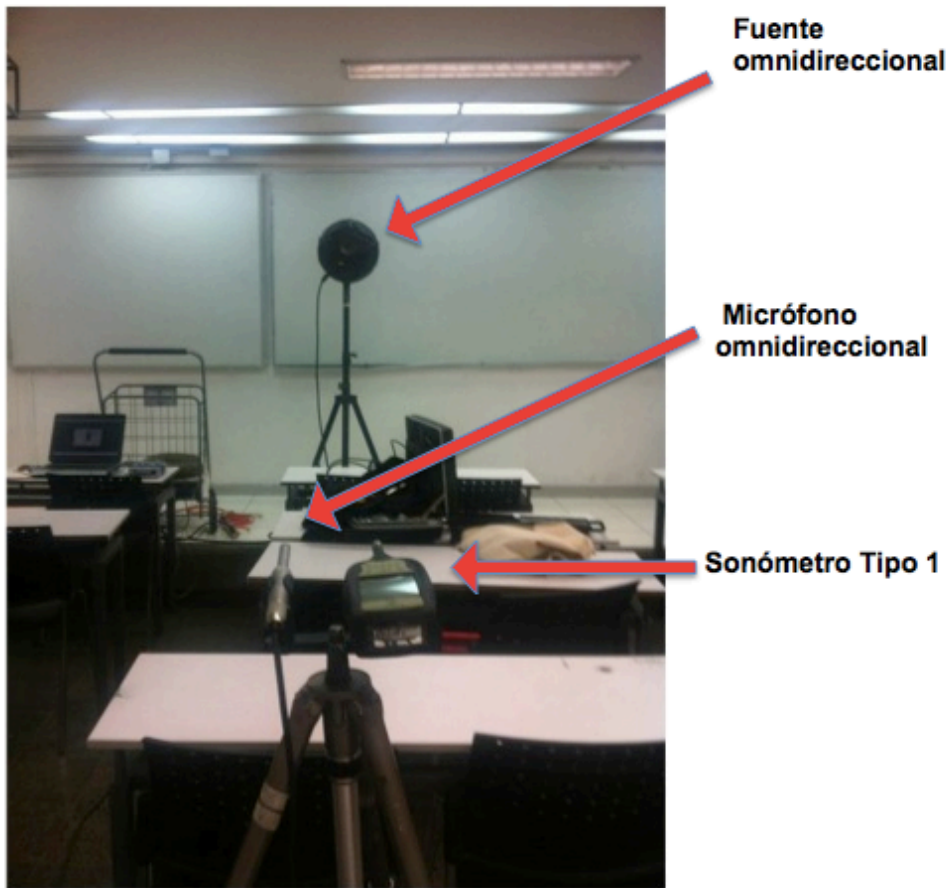


Figura 2.7 Fuente omnidireccional y micrófono omnidireccional

## Medición del tiempo de reverberación $T_{30}$ .

Para realizar la medición del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del recinto, se realiza el siguiente procedimiento en el software DIRAC:

1.- Se selecciona la opción *Medición*, que muestra una ventana donde se configuran las características del sonido que reproduce la fuente omnidireccional. Véase la figura 2.8



Figura 2.8 Selección de opción *Medición*

2.- En la nueva ventana, se seleccionan las siguientes opciones para realizar la configuración de la medición: *Internal*, pues el sonido lo genera el mismo programa; *e-Sweep*, porque el sonido producido por la fuente es un barrido sinusoidal exponencial; el tiempo de duración del barrido, debe ser mayor al tiempo de reverberación del recinto, predicho subjetivamente mediante la fórmula de Sabine y el coeficiente de absorción sonora de los materiales; el tipo de recepción de la señal, en este caso, un canal y un micrófono omnidireccional; y por último el número de veces que se promediará el estímulo antes de ofrecer una respuesta; usualmente la medición se promedia 3 veces para el análisis del Tiempo de Reverberación, y una vez en la obtención del parámetro STI. Véase la figura 2.9

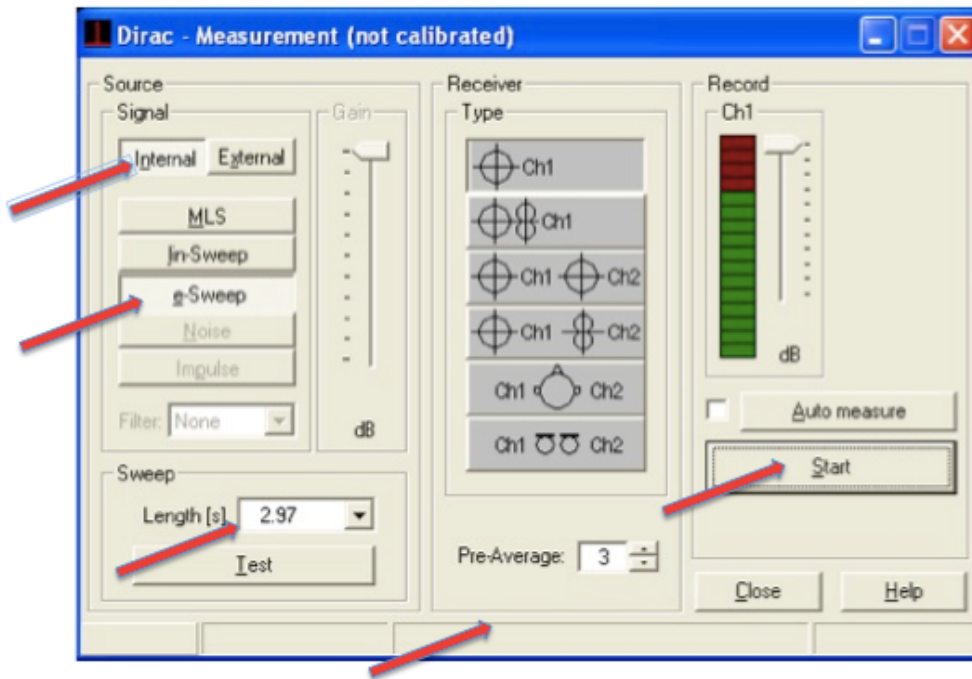


Figura 2.9 Ventana de configuración de las características del sonido producido por la fuente en la medición del tiempo de reverberación  $T_{30}$

3.- Una vez obtenida la respuesta al impulso con la medición, se debe realizar el procesamiento de la señal. DIRAC permite el cálculo de diferentes parámetros acústicos para dicho análisis, entre ellos:

EDT: Tiempo de Decaimiento Temprano

$T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ : Tiempo de Reverberación

INR: Razón de la Respuesta al Impulso al Ruido

SNR: Relación Señal a Ruido

$C_{80}$ : Claridad

$D_{50}$ : Definición

SPL: Nivel de Presión Sonora

Para procesar la señal se selecciona la opción *Gráficas y Estadísticas*.

Véase la figura 2.10

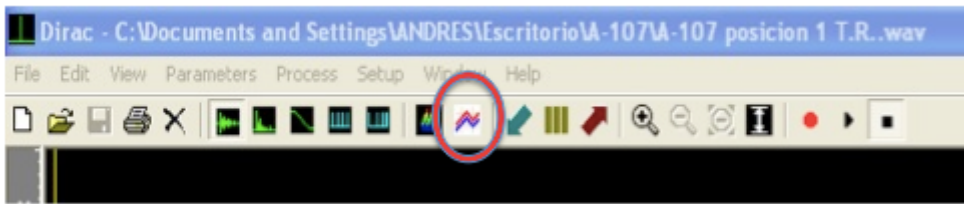


Figura 2.10 *Gráficas y Estadísticas*

Enseguida se muestra la figura 2.11

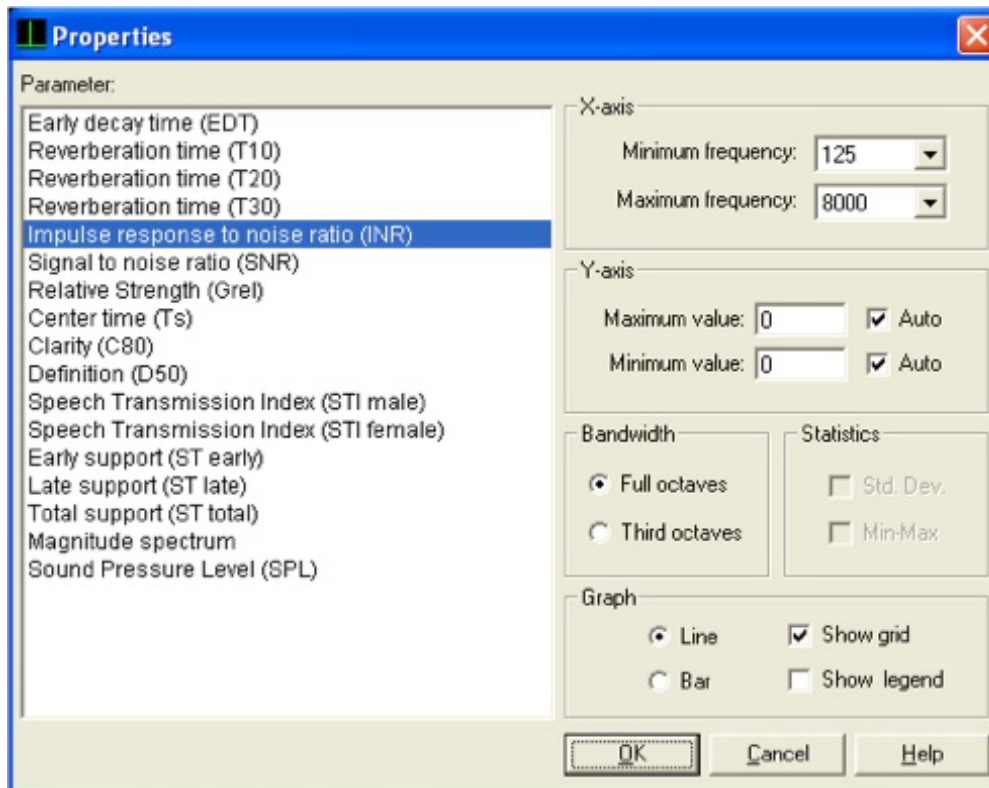


Figura 2.11 Parámetros que se pueden determinar en DIRAC a partir de la respuesta al impulso



4.- Lo primero que se debe verificar es la Razón de la respuesta al impulso al Ruido (INR). Es importante comprobar que la respuesta al impulso después de cada medición no se encuentra contaminada por ruido.

Según la norma [8], el INR debe tener un valor mayor de 35 dB para la medición del parámetro  $T_{20}$  y un valor mayor de 45 dB para el parámetro  $T_{30}$  principalmente en el rango de frecuencias de la voz humana.

En términos de frecuencia, la voz se encuentra en un rango de 80 Hz a 1100 Hz. Es importante analizar el tiempo de reverberación y enfatizar principalmente en los valores de INR correspondientes a las frecuencias: 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz.

La tabla 2.1 muestra el rango de frecuencias de la voz humana:

Hz	20	30	44	70	100	150	200	300	440	700	1000	1500	2000	3000	4400
Rango de la voz humana															

**Tabla 2.1 Rango de frecuencias de la voz humana**

Frecuencia [Hz]	INR [dB]
125	49
250	48
<b>500</b>	<b>48</b>
<b>1000</b>	<b>48</b>
<b>2000</b>	<b>50</b>
4000	53
8000	37

**Tabla 2.2 INR con valores mayores a 45 dB, principalmente en el rango de frecuencias de la voz humana**

Esto asegura que el nivel de la señal de la respuesta al impulso obtenida es más alto que el ruido de fondo que existe en el recinto, por tanto, no existe enmascaramiento en las señales y las mediciones se consideran válidas. Véase la figura 2.12

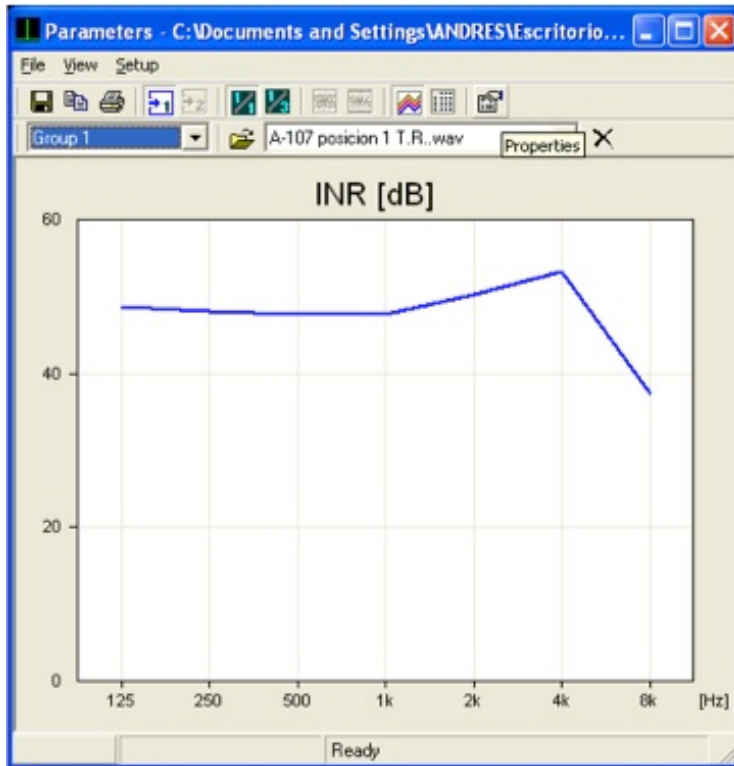
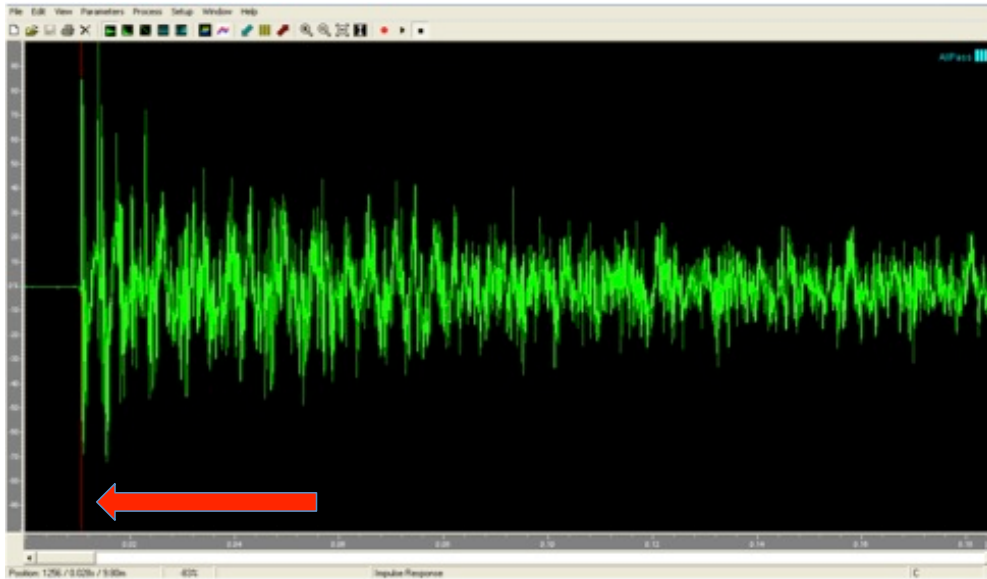


Figura 2.12 Gráfica de los valores del INR con valores mayores a 45 dB

5.- Se debe verificar que el inicio de la respuesta al impulso es detectado por el software DIRAC. Éste, se muestra en la figura 2.13 con un marcador rojo vertical al inicio de la respuesta al impulso y representa el tiempo que el sonido tarda en ser captado por el micrófono omnidireccional desde su propagación en la fuente omnidireccional



**Figura 2.13 Detección del inicio de la respuesta al impulso**

La longitud de captura debe ser dos veces el tiempo de reverberación. El punto en el que la respuesta al impulso se desintegra en el ruido de fondo debe estar dentro de la longitud de medición.

La medición debe mostrar claramente una cola plana donde el ruido de fondo domine sobre la respuesta al impulso.

6.- Para obtener el tiempo de reverberación  $T_{30}$ , se selecciona la opción *Parámetros* seguida de la opción *Reverberación*. Véase la figura 2.14

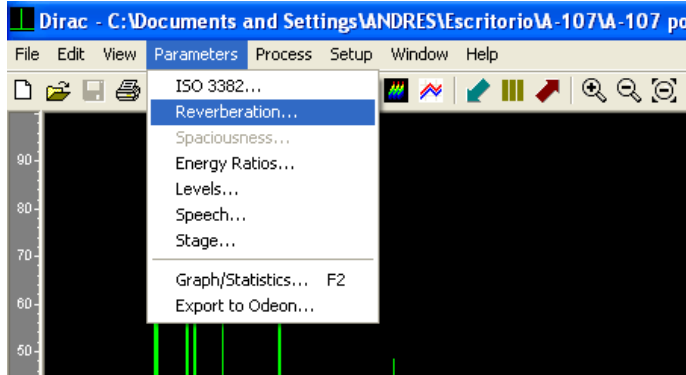


Figura 2.14 Opción *Parameters*, *Reverberation*

Enseguida aparece la figura 2.15

The screenshot shows the 'Reverberation' dialog box with a table of reverberation times. The table has columns for frequencies (31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000) and rows for parameters (EDT, T10, T20, T30) and conditions (cc). Buttons for 'Save', 'Print', 'OK', and 'Help' are visible on the right.

	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT [s]	1.563	2.056	2.279	1.764	1.555	1.790	1.645	1.315	1.018	--
cc	-0.991	-0.996	-0.995	-0.982	-0.997	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	--
T10 [s]	0.903	2.892	1.972	2.103	1.729	1.727	1.707	1.452	1.109	--
cc	-0.985	-0.982	-0.992	-0.999	-0.997	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	--
T20 [s]	0.803	2.952	2.412	1.803	1.688	1.717	1.714	1.457	1.152	--
cc	-0.929	-0.997	-0.994	-0.996	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	--
T30 [s]	0.642	2.551	2.499	1.840	1.701	1.703	1.658	1.450	1.168	--
cc	-0.913	-0.992	-0.998	-0.998	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	--

Figura 2.15 Tiempo de reverberación a partir de la respuesta al impulso obtenida

DIRAC provee el cálculo de diferentes tiempos de reverberación, por ejemplo,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ . En este trabajo, el tiempo de reverberación se obtiene con el

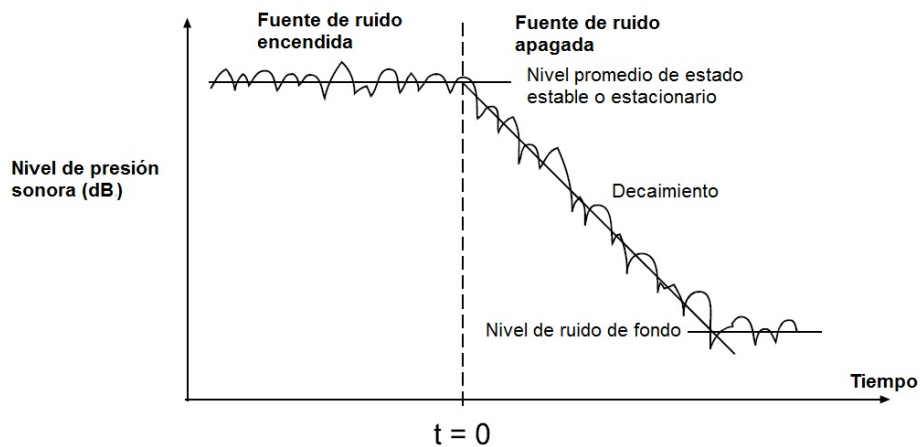
parámetro  $T_{30}$ . Se consideran principalmente los resultados correspondientes a las frecuencias de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz debido a que la voz se encuentra en esa gama de frecuencias. Véase la figura 2.16

	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT [s]	1.563	2.056	2.279	1.764	1.555	1.790	1.645	1.315	1.018	--
cc	-0.991	-0.996	-0.995	-0.982	-0.997	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	--
T10 [s]	0.903	2.892	1.972	2.103	1.729	1.727	1.707	1.452	1.109	--
cc	-0.985	-0.982	-0.992	-0.999	-0.997	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	--
T20 [s]	0.803	2.952	2.412	1.803	1.688	1.717	1.714	1.457	1.152	--
cc	-0.929	-0.997	-0.994	-0.996	-0.999	-0.999	-0.999	1.000	-1.000	--
T30 [s]	0.642	2.551	2.499	1.840	1.701	1.703	1.658	1.450	1.168	--
cc	-0.913	-0.992	-0.998	-0.998	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	-1.000	--

Figura 2.16 Frecuencias principales de la voz humana y su tiempo de reverberación ( $T_{30}$ )

### Curva de decaimiento

El tiempo de reverberación se puede medir con una señal de ruido o con un impulso. El método tradicional utiliza ruido emitido por una fuente y un receptor que capta el nivel de presión sonora como una función del tiempo, después de que la fuente se encuentra apagada. Esto da una curva de caída y se presenta en la figura 2.17. Si el sonido en la habitación es lo suficientemente difuso; esto es, que el sonido se distribuya uniformemente en todas las secciones del recinto, la curva de decaimiento se encuentra cercana a ser una línea recta entre el nivel de excitación del sonido y el nivel de ruido fondo.



**Figura 2.17** Curva de decaimiento de una fuente de ruido interrumpida en el tiempo  $t = 0$

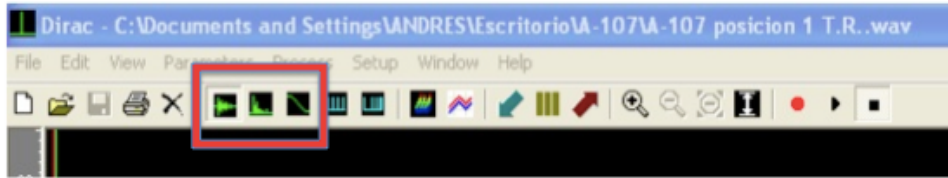
La parte inferior de la curva de decaimiento está influenciada por el ruido de fondo y la parte superior por el sonido directo.

La parte de la curva de decaimiento utilizada para la evaluación acústica comienza 5 dB por debajo del nivel promedio o estacionario y termina normalmente 35 dB por debajo del mismo nivel. El rango de evaluación es 30 dB y la pendiente se determina ajustando una línea recta o mediante el cálculo de la pendiente de una recta por el método de regresión lineal.

A partir de la pendiente de la curva de decaimiento medida en [dB/s], se calcula el tiempo de reverberación, que es el tiempo que transcurre durante una caída de 60 dB a partir del nivel sonoro inicial. El resultado se representa como  $T_{30}$  para dejar claro que el rango de evaluación utilizado realmente es 30 dB. Si el ruido de fondo es demasiado alto, el tiempo de reverberación se puede medir como  $T_{20}$ . En este caso se evalúa la pendiente de la curva de decaimiento entre -5 dB y -25 dB por debajo del nivel de excitación.

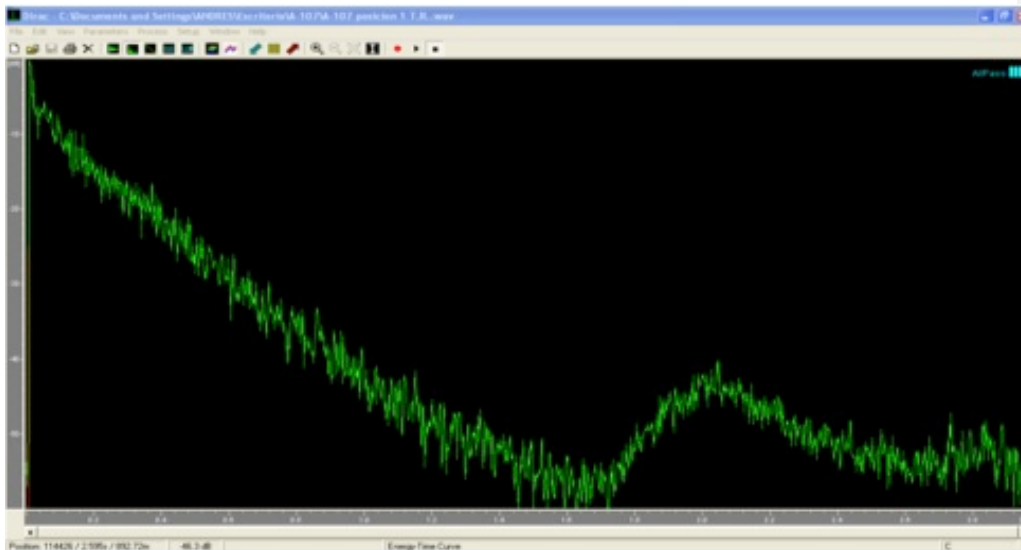
El software puede calcular la curva energía-tiempo y la curva de decaimiento, estas curvas nos brindan información sobre el tiempo en segundos, que la energía acústica tarda en decaer por completo en el recinto.

Se selecciona alguna de las opciones de la figura 2.18



**Figura 2.18 Respuesta al Impulso, Curva de energía y Curva de decaimiento**

En las figuras 2.19 y 2.20 se muestran la curva de energía y la curva de decaimiento respectivamente.



**Figura 2.19 Curva Energía - Tiempo**



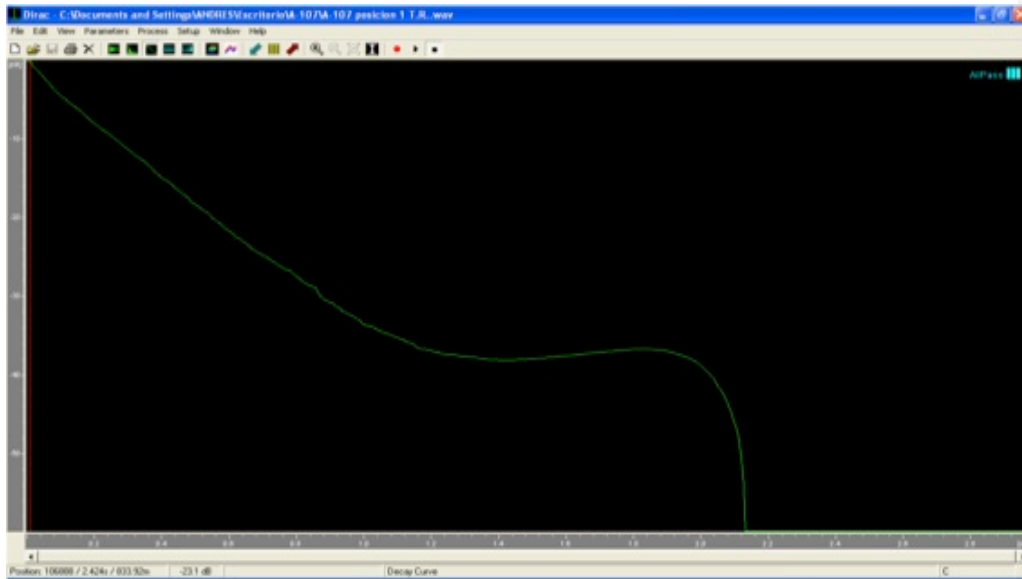
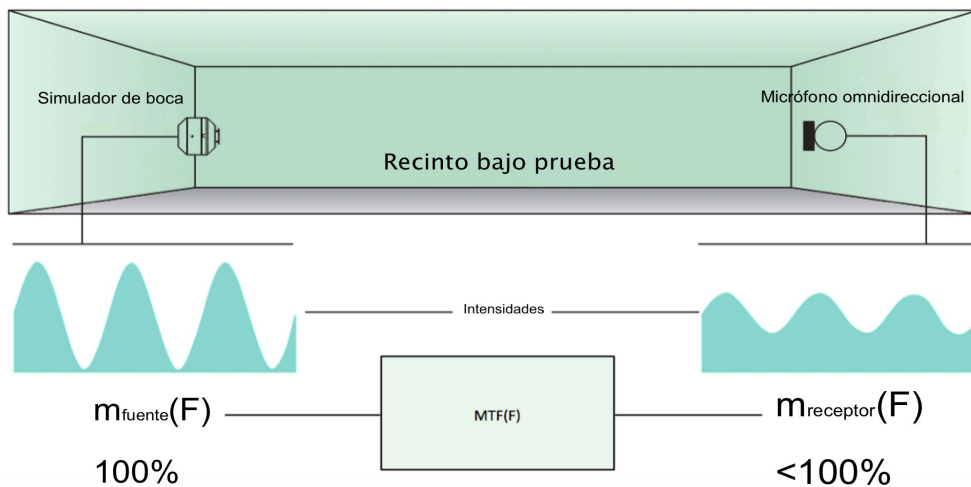


Figura 2.20 Curva de decaimiento

## Obtención del parámetro STI

STI es el parámetro establecido para medir la inteligibilidad del habla. Se basa en la medición de las Funciones de Transferencia de Modulación (MTF), en siete bandas de octava. Para cada banda de octava hay una MTF cuantificando el grado de conservación de las modulaciones de intensidad de esta banda. Estas funciones también determinan cuánto se conservan las modulaciones de intensidad que cubren el espectro del habla.

La Función de Transferencia de Modulación (MTF) describe en qué medida la modulación se transfiere de la fuente al receptor, como una función de la frecuencia de modulación  $F$ , que oscila desde 0.63 Hz hasta 12.5 Hz. La MTF depende de las propiedades del sistema y el ruido de fondo.



**Figura 2.21 Relación entre la inteligibilidad del habla y la profundidad de la modulación**

Una medición típica de la inteligibilidad del habla puede llevarse a cabo de la siguiente manera:

1. Un estímulo se reproduce a través de una fuente de sonido direccional (simulador de boca artificial) en la posición del hablante. Se da un tiempo específico de retardo para que el estímulo sea de mayor duración.
2. Un micrófono omnidireccional capta el estímulo producido por la fuente direccional y la información obtenida se registra en un software.
3. Es posible ver un cambio en la inteligibilidad del habla si el micrófono omnidireccional se cambia de posición en la medición y si el nivel de ruido de fondo es muy intenso.

La inteligibilidad del habla se mide relativamente con una lista de palabras (o frases), donde lo importante es el porcentaje de palabras entendidas correctamente. La inteligibilidad del habla depende de las características de las palabras (frases, palabras sueltas, enunciados, etc.); el hablante, el oyente, el método de puntuación, los acentos y la calidad acústica del sistema de transmisión.

Para obtener el parámetro STI mediante el software DIRAC, el procedimiento a seguir, es el siguiente:

1.- El software DIRAC genera una señal MLS, a dicha señal se le aplica un filtro de ruido rosa y ruido azul. Véase la figura 2.22. El simulador de boca pretende simular el patrón de radiación de la boca humana.

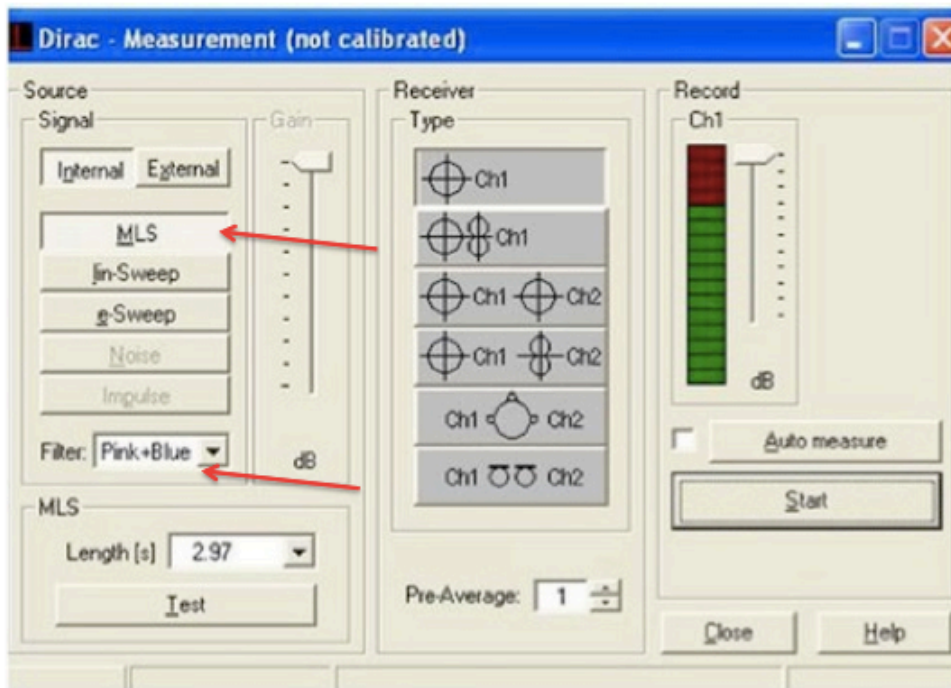
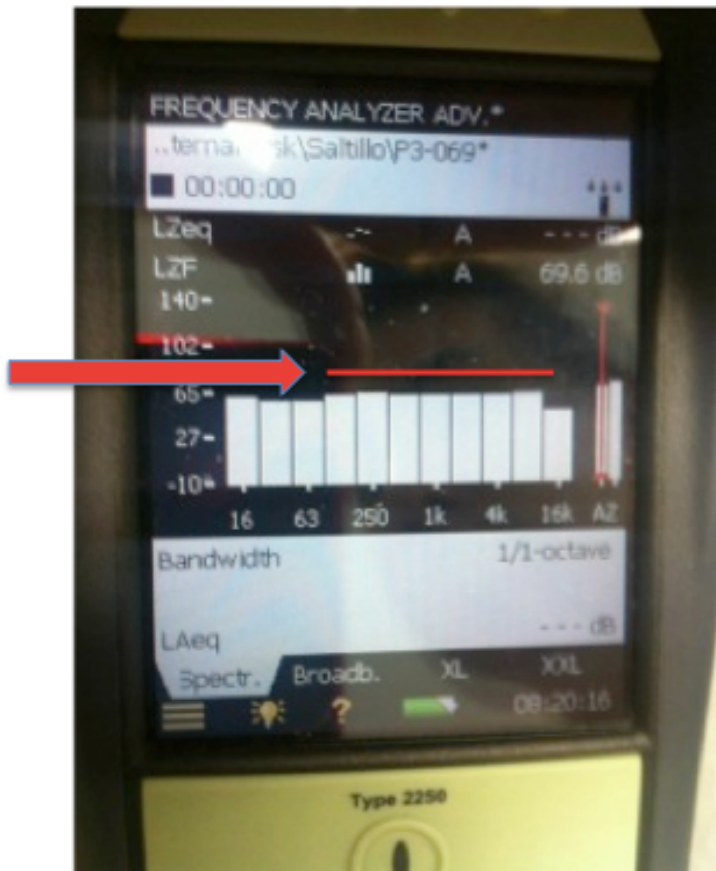


Figura 2.22 Señal MLS con el filtro Pink + Blue para medición del parámetro STI

2.- En la interfaz gráfica del software *System Architect 3.4* se ecualiza la respuesta en frecuencia del recinto para obtener una respuesta plana que será visible en el sonómetro; una respuesta plana significa que no exista una diferencia entre cada octava de banda de máximo 1 dB en el rango de frecuencias comprendido de 125 Hz a 8 kHz. Véase la figura 2.23



**Figura 2.23** Respuesta plana del recinto

3.- Se selecciona la opción *Medición* y se establecen los parámetros iniciales para generar la señal MLS en el simulador de boca

Se selecciona la opción *Internal* porque la señal proviene directamente de la interfaz. MLS es una señal útil para medir sistemas acústicos. La señal MLS es ruido blanco, es una señal no periódica y aleatoria, su medición requiere largos tiempos de promediación (minutos) para asegurar la correcta estimación de su espectro. Se selecciona el filtro *Pink+Blue* junto con el tiempo de duración de la señal MLS, este tiempo, siempre tiene que ser mayor al tiempo de reverberación calculado del recinto. El prepromedio de repetición de la señal MLS en la medición es indiferente debido a que la medición requiere una señal constante y continua en el tiempo. Se selecciona el tipo de receptor *Ch1* para un micrófono omnidireccional.

Se realiza una simulación de la medición con la opción *Test*, para verificar que se seleccionaron los parámetros correctos. Véase la figura 2.24. Se ecualiza la señal MLS en la interfaz gráfica del software *System Architect 3.4*

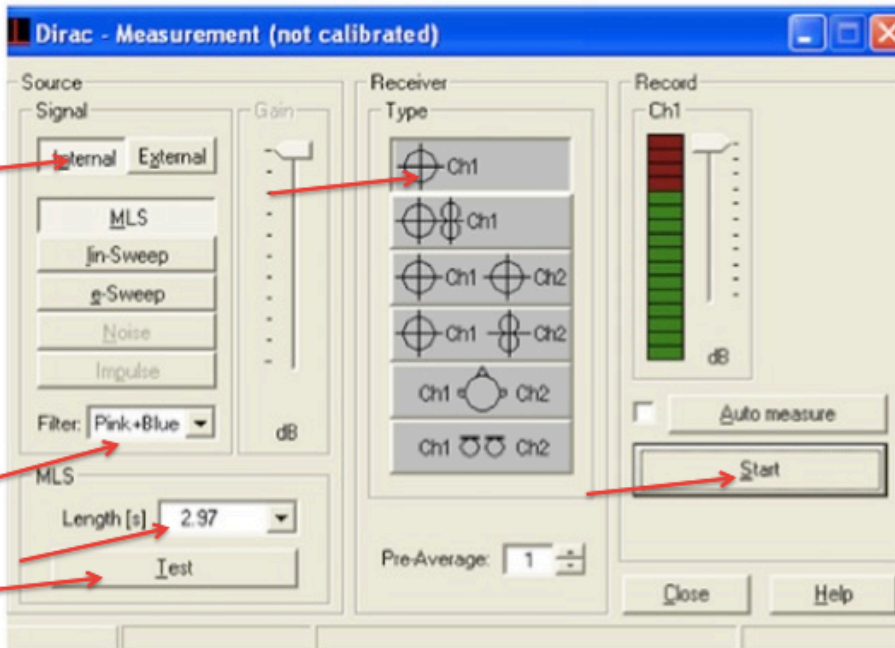


Figura 2.24 Medición del parámetro STI

El software *System Architect 3.4* permite seleccionar el amplificador con el cual se sincroniza la interfaz; al seleccionarlo, se abre una ventana de ecualización en la que se selecciona la opción, *Out EQ*. Véase la figura 2.25



**Figura 2.25** Primeros ajustes para la ecualización de la señal MLS en *System Architect 3.4*



Se muestra una ventana que permite ecualizar la señal MLS. Se activan y ajustan los filtros para las bandas correspondientes, para verificar en el sonómetro que no existe más de 1 dB de diferencia entre banda y banda desde 125 Hz a 8 kHz como se muestra en la figura 2.26

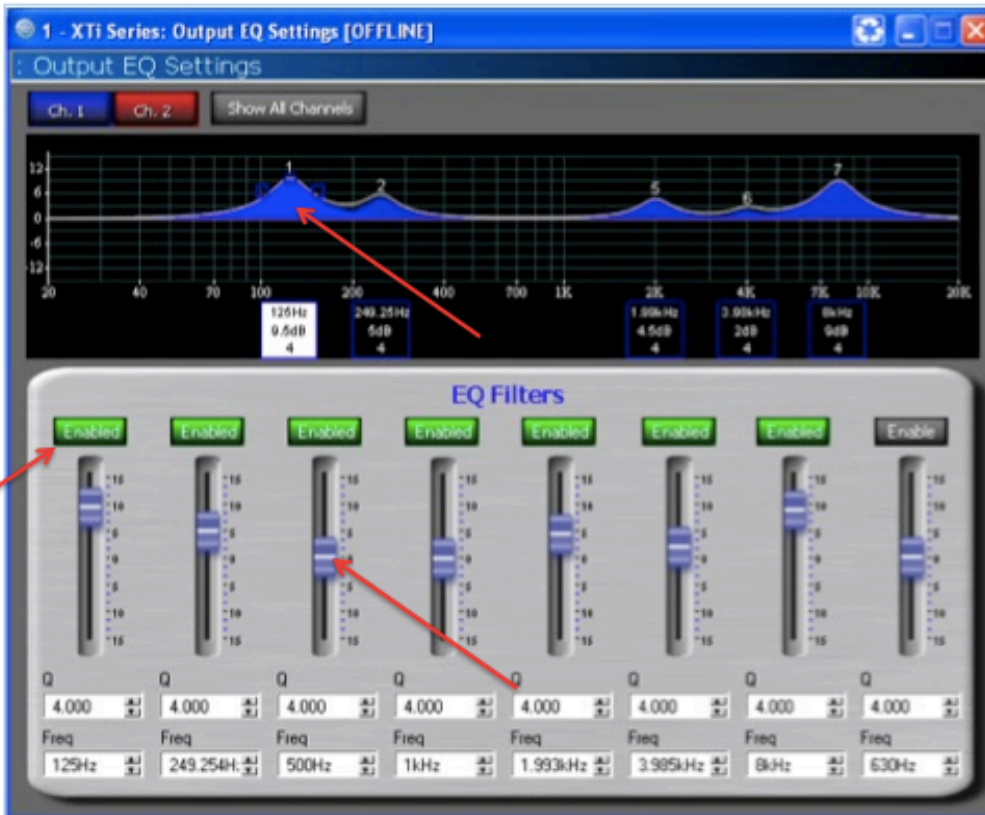


Figura 2.26 Ecualización de la señal MLS por bandas de octava en *System Architect 3.4*

Para simular la posición del oído de una persona que está sentada en una silla, el micrófono debe encontrarse a una altura de 1.20 m.

Es necesario medir el parámetro STI en la posición inicial del micrófono en la que se realizó el aplanamiento de la señal. La medición debe realizarse en tres zonas diferentes del recinto, utilizando los filtros *Male* y *Female* en cada medición como se muestra en la figura 2.27.

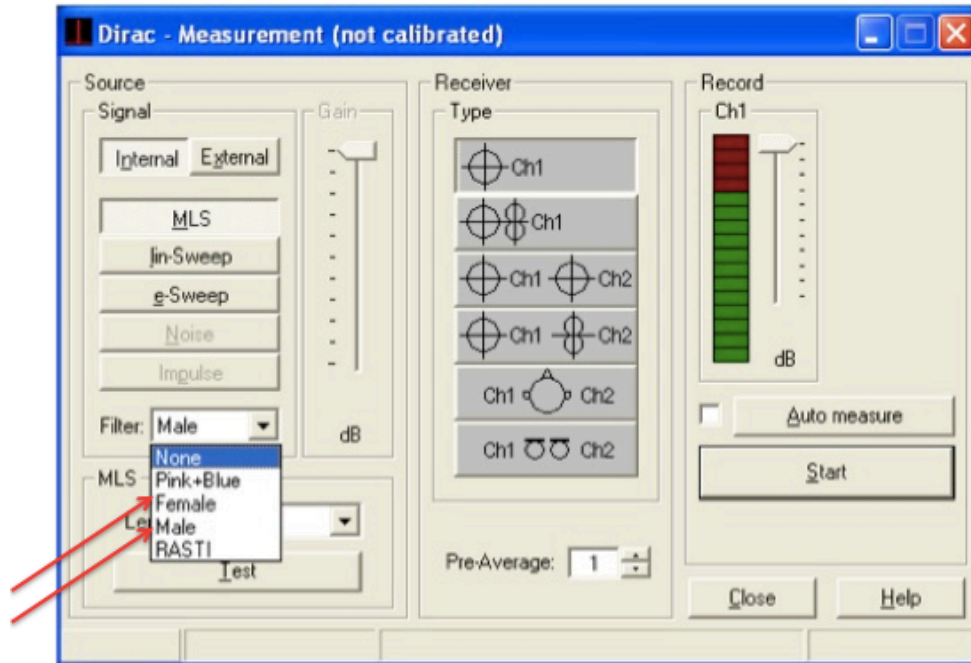


Figura 2.27 Selección de filtros *Male* y *Female* en la medición del parámetro STI

La figura 2.28 muestra la posición del simulador de boca y el micrófono omnidireccional con el sonómetro para el aplanamiento de la señal MLS.



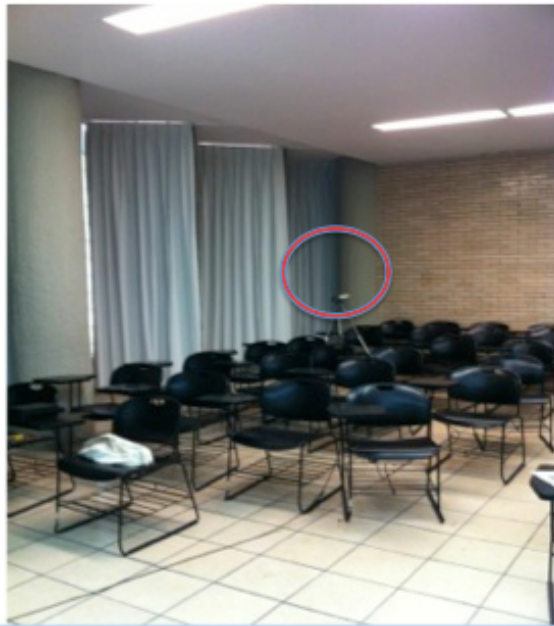
**Figura 2.28** Posición del micrófono omnidireccional en frente del simulador de boca, a 1 m de distancia para realizar el aplanamiento de la señal MLS



**Figura 2.29** Posición 1 del micrófono omnidireccional, como se aprecia en la imagen, esta es la misma posición en la que se realiza el aplanamiento de la señal MLS por octavas de banda para obtener los parámetros acústicos del recinto



**Figura 2.30** Posición 2 del micrófono omnidireccional, lateral trasera derecha



**Figura 2.31** Posición 3 del micrófono omnidireccional, lateral trasera izquierda

El micrófono que capta la señal MLS debe estar por lo menos 1 m separado de cualquier superficie reflejante, sean paredes, cortinas o nichos.

Las figuras 2.32, 2.33 y 2.34 muestran la respuesta al impulso de tres diferentes zonas de medición, en la obtención del parámetro STI con el filtro *Female* en el salón A107.



Figura 2.32 Respuesta al impulso del punto 1 en la medición de STI, filtro Female  
STI = 0.50 = Fair

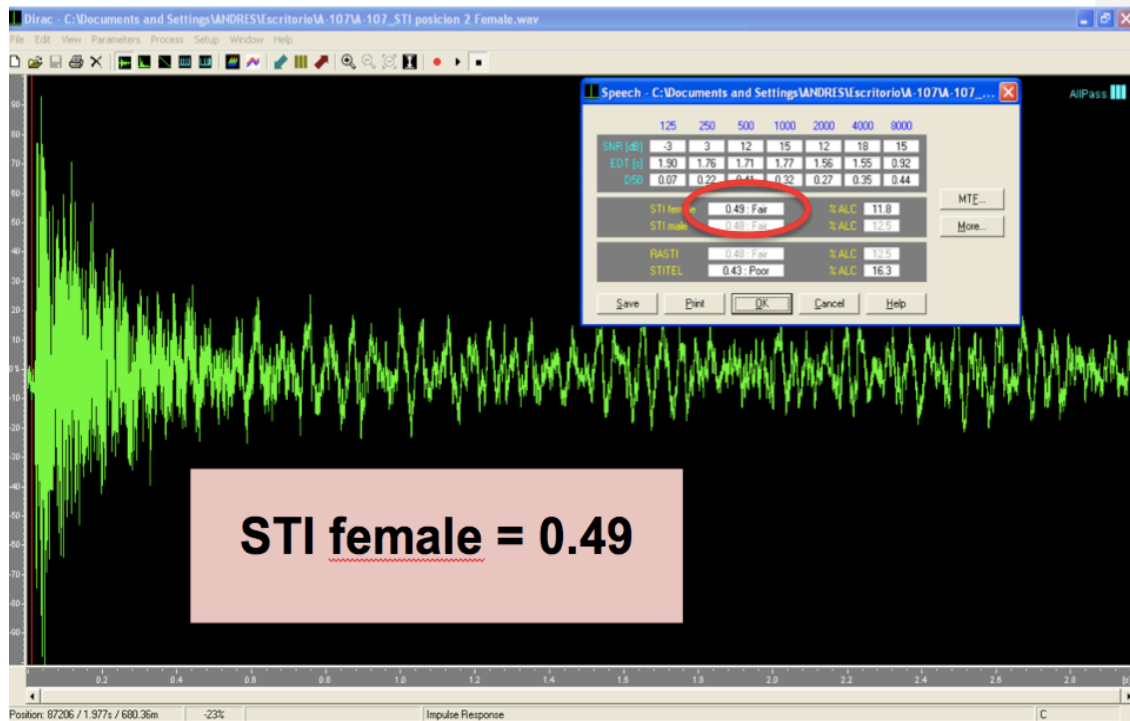


Figura 2.33 Respuesta al impulso del punto 2 en la medición de STI, filtro Female  
STI = 0.49 = Fair

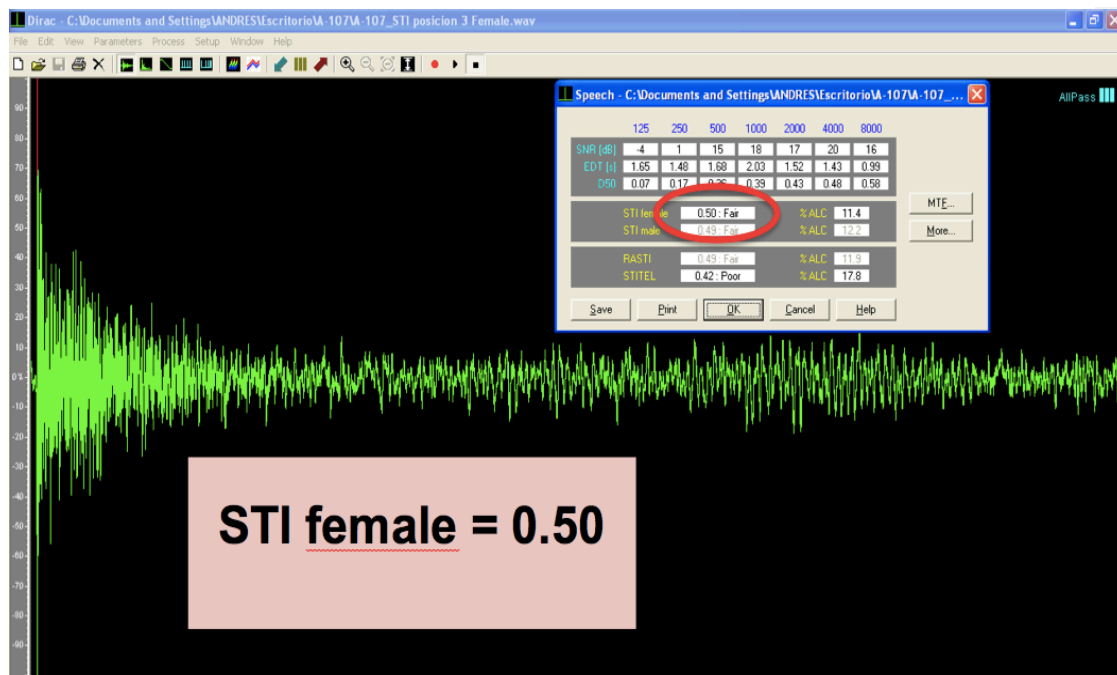


Figura 2.34 Respuesta al impulso del punto 3 en la medición de STI, filtro Female  
STI = 0.50 = Fair

En el software DIRAC, se selecciona la opción *Parameters* seguida de la opción *Speech*. Véase la figura 2.35.

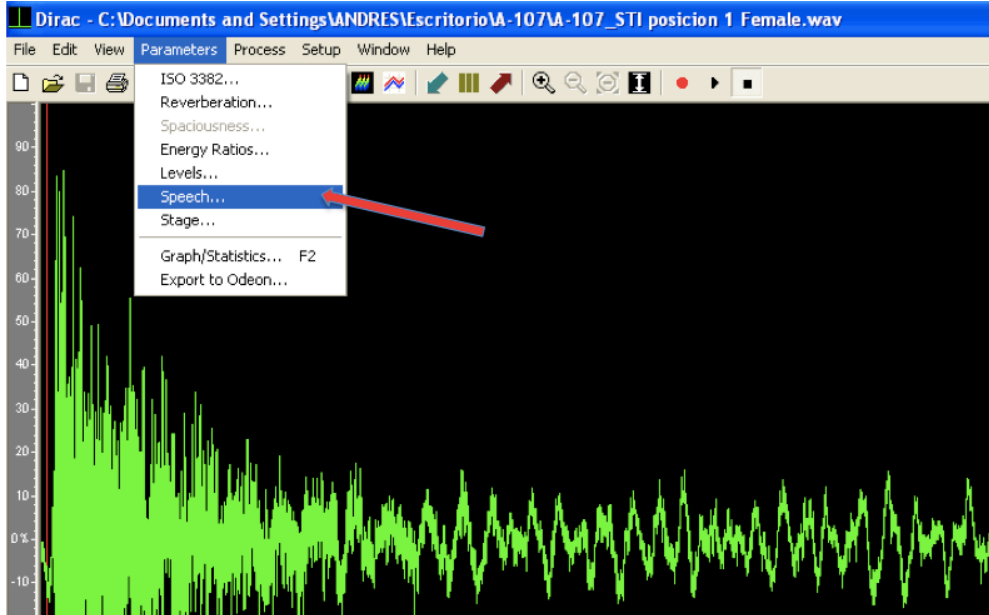


Figura 2.35 Selección opción *Speech* para obtener el parámetro STI en el punto 1 del salón A107

La figura 2.36 muestra el valor del parámetro STI *Female* o *Male*, sea el caso, y la Pérdida Porcentual de Articulación de las Consonantes (%ALC, *Percentage Articulation Loss of Consonants*) que es un valor numérico utilizado en acústica para medir las cualidades de un recinto y evaluar de cierta manera la inteligibilidad de la palabra. Es más fácil entender las palabras en un recinto que presenta un valor bajo de %ALC, que en uno que presenta un valor alto de %ALC.



El valor se establece con el porcentaje de consonantes que los oyentes de una sala no entienden, ya que las vocales no son necesarias para entender un mensaje.

El método está basado en el estudio de la pérdida real de consonantes.

En salas de diferente tipo, un grupo de personas escuchan dictados de palabras monosílabas; La pérdida de consonantes se relaciona con las características acústicas de la sala. Cuando el valor del porcentaje en el recinto es mayor que 10%, la inteligibilidad del habla es mala. En entornos de aprendizaje y sistemas de alerta por voz, el valor de porcentaje deseado es de 5% o menos. Un 15% suele ser la pérdida máxima aceptable.

La figura 2.36 muestra los resultados del parámetro STI y %ALC en una medición de prueba.

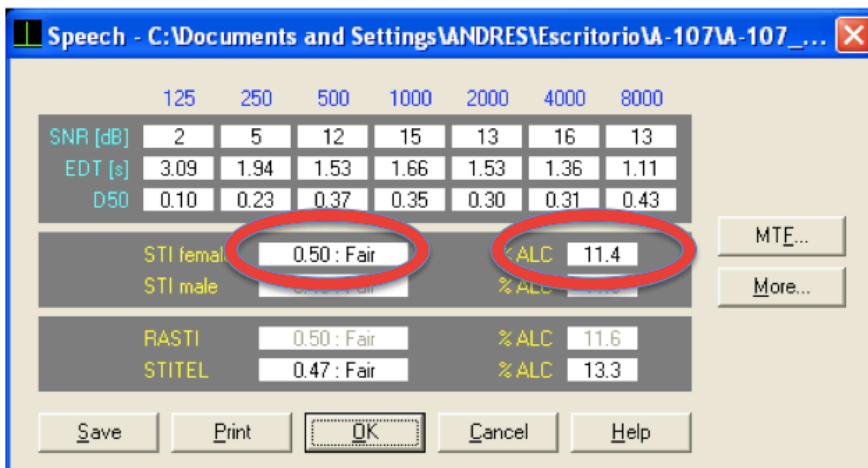


Figura 2.36 Resultados de STI *Female* y la Pérdida Porcentual de Articulación de Consonantes, %ALC

La tabla 2.3 muestra la relación del parámetro STI con la inteligibilidad del habla.

STI	0.00 - 0.30	0.30 - 0.45	0.45 - 0.60	0.60 - 0.75	0.75 -1.00
Inteligibilidad de la palabra	Malo	Pobre	Regular	Bueno	Excelente

**Tabla 2.3 Relación entre la inteligibilidad de la palabra y el parámetro STI**

### **Obtención de los niveles de ruido de fondo en puntos aleatorios exteriores y cercanos a las aulas**

Si se obtiene el nivel de ruido de fondo en distintos puntos cercanos y fuera del recinto, se puede realizar un croquis acústico, también llamado *mapa de ruido*, que brinda información sobre el nivel que de ruido que presentan algunas aulas en su exterior.

Para obtener el nivel de ruido de un recinto se deben aplicar los procedimientos establecidos por la norma [9], la cual menciona que para obtener el nivel de ruido equivalente  $L_{eq}$ , se necesitan los valores que registra un sonómetro integrador en intervalos de 5 segundos y con un mínimo de 35 muestras por punto de medición, usualmente, la medición se realiza en 3 puntos exteriores y cercanos al salón.

También existe un método de medición de ruido de fondo creado por Académicos del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM (CCADET).

Para capturar el ruido de fondo, los académicos, realizan grabaciones de 15 minutos con ayuda del software *Adobe Audition*. Un programa en *MATLAB* desarrollado por el Ing. José Alberto Arellano Figueroa de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, obtiene el nivel equivalente de dichas grabaciones ( $L_{eq}$ ).

Para realizar las grabaciones se utiliza el siguiente material:

- Computadora personal
- *Adobe Audition*
- Interfaz de audio TASCAM US-144MKII
- 1 Micrófono BERHINGER ECM8000 omnidireccional de condensador
- Sonómetro integrador TES 1352A
- Calibrador acústico TES 1356
- Cable de conexión micrófono-interface XLR
- Cable de conexión interfaz-computadora
- Atril con cabezal doble para el micrófono y el sonómetro integrador.

### **Grabaciones**

- Grabar por 30 s el tono de calibración (94 dB a 1KHz) con el micrófono omnidireccional. Para el micrófono; el control de la ganancia en la interfaz de audio debe ajustarse al máximo sin producir distorsión, esto, con el propósito de aprovechar la capacidad del convertidor analógico/digital en su totalidad. La interfaz indica con un led si la señal satura el convertidor.

Durante la grabación del tono de calibración se debe verificar que el micrófono este apartado de superficies reflejantes y aislado de ruido intenso. Véase la figura 2.37



**Figura 2.37** Grabación del tono de calibración a 94dB – 1kHz en *Adobe Audition*

- Una vez grabado el tono de calibración, el ajuste del control de ganancia del canal no se debe manipular, si se hiciese, los niveles de ruido obtenidos en las grabaciones posteriores no coincidirán con la señal de referencia ya grabada, reflejándose en un nivel distinto del convertidor analógico/digital.

- Se debe calibrar el sonómetro para que las mediciones sean más precisas. El sonómetro debe tener la capacidad de almacenar valores en tiempos de integración de 2 s, ya que, en la grabación del nivel de ruido de fondo, estará en funcionamiento. Véase la figura 2.38



**Figura 2.38** Calibración del sonómetro a 94 dB – 1kHz

- El sonómetro y micrófono deben encontrarse lo más cercano posible a una altura de 1.50 m y alejados 1m de cualquier superficie reflejante para evitar la contribución a la saturación como se muestra en la figura 2.39
- Se deben ubicar los puntos de medición, generalmente 3 puntos, y comenzar con la grabación de las muestras de ruido. También se realiza una grabación del nivel de ruido de fondo con la memoria del sonómetro integrador.



**Figura 2.39** Posición del sonómetro y micrófono a 1.50 m de altura y por lo menos 1m de separación de cualquier superficie reflejante

## Procesamiento de las señales obtenidas

Trabajar con fenómenos acústicos presenta complicaciones debido al extenso intervalo de valores que se puede obtener como respuesta. Para cuantificar las propiedades del sonido, se deben realizar varios procesos de medición para tener mayor certeza y obtener información sobre el comportamiento del sonido en un recinto.

Para realizar la medición de manera sencilla, utilizamos los niveles de presión sonora medidos en dB que nos brindan información sobre la relación entre dos cantidades, una de referencia y otra de interés. La señal de referencia o umbral auditivo es el valor mínimo de presión sonora que detecta el oído humano sano ( $20 \times 10^{-6} Pa$  a  $1kHz$ ). En las grabaciones se encuentra implícito en el tono de calibración.

El valor de referencia se obtiene de la siguiente manera:

El tono producido por el calibrador es de 94 dB a 1KHz; este valor es el nivel que produce 1 Pa de presión sonora eficaz ( $P_{rms}$ ) re a  $20 \mu Pa$ .

El valor eficaz de la grabación es:

$$tono_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T (tono \text{ de calibración})^2 dt\right)} \quad 2.2$$

Donde  $T$  son los 30 segundos de la calibración.

Se conoce que:

$$94 \text{ dB} = 20 \log \left[ \frac{1 \text{ Pa}}{20 \text{ } \mu\text{Pa}} \right] = 20 \log \left[ \frac{\text{tono}_{rms}}{\text{señal de referencia}} \right] \quad 2.3$$

Despejando la señal de referencia:

$$S_r = \frac{\text{tono}_{rms}}{10^{94/20}} \quad 2.4$$

A los 15 minutos de grabación se realiza un análisis semejante al anterior para obtener el valor eficaz. Se trabaja con un filtro de ponderación A, la curva de esta ponderación es semejante al comportamiento del oído humano en situaciones de bajo nivel de presión sonora, por ejemplo, la actividad escolar.

$$\text{ruido}_{rms} = \sqrt{\left( \frac{1}{T} \int_0^T (\text{muestra de ruido})^2 dt \right)} \quad 2.5$$

Donde  $T$  son los 15 minutos de la grabación.

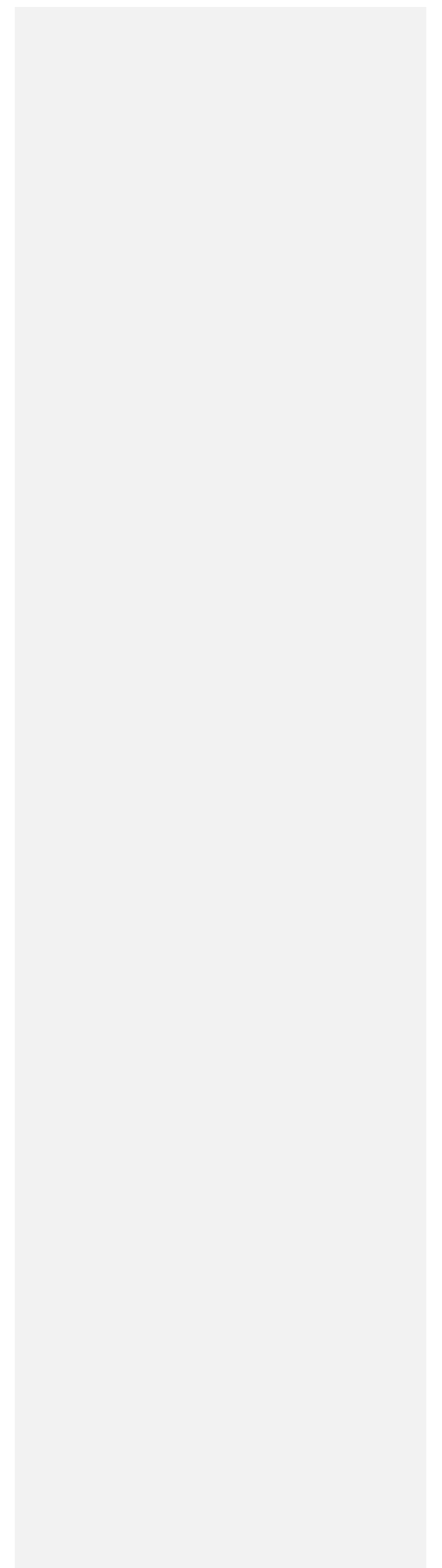
Se divide el valor de  $\text{ruido}_{rms}$  entre la señal de referencia  $S_r$  y se obtiene el nivel equivalente de presión sonora de la grabación, en ese punto de la medición.

$$L_{eq} = 20 \log \left( \frac{\text{ruido}_{rms}}{S_r} \right) \quad 2.6$$



# **Capítulo 3**

# **Resultados**



## **Características dimensionales y condiciones actuales de las aulas de la Facultad de Ingeniería**

Algunos edificios de la Facultad de Ingeniería se construyeron en otra época; los salones han sufrido cambios y difieren de los tratamientos acústicos que actualmente se recomiendan para el buen entendimiento en las aulas. Los edificios fueron diseñados y construidos en condiciones distintas a las condiciones actuales, la población estudiantil de ese entonces era menor que la actual, por tanto, las aulas se planearon para un número menor de alumnos.

Actualmente, los salones presentan más tecnología, es el caso de algunas aulas en el Conjunto norte y el Anexo de Ingeniería, sin embargo, las condiciones iniciales de construcción no han cambiado. Los salones están formados por muros de concreto que aíslan el ruido proveniente del exterior pero por dentro, contribuyen a la reverberación.

Algunas zonas de la Facultad de Ingeniería presentan ruido constante que influye en el proceso de comprensión del habla y afecta el desempeño de las actividades cotidianas.

Las causas por las que se genera el ruido son:

- El tránsito de automóviles
- El tránsito de los alumnos durante el cambio de clase
- La plática o gritos en los pasillos
- Ruido producido por maquinaria
- Ruido generado por la operación de la subestación eléctrica
- Ruido generado por las labores de mantenimiento y limpieza de áreas verdes

El ruido se infiltra por las puertas y ventanas, debido a que éstas, no fueron diseñadas adecuadamente y no presentan aislamiento acústico.

Debido al equipamiento tecnológico y la seguridad que implementa La Facultad de Ingeniería, el acceso a los salones del Edificio Principal y el Anexo de Ingeniería es mediante huella digital; si un salón se abre sin seguir los protocolos de seguridad, se activa una alarma que emite un sonido muy fuerte y molesto. La alarma también se activa si se abre un salón de adentro hacia fuera de manera brusca; la mayoría de los profesores optan por presentar su clase con la puerta abierta para evitar que la alarma se active y suene. El ruido proveniente del exterior se infiltra por la puerta del salón.

Algunas de las características físicas de construcción de las aulas en las que se realizó la medición del parámetro STI son:

- Pisos de azulejo
- Techos de tabla roca
- Conjuntos lineales de bancas contruidos principalmente de acero y madera
- Paredes ventanales con cortinados
- Muros de concreto
- Ventanas despleables

La mayoría de los salones tienen proyectores y pizarrones inteligentes. Son pocos los recintos que presentan sistemas de audio a excepción del Auditorio Javier Barros Sierra, el Aula Magna y el Aula de Proyecciones ubicados en el Conjunto norte de la Facultad de Ingeniería.

La tabla 3.1 muestra las dimensiones de los salones en los que se realizó la medición del tiempo de reverberación  $T_{30}$  y el parámetro STI.

Conjunto	Salón	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Prof. nicho (m)	Ancho nicho (m)	Altura nicho (m)	Volumen nicho (m <sup>3</sup> )	Volumen total (m <sup>3</sup> )
Conjunto Norte	A-107 (6 Nichos con cortinas)	10.06	7.64	3.18	0.42	1.02	3.18	8.04	252.44
	B-305	9.3	8.81	3.15	*	*	*	*	258.08
	D-S01	9.5	7.45	3.79	*	*	*	*	268.23
	D-004	9.1	7.64	2.87	*	*	*	*	199.53
	Aula Magna	8	9.57	3.21	*	*	*	*	245.75
Anexo de Ingeniería	Laboratorio Acústica (4 nichos laterales)	8.2	9.13	3.87	0.64	1.34	3.87	13.24	302.97
	J-110	8.6	9.11	2.54	*	*	*	*	198.99
	I-306	8.4	9.32	3.15	*	*	*	*	246.6
Posgrado de Ingeniería	U-203	5.31	7.42	2.58	*	*	*	*	101.65
Edificio Valdés Vallejo	Laboratorio de Computación (D.I.E.)	14.77	7.2	2.53	*	*	*	*	269.05
Edificio DIE	Laboratorio de Computación I.I.	13.28	8.01	2.47	*	*	*	*	263.8

**Tabla 3.1 Dimensiones de los salones en los que se realizó la medición**

## Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería de la UNAM

### Edificio A, salón A107

La estructura del salón no es regular, la pared izquierda está formada por 6 nichos con cortinas largas; los nichos repercuten en un mayor tiempo de reverberación.



Figura 3.1 Salón A107

Los estudiantes caminan y platican en el pasillo exterior al recinto, generando ruido. El ruido de fondo es generado por el tránsito automovilístico constante sobre el Circuito Interior, ubicado atrás del salón, aproximadamente a 30 m.

La figura 3.2 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del salón A107.

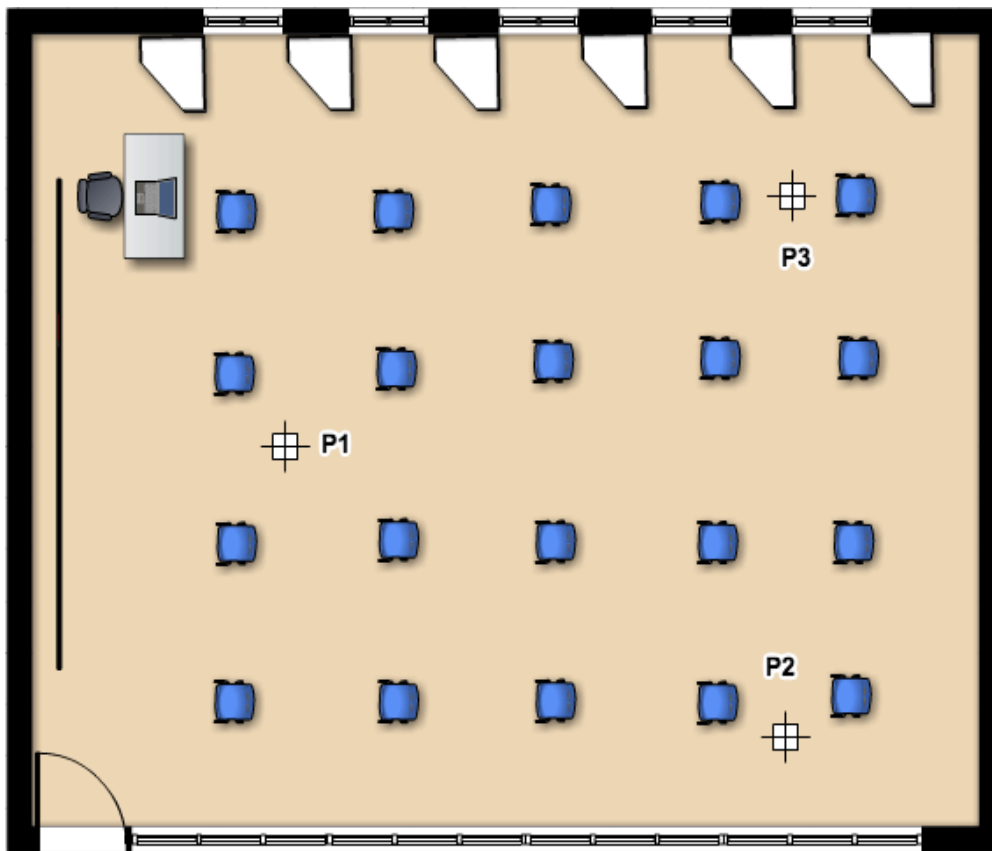


Figura 3.2 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón A107

La tabla 3.2 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón A107.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	2.4
250	1.7
<b>500</b>	<b>1.6</b>
<b>1000</b>	<b>1.7</b>
<b>2000</b>	<b>1.6</b>
4000	1.4
8000	1.1

**Tabla 3.2 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón A107**

En la tabla 3.3 se muestran los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del salón A107:

<b>A107</b>		<b>Punto 1</b>	<b>Punto 2</b>	<b>Punto 3</b>
<b>STI</b>	<b>Male</b>	0.49 fair	0.48 fair	0.49 fair
	<b>Female</b>	0.5 fair	0.49 fair	0.5 fair
<b><math>T_{30}</math> (s)</b>		<b>1.7</b>		
<b>Volumen = 252.44 (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Anchura (m)</b>	<b>Altura (m)</b>	
	10.06	7.64	3.18	
<b>6 nichos</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Anchura (m)</b>	<b>Altura (m)</b>	
	0.42	1.02	3.18	
1.34 x 6 nichos = 8.04 m <sup>3</sup> por nicho				

**Tabla 3.3 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula A107**

### **Edificio B, salón B305**

El aula está ubicada a un costado del circuito interior, presenta ruido constante generado por el tránsito automovilístico, tiene una pared de ventanas por las cuales se infiltra el ruido proveniente del exterior. Hay ruido proveniente del pasillo exterior, principalmente, gritos, voces y pisadas. La puerta de la entrada no presenta aislamiento acústico.



**Figura 3.3 Salón B305**



La figura 3.4 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del tiempo de reverberación  $T_{30}$  y el parámetro STI del salón B305.

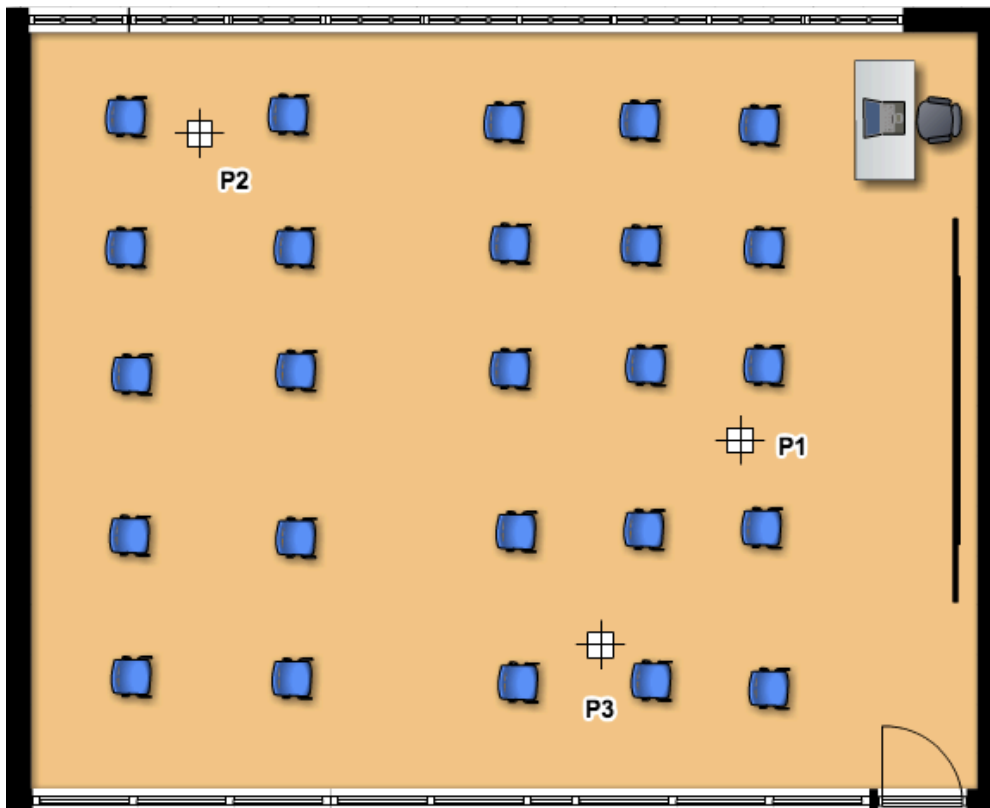


Figura 3.4 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón B305

En la tabla 3.4 se muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón B305.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	1.9
250	1.2
<b>500</b>	<b>1.5</b>
<b>1000</b>	<b>1.4</b>
<b>2000</b>	<b>1.2</b>
4000	1
8000	0.8

**Tabla 3.4 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón B305**

En la tabla 3.5 se muestran los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del salón B305:

<b>B305</b>		Punto 1	Punto 2	Punto 3
<b>STI</b>	Male	0.55 fair	0.55 fair	0.57 fair
	Female	0.56 fair	0.57 fair	0.58 fair
<b><math>T_{30}</math> (s)</b>		<b>1.5</b>		
<b>Volumen = 258.08 (m<sup>3</sup>)</b>		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
		9.3	8.81	3.15

**Tabla 3.5 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula B305**

## Edificio D, salón D004

El ruido proveniente del exterior es generado por los laboratorios adyacentes (hidráulica, materiales, eléctrica). Las ventanas no presentan aislamiento acústico y los muros son de concreto. La subestación eléctrica ubicada en el piso inferior, provee de energía al Laboratorio de Ingeniería Eléctrica, al funcionar de manera constante genera ruido que es molesto. Algunos profesores imparten sus clases con las máquinas en funcionamiento, esto repercute directamente en la calidad del entendimiento entre el educando y el profesorado. Véanse las figuras 3.5 y 3.6



**Figura 3.5 Clases impartidas enfrente del salón a B305**



**Figura 3.6 Clase de Termodinámica impartida en frente del salón B305**

La figura 3.7 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del salón D004.

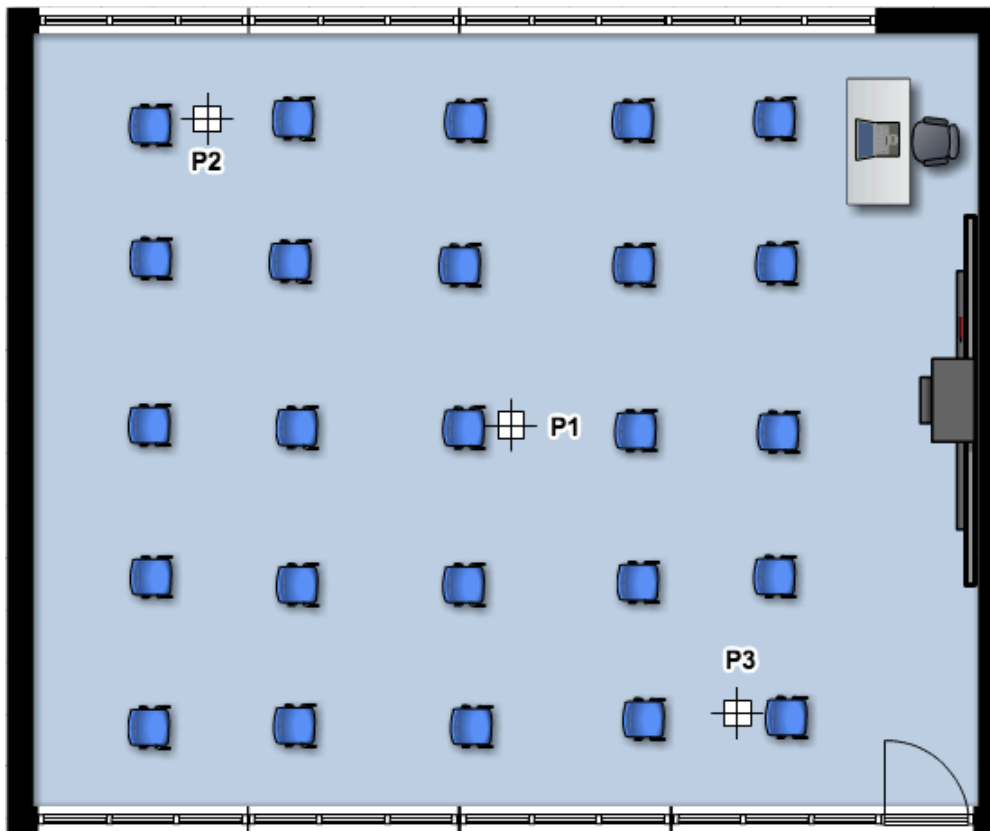


Figura 3.7 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón D004

La tabla 3.6 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón D004.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	1.8
250	1.3
<b>500</b>	<b>1.2</b>
<b>1000</b>	<b>1.1</b>
<b>2000</b>	<b>1</b>
4000	0.8
8000	0.6

**Tabla 3.6 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón D004**

Al medir el ruido afuera del salón, el sonómetro registró valores de 85 dB hasta 95 dB. Actualmente, las clases se imparten sin prestar atención a los problemas acústicos dentro de los salones. El nivel de ruido de fondo en la sección de los laboratorios es tan alto, que los profesores necesitan gritar para poder sentirse comprendidos; algunos profesores opinan que es frustrante dar su clase a tales niveles de ruido.

La falta de aislamiento acústico en la puerta del salón D004 es visualmente perceptible, no presenta aislamiento acústico y el ruido proveniente de los laboratorios se infiltra por las ranuras. Véase figura 3.8



**Figura 3.8 Puerta del salón D004 sin aislamiento acústico**

La tabla 3.7 muestra los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del salón D004:

D004		Punto 1	Punto 2	Punto 3
STI	Male	0.59 fair	0.6 good	0.61 good
	Female	0.62 good	0.61 good	0.61 good
$T_{30}$ (s)		1.2		
Volumen = 221.46 (m <sup>3</sup> )		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
		9.1	7.64	2.87

**Tabla 3.7 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula D004**

## Edificio D, salón DS01

El salón DS01 se encuentra ubicado un piso abajo del salón D004 y se muestra en la figura 3.9, el salón DS01 también colinda con la zona de laboratorios, es espacioso y alto. La puerta no presenta aislamiento acústico, el ruido proveniente de los laboratorios y la subestación eléctrica es perceptible. El salón DS01 presenta un nivel de ruido más bajo que el salón D004 debido al muro de concreto que delimita la zona de laboratorios.



Figura 3.9 Salón DS01



La figura 3.11 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del salón DS01.

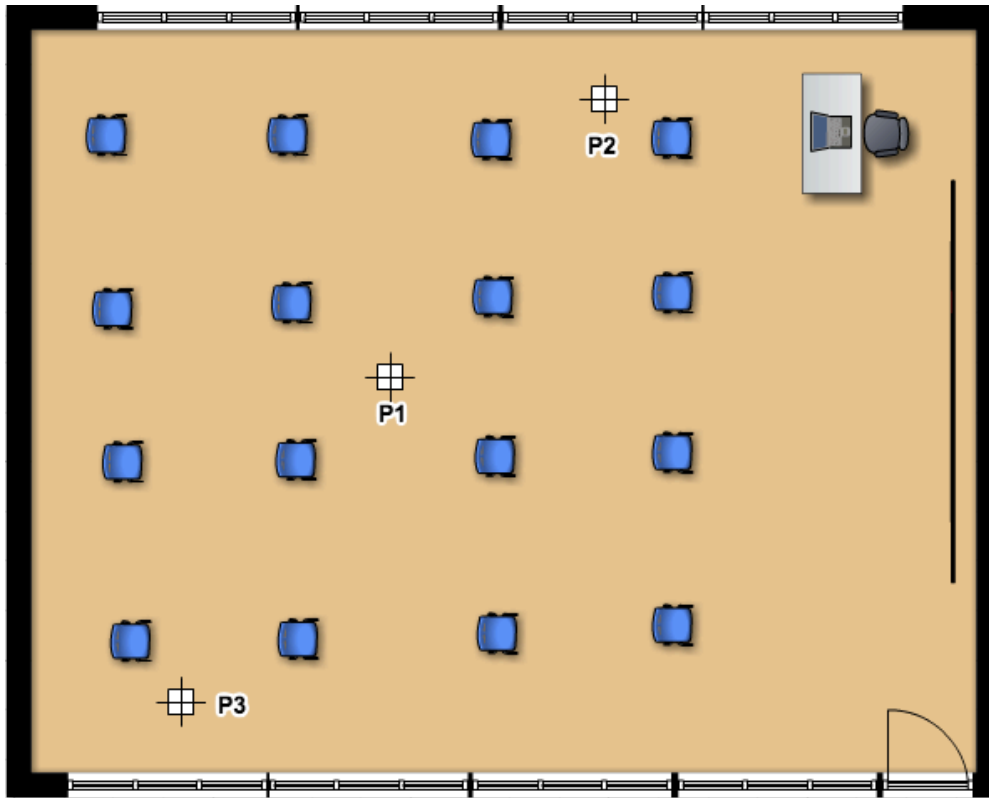


Figura 3.11 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón DS01

La tabla 3.8 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón DS01.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	2.2
250	1.7
<b>500</b>	<b>1.8</b>
<b>1000</b>	<b>1.7</b>
<b>2000</b>	<b>1.5</b>
4000	1.2
8000	0.9

**Tabla 3.8** Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón DS01

La figura 3.12 muestra la posición en la que debe estar el micrófono omnidireccional y el sonómetro en la medición del parámetro STI



**Figura 3.12** El micrófono omnidireccional se coloca a la altura del oído de una persona que se encuentra sentada dentro del salón de clases

En la tabla 3.9 se muestran los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del salón DS01:

DS01		Punto 1	Punto 2	Punto 3
STI	Male	0.40 poor	0.40 poor	0.40 poor
	Female	0.42 poor	0.42 poor	0.40 poor
$T_{30}$ (s)		1.8		
Volumen = 268.23 (m <sup>3</sup> )		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
		9.5	7.45	3.79

**Tabla 3.9 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula DS01**

## Conjunto sur de la Facultad de Ingeniería de la UNAM

### Edificio I, salón I306

El salón se encuentra ubicado en el edificio I, en el Anexo de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería. El Anexo de Ingeniería es una zona con gran afluencia de personas; estudiantes, profesores y público general caminan por los pasillos de la zona de laboratorios y se reúnen para platicar enfrente de los salones del Edificio I.



**Figura 3.13** Salón I306 en el Anexo de Ingeniería

La figura 3.14 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del salón I306.

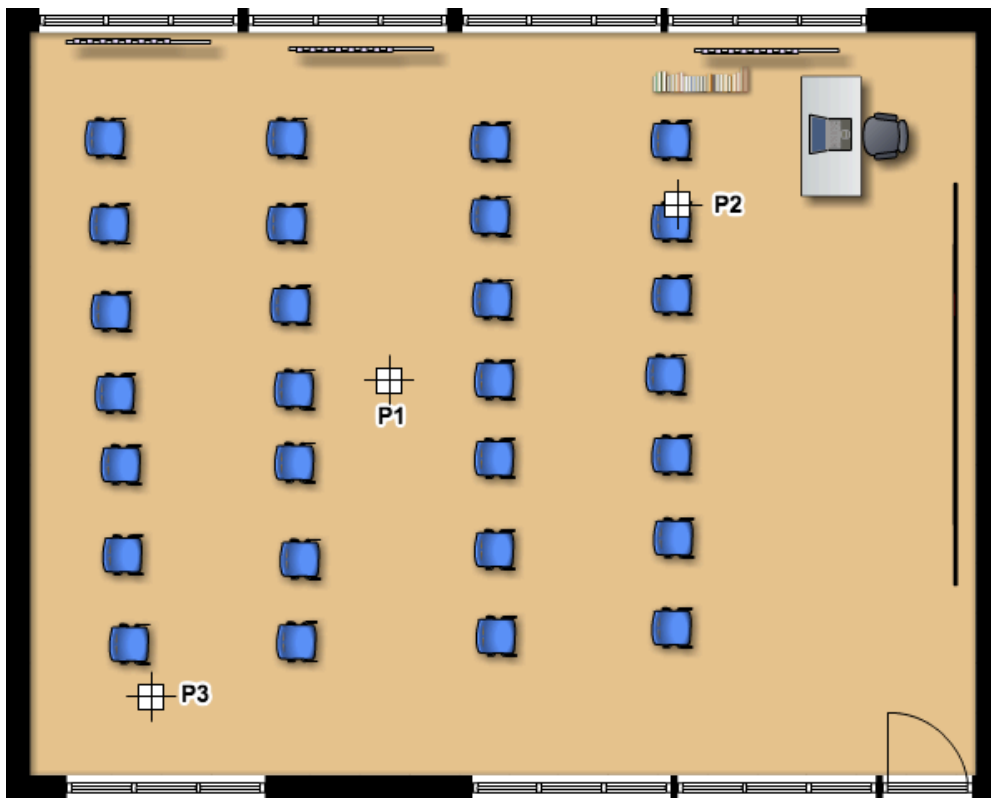


Figura 3.14 Posiciones del micrófono omnidireccional en el salón I306

La tabla 3.10 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón I306.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	2.0
250	1.6
<b>500</b>	<b>1.6</b>
<b>1000</b>	<b>1.7</b>
<b>2000</b>	<b>1.8</b>
4000	1.4
8000	1.1

**Tabla 3.10 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón I306**

En la tabla 3.11 se muestran los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del salón DS01:

I306		Punto 1	Punto 2	Punto 3
STI	Male	0.49 fair	0.47 fair	0.46 fair
	Female	0.49 fair	0.5 fair	0.50 fair
$T_{30}$ (s)		<b>1.8</b>		
Volumen = 246.60 (m <sup>3</sup> )		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
		8.4	9.32	3.15

**Tabla 3.11 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula I306**

## Edificio J, salón J110

El salón J110 se encuentra en posición perpendicular al edificio I. El edificio J presenta ruido generado por alumnos que caminan y conversan en los pasillos y los ciclistas que circulan sobre la acera ubicada en el costado derecho del salón. El edificio J se construyó en una época más reciente, presenta más tecnología en las instalaciones eléctricas, hidráulicas y de comunicaciones, sin embargo, ningún salón tiene tratamiento acústico.

Enfrente de los salones del edificio J se encuentra el estacionamiento para profesores del Anexo de Ingeniería; el ruido generado por los automóviles en esta zona es perceptible dentro del salón.



Figura 3.15 Salón J110

La figura 3.16 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del salón J110.

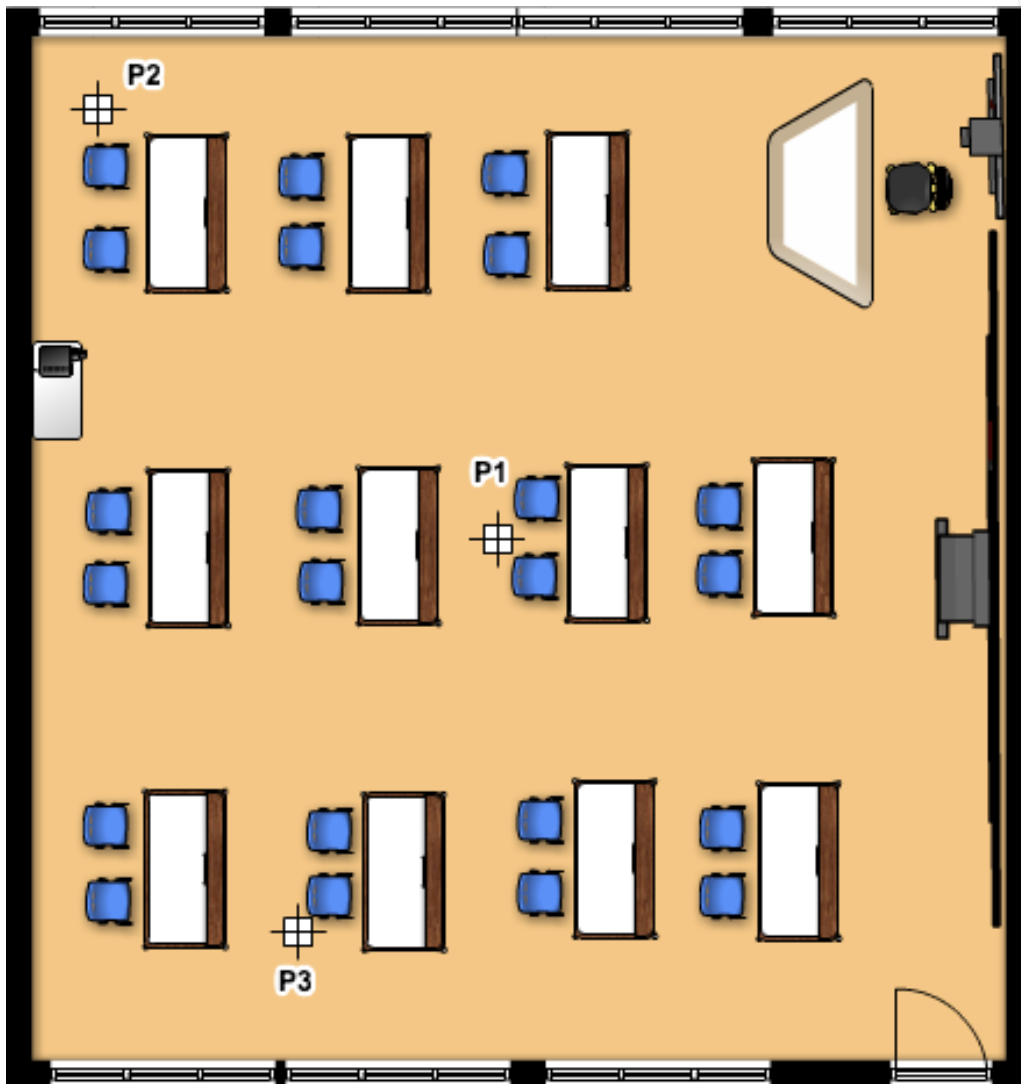


Figura 3.16 Posiciones del micrófono omnidireccional del Salón J110



La tabla 3.12 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón J110.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	2.1
250	2.0
<b>500</b>	<b>1.8</b>
<b>1000</b>	<b>1.7</b>
<b>2000</b>	<b>1.6</b>
4000	1.4
8000	1.1

**Tabla 3.12 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón J110**

Las ventanas y la puerta del salón J110 no presentan tratamiento acústico; el ruido de los salones colindantes se infiltra por el muro que los divide, algunos muros son de tablaroca o yeso. Véanse las figuras 3.17 y 3.18



**Figura 3.17 Ventanas del salón J110**



Figura 3.18 Puerta del salón J110 sin aislamiento acústico

La tabla 3.13 muestra los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del salón J110:

J110		Punto 1	Punto 2	Punto 3
STI	Male	0.45 fair	0.49 fair	0.51 fair
	Female	0.48 fair	0.48 fair	0.51 fair
$T_{30}$ (s)		1.8		
Volumen = 198.99 (m <sup>3</sup> )		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
		8.6	9.11	2.54

Tabla 3.13 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula J110

### **Edificio U, salón U203**

El salón U203 se encuentra ubicado en el segundo piso del edificio U, en la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. El ruido es perceptible en los pasillos del edificio; enfrente del edificio U, hay un huerto con aspecto de jardín, el personal que trabaja en el huerto genera ruido con la cortadora de pasto; escucha música a un alto nivel sonoro. El salón tiene ventanas en la pared opuesta a la entrada, estas ventanas no presentan aislamiento acústico y el ruido se infiltra fácilmente por ellas. Véase figura 3.19



**Figura 3.19 Salón U203**

La figura 3.20 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del salón U203.

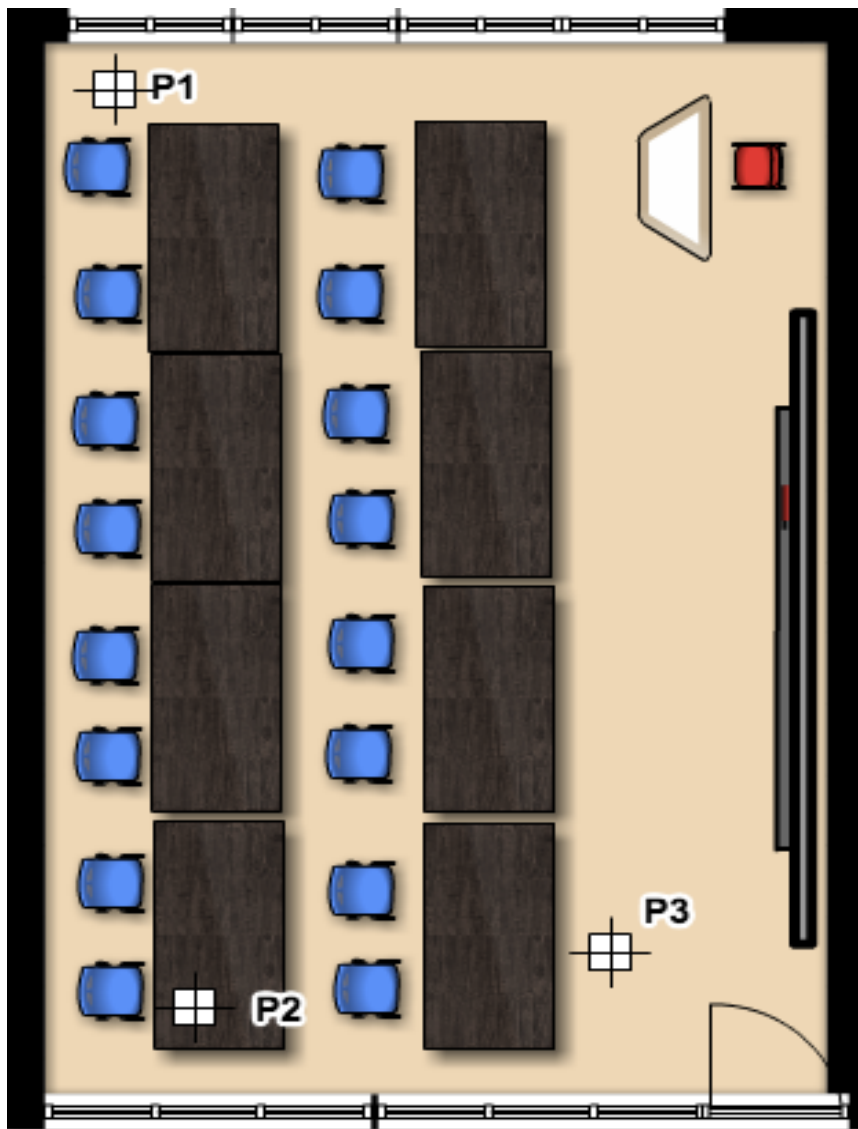


Figura 3.20 Posiciones del micrófono omnidireccional del salón U203

La tabla 3.14 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Salón U203:

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	1.8
250	1.5
<b>500</b>	<b>1.3</b>
<b>1000</b>	<b>1.1</b>
<b>2000</b>	<b>1.1</b>
4000	1.0
8000	0.9

Tabla 3.14 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del salón U203

En la tabla 3.15 se muestran los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del salón U203:

U203		Punto 1	Punto 2	Punto 3
STI	Male	0.64 good	0.53 fair	0.55 fair
	Female	0.68 good	0.57 fair	0.57 fair
$T_{30}$ (s)		<b>1.3</b>		
Volumen = 101.65 (m <sup>3</sup> )		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
		5.31	7.42	2.58

Tabla 3.15 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el aula U203

**Edificio Q, Luis G. Valdés Vallejo**  
**Laboratorio de Computación, 1er piso**

El edificio Q se encuentra ubicado en el Anexo de Ingeniería, atrás del edificio P que es la División de Ingeniería Eléctrica. En esta zona del plantel se imparten clases relacionadas con los laboratorios de computación, electrónica y telecomunicaciones. Es el punto de reunión de estudiantes de diferentes carreras, por tanto, es una zona ruidosa y con gran afluencia de personas. Los estudiantes se trasladan por las instalaciones del edificio a todas horas, suben y bajan las escaleras, caminan por los pasillos y platican afuera de los salones. Véase la figura 3.21

El Laboratorio de Computación cuenta con un sistema de aire acondicionado que sirve para refrescar el salón y proveer a los equipos de la temperatura correcta para funcionar. El aire acondicionado genera ruido constante. El salón es muy grande, factor que influye en el entendimiento de la información de los estudiantes que se encuentran en la parte posterior. El Laboratorio de Computación es similar al salón B305, existe una pared de ventanas donde el ruido proveniente del estacionamiento de profesores que se encuentra a un lado del laboratorio, se infiltra. El personal de limpieza y mantenimiento genera ruido con sus instrumentos de trabajo, principalmente con las aspiradoras. Algunos trabajadores laboran en el momento en que las clases son impartidas.



**Figura 3.21** Laboratorio de Computación, Edificio Q

La figura 3.22 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del Laboratorio de Computación en el Edificio Luis G. Valdés Vallejo.

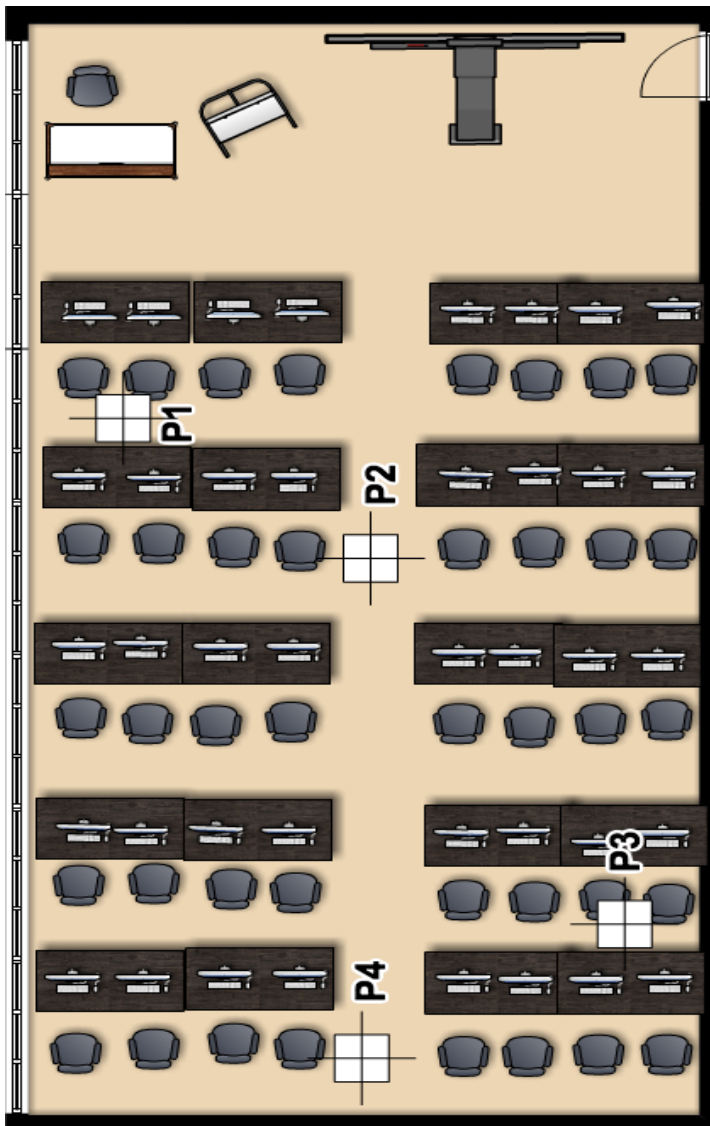


Figura 3.22 Posiciones del micrófono omnidireccional del Laboratorio de Computación del Edificio Luis G. Valdés Vallejo



La tabla 3.16 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Laboratorio de Computación del Edificio Q, Luis G. Valdés Vallejo.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	0.9
250	0.7
<b>500</b>	<b>0.8</b>
<b>1000</b>	<b>0.8</b>
<b>2000</b>	<b>0.8</b>
4000	0.7
8000	0.6

**Tabla 3.16 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Lab. de Computación del edificio Luis G. Valdés Vallejo**

El tiempo de reverberación del Laboratorio de Computación es relativamente corto según el criterio establecido en la norma ANSI / ASA S12.60 – 2010 / part 1; donde se menciona y establece que el tiempo de reverberación para una aula donde se imparten clases debe ser 0.6 segundos, esto se traduce en un mejor entendimiento de la información por la poca reverberación del sonido, sin embargo, son pocos los salones que presentan condiciones acústicas favorables para la comunicación.

En la tabla se 3.17 muestran los resultados del parámetro STI y T<sub>30</sub> del Laboratorio de Computación del Edificio Luis G. Valdés Vallejo:

Lab. Comp. Valdés Vallejo		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
STI	Male	0.64 good	0.53 fair	0.55 fair	0.51 fair
	Female	0.68 good	0.57 fair	0.57 fair	0.53 fair
T <sub>30</sub> (s)		0.8			
Volumen = 269.05 (m <sup>3</sup> )		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)	
		14.77	7.2	2.53	

**Tabla 3.17 Resultados de la medición del parámetro STI y T<sub>30</sub> para el Laboratorio de Computación del Edificio Luis G. Valdés Vallejo**

## **Edificio P**

### **Laboratorio de Computación de la División de Ingeniería Industrial**

El Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial se encuentra en el edificio P, que es la División de Ingeniería Eléctrica (DIE). Para acceder al laboratorio es necesario recorrer un largo pasillo conformado por 8 cubículos. Los alumnos se reúnen para discutir y elaborar proyectos, juntas de trabajo, etc. El ruido proveniente del pasillo es notable dentro del Laboratorio. El salón tiene 2 sistemas de aire acondicionado que proporcionan ventilación para el correcto funcionamiento del equipo de cómputo; este sistema de aire acondicionado genera ruido. El salón está cercano a la entrada del edificio, los alumnos se reúnen para conversar antes o después de las clases. Las puertas del laboratorio son de cristal y no presentan aislamiento acústico, por tanto, el ruido se infiltra fácilmente.



**Figura 3.23 Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial**

La figura 3.24 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial.



**Figura 3.24 Posiciones del micrófono omnidireccional del Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial**

La tabla 3.18 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Laboratorio de Computación del Edificio Q, Luis G. Valdés Vallejo.

<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b><math>T_{30}</math> [s]</b>
125	1.0
250	0.8
<b>500</b>	<b>0.9</b>
<b>1000</b>	<b>0.9</b>
<b>2000</b>	<b>0.9</b>
4000	0.7
8000	0.6

**Tabla 3.18 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial**

El tiempo de reverberación es menor que en otras aulas, sin embargo, el Laboratorio no cumple con lo establecido en la norma *ANSI / ASA S12.60 – 2010 / part 1*

En la tabla 3.19 se muestran los resultados del parámetro STI y T<sub>30</sub> del Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial:

Lab. Comp. Ingeniería Industrial		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
STI	Male	0.64 good	0.54 fair	0.40 poor	0.40 poor
	Female	0.67 good	0.56 fair	0.52 fair	0.42 poor
TR 30 (s)		0.9			
Volumen = 263.80 (m <sup>3</sup> )	Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)		
	13.28	8.01	2.47		

**Tabla 3.19 Resultados de la medición del parámetro STI y T<sub>30</sub> para el Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial**

## **Edificio H**

### **Laboratorio de Óptica y Acústica**

El Laboratorio de Óptica y Acústica se encuentra en el Edificio H del Anexo de Ingeniería, la pared lateral izquierda es de cantera que funciona como material aislante y absorbente; El Laboratorio de Óptica y Acústica se encuentra ubicado entre la cancha de básquetbol, dónde se realizan actividades recreativas y el pasillo central que conduce al edificio I, el edificio J y la Biblioteca Enrique Rivero.



**Figura 3.25 Laboratorio de Óptica y Acústica, Edificio H del Anexo de Ingeniería**

El laboratorio de Óptica y Acústica se encuentra a lado del Laboratorio de Química, sin embargo, no hay algún muro que los divida, y el sonido se transmite de un salón a otro. Comúnmente se imparten clases al mismo tiempo en ambos laboratorios. El laboratorio de Óptica y Acústica no tiene una estructura regular, la pared de cantera está formada por 4 nichos. Los problemas de aislamiento acústico son tan notorios, que algunos profesores optan por utilizar un sistema de audio con micrófono y bocinas, para reforzar el sonido de su voz y sentirse escuchados. La puerta no presenta aislamiento acústico. El pasillo central que se encuentra afuera del laboratorio presenta ruido proveniente de la jardinera central, las cafeterías, y las tiendas.



**Figura 3.26** Techo del Laboratorio de forma irregular





Figura 3.27 Puerta del laboratorio sin aislamiento acústico

La figura 3.28 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del Laboratorio de Óptica y Acústica.

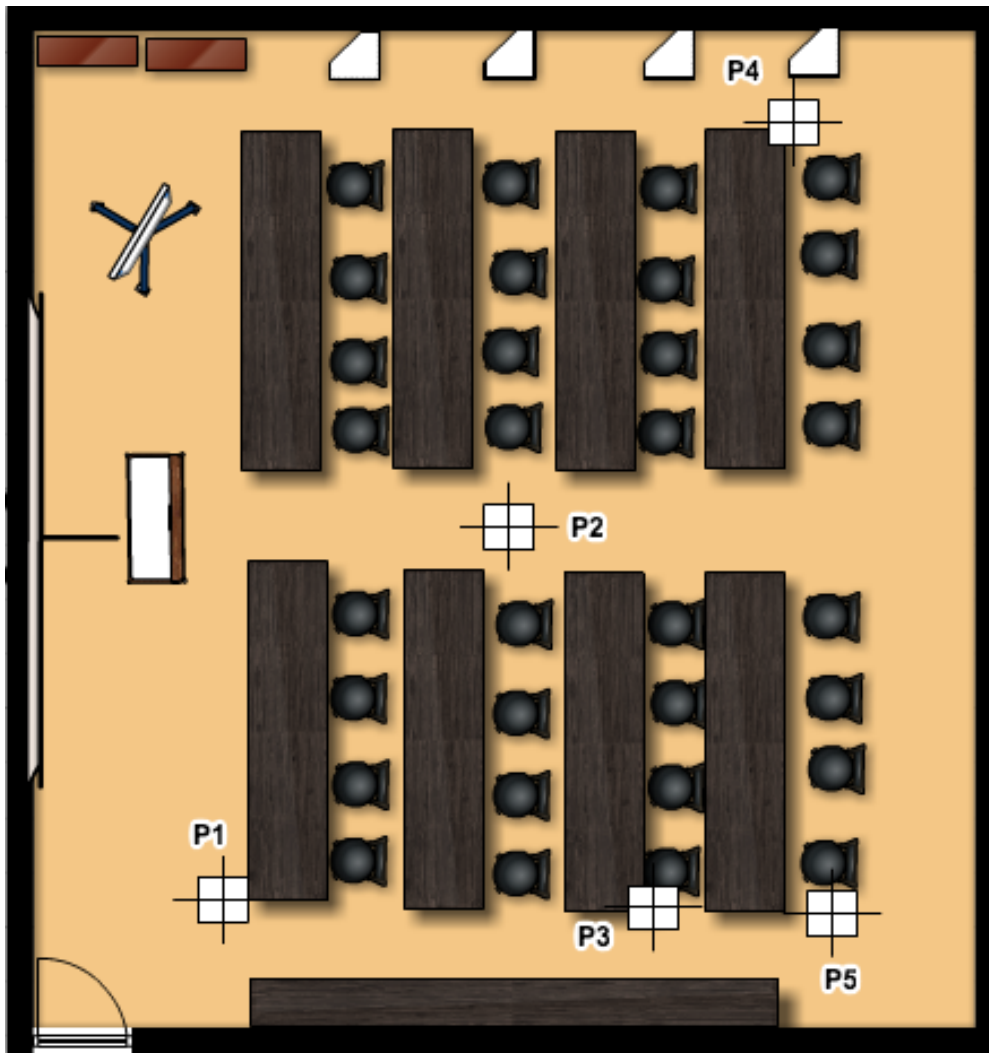


Figura 3.28 Posiciones del micrófono omnidireccional del Laboratorio de Óptica y Acústica

En la tabla 3.20 se muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Laboratorio de Óptica y Acústica.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	1.2
250	1.0
<b>500</b>	<b>1.3</b>
<b>1000</b>	<b>1.6</b>
<b>2000</b>	<b>1.5</b>
4000	1.2
8000	1.0

**Tabla 3.20 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Laboratorio de Óptica y Acústica**

La tabla 3.21 muestra los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del Laboratorio de Óptica y Acústica.

Lab. Óptica y Acústica		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
STI	Male	0.55 fair	0.45 fair	0.43 poor	0.42 poor	0.47 fair
	Female	0.52 fair	0.42 poor	0.36 poor	0.32 poor	0.33 poor
$T_{30}$ (s)		1.6				
Volumen = 302.97 m <sup>3</sup>		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)		
		8.2	9.13	3.87		
4 nichos		Profundidad (m)	Ancho (m)	Altura (m)		
		0.64	1.34	3.87		
3.31 x 4 nichos = 13.24 m <sup>3</sup> por nicho						

**Tabla 3.21 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el Laboratorio de Óptica y Acústica**

## **Auditorio Javier Barros Sierra**

El Auditorio Javier Barros Sierra se encuentra en la planta baja del Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería, la mayor parte del tiempo se encuentra ocupado en actividades culturales, musicales, ingenieriles, exposiciones, conferencias, entregas de reconocimientos, etc. El recinto presenta tratamiento acústico en el techo y el escenario, el techo plafón tiene se divide en 3 secciones y presenta curvaturas en su estructura. El ruido afuera del auditorio es muy notable; los alumnos circulan sobre la planta baja, suben escaleras, se reúnen y platican. Las puertas de la entrada no presentan aislamiento acústico y el ruido se infiltra. Al ser un recinto considerablemente grande, la medición del tiempo de reverberación  $T_{30}$  y el parámetro STI se realiza en 9 diferentes zonas, abarcando diferentes filas y alturas.



**Figura 3.29 Auditorio Javier Barros Sierra en el Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería**

La tabla 3.22 muestra el promedio del tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Auditorio Javier Barros Sierra.

Frecuencia [Hz]	$T_{30}$ [s]
125	1.4
250	1.4
<b>500</b>	<b>1.0</b>
<b>1000</b>	<b>0.9</b>
<b>2000</b>	<b>0.9</b>
4000	0.8
8000	0.7

**Tabla 3.22 Tiempo de reverberación  $T_{30}$  del Auditorio Javier Barros Sierra**

En la tabla 3.23 se muestran los resultados del parámetro STI y  $T_{30}$  del Auditorio Javier Barros Sierra.

Auditorio Javier Barros Sierra		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9
STI	Male	0.58 fair	0.70 good	0.61 good	0.63 good	0.64 good	0.59 fair	0.55 fair	0.59 fair	0.62 good
	Female	0.57 fair	0.72 good	0.61 good	0.62 good	0.65 good	0.60 fair	0.58 fair	0.55 fair	0.61 good
$T_{30}$ (s)		<b>1</b>								

**Tabla 3.23 Resultados de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$  para el Auditorio Javier Barros Sierra en el Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería**

## **Aula Magna**

El Aula Magna se encuentra en el edificio D del Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería, a lado de la zona de laboratorios. La pared lateral izquierda colinda con el pasillo exterior del edificio y la pared lateral derecha con la zona de laboratorios. El ruido generado en los laboratorios es muy molesto, el ruido de fondo medido muestra valores de ruido constante entre 85 dB y 90 dB, sin embargo, la acústica dentro del salón es favorable, el tiempo de reverberación es corto y las palabras se entienden fácilmente.



**Figura 3.30 Aula Magna**

La figura 3.31 muestra los puntos en los que se colocó el micrófono omnidireccional en la obtención del parámetro  $T_{30}$  y el parámetro STI del Aula Magna.

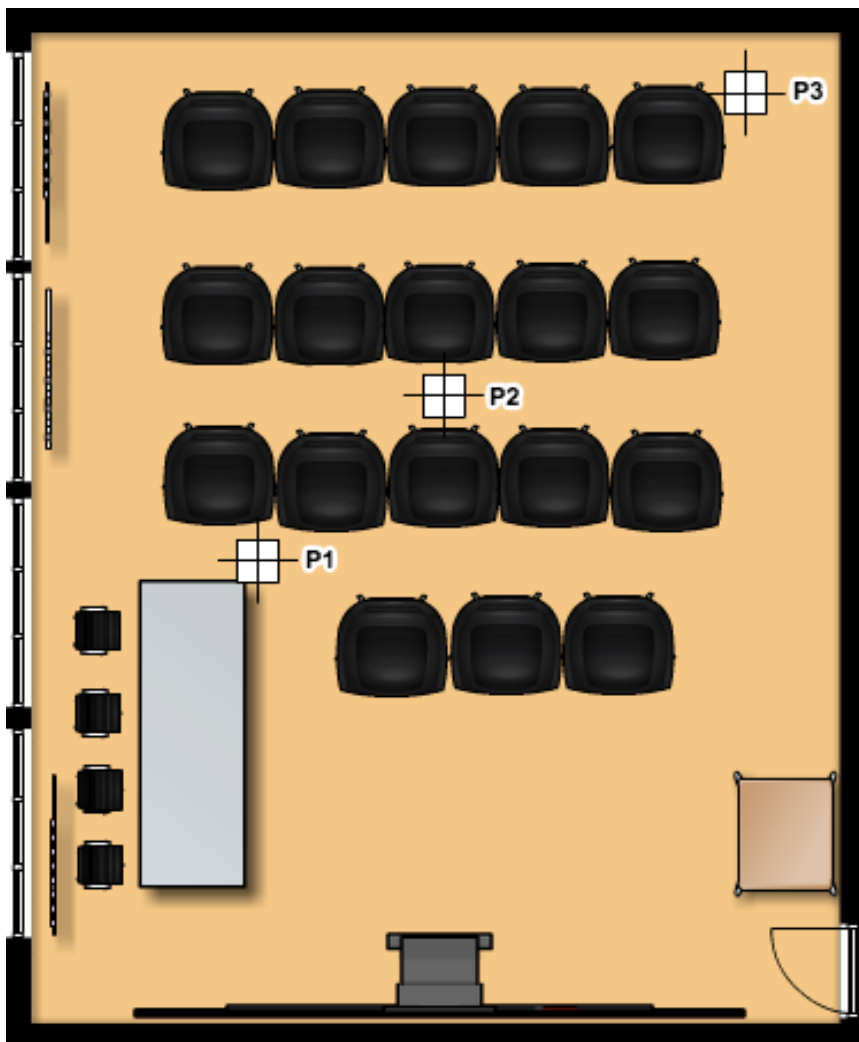


Figura 3.31 Posiciones del micrófono omnidireccional del Aula Magna



La tabla 3.24 muestra los resultados generales del parámetro STI y T<sub>30</sub> del Aula Magna.

Frecuencia [Hz]	T <sub>30</sub> [dB]
125	0.7
250	0.5
<b>500</b>	<b>0.5</b>
<b>1000</b>	<b>0.6</b>
<b>2000</b>	<b>0.7</b>
4000	0.6

**Tabla 3.24 Tiempo de reverberación T<sub>30</sub> del Aula Magna**

En la tabla 3.25 se muestran los resultados parámetro STI y T<sub>30</sub> del Aula Magna.

Aula Magna		Punto 1	Punto 2	Punto 3
STI	Male	0.71 good	0.71 fair	0.72 fair
	Female	0.70 good	0.70 fair	0.71 fair
T <sub>30</sub> (s)		<b>0.7</b>		
Volumen = 245.75 (m <sup>3</sup> )		Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
		8.0	9.57	3.21

**Tabla 3.25 Resultados de la medición del parámetro STI y T<sub>30</sub> para el Aula Magna en el Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería**

## Resultados Generales

La tabla 3.26 muestra los resultados generales de la medición de los parámetros STI y  $T_{30}$  de todas las aulas. El tiempo de reverberación en la mayoría de los salones es alto según lo establecido en la norma ANSI / ASA S12.60 – 2010 / part 1 a excepción del Auditorio Javier Barros Sierra con un tiempo de reverberación de 1s, el Aula Magna con 0.7s y el Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial con 0.9s.

Conjunto Norte						
	Edificio A		Edificio B	Edificio D		
Aula	A107	Auditorio J.B.S.	B305	D004	DS01	Aula Magna
TR (30) (s)	1.7	1	1.5	1.2	1.8	0.7
STI Male	0.48 fair	0.61 good	0.55 fair	0.6 good	0.4 poor	0.71 good
STI Female	0.49 fair	0.61 good	0.57 fair	0.61 good	0.42 poor	0.70 good

Conjunto Sur						
	Edificio H	Edificio I	Edificio J	Edificio P	Edificio Q	Edificio U
Aula	Lab. Óptica y Acústica	I306	J110	Lab. Computación I.I.	Lab. Computación (DIE).	U203
TR (30) (s)	1.6	1.8	1.8	0.9	0.8	1.3
STI Male	0.46 fair	0.47 fair	0.48 fair	0.49 fair	0.55 fair	0.57 fair
STI Female	0.39 poor	0.49 fair	0.49 fair	0.54 fair	0.58 fair	0.60 good

Tabla 3.26 Resultados generales de la medición del parámetro STI y  $T_{30}$

## Análisis de Ruido.

Es importante evaluar el ruido de fondo para realizar un croquis acústico con el nivel de ruido que existe afuera de los salones. Con el desarrollo de un programa en Matlab realizado por el Ingeniero José Alberto Arellano Figueroa de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se puede obtener el nivel equivalente de ruido ( $L_{eq}$ ) de las grabaciones realizadas con *Adobe Audition* y de las grabaciones en el sonómetro. El programa analiza los archivos de grabación en formato (.wav), aproximadamente con un peso de 70MB a 80 MB por grabación. El tono de calibración en formato (.wav), es la referencia principal para la medición de ruido. Es indispensable tener los archivos de texto (.dat) que registra el sonómetro, para comparar la grabación de Adobe Audition con la grabación del sonómetro.

La figura [] muestra la pantalla de inicio del programa en Matlab que calcula el nivel equivalente de ruido.

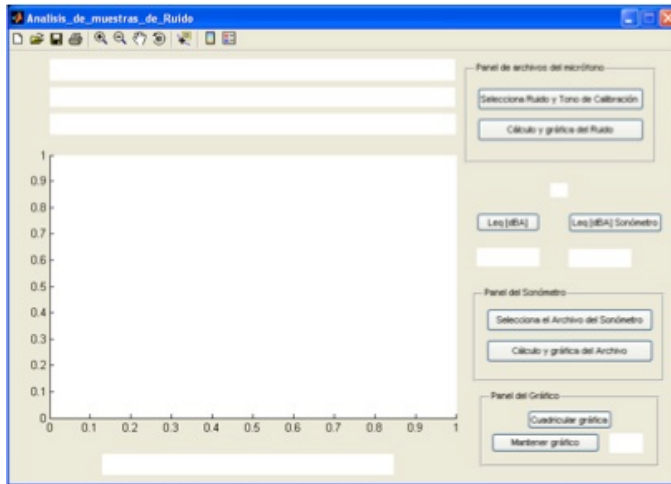


Figura 3.32 Interfaz gráfica del programa en Matlab que calcula el nivel de ruido equivalente. ( $L_{eq}$ )

La figura 3.33 muestra el análisis y el nivel equivalente de ruido de la grabación con *Adobe Audition* para el punto 1 de medición, en el tercer piso del edificio I.

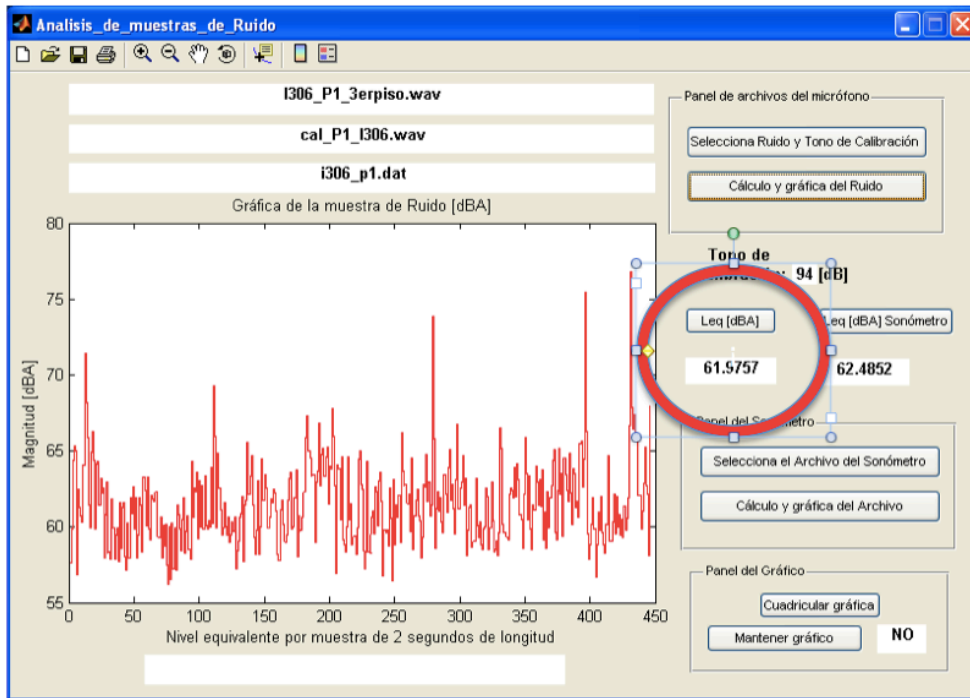
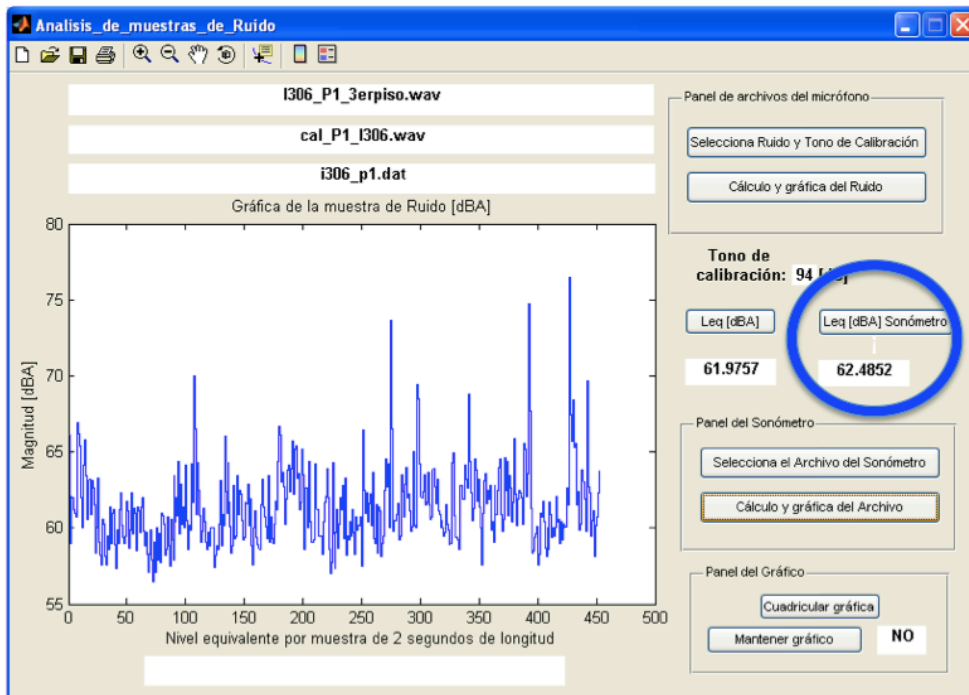


Figura 3.33 Nivel de ruido equivalente de la grabación realizada en *Adobe Audition*.  
( $L_{eq}$  grabación)

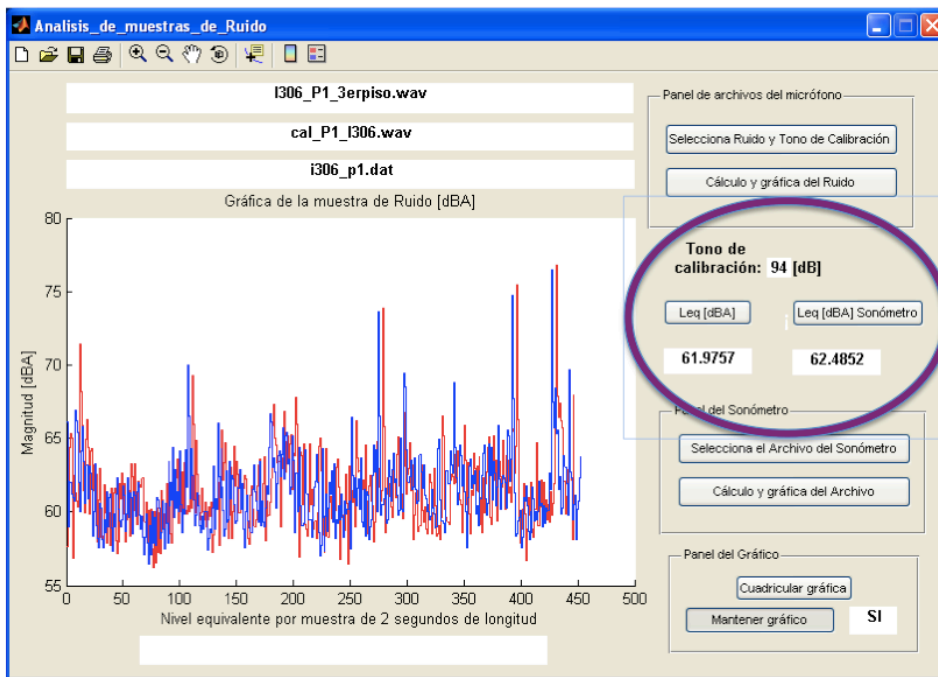
En la figura 3.34 se muestra el análisis y el nivel equivalente de ruido de la grabación registrada por el sonómetro para el punto 1 de medición, en el tercer piso del Edificio I.



**Figura 3.34 Nivel de ruido equivalente grabado por el sonómetro. ( $L_{eq}$  sonómetro)**

Si los valores de nivel equivalente de ruido de fondo,  $L_{eq}$  grabación y  $L_{eq}$  sonómetro, son similares o coinciden, la medición es válida.

El programa muestra de manera simultánea el nivel equivalente de ruido obtenido con el software *Adobe Audition* y el sonómetro para comprobar si las mediciones obtenidas coinciden.



**Figura 3.35 Nivel equivalente de ruido de fondo  $L_{eq}$  obtenido con el software Adobe Audition y el sonómetro**

La tabla 3.27 muestra el nivel equivalente de ruido de fondo en diferentes puntos de medición. También se muestran los horarios y la fecha de obtención de los datos.

<b>Muestras de Ruido en la Facultad de Ingeniería, Campus CU.</b>				
<b>Puntos de medición</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Leq (dBA) grabación</b>	<b>Leq (dBA) sonómetro</b>
(1) P1 Ruido en el 3er piso del edificio I	23-sep-14	12:09	61.9	62.4
(2) P2 Ruido en el 1er piso del edificio I	23-sep-14	12:48	66.7	68
(3) P3 Ruido en Punto de Evacuación del edificio I	24-sep-14	10:00	59.3	61.5
(4) P1 Ruido en el 1er piso del edificio D	25-sep-14	11:42	75.9	76.5
(5) P2 Ruido en el 1er piso del edificio D	25-sep-14	12:14	69.9	70.9
(6) P1 Ruido en el 3er piso del edificio B	25-sep-14	16:03	60.5	61.9
(7) P1 Ruido en el 1er piso del edificio A	25-sep-14	16:51	59.2	59.8
(8) P1 Ruido en el 2do piso del edificio U	01-oct-14	16:05	54.1	56.1
(9) P2 Ruido en el 2do piso del edificio U	01-oct-14	16:27	39.1	40.5
(10) P1 Ruido dentro del aula Q007, Computadoras ON	13-nov-14	16:13	42.1	44.1
(11) Ruido dentro del aula Q007, Aire Acondicionado ON	13-nov-14	16:26	45.6	46.1
(12) P3 Ruido dentro del aula Q007, Computadoras, Aire Acondicionado OFF	13-nov-14	16:38	40.3	42.6
(13) P4 Ruido dentro del aula Q007, Computadoras, Aire Acondicionado ON	13-nov-14	16:51	49.5	50.1
(14) P1 Ruido en el aula P010, Computadoras ON	15-nov-14	17:25	40.3	42.1
(15) P2 Ruido dentro del aula P010, Aire Acondicionado ON	15-nov-14	18:00	47.8	49.5
(16) P3 Ruido dentro del aula P010, Computadoras, Aire Acondicionado OFF	15-nov-14	18:34	37.6	38.8
(17) P4 Ruido dentro del aula P010, Computadoras, Aire Acondicionado ON	15-nov-14	18:56	48.7	51.4
(18) P1 Ruido afuera Aula magna	13-feb-15	14:25	55.4	56.2
(19) P2 Ruido adentro Aula Magna	13-feb-15	15:10	40.7	41.3

**Tabla 3.27 Nivel equivalente de ruido de las grabaciones con el software *Adobe Audition* y el sonómetro.**

La figuras 3.36 y 3.37 muestran la ubicación de los edificios en el Conjunto Norte y el Conjunto Sur de la Facultad de Ingeniería y el nivel de ruido equivalente medido en diferentes zonas.

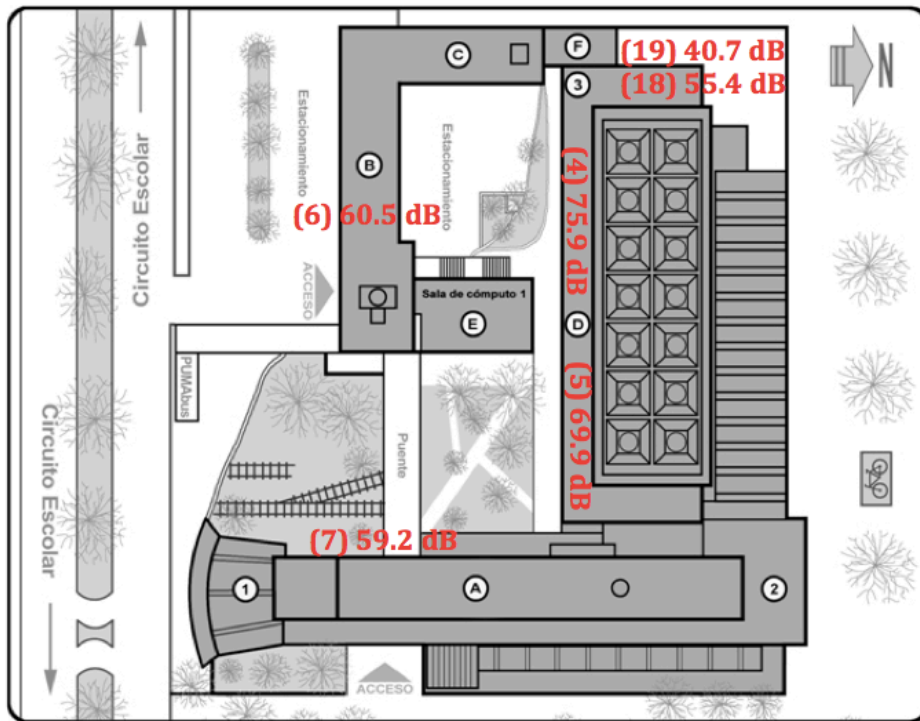
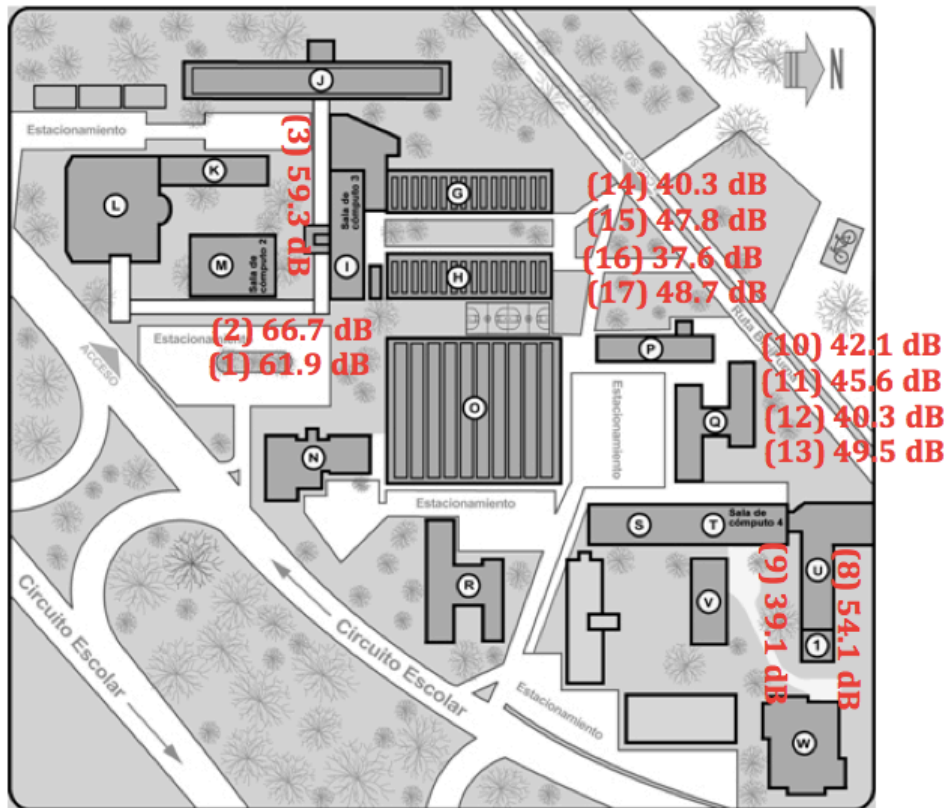


Figura 3.36 Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería

- A Edificio de la Dirección
- B Edificio del Circuito Principal
- C Edificio colidante con Arquitectura
- D Zona de Laboratorios
- E Edificio de USECAD
- F Edificio de Ingeniería de Minas y Laboratorio de Metalurgia
- 1 Auditorio Javier Barros Sierra
- 2 Biblioteca Antonio Dovalí Jaime
- 3 Aula Magna

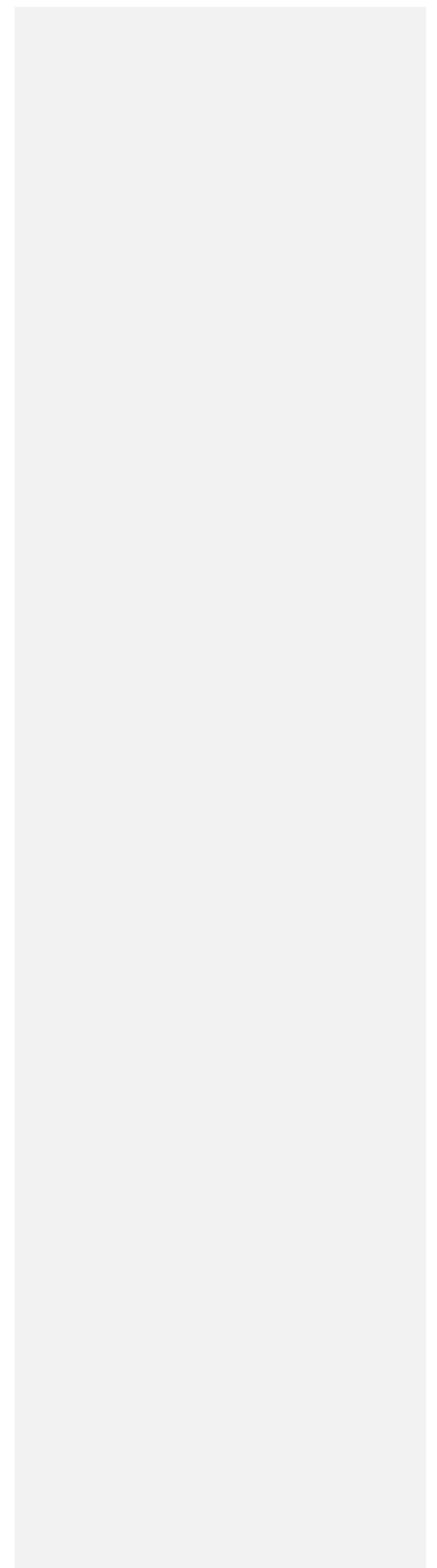




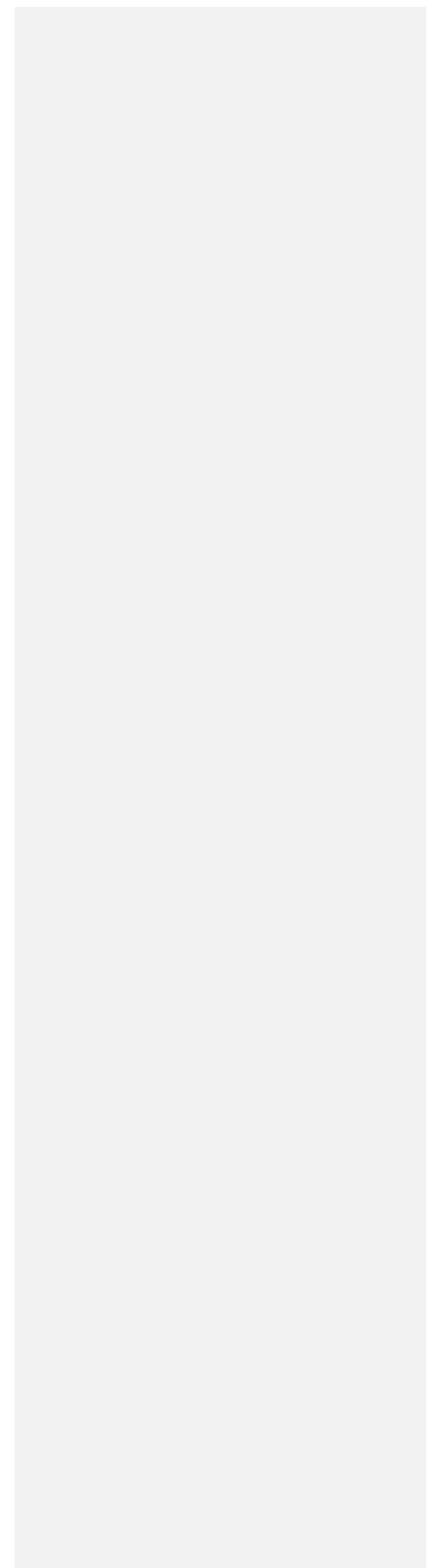
**Figura 3.37** Conjunto Sur de la Facultad de Ingeniería

- G** Laboratorios de Ciencias Básicas
- H** Laboratorios de Ciencias Básicas
- I** Torres de Ciencias Básicas
- J** Ala poniente de Ciencias Básicas
- K** Centro de Docencia Gilberto Borja Navarrete
- L** Biblioteca Enrique Rivero Borrell
- M** Auditorio Sotero Prieto
- N** Laboratorio de Termofluidos
- O** Laboratorio y talleres de Ingeniería Mecánica, Alberto Camacho S.
- P** Divisiones de Ingeniería Mecánica e Industrial y de Ingeniería Eléctrica
- Q** Edificio Luis G. Valdés Vallejo
- R** División de Ingenierías Civil y Geomática
- S** Edificio de Posgrado
- T** Edificio Bernardo Quintana Arriola

**U** Salones del Posgrado  
**V** Laboratorio del Posgrado  
**Q** Biblioteca Enzo Levi  
**1** Auditorio Raúl J. Marsal



# **Conclusiones y Recomendaciones**



La inteligibilidad del habla es primordial para el entendimiento del ser humano en cualquier ambiente. La inteligibilidad del habla en los recintos donde se imparten clases debe ser un requisito y no una opción. Los principales factores que modifican la inteligibilidad de la palabra son el ruido de fondo y el tiempo de reverberación, parámetros que se evaluaron y analizaron con la instrumentación adecuada. El mal entendimiento que se puede presentar en una clase puede generar problemas de comprensión en el alumnado y profesorado reflejándose en inseguridad al momento de participar o frustración en los profesores al no sentirse comprendidos. Los altos niveles de ruido y reverberación en el aula se reflejan en problemas de índole física como el deterioro temprano de la voz, la falta de comprensión, frustración psicológica, hasta problemas cardiovasculares según la Organización Mundial de la Salud (OMS).

El análisis realizado sobre la inteligibilidad de la palabra en los salones nos brinda un panorama general de cómo se escucha y entiende en algunas aulas de la Facultad de Ingeniería. Los resultados generales nos revelan que solo el auditorio y 2 salones de los 11 en los que se realizó el estudio se encuentran con condiciones acústicas favorables para el proceso de comunicación y presentan un tiempo de reverberación relativamente bajo; tal es el caso del Auditorio Javier Barros Sierra con un tiempo de reverberación de 1 s, el Laboratorio de Computación de Ingeniería Industrial con un tiempo de reverberación de 0.9 s y finalmente el Aula Magna, recinto donde se realizan los exámenes profesionales orales, con un tiempo de reverberación de 0.7 s.

Con base en la norma *ANSI/ASA S12.60-2010/PART1* y un sondeo oral realizado a profesores y alumnos; la mayoría de las opiniones sobre la percepción del sonido son negativas y mencionan que la mayor concurrencia

de ruido es en los salones que se encuentran a un costado de los Laboratorios de Hidráulica, Materiales, Termodinámica y Eléctrica en el edificio D del Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería. El entendimiento es casi inteligible debido a los altos índices de ruido de fondo y la reverberación del sonido dentro de las aulas.

Algunos salones no tienen forma regular y fue un poco difícil determinar el área de los mismos. Al determinar el tiempo de reverberación en las aulas, el ruido de fondo no permitía obtener valores con certidumbre y precisión. Las grabaciones de ruido de fondo varían, la cantidad de personas varía en los pasillos y los lugares de concurrencia, eso se refleja en distintos niveles de ruido de fondo. También hubo complicaciones al grabar el tono de grabación puro de 94 dB del calibrador, para grabar este tono se necesita casi un silencio absoluto pues si el micrófono omnidireccional captura ruido, la comparación de los datos que obtiene el sonómetro diferirá de nuestra señal de referencia.

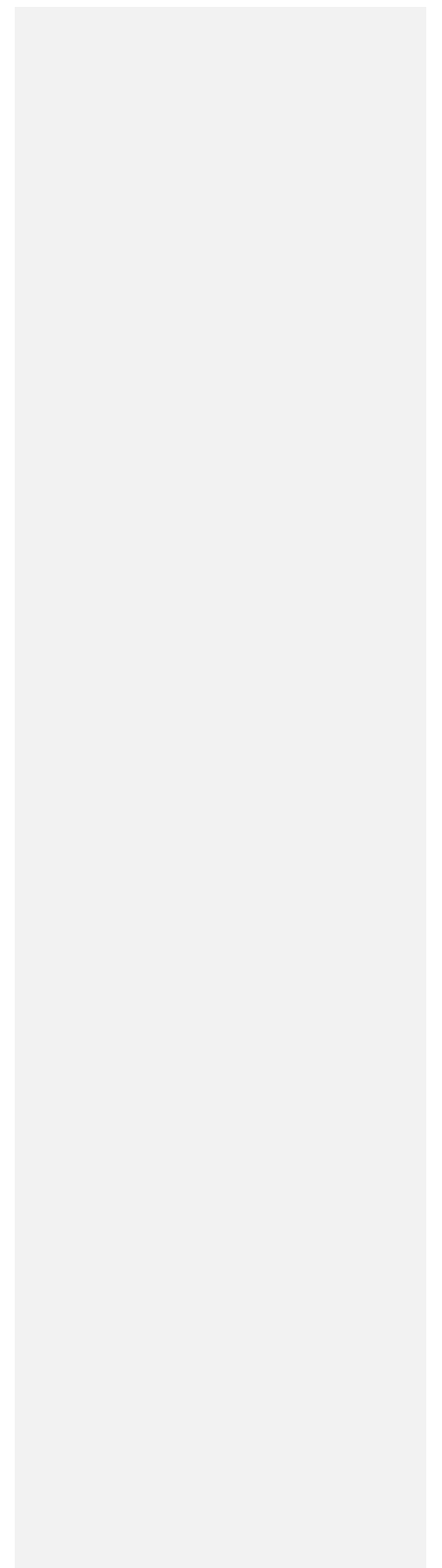
Las construcciones recientes como el nuevo Centro de Ingeniería Avanzada de Ingeniería Industrial, no presenta tratamiento acústico, si quiera un interés por mejorar las condiciones acústicas. La mayoría de los cubículos en este edificio no presentan aislamiento acústico e intimidad, provocando la molestia de algunos profesores al no poder comunicar sus mensajes de manera discreta.

Es necesario que las autoridades directivas se interesen más en los problemas acústicos que existen en la Facultad de Ingeniería. La calidad de la enseñanza aumentaría si se invirtiera en mejorar las condiciones acústicas de

los salones; aislar puertas y ventanas, colocar plafones, resonadores, cortinas, etc.

La salud de las personas es sumamente importante, si las aulas no se adecuan a las necesidades de los alumnos y el profesor, el proceso de enseñanza-aprendizaje será deficiente y de mala calidad, aunado a esto los problemas físicos, psicológicos y sociales que conlleva una acústica de recintos deficiente.

# Bibliografía



[1] American National Standard Institute. (2010). ANSI/ASA S12.60-2010/PART1, Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools Part 1: Permanent Schools. E.E.U.U.A. Recuperado el 13 de Agosto de 2014 de:

[http://acousticalsociety.org/about\\_acoustics/acoustics\\_of\\_classrooms](http://acousticalsociety.org/about_acoustics/acoustics_of_classrooms)

[2] Ogata, K. (2003). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, España: Pearson, Prentice Hall.

[3] Miyara, F. (1999). *Acústica y Sistemas de Sonido*. Rosario, Argentina: Editorial Universidad Nacional de Rosario.

[4] Acoustics Engineering. (2014). *Application Note, Measuring Speech Intelligibility Using Dirac*, Holanda. Recuperado el 15 de Noviembre de 2015 de: <http://www.acoustics-engineering.com/files/TN002.pdf>

[5] Jacobsen, F. (2007). *Fundamentals Of Acoustics And Noise Control*. Dinamarca: DTU, Technical University of Denmark.

[6] Brüel & Kjær. (2000). *Application Note, Measuring Speech Intelligibility Using DIRAC Type 7841*, Dinamarca. Recuperado el 12 de Octubre de 2014 de: <http://www.bksv.es/doc/bo0506.pdf>

[7] International Electrotechnical Commission. (2011). *IEC 60268-16 Sound System Equipment, Part 16, Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index*, Suiza. Recuperado el 13 de Noviembre de 2014 de: <http://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PubPDFs/BS%20EN%2060268-16.pdf>



[8] International Organization for Standardization. (2009). *ISO 3382 (Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters)*, Suiza. Recuperado el 15 de Noviembre de 2014 de: [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?csnumber=2354](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=2354)

[9] Dirección General de Normas, Normatividad Oficial Mexicana. (1995). *NOM-081-SEMARNAT-1994, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN DE RUIDO DE LAS FUENTES FIJAS Y SU MÉTODO DE MEDICIÓN*. México. Recuperado el 3 de Septiembre de 2014 de: <http://www.aguascalientes.gob.mx/PROESPA/pdf/NOM-SEMARNAT-081%20RUIDO.pdf>

[ ] Kuttruff, H. (2009). *Room Acoustics*. Achen, Alemania: Spon Press. Oppenheim A., Willsky A. & Hamid N. (1998). *Señales y Sistemas*. (2ª Edición). México: Pearson, Prentice Hall.

[ ] Arellano, L.A. (2014). *Tratamiento Acústico de un Recinto Escolar empleando la Norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

[ ] Cortés, C. & Medina I. (2013). *Tratamiento Acústico y Sonorización del Instituto Domus de Autismo*. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.

[ ] Medina, R. (2008), *Materiales y Sistemas de Conformación Acústica para Espacios Laborales*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

[] Dirección General de Normas, Normas Mexicanas. (1976). *NMX-AA-040-1976, "Clasificación de Ruidos"*. México. Recuperado el 20 de Agosto de 2014 de:

[http://www.cmic.org/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Varios/Leyes\\_y\\_Normas\\_SEMARNAT/NMX/ruido/2.1976.pdf](http://www.cmic.org/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Varios/Leyes_y_Normas_SEMARNAT/NMX/ruido/2.1976.pdf)

[] *Acoustical Society of America*. (2006). *Acústica en Salones de Clase, Un recurso para crear ambientes de aprendizaje con condiciones de audición deseables Parte 1*, E.E.U.U.A. Recuperado el 12 de Noviembre de 2014 de: [http://ingenierias.uanl.mx/30/30\\_acustica.pdf](http://ingenierias.uanl.mx/30/30_acustica.pdf)

