

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

ESCUELA DE GRADUADOS



EL MODELO FISICO A ESCAIA COMO HERRAMIENTA DE  
DISEÑO DE LA ACUSTICA DE UN RECINTO

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE  
MAGISTER EN FISICA APLICADA

PRESENTADO POR:

RICHARD ALFREDO MOSCOSO BULLON

LIMA - PERU

1998

# **El Modelo Físico a Escala como Herramienta de Diseño de la Acústica de un Recinto**





*El temor de Jehova es el principio  
de la sabiduría,  
Y el conocimiento del Santísimo es  
la inteligencia*

Proverbios 9:10

## Agradecimientos

Al Lic. Jorge N. Moreno Ruiz por su dirección y apoyo en todo el proceso de realización de esta tesis.

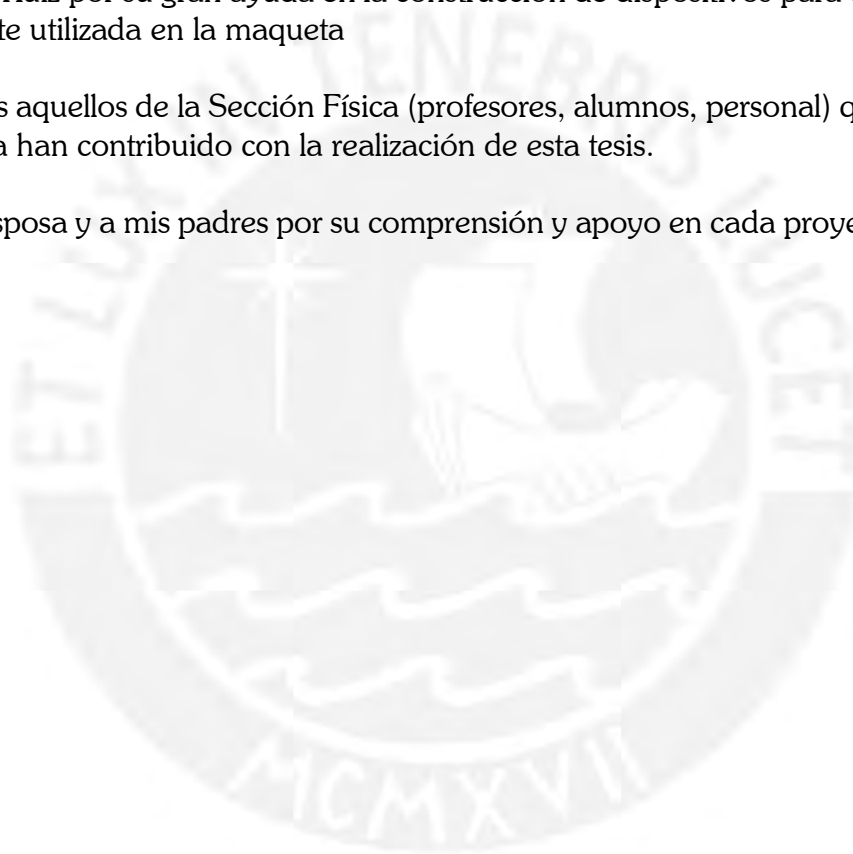
Al Arq. M.A Carlos Jiménez Dianderas por toda su invaluable ayuda en la construcción y diseño de la maqueta, en las mediciones, bibliografía y apoyo durante todo el proceso de la tesis.

A Rafael Piscoya y Jorge Moy con quien muchas veces he discutido y aclarado diversos puntos de acústica y acústica arquitectónica

A José Ruíz por su gran ayuda en la construcción de dispositivos para el montaje de la fuente utilizada en la maqueta

A todos aquellos de la Sección Física (profesores, alumnos, personal) que de alguna manera han contribuido con la realización de esta tesis.

A mi esposa y a mis padres por su comprensión y apoyo en cada proyecto que llevo a cabo



## Resumen

La presente tesis describe el desarrollo de una técnica para medición de parámetros acústicos objetivos en modelos a escala. Esta técnica se basa en la medición de la respuesta impulsiva del modelo. Se explican las razones por las cuales es conveniente el uso de un modelo físico a escala como herramienta para la evaluación acústica de un recinto mediante su respuesta impulsiva. Se expone brevemente la evolución histórica de la evaluación de la “calidad acústica” de un recinto y de los métodos de medición empleados en la Acústica Arquitectónica. Luego se definen los parámetros objetivos actualmente aceptados como herramientas de evaluación de la “calidad acústica” un recinto. Se expone la implementación de la medición de la respuesta impulsiva y se comparan los valores de los parámetros medidos en el Auditorio de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú y en un modelo de dicho auditorio en escala 1:10 mediante esta técnica. Finalmente se presenta una evaluación de auditorios multipropósito en el Perú a través de su respuesta impulsiva como una aplicación alternativa del método y la evaluación de una cámara reverberante a escala como una aplicación directa del método.

## Summary

The present thesis describes the development of a technique for measuring objective acoustical parameters in a scale model. This technique is based on the measuring of the impulse response of the model. Here we explain the reasons why it is convenient the use of a physical scale model as a tool for the acoustical evaluation of an enclosure by its impulse response. We briefly discuss the historical evolution of the acoustical quality evaluation of an enclosure and the measuring methods employed in Architectural Acoustics. We later defined the objective parameters actually accepted as evaluation tools of acoustical quality of an enclosure. We show the implementation of measuring the impulse response and compare the values of the measured parameters in the physics auditorium of the Pontificia Universidad Católica del Perú with a 1:10 scale model of the auditorium. Finally we present an evaluation of multipurpose auditoriums in Peru through its impulse response as an alternative application of the method, and the evaluation of 1:10 scale model of a reverberant chamber as a direct application of the method.

# Índice General

<b>1</b>	<b>TEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción	1
1.2	Título de la Tesis	2
1.3	Motivación	2
1.4	Enfoque	4
1.5	Alcances y Limitaciones	4
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>5</b>
2.1	Presentación del problema	5
2.1.1	Introducción	5
2.1.2	El proceso tradicional de diseño acústico	6
2.1.3	Las leyes de la similaridad acústica	7
2.1.3.1	Absorción del aire	9
2.1.4	La simulación acústica en el proceso de diseño	11
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
3.1	Objetivo General	13
3.2	Objetivos Específicos	13
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>14</b>
4.1	Antecedentes de las técnicas de simulación acústica en modelos a Escala	14
4.1.1	Primeras técnicas	14
4.1.2	Técnicas actuales y en desarrollo	15
4.2	Técnica elegida de medición de la respuesta Impulsiva	16
4.3	Estudio de la fuente sonora para la medición en el modelo a escala	17
4.3.1	Respuesta de frecuencia	17
4.3.2	Patrón de radiación	17
4.4	Criterio de evaluación objetiva	22
4.4.1	Reflectogramas	22
4.4.2	Coeficiente de correlación cruzada interaural	23
4.4.3	Razones temporales de energía	24
4.4.4	Mediciones de decaimiento de energía	26
4.4.5	Mediciones de la curva de energía acumulada	28
4.4.6	Parámetros objetivos de evaluación elegidos	29



<b>5</b>	<b>OBJETOS DE ESTUDIO</b>	<b>31</b>
	5.1 Cuarto a escala real	31
	5.2 Modelo a escala	31
<b>6</b>	<b>APLICACIÓN</b>	<b>32</b>
	6.1 Medición de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física	32
	6.1.1 Instrumental utilizado	34
	6.1.2 Esquemas de las mediciones realizadas	34
	6.1.3 Desarrollo del software para el procesamiento de datos	35
	6.2 Cálculo de parámetros objetivos a partir de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física	36
	6.2.1 Medición por el método de Schroeder utilizando explosión de globos	36
	6.2.2 Medición por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente	41
	6.2.3 Método Gráfico	46
	6.2.4 Resultados Finales	47
	6.2.5 Conclusiones	49
	6.3 Medición de la respuesta impulsiva en el modelo a escala del Auditorio de Física	50
	6.3.1 Instrumental utilizado	51
	6.4 Cálculo de parámetros objetivos a partir de la respuesta impulsiva del modelo a escala del Auditorio de Física	53
	6.5 Comparación de resultados entre el Auditorio y su modelo a escala	55
	6.5.1 Resultados por posición	55
	6.5.2 Resultados por método	61
	6.6 Evaluación de auditorios multipropósito en el Perú	63
	6.7 Evaluación de una cámara reverberante a escala	63
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>65</b>
	7.1 Medición de la respuesta impulsiva en el Auditorio de Física y cálculo de parámetros objetivos a partir de ella	65
	7.2 Medición de la respuesta impulsiva en el modelo a escala del Auditorio de Física y cálculo de parámetros objetivos	65
	7.3 Comparación de resultados entre el Auditorio y su modelo a escala	66



7.4 Conclusiones finales	66
<b>8 ANEXOS</b>	<b>67</b>
8.1 La respuesta impulsiva de un recinto	67
8.2 Cálculo de $C_{50}$ , $C_{80}$ y $t_s$ para el método gráfico	70
<b>9 BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>73</b>



# Capítulo 1

## TEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1 Introducción

Es creciente el interés que está tomando actualmente el acondicionamiento ambiental en la arquitectura y en otras ciencias implicadas e interesadas en el desarrollo y conservación de la vida humana y su hábitat.

El acondicionamiento ambiental posee una serie de ramas de estudio, cada vez más amplias y complejas, dentro de las cuales se encuentra la Acústica, como un factor determinante o condicionante de todo hecho urbano-arquitectónico, especialmente en los locales de audición, donde se llevan a cabo procesos de comunicación muy particulares y en los cuales la fidelidad del mensaje transmitido sea éste musical o de la palabra, es la razón de ser del recinto.

Existen espacios arquitectónicos cuya función primordial es la de albergar la realización efectiva de estos tipos de procesos comunicativos por lo que corresponde a la Acústica Arquitectónica la concreción de este fin.

Estos espacios diseñados con una determinada función, producen en el hombre diversas y variadas sensaciones. Un elemento arquitectónico diseñado en condiciones acústicas apropiadas, garantizará la óptima realización del proceso de comunicación antes mencionado, ya sea en el caso de utilizar el lenguaje musical o en el caso de hacer uso del lenguaje hablado -en el que la sola transmisión de conceptos, sentimientos y emociones, dan la pauta para esta forma de comunicación.

La producción del sonido, cualquiera sea la fuente sonora que la genere, trae consigo una serie de cualidades y características propias, las que, al producirse en un local de audición, determinan en éste ciertos parámetros o limitaciones (dimensionales, morfológicos, de tratamiento de superficies, etc.) en los cuales la eficiencia y fidelidad de aquella puede garantizarse. Estas condicionantes alcanzan su máximo grado de exigencia y rigurosidad en un local de audición para espectáculos musicales, en el que cada aspecto juega un papel protagónico en la perfecta calidad acústica requerida para llegar al público, de modo que éste logre captar el mensaje, no sólo educándose, sino a la vez sintiendo y comprendiendo éstas artes.

Podemos afirmar que, al realizar un proyecto, los diseñadores deben tomar en consideración los necesarios requerimientos acústicos, además de los urbano-arquitectónicos, para garantizar y justificar la existencia de un local de audición como tal.

## **1.2 Título de la Tesis**

"El Modelo Físico a Escala como Herramienta de Diseño de la Acústica de un Recinto"

Consiste en la propuesta y estudio de la simulación del comportamiento del sonido en un espacio físico a escala (modelo a escala). Como herramienta para la evaluación de la calidad acústica del espacio físico real, previo a su construcción; o sino para su posible mejoramiento en el caso de que el estudio sea hecho en base a un recinto previamente construido. Esto se aplica, por ejemplo, en el caso de un recinto con valor histórico en el cual es imprescindible evitar su manipulación y garantizar una propuesta acorde a sus características arquitectónicas, artísticas y culturales.

## **1.3 Motivación**

Es posible definir dos ámbitos del problema: el primero referido al papel de los diseñadores hacia este tipo de compromisos (dentro de los cuales se encuentra el presente trabajo de investigación) y el segundo concerniente a la problemática artístico-cultural del medio local.

En relación al primer ámbito de la investigación, es posible decir que generalmente (por no decir siempre, salvo contadas excepciones), frente al compromiso de un local de audición, los diseñadores optan por la posición de dejar el tratamiento y estudio acústico para una etapa posterior (que por lo general es la última y nunca se lleva a cabo), obviándolo durante el proceso de diseño. Esto origina en la gran mayoría de los casos, problemas en términos de audición, que podrían evitarse, tomando en consideración las pautas debidas durante su proyección; además, incrementan el costo del proyecto al tener que hacer uso de equipo electroacústico complementario que pudo ser innecesario, o al tratar de subsanar posibles defectos acústicos en la arquitectura misma del local; aparte de la demora que implica un nuevo análisis acústico posterior. Actualmente es posible encontrar en Lima algunos lamentables "ejemplos" de estas modificaciones, en la mayoría de las cuales la calidad acústica lograda no justifica la inversión realizada (Teatro Municipal, Sala de conciertos de la Escuela Nacional de Música, etc.) [23]. Una honrosa

excepción es la Sala Alcedo, la cual si tuvo un diseño acústico previo a su construcción. A pesar de que esta sala está diseñada para oratoria y música de cámara por lo general nunca es usada para este tipo de programas.

En los últimos 5 años se han construido auditorios multipropósito en el Perú, pero lamentablemente el problema sigue vigente [24], [25].

Es por este motivo, que, en dicha tipología arquitectónica, no ha sido posible aún obtener en Lima, ni en el Perú, un nivel acústico-arquitectónico óptimo; por lo que la mayoría de la población desconoce la existencia de una calidad acústica en éstos recintos, no logrando la educación del oído que les permita captar, distinguir y calificar el sonido producido en estos locales. Además, es posible y necesario lograr la racionalización de recursos (humanos, técnicos y económicos), acordes con la economía y desarrollo tecnológico del Perú.

#### **1.4 Enfoque**

El tema de investigación pertenece al tipo de investigación técnica-científica, y se refiere al Diseño Acústico, aplicado específicamente a la utilización de una herramienta que permita al diseñador obtener información complementaria a la obtenible mediante otras herramientas.

#### **1.5 Alcances y Limitaciones**

##### **Alcances**

- Conceptualización, descripción y evaluación de la simulación acústica en modelos a escala y sus formas de aplicación, como paso previo a la profundización en el diseño del local de audición a proponer.
- Marco referencial, con el cual se realizará una síntesis de trabajos realizados sobre el tema formulado, procediendo a un procesamiento de bibliografía especializada y experiencias realizadas en el Perú y otras partes del mundo.
- Determinación de parámetros objetivos de diseño obtenibles del modelo físico a escala; constituye el tema de investigación principal.

## Limitaciones

- Si bien podrá hacerse uso de la información contenida en la presente investigación para el desarrollo de un proyecto de remodelación, la investigación estará dirigida solamente a la evaluación de la utilización del modelo a escala para la obtención de los parámetros objetivos elegidos.
- El presente estudio no pretende ser exhaustivo con respecto a las fuentes sonoras utilizadas en el modelo a escala; solamente se propondrá normas básicas y elementales en el uso y aprovechamiento de éstos elementos.





# Capítulo 2

## ANTECEDENTES

### 2.1 Presentación del Problema

#### 2.1.1 Introducción

En el proceso de diseño de la acústica de un recinto es imprescindible el uso de técnicas que permitan resultados confiables en el menor tiempo posible. La principal dificultad para este fin radica en la elección de la técnica de simulación adecuada a partir de las ya existentes y consideradas como "estándar". Las técnicas de simulación acústica tienen una larga tradición en la acústica de locales. En 1843 Scott Russell realizó experimentos con ondas de agua que permitían estudiar su propagación en una sección determinada del recinto [1]. En 1912 W. C. Sabine, el padre de la acústica cuantitativa de recintos, fotografió ondas de aire en modelos bidimensionales usando la técnica Schlieren [2]. Posteriormente en un trabajo pionero en la década de los 30, Spandöck [3] mostró la posibilidad de la simulación acústica en un modelo a escala. Simultáneamente, Van den Dungen [4] estableció las leyes de la similaridad acústica, y diversos grupos iniciaron la investigación en modelos con la finalidad de evaluar diseños de auditorios [1], [2], [5].

En 1969, M.R. Schroeder [7] desarrolló una nueva técnica de simulación acústica, que hace uso de una computadora digital para calcular el campo sonoro en un auditorio.

La simulación en modelos a escala toma en cuenta el comportamiento ondulatorio del sonido. Los modelos en computadora por otra parte están basados en el trazado de rayos sonoros; el comportamiento ondulatorio es incorporado con dificultad. Hoy en día, la simulación acústica en computadora presenta ventajas frente a la simulación tradicional a escala, pero aún no ha podido reemplazarla sino más bien complementarla.

En su forma más elaborada, la simulación por computadora compite en la capacidad para evaluar la acústica de espacios con la técnica tradicional y evita los costos y demoras relacionadas al construir un modelo físico a escala [22].

La investigación en modelos a escala continúa actualmente por las siguientes razones:

1. La falta de algoritmos que simulen en un computador completamente el



comportamiento del sonido que incide sobre una superficie no plana.

2. Las ventajas arquitectónicas que presenta el modelo a escala de un espacio, tanto en ayuda al diseño, como en la presentación del diseño para un potencial cliente.

Este último punto tiene decisivas consecuencias en el desarrollo de técnicas simples de simulación acústica. Por lo general se buscan modelos que sean sencillos de manipular y modificar, además de tratar de solucionar los problemas técnicos relacionados con los equipos de medición, lo que conduce a la elección de la escala 1:50, a la cual se realizan la mayoría de los dibujos arquitectónicos. Así mismo, son preferibles las técnicas de evaluación en modelos que eviten las complicaciones usuales de una atmósfera de aire seco o nitrógeno y que además no impliquen costos muy altos.

### **2.1.2 El Proceso Tradicional de Diseño Acústico**

Básicamente la evaluación acústica de espacios puede dividirse en dos grandes áreas:

1. Acústica Física - Se consideran las características ondulatorias del sonido incluyendo:

- Distribución de presión sonora
- Difusión del sonido
- Resonancia

Las cuales están afectadas por:

- La absorción de las superficies del cuarto
- La forma y el tamaño de los objetos dentro del cuarto
- Las condiciones de frontera

2. Acústica Geométrica - Considera la propagación del sonido análoga a la de los rayos luminosos:

- Reflexiones
- Absorción parcial
- Igualdad entre los ángulos de incidencia y reflexión

### 2.1.3 Leyes de Similitud Acústica

El principio detrás de la simulación acústica usando un modelo a escala es simple. El complejo comportamiento del sonido cuando interactúa con superficies de tamaño finito u obstáculos depende de la razón entre el tamaño de la superficie y la longitud de la onda, Si esta razón se mantiene constante, el comportamiento acústico es reproducido en miniatura. De la ecuación fundamental: velocidad del sonido = longitud de onda x frecuencia, notamos que si la longitud de onda se reduce la frecuencia debe incrementarse. La similitud entre un cuarto y su modelo a escala [4], [5] puede ser expresada mediante dos cocientes: un cociente geométrico, o factor de escala,

$$S = \frac{l_m}{l_r}$$

donde  $l_r$  es cualquier dimensión en el cuarto a escala real y  $l_m$  su equivalente en el modelo; y un cociente característico de los fluidos,

$$K = \frac{c_m}{c_r}$$

donde  $c_r$  es la velocidad del sonido del fluido en el cuarto y  $c_m$  es la velocidad del sonido del fluido en el interior del modelo, dependiendo ambas de la presión y la temperatura del medio. Se habrá conseguido una similitud perfecta entre las dimensiones del cuarto y su modelo si todas las demás cantidades cumplen la razón de escalamiento mostradas en la tabla 2.1.

magnitud	prototipo	modelo
longitudes de onda	$S\lambda_r$	$\lambda_m$
frecuencias	$\frac{K}{S} f_r$	$f_m$
tiempos	$\frac{S}{K} t_r$	$t_m$

Tabla 2.1. Razones de escalamiento para el caso general.

En el caso de un factor de escala  $S = 1/10$ , las frecuencias en el modelo deben ser multiplicadas por 10 si el fluido que llena el modelo es aire ( $K = 1$ ).

Una vez elegida la escala del modelo, surgen ciertos problemas técnicos que deben resolverse. Por ejemplo, si se elige un factor de escala  $S = 1/10$ , el rango normal de frecuencias de 63 Hz - 20 kHz, es en el modelo de 630 Hz - 200 kHz. Esto presenta una serie de dificultades, relacionadas con:

- Medición de la absorción a altas frecuencias para el modelo
- Obtener una adecuada respuesta a altas frecuencias en los micrófonos y en las fuentes utilizadas, así como la suficiente potencia para efectuar las mediciones
- Obtener una fuente omnidireccional a altas frecuencias
- Evitar pérdidas por transmisión, amortiguamiento o vibración de las paredes del modelo a escala
- Las pérdidas debidas a la viscosidad y conductividad térmica del aire
- Los efectos debidos a la humedad relativa del fluido en el modelo

<b>magnitud</b>	<b>prototipo</b>	<b>modelo</b>
tamaño	1x	1/10x
frecuencia	1x	10x
longitud de onda	1x	1/10x
reverberación	$RT$	1/10 $RT$
absorción	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{10f}$
tiempo	1x	1/10x

Tabla 2.2. Razones de escalamiento para el caso de  $S = 1/10$  y  $K = 1$ .

### 2.1.3.1 Absorción del aire

Para una similaridad ideal, es decir una simulación perfecta se cumplirá:

$$m' = \frac{m}{S}$$

donde “m´” es el coeficiente de absorción del aire a la frecuencia en el modelo, “m” el coeficiente de absorción a la frecuencia a escala real y S es el factor de escala. Esto implica que a una frecuencia a escala real dada el coeficiente de absorción en el modelo será mayor.

La absorción debida al aire tiene dos componentes. La primera, es la absorción clásica, debida a los efectos de viscosidad y conducción térmica y es inevitable [26]. La segunda, la componente molecular es debida a la presencia del oxígeno y el vapor de agua en el aire. Para minimizar la segunda componente el oxígeno se remueve usando una atmosfera de nitrógeno, o se deshumedece el aire. En ambos casos es potencialmente posible una simulación perfecta, pues la velocidad del sonido permanece prácticamente constante.

El coeficiente de absorción clásico [16] está dado por la siguiente ecuación:

$$m = (33 + 0.2T) f^2 10^{-12} (m^{-1})$$

Donde T es la temperatura en °C y f es la frecuencia en Hz.

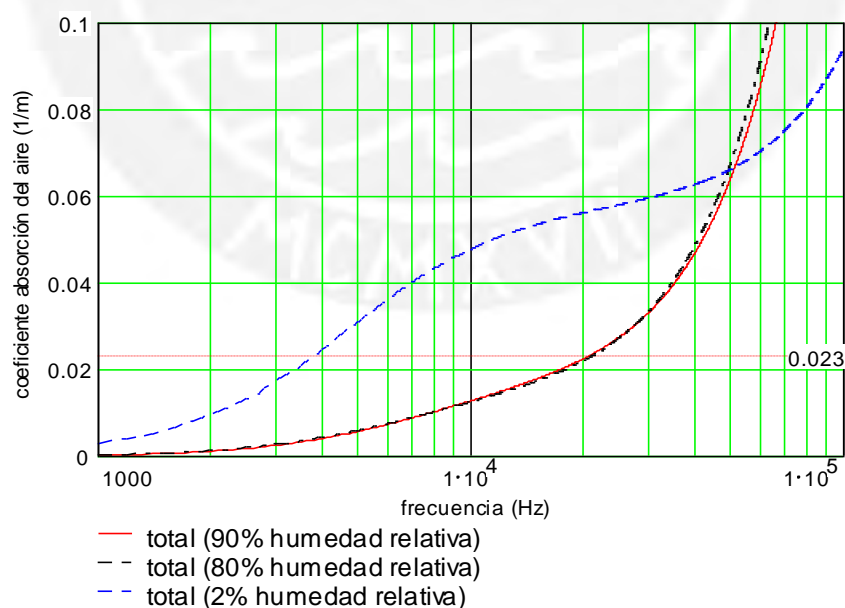


Figura 2.1. Coeficiente de absorción total y clásico del aire a distintas humedades relativas a las frecuencias de medición en el modelo.

En el diseño acústico de un recinto la absorción del aire se considera significativa para frecuencias superiores a los 2 kHz que corresponde a  $0,0023 \text{ m}^{-1}$ , por lo tanto, en el modelo se puede considerar que para las frecuencias con absorción menor a  $0,023 \text{ m}^{-1}$  no es necesario realizar una corrección por la absorción de la humedad. Se observa de la gráfica 2.1 se observa que la frecuencia límite es 20 kHz. Para frecuencias superiores a los 20 kHz en el modelo se deben de considerar las correcciones necesarias o en todo caso trabajar en una atmósfera de nitrógeno.

En Lima es corriente tener un porcentaje entre 80 a 95% de humedad relativa, en el caso de la presente tesis las mediciones fueron realizadas hasta 20 kHz a 90% de humedad relativa en el modelo (frecuencia de 2 kHz a escala real) debido al montaje realizado (esto se explica en el capítulo 6 correspondiente a las mediciones), por lo tanto, no es necesario deshumedecer el aire dentro de la maqueta, pues el coeficiente de absorción aumenta con una humedad relativa baja.

En la figura 2.2 se muestra la atenuación total del aire en decibeles por metro (dB/m) para una humedad relativa de 90% y 2% comparada con la atenuación debida al componente clásico a 20% de humedad relativa. Para la frecuencia de 20 kHz en el modelo la atenuación es de 0,196 dB/m.

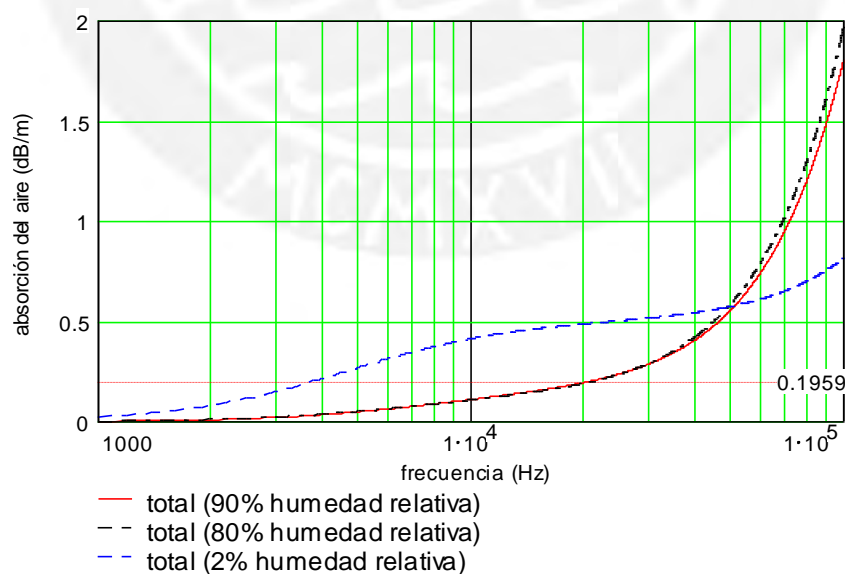


Figura 2.2. Coeficiente de absorción total y clásico del aire a distintas humedades relativas en dB/m.



#### **2.1.4 Simulación Acústica en el Proceso de Diseño**

La simulación acústica contemporánea considera la relación entre la longitud de onda, frecuencia y velocidad de propagación de la onda con los parámetros acústicos y arquitectónicos del espacio y el criterio psicoacústico deseado.

#### **Dificultades Inherentes**

El proceso de diseño acústico presenta ciertas dificultades que acentúan la necesidad de estudiar la acústica de un cuarto a través de un modelo, éstas son:

- Cuantificación.
- Control para la investigación objetiva.
- Evaluación subjetiva a la respuesta humana (grado de satisfacción).
- Generación de decisiones o parámetros óptimos de diseño acústico.

#### **Decisiones a tomarse**

Los resultados y logros de la etapa de diseño dependen de manera directa de la elección de la técnica adecuada de simulación acústica. Por ello es imprescindible la formulación de las preguntas siguientes:

- ¿Qué información es necesaria o requerida?
- ¿Qué técnica de simulación es la mejor para obtener esa información?

#### **Condiciones para la evaluación de la técnica de simulación elegida**

- El grado de exactitud deseado
- El estado de desarrollo del diseño del prototipo u objeto de estudio
- Condiciones del espacio a escala real
- Materiales
- Personal
- La complejidad del objeto de estudio o prototipo
- La flexibilidad a alteraciones y comparación de situaciones
- La repetibilidad de las mediciones



Desafortunadamente, las técnicas de simulación acústica varían entre extremos opuestos, es decir desde una máxima flexibilidad, mínimo costo y precisión hasta un modelo extremadamente complejo y costoso, pero muy preciso.

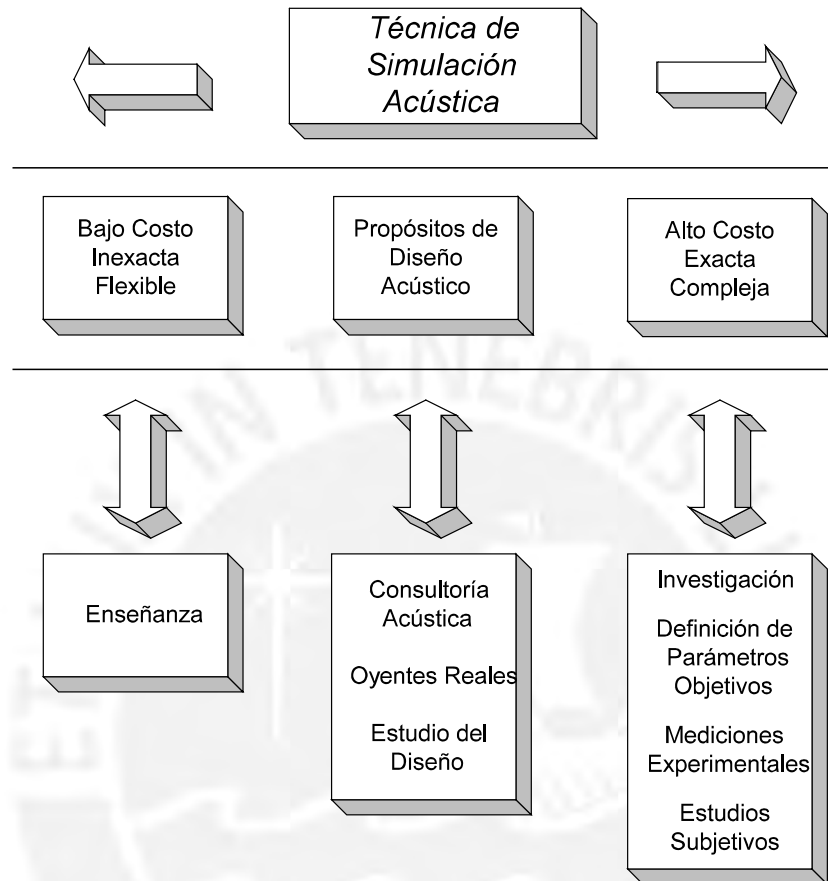


Figura 2.3: Técnicas de simulación acústica y su rango de aplicación.

# Capítulo 3

## OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo General

- Evaluación de la acústica de un recinto mediante el cálculo de parámetros objetivos en un modelo físico a escala.

### 3.2 Objetivos Específicos

- Medición de la respuesta impulsiva de un recinto.
- Cálculo de parámetros objetivos a partir de la respuesta impulsiva.
- Investigación sobre modelos a escala



# Capítulo 4

## METODOLOGIA

### 4.1 Antecedentes de las técnicas de simulación acústica en modelos a escala

#### 4.1.1 Primeras técnicas

##### Técnicas ópticas

La simulación de las ondas sonoras mediante técnicas ópticas se basa en la analogía existente entre la propagación del sonido a ciertas frecuencias y la propagación de rayos luminosos. Ambas asumen un comportamiento geométrico de la propagación del sonido y sus resultados son válidos cuando las longitudes de onda son pequeñas en comparación con las dimensiones del modelo. Existen dos técnicas básicas:

- El método de distribución luminosa.
- El método de rayos.

##### Técnicas geométricas

La simulación gráfica en dos y tres dimensiones (diagrama de rayos), también considera la acústica geométrica como una base teórica. El estudio de los rayos es hecho en la vista de planta y en secciones longitudinales del modelo mediante reflexiones especulares.

##### Técnicas ondulatorias

Los estudios se realizan en tanques de agua, consideran el comportamiento ondulatorio del sonido permitiendo estudiar la difracción en el modelo. Esta es la más básica de las técnicas de tipo ondulatorias. Las longitudes de onda son reducidas por la escala del modelo.

##### Aplicaciones

Las técnicas descritas pueden ser utilizadas para determinar:

- Propagación de la onda sonora y posibles ecos.
- Superposición constructiva o destructiva de ondas sonoras (enfoque sonoro).
- Forma básica del local.
- Difracción (sólo las técnicas ondulatorias).

## **4.1.2 Técnicas actuales y en desarrollo**

### **Medición de la respuesta impulsiva**

Las técnicas de medición de la respuesta impulsiva (ver anexo A), aparecen como las más prácticas en la acústica arquitectónica, considerando especialmente el desarrollo de la electroacústica, tanto en técnicas como instrumentación [18]. El principio básico consiste en procesar la respuesta impulsiva con la finalidad de obtener parámetros "objetivos", es decir parámetros que nos permitan evaluar cuantitativamente las características acústicas del recinto en estudio.

### **Simulación acústica con ultrasonido**

La simulación mediante ultrasonido intenta obtener una impresión subjetiva "re-escalada" de la acústica del modelo mediante oyentes entrenados. Para un modelo con un factor de escala  $S$  y relación de velocidades  $K$ , las frecuencias de medición en él están relacionadas con las frecuencias a escala real según la tabla 2.1. Típicamente se utiliza música previamente grabada en un cuarto anecoico (un cuarto acústicamente tratado para evitar la generación de reflexiones en sus superficies), y luego es reproducida a una velocidad  $K/S$  veces la velocidad normal de reproducción en el modelo y es registrada mediante micrófonos en miniatura que simulan los oídos de una persona. Finalmente este registro es reproducido a velocidad normal (generalmente a través de auriculares) a los oyentes de manera que puedan "evaluar" subjetivamente la calidad acústica del modelo.

### **Auralización**

Se ingresa la geometría del local a un computador y mediante algoritmos se genera digitalmente su respuesta impulsiva, luego se convoluciona la música u otro tipo de señal deseada con la respuesta impulsiva obtenida y la señal resultante se reproduce mediante auriculares. El objetivo es simular la ejecución de cualquier pieza musical en el futuro recinto y así poder obtener la impresión subjetiva de la sala previamente a su construcción física. Una de las diversas aplicaciones de esta técnica, pronto se utilizará en las salas de concierto más famosas del mundo con el objetivo de poder elegir la ubicación ideal de un oyente según sus preferencias musicales subjetivas [19].

## **Aplicaciones**

Estas técnicas permiten estudiar:

- Efectos de localización en la sala.
- Contenido de energía a intervalos discretos de tiempo.
- Inteligibilidad de la palabra.
- Reverberación.
- Estudios subjetivos (sólo las técnicas de ultrasonido y auralización)

### **4.2 Técnica elegida de medición de la respuesta impulsiva**

Las técnicas básicas de medición de la respuesta impulsiva realizadas con modelos a diversas escalas son conocidas y están bien documentadas [5],[9],[16].

A partir del trabajo de M. R. Schroeder, que fue concebido para el cálculo del tiempo de reverberación, se prestó atención a la información sobre la acústica de la sala contenida en su respuesta impulsiva (análoga a la respuesta impulsiva de un sistema lineal). Se inició el desarrollo de técnicas que permitieran la medición de la respuesta impulsiva en forma rápida, repetida y con el mínimo error posible [18].

#### **Técnica de medición mediante pulsos rectangulares**

Es la técnica elegida para este trabajo de investigación. En este caso se generan pulsos de corta duración (del orden de 1 ms) pero de gran amplitud. Estos pulsos son generados electrónicamente y se pueden reproducir mediante un altavoz omnidireccional. Es posible también generarlos mediante pistolas de fogeo especialmente diseñadas o mediante la utilización de fuentes explosivas (globos, chispas eléctricas, etc.). Teóricamente la medición se realiza una sola vez en cada posición, pero en la práctica se pueden necesitar varias mediciones. Esto se verá con mayor detalle en la parte correspondiente a las mediciones.

### 4.3 Estudio de la fuente sonora para la medición en el modelo a escala

Existen en el mercado fuentes y micrófonos omnidireccionales para las frecuencias dentro del rango audible de interés en acústica arquitectónica (125Hz - 8000Hz). Al realizar mediciones en un modelo a escala es imprescindible la condición de que la fuente utilizada sea omnidireccional o que tenga el mismo patrón de radiación de la fuente utilizada en el recinto a escala real. De otra manera las respuestas impulsivas respectivas serán distintas. Se eligió un altavoz dinámico de alta frecuencia (tweeter) JBL modelo GB07 como fuente en el modelo a escala y una caja acústica JBL modelo SR4732A como fuente sonora para las mediciones a escala real.

#### 4.3.1 Respuesta de frecuencia

Por estudios previos se sabe que no es imprescindible que la fuente tenga una respuesta de frecuencia plana si se realizan mediciones en bandas de octavas [15]. Una octava corresponde al intervalo de frecuencias que hay entre una frecuencia  $f$  y el doble de ella es decir  $2f$ . Asimismo se acostumbra hacer mediciones en bandas de  $1/3$  de octava, en este caso el intervalo entre  $f$  y  $2f$  (una octava), se divide en tres bandas iguales. En la figura 4.1 se muestra la respuesta de frecuencia de la fuente utilizada en la etapa de experimentación en el eje en bandas de  $1/3$  de octava.

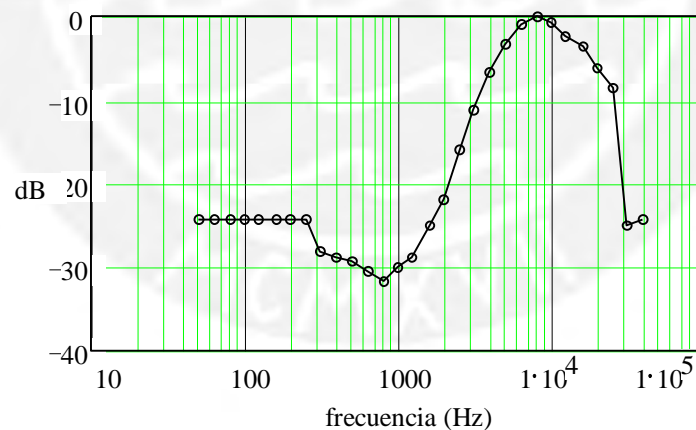


Figura 4.1: Respuesta de frecuencia de la fuente en bandas de  $1/3$  de octava

#### 4.3.2 Patrón de Radiación

En el caso de mediciones de la respuesta impulsiva de un recinto es deseable el uso de fuentes sonoras omnidireccionales, estas se caracterizan por emitir las ondas sonoras con igual amplitud en todas las direcciones. Esto representa un problema cuando se trabaja



con altas frecuencias, pues en general las fuentes dejan de tener un comportamiento omnidireccional. La respuesta impulsiva se genera por las sucesivas reflexiones que llegan al micrófono, si la fuente es muy direccional (es decir si tiene direcciones preferenciales de radiación), es probable que ciertas reflexiones que no alcancen al micrófono en esas direcciones, no sean registradas y se pierdan en la respuesta impulsiva medida con esta fuente. En las figuras 4.2 a 4.5 se muestran los patrones de radiación en el plano horizontal del tweeter JBL GB07 a distintas frecuencias:

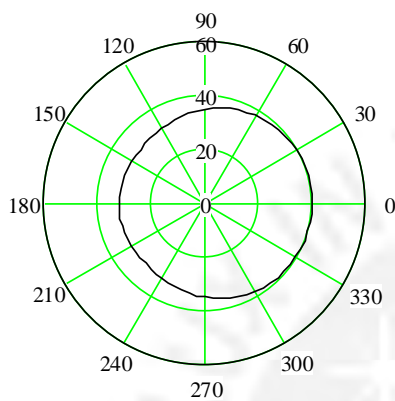


Figura 4.2: Patrón polar en el plano horizontal a 2500 Hz

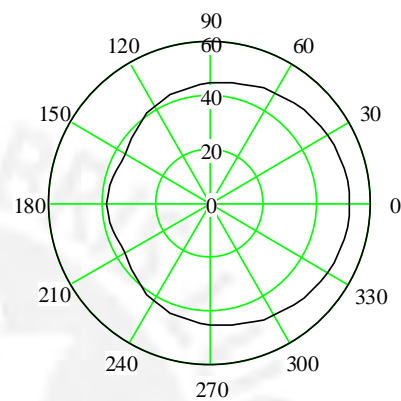


Figura 4.3: Patrón polar en el plano horizontal a 5000 Hz

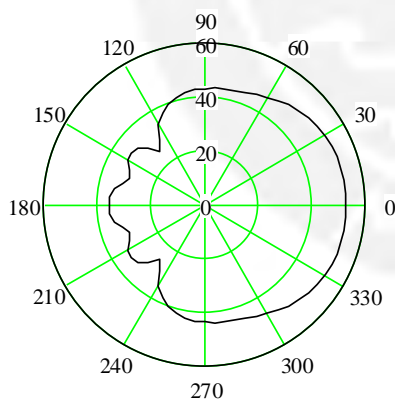


Figura 4.4: Patrón polar en el plano horizontal a 10 000 Hz

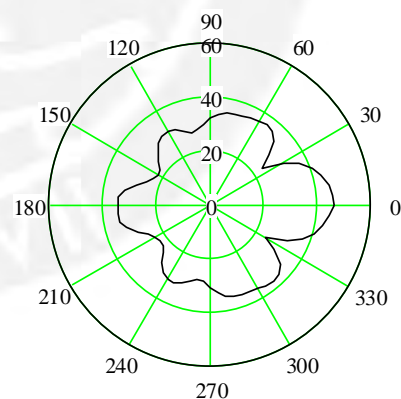


Figura 4.5: Patrón polar en el plano horizontal a 20 000 Hz

## Patrón de Radiación Tweeter JBL sin difusor Plano Horizontal (referido a 10 kHz y 0°)

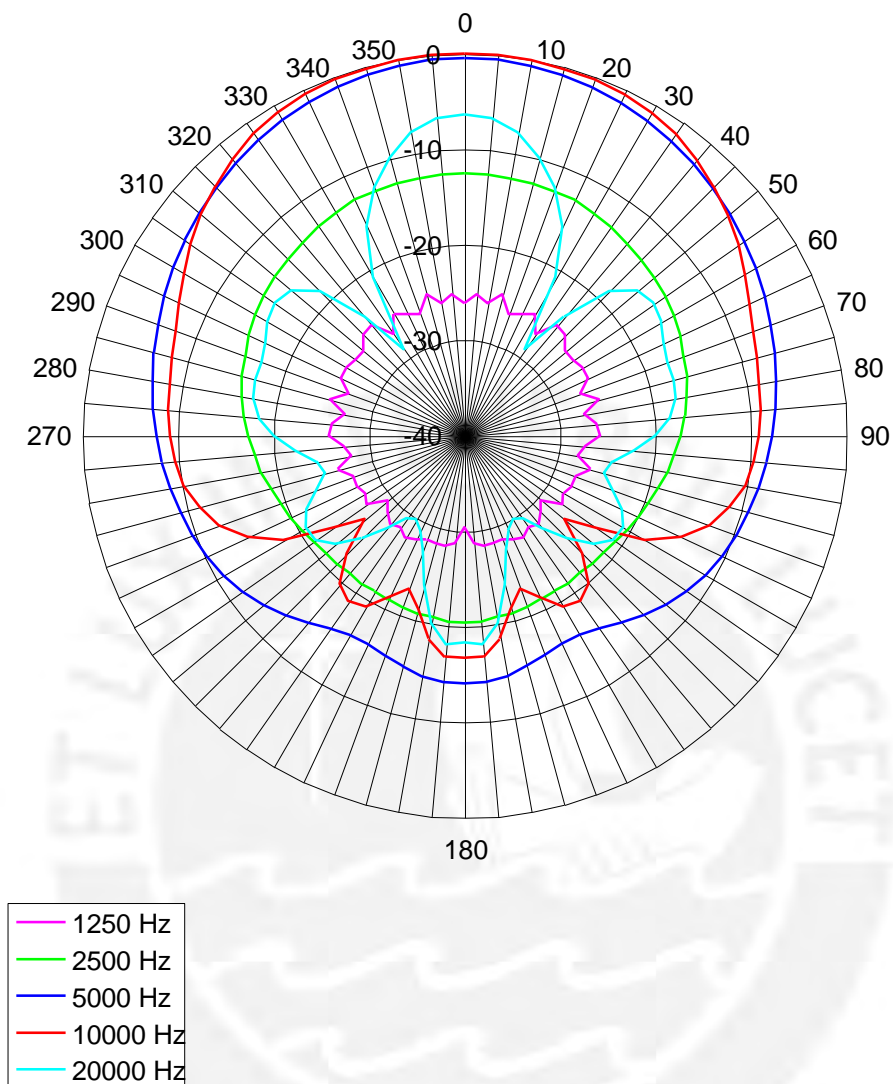


Figura 4.6: Patrón polar en el plano horizontal a diversas frecuencias para la fuente utilizada en el modelo sin difusor.

## Patrón de Radiación Tweeter JBL con difusor Plano Horizontal (referido 10 kHz y 0°)

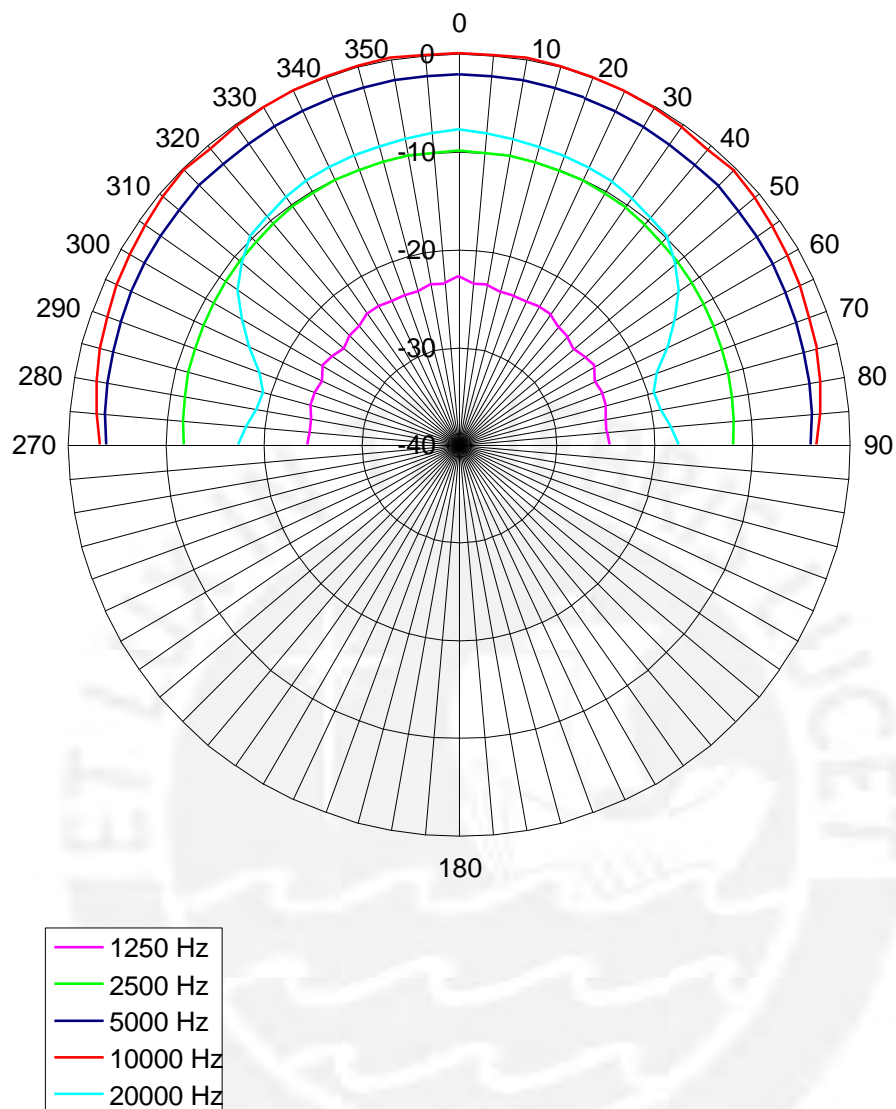


Figura 4.7: Patrón polar en el plano horizontal a diversas frecuencias para la fuente utilizada en el modelo con difusor.

**Patrón de Radiación Tweeter JBL GB-07**  
**sin difusor**  
**Plano Vertical (referido a 10 kHz y 0°)**

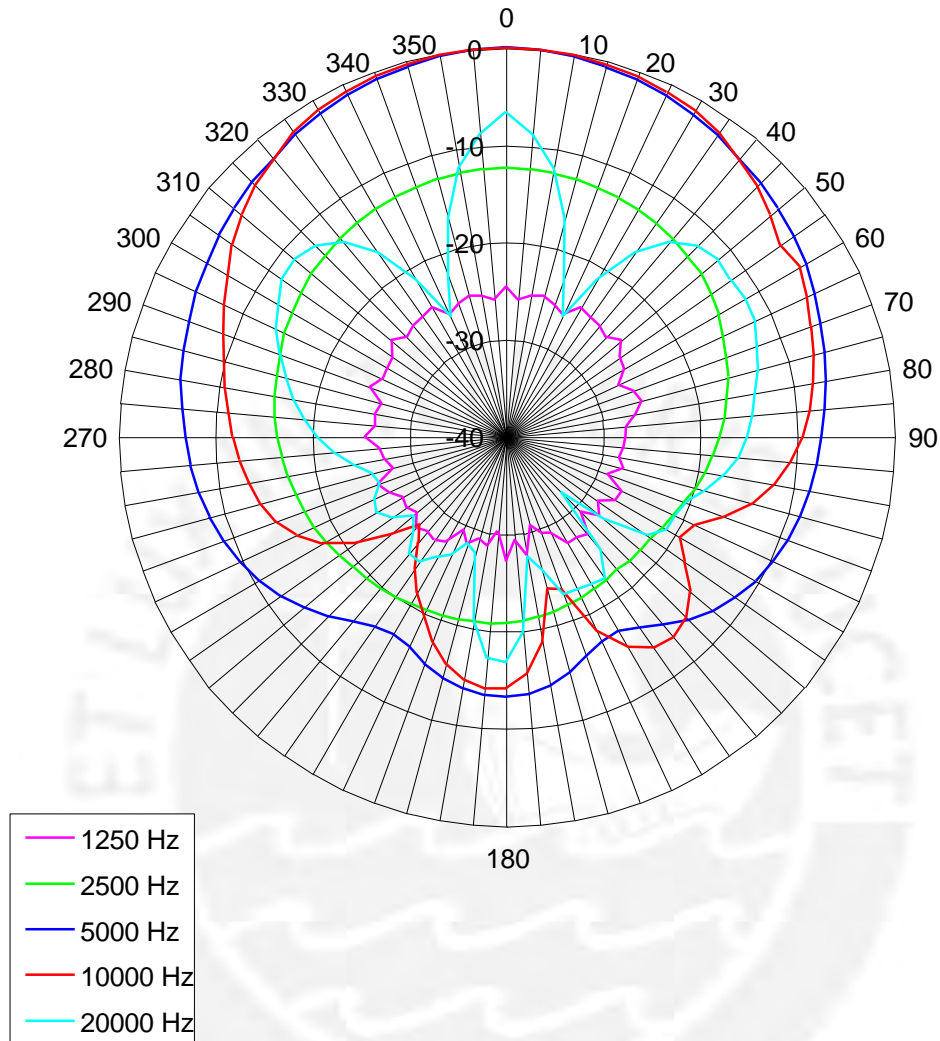


Figura 4.7: Patrón polar en el plano vertical a diversas frecuencias para la fuente utilizada en el modelo sin difusor.

Se puede observar que la fuente presenta un patrón casi omnidireccional en las frecuencias de 2500 Hz y 5000 Hz. A las frecuencias de 10 000 y 20 000 Hz la fuente presenta ya una direccionalidad apreciable, lo que no es conveniente y es de esperarse que esto afecte la medición del reflectograma a la frecuencia correspondiente. Para evitar esta característica se puede utilizar un lente acústico para las mediciones a partir de los 10 000 Hz, de manera que se modifique el patrón de radiación y pueda obtenerse una menor direccionalidad a las frecuencias deseadas.

#### 4.4 Criterio de evaluación objetiva

Las mediciones específicas en cada categoría están basadas en la gran cantidad de trabajos publicados sobre investigaciones de criterios psicoacústicos de diseño propuestos por diversos investigadores.

Todos los parámetros acústicos objetivos a continuación fueron evaluados a partir de la respuesta impulsiva medida. En las fórmulas  $E(t_1, t_2)$  representa la energía en el intervalo de tiempo  $t_1$  a  $t_2$  de la respuesta impulsiva  $h(t)$  la cual se registra desde el arribo del sonido directo.

Según Schroeder [14]

$$E(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} h^2(t) dt$$

La energía de toda la respuesta impulsiva será:

$$E(0, \infty) = \int_0^{\infty} h^2(t) dt$$

La presión eficaz en un instante de tiempo puede calcularse mediante:

$$p^2(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt = E(t, \infty)$$

Las mayores categorías de parámetros para evaluación de diseño acústico son las siguientes:

##### 4.4.1 Reflectogramas

Un reflectograma es la representación gráfica de la respuesta impulsiva de un recinto en la posición de un oyente.

Un análisis visual de los reflectogramas medidos en diferentes posiciones, muestra claramente que hay zonas distinguibles en una sala. Los criterios para la evaluación objetiva de los reflectogramas en algunos casos son distintos. Con la finalidad de poder comparar los reflectogramas, se acostumbra normalizarlos de manera que el nivel del sonido directo sea el mismo en todos. En general se prefiere representar el cuadrado de la respuesta impulsiva en función del tiempo (ver la figura A3 del capítulo 8).

En la figura 4.6 se muestra un reflectograma típico donde se representa la respuesta impulsiva del recinto sin elevarse al cuadrado.



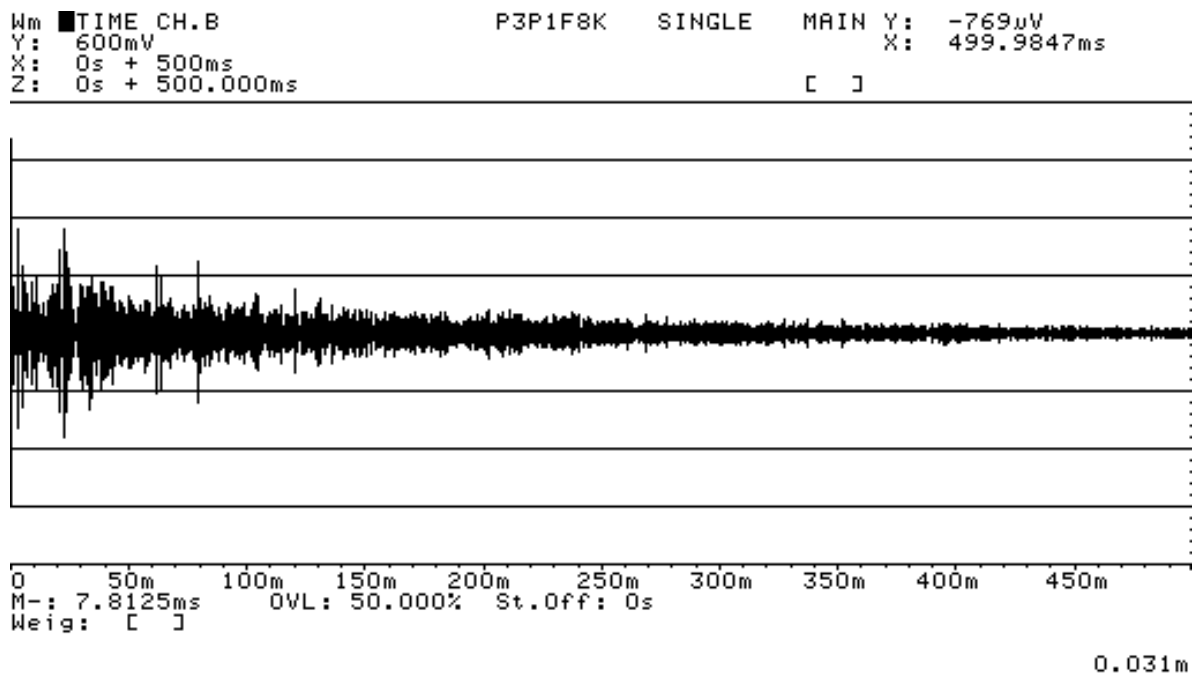


Figura 4.6: Reflectograma típico de un recinto.

#### 4.4.2 Coeficiente de correlación cruzada interaural

El *coeficiente de correlación cruzada interaural* (*Interaural cross correlation* - IACC), es una medida de la diferencia entre los sonidos que arriban a los oídos al emitirse un pulso. Si ambos sonidos son iguales, IACC es igual a la unidad, si los sonidos en los dos oídos son señales aleatorias independientes entonces el  $IACC = 0$ . Para fuentes impulsivas, el IACC está descrito por la siguiente ecuación:

$$IACC = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\int_{t_1}^{t_2} h_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} h_R^2(t) dt}$$

donde  $L$  y  $R$  designan las señales que llegan al oído izquierdo y derecho respectivamente, mirando directamente hacia la fuente. La variable  $\tau$  varía entre  $-1$  a  $+1$  ms, que es aproximadamente la diferencia temporal entre la llegada de un frente de onda a ambos oídos, proveniente del lado derecho o izquierdo de la cabeza.



### 4.4.3 Razones temporales de energía

Estos parámetros objetivos comparan el cociente entre los niveles de energía temprana y tardía de un pulso sonoro. Esto tiene la finalidad de resumir la respuesta impulsiva del cuarto que es visualmente examinado en los reflectogramas antes descritos. Esto se justifica debido a que el oído actúa como un rectificador cuando transforma las vibraciones mecánicas del tímpano en impulsos eléctricos. Cremer encontró que el oído puede distinguir entre impulsos sonoros separados por 50 ms. Se estima que el período crítico subjetivo de las reflexiones tempranas está entre 33 a 95 ms, el cual es muy importante en la percepción subjetiva del campo sonoro en un espacio cerrado.

Las razones temporales de energía comparan los niveles de energía acústica del pulso sonoro en períodos discretos de energía. Esta categoría se puede subdividir en tres, que son:

1. Razón de nivel de energía temprana a total ( $ET_t$ ), compara los niveles de energía en la parte inicial de la respuesta impulsiva (típicamente entre los primeros 50 u 80 ms), con el nivel de energía total. El parámetro “*Deutlichkeit*” (distinción), definido por Thiele [10] en 1953, constituyó la base para estas mediciones. Se define como:

$$ET_t = \frac{E(0, t)}{E(0, \infty)} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right] dB$$

donde “t” toma usualmente valores entre 30 y 250 ms.

2. Claridad (Clarity) o Razón de nivel de energía temprana a tardía (Early to late sound energy ratio) ( $EL_t$ ,  $C_t$ ), se describe como la definición del sonido; subjetivamente representa la habilidad de percibir detalles musicales o el grado de separación de las notas en el tiempo. Se define como:

$$C_t = \frac{E(0, t)}{E(t, \infty)} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^t h^2(t) dt}{\int_t^{\infty} h^2(t) dt} \right] dB$$

Compara los niveles de energía en la parte inicial de la respuesta impulsiva, con el nivel de energía de la parte final de la misma. Beranek [11] considera que debe tomarse “t” entre 20 y 200 ms con una resolución de 5 o 10 ms en bandas por octavas. Cuando no se necesita un estudio detallado, el tiempo “t” toma los valores de 50 y 80 ms, y en este caso la medición se realiza sin filtrado.

3. Razón de energía lateral temprana a total (Lateral early fraction) (LF), intenta determinar la fracción de energía temprana que llega en ángulos laterales, comparada con la energía que llega en forma directa a la posición del oyente. Barron [13] demostró que la *impresión espacial (spatial impression, spaciousness)* está relacionada con la razón de energía lateral y definida como “temprana” en los 80 ms posteriores a la llegada del sonido directo. Se define como:

$$LF = \frac{E_L(0, 80ms)}{E(0, 80ms)} 10 \log \left[ \frac{\int_0^{0.08} h_L^2(t) dt}{\int_0^{0.08} h^2(t) dt} \right] dB$$

donde “ $h_L$ ” es la presión sonora medida por un micrófono con un patrón de directividad de tipo  $\cos(\theta)$ .

4. Intervalo de tiempo de demora inicial (Initial time delay gap) ( $t_i$ ), es el tiempo transcurrido entre el arribo del sonido directo y la primera reflexión en el punto de medición. La primera reflexión cuya amplitud esté en el intervalo de  $\pm 10$  dB con respecto a la amplitud del sonido directo, será la que dará el valor de “ $t_i$ ”. Este tiempo puede leerse de la gráfica del cuadrado de la presión (o de su logaritmo) en función del tiempo, de forma directa.
5. Tiempo Central (Center Time) ( $t_s$ ), es el centro de gravedad del reflectograma. Se define como:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} ms$$

El *tiempo central* está relacionado con la *claridad*, ya que para grandes valores de “ $t_s$ ” (mayores a 200ms) se obtendrán valores de *claridad* inaceptables.

#### 4.4.4 Mediciones de decaimiento de energía

Muestran la razón de decaimiento del sonido emitido por la fuente luego de que cesa su emisión. La curva de decaimiento de energía se define como:

$$IRT(t) = \frac{E(t, \infty)}{E(0, \infty)} = 10 \log \left[ \frac{\int_t^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right] dB$$

En el caso ideal esta “curva” debe corresponder a una línea recta, de manera que presente una sola pendiente. En la realidad las curvas de decaimiento difieren mucho de tener una sola pendiente y por lo general debido al ruido de fondo (siempre presente en toda medición), se obtienen decaimientos de 25 a 30 dB típicos.

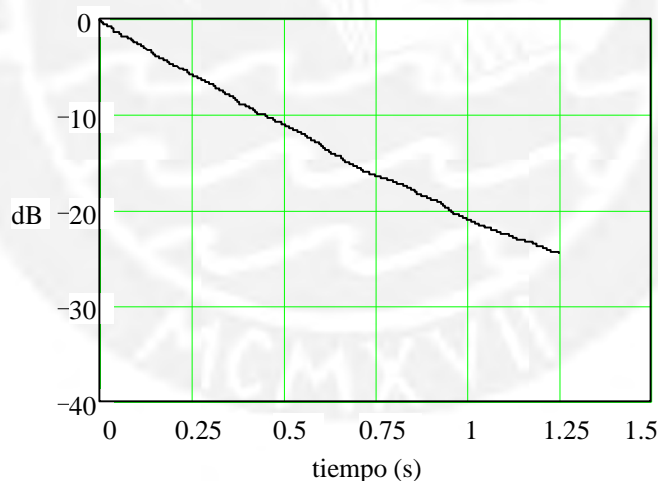
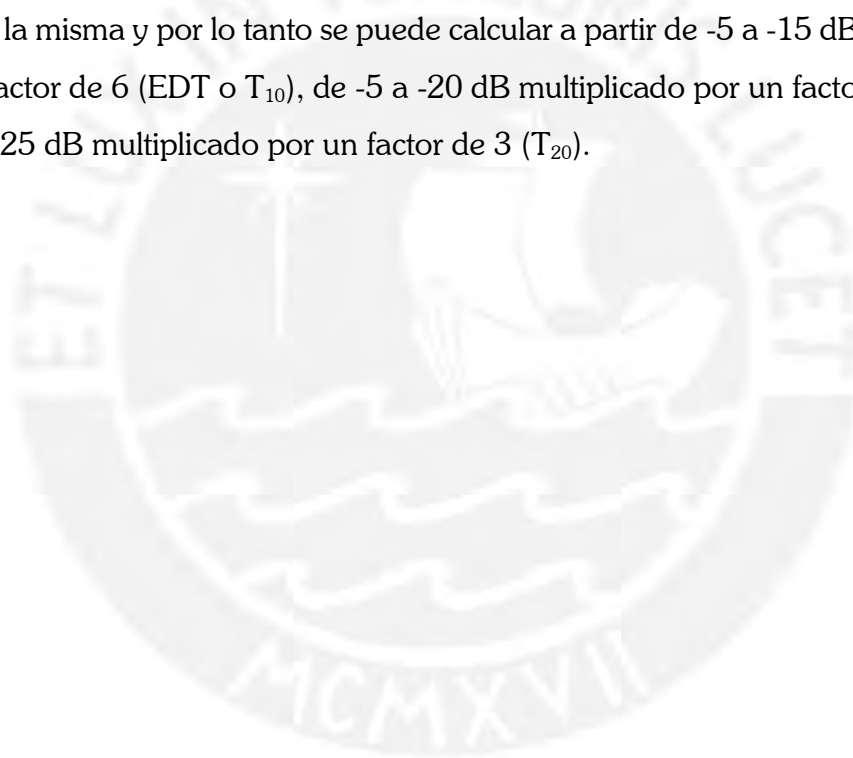


Figura 4.7: Curva de decaimiento de energía típica para un recinto.

La figura 4.7 corresponde a una curva de decaimiento para una posición en el Auditorio de Física, objeto de estudio. Se puede observar que no se llega a tener un decaimiento de 30 dB, este valor se denomina *relación señal a ruido* (S/N) (S/N ratio).

El método de Schroeder [14] ha sido utilizado para determinar la curva de decaimiento y es ampliamente utilizado hoy en día. A partir de la curva generada se calculan los siguientes parámetros:

1. Tiempo de decaimiento temprano (Early Decay Time) (EDT), es el tiempo para que el nivel de presión sonora decaiga de 0 a -10 dB, multiplicado por un factor de 6.
2. Tiempo de reverberación (Reverberation Time) (RT, T, T<sub>60</sub>), es el tiempo de reverberación clásico; el cual se define como el tiempo para que el nivel de presión sonora decaiga de -5 a -35 dB multiplicado por un factor de 2. Cuando la relación S/N no es suficiente, como ocurre en la figura 4.7, se asume que la pendiente de la curva es la misma y por lo tanto se puede calcular a partir de -5 a -15 dB multiplicado por un factor de 6 (EDT o T<sub>10</sub>), de -5 a -20 dB multiplicado por un factor de 4 (T<sub>15</sub>) o de -5 a -25 dB multiplicado por un factor de 3 (T<sub>20</sub>).



#### 4.4.5 Mediciones de la curva de energía acumulada

En la cual se observa la transferencia de la energía emitida hacia la posición del micrófono en función del tiempo. La *curva de energía acumulada* (*Build Up curve*) se define como la gráfica de  $ET_t$  vs.  $t$ , de ella se puede obtener:

1. Tiempo de incremento hasta 3 dB antes del nivel asintótico final de la curva de energía acumulada ( $t_3$ ). Es el intervalo de tiempo en el cual ha llegado a la posición del oyente la mitad de toda la energía sonora del pulso (Jordan [12], 1977).
2. Tiempo de incremento hasta 5dB antes del nivel asintótico final de la curva de energía acumulada ( $t_5$ ).

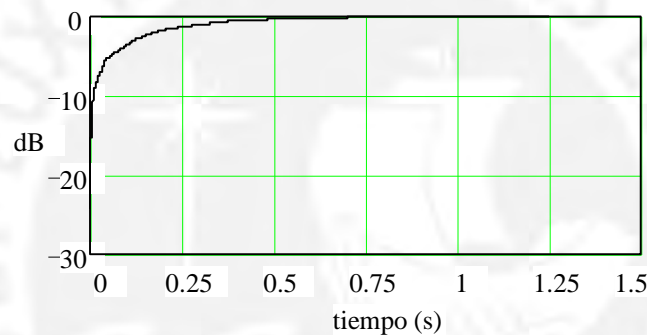


Figura 4.8: Curva de energía acumulada típica para un recinto.

Ambos tiempos tienen la ventaja sobre las razones temporales de energía que éstos no están afectados por una reflexión de mucha amplitud que llegue justo antes ó después de un tiempo arbitrario (tal como una reflexión de gran amplitud que llega en el instante  $t = 51$  ms, cuando se calcula el índice de claridad a 50 ms).



#### 4.4.6 Parámetros Objetivos de Evaluación elegidos

Una evaluación objetiva requiere la medición de un número mínimo de parámetros en el modelo, pues es una manera conveniente de comparar la acústica de diferentes modelos, o diferentes auditorios, y estos son utilizados extensivamente en la práctica. Todas las mediciones objetivas usuales son calculadas a partir de la respuesta de energía y no a partir de la respuesta impulsiva. Esta evaluación objetiva no requiere una fuente que genere un pulso ideal pero si una fuente que sea omnidireccional. En la práctica se ha encontrado que no es necesario ecualizar la respuesta de la fuente si se realiza la medición por bandas en octavas [15].

Una investigación exhaustiva en los últimos 20 años [1], ha conducido a la práctica corriente de calificar la acústica de un auditorio mediante cuatro grandes grupos de parámetros o criterios. Estos grupos son descritos de la mejor forma en términos de los atributos subjetivos relacionados: sonoridad (loudness), claridad (clarity), reverberancia (reverberance) e impresión espacial (spatial impression). Este último grupo está relacionado con la distribución espacial del sonido y requiere micrófonos direccionales (o el arreglo equivalente realizado con micrófonos omnidireccionales o, preferiblemente, el posicionamiento secuencial de un micrófono en combinación con ondas sonoras coherentes), no disponibles aún para modelos a escala.

Los otros grupos contienen parámetros que pueden ser medidos mediante un solo micrófono omnidireccional.

<b>Atributos subjetivos</b>	<b>Parámetros Objetivos</b>	<b>Símbolo</b>
Sonoridad (loudness)	nivel estado estacionario	L
Claridad (clarity)	claridad a 50 ms, claridad a 80 ms	C <sub>50</sub> , C <sub>80</sub>
Reverberación (reverberance)	tiempo de reverberación	IRT(t)
	tiempo de decaimiento temprano	EDT

Tabla 4.1: Parámetros acústicos para la evaluación objetiva y sus atributos subjetivos relacionados.



Símbolo	Definición
L	$L = 10 \log \left[ \int_0^{\infty} h^2(t) dt \right] dB$
IRT(t)	T20 por regresión lineal en la curva $IRT(t) = 10 \log \left[ \int_t^{\infty} h^2(t) dt \right] dB$ de -5 a -25 dB re: IRT(0) *
$t_s$	$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} ms$
$C_{50}$	$C_{50} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^{0.05} h^2(t) dt}{\int_{0.05}^{\infty} h^2(t) dt} \right] dB$
$C_{80}$	$C_{80} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^{0.08} h^2(t) dt}{\int_{0.08}^{\infty} h^2(t) dt} \right] dB$
EDT	EDT por regresión lineal de 0 a -10 dB de la curva IRT(t) re: IRT(0) *

Tabla 4.2: Parámetros acústicos seleccionados para la evaluación objetiva.

\*El valor de 0 dB corresponde a IRT(0) en la gráfica de IRT(t) vs t

# Capítulo 5

## OBJETOS DE ESTUDIO

### 5.1 Cuarto a escala real

Se eligió como objeto de estudio el Auditorio de Física. Las principales razones que llevaron a tomar esta elección son:

- Disponibilidad casi permanente.
- Traslado de los equipos del laboratorio para las mediciones.
- Presencia de múltiples defectos acústicos. Una vez implementada la técnica de simulación se realizará una propuesta de diseño acústico. Este auditorio es utilizado principalmente como aula de dictado de clase.

### 5.2 Modelo a escala

La herramienta indispensable para llevar a cabo el proyecto de investigación, y la que ha demandado más tiempo, ha sido el modelo a escala. Se construyó una maqueta, a escala 1:10 ( $S=1/10$ ), del Auditorio de Física, utilizando materiales que simulen el comportamiento acústico de la edificación real. La maqueta está hecha con trupan de 18 mm de espesor, sus dimensiones son aproximadamente 1,80 m x 1,00 m x 0,60 m, se encuentra en el Laboratorio de Acústica de la Sección Física.

# Capítulo 6

## APLICACION

### 6.1 Medición de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física

Con la finalidad de utilizar la técnica de medición de la respuesta impulsiva por el método de Schroeder [14] se decidió realizar mediciones en el Auditorio de Física durante los meses de febrero y marzo de 1995. Estas correspondieron a:

- Medición de tiempo de reverberación (RT) y tiempo de decaimiento inicial (EDT) mediante el método convencional de registro gráfico de la curva de decaimiento de energía.
- Medición de la respuesta impulsiva por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente.
- Medición de la respuesta impulsiva por el método de Schroeder utilizando pulsos generados por explosión de globos.

Las mediciones fueron realizadas por bandas de una octava (1/1 octava) y por bandas de un tercio de octava (1/3 octava). En la tabla 6.1 se muestran las frecuencias centrales seleccionadas para las mediciones en cada banda y en la tabla 6.2 se muestran las bandas elegidas para cada método de medición:

<b>banda</b>	<b>frecuencias centrales de cada banda (Hz)</b>
1/1 octava	125, 250, 500, 1k, 2k, 4k y 8k
1/3 octava	63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1,25k, 1,6k, 2k, 2,5k, 3,15k, 4k, 5k, 6,3k y 8k

Tabla 6.1: Frecuencias seleccionadas para cada banda.

Se realizaron cuatro mediciones para cada frecuencia central de cada banda (1/1 octava y 1/3 octava) para los tres métodos en cada una de las posiciones elegidas. Los resultados finales se resumen en bandas de octavas para una posterior comparación con el modelo a escala.

método	medición	
	bandas de 1/1 octava	bandas de 1/3 octava
registro gráfico	si	si
Schroeder (globos)	si	si
Schroeder (pulsos)	si	si

Tabla 6.2: Selección de bandas de medición para cada método.

método	Parámetro				
	EDT	RT	C <sub>50</sub>	C <sub>80</sub>	t <sub>s</sub>
registro gráfico	si	si	no*	no*	no*
Schroeder (globos)	si	si	si	si	si
Schroeder (pulsos)	si	si </td <td>si</td> <td>si</td> <td>si</td>	si	si	si

\* calculables indirectamente

Tabla 6.3: Relación entre los métodos de medición y el cálculo de los parámetros objetivos seleccionados.

La figura 6.1 muestra la vista en planta del Auditorio de Física con las posiciones (1, 2, 3 y 4) donde fue colocado el micrófono para los tres métodos de medición utilizados. Las cuales describen las posiciones de los oyentes y un orador para un programa en el Auditorio.

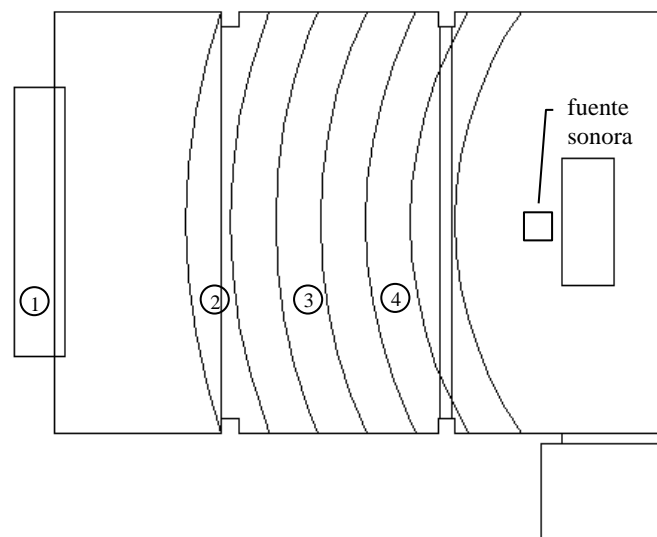


Figura 6.1: Posiciones del micrófono y fuente sonora en el Auditorio de Física.

### 6.1.1 Instrumental utilizado

El equipo utilizado para las mediciones fue proporcionado por el Laboratorio de Acústica de la Sección Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú y consistió en:

- analizador de FFT de dos canales (B&K 2035)
- sonómetro integrador de precisión (B&K 2233)
- micrófono de 1/2 pulgada (B&K 4155)
- registrador gráfico (B&K 2306)
- filtro por octavas (1/1) (B&K 1613)
- filtro por tercios de octava (1/3) (B&K 1625)
- filtro por tercios de octava (1/3) (B&K 1616)
- caja acústica (JBL SR4732A) utilizada como fuente sonora

### 6.1.2 Esquemas de las mediciones realizadas

Un esquema del proceso de mediciones es mostrado en las figuras 6.2 a 6.4 La figura 6.2 corresponde al esquema de la medición de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física mediante pulsos, la figura 6.3 muestra el esquema para la medición de la respuesta impulsiva mediante explosión de globos y finalmente la figura 6.4 muestra el esquema de la medición del tiempo de reverberación utilizando el método gráfico.

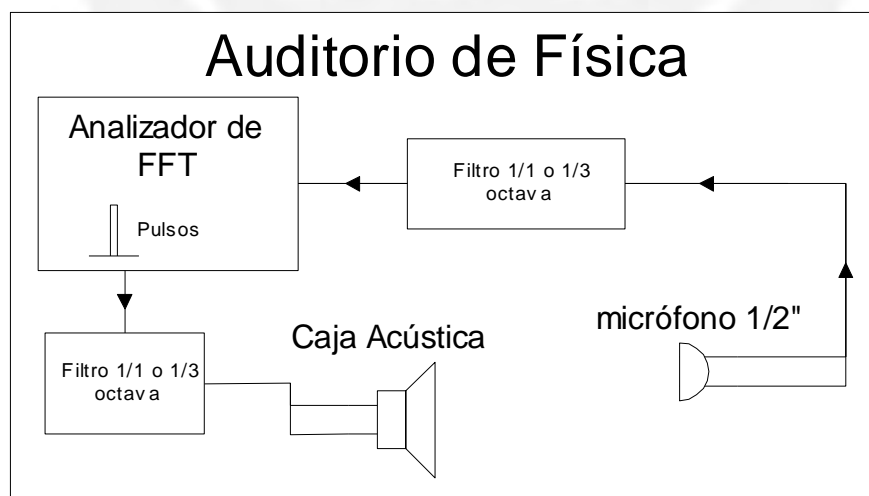


Figura 6.2: Esquema de medición de la respuesta impulsiva mediante pulsos generados electrónicamente en el Auditorio de Física.

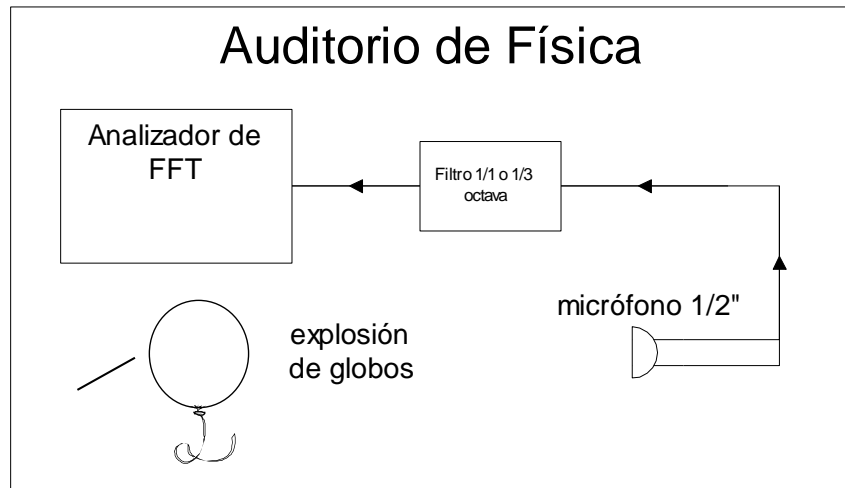


Figura 6.3: Esquema de medición de la respuesta impulsiva en el Auditorio de Física mediante pulsos generados por explosión de globos.

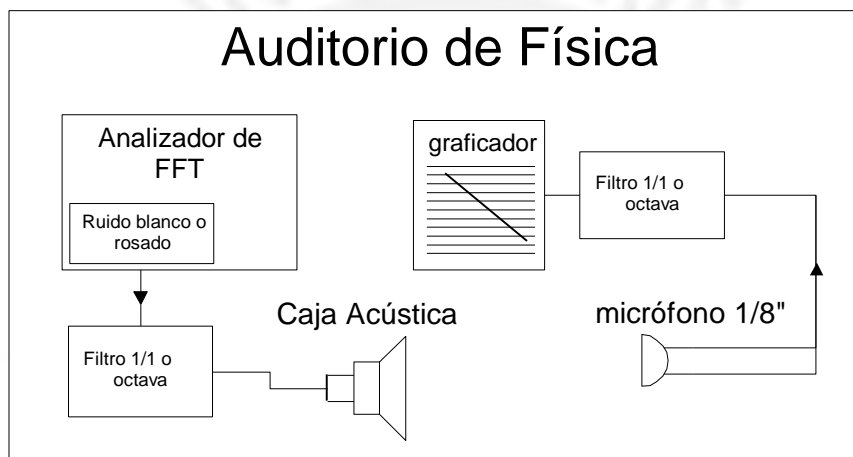


Figura 6.4: Esquema de medición del tiempo de reverberación por el método gráfico en el Auditorio de Física.

### 6.1.3 Desarrollo del software para el procesamiento de datos

Paralelamente a la obtención de datos en el Auditorio de Física, se desarrolló un software que permitió procesar las señales medidas mediante ambas técnicas.

Los parámetros calculados por este programa fueron:

- tiempo de decaimiento temprano (EDT)
- tiempo de reverberación (RT)
- claridad a 50 ms ( $C_{50}$ )
- claridad a 80 ms ( $C_{80}$ )
- tiempo central ( $t_s$ )



## 6.2 Cálculo de parámetros objetivos a partir de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física

Los valores de EDT, RT,  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  y  $t_s$  para un local se calculan tomando el promedio de los valores medios en todas las posiciones en las cuales fue efectuada la medición. Los resultados mostrados a continuación están resumidos en octavas para su posterior comparación con los datos medidos en el modelo a escala.

### 6.2.1 Medición por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
valor medio	3,56	5,03	3,67	3,69	2,99	2,31	1,49
posición 1	3,56	5,03	3,67	3,69	2,99	2,31	1,49
posición 2	4,45	4,39	3,58	3,39	2,87	2,22	1,46
posición 3	4,44	4,42	3,51	3,38	2,77	2,27	1,51
posición 4	5,07	4,39	3,54	3,37	2,81	2,21	1,34
<b>promedio</b>	<b>4,38</b>	<b>4,56</b>	<b>3,57</b>	<b>3,48</b>	<b>2,86</b>	<b>2,25</b>	<b>1,45</b>

Tabla 6.4: Valores finales de EDT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	0,08	0,58	0,29	0,07	0,16	0,02	0,05
posición 1	0,08	0,58	0,29	0,07	0,16	0,02	0,05
posición 2	0,21	0,33	0,32	0,27	0,07	0,04	0,12
posición 3	0,45	0,37	0,46	0,03	0,13	0,07	0,10
posición 4	0,58	0,39	0,17	0,12	0,00	0,11	0,04
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,33</b>	<b>0,42</b>	<b>0,31</b>	<b>0,12</b>	<b>0,09</b>	<b>0,06</b>	<b>0,08</b>

Tabla 6.5: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de EDT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
valor promedio	4,38	4,56	3,57	3,48	2,86	2,25	1,45
$\sigma$ promedio	0,33	0,42	0,31	0,12	0,09	0,06	0,08
<b>% error</b>	<b>7,53</b>	<b>9,21</b>	<b>8,68</b>	<b>3,45</b>	<b>3,15</b>	<b>2,67</b>	<b>5,52</b>

Tabla 6.6: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de EDT por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
RT posición 1	5,61	4,30	3,43	3,49	2,93	2,27	1,58
RT posición 2	4,95	4,55	3,51	3,49	2,90	2,18	1,44
RT posición 3	4,92	4,27	3,39	3,51	3,01	2,17	1,45
RT posición 4	5,35	4,39	3,46	3,47	2,97	2,17	1,43
<b>promedio</b>	<b>5,21</b>	<b>4,38</b>	<b>3,45</b>	<b>3,49</b>	<b>2,95</b>	<b>2,20</b>	<b>1,47</b>

Tabla 6.7: Valores finales de RT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	0,22	0,15	0,15	0,09	0,09	0,04	0,05
posición 2	0,16	0,13	0,31	0,13	0,03	0,08	0,09
posición 3	0,33	0,21	0,18	0,08	0,12	0,14	0,09
posición 4	0,48	0,17	0,23	0,20	0,01	0,08	0,11
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,30</b>	<b>0,17</b>	<b>0,22</b>	<b>0,13</b>	<b>0,06</b>	<b>0,09</b>	<b>0,09</b>

Tabla 6.8: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de RT para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	5,21	4,38	3,45	3,49	2,95	2,20	1,47
$\sigma$ promedio	0,30	0,17	0,22	0,13	0,06	0,09	0,09
<b>% error</b>	<b>5,76</b>	<b>3,88</b>	<b>6,38</b>	<b>3,72</b>	<b>2,03</b>	<b>4,09</b>	<b>6,12</b>

Tabla 6.9: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de RT por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
$C_{50}$ posición 1	-7,6	-11,3	-9,5	-6,8	-5,3	-4,1	-2,0
$C_{50}$ posición 2	-7,6	-9,3	-8,2	-8,9	-4,7	-3,9	-2,2
$C_{50}$ posición 3	-5,1	-8,4	-6,8	-7,3	-6,3	-4,2	-1,6
$C_{50}$ posición 4	-6,6	-8,1	-9,6	-5,6	-5,6	-4,1	-0,9
<b>promedio</b>	<b>-6,7</b>	<b>-9,3</b>	<b>-8,5</b>	<b>-7,1</b>	<b>-5,5</b>	<b>-4,1</b>	<b>-1,7</b>

Tabla 6.10: Valores finales de  $C_{50}$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	1,2	2,4	1,5	1,8	0,1	0,4	0,1
posición 2	2,2	1,4	0,5	0,5	0,1	0,4	0,1
posición 3	2,0	4,8	1,5	1,7	0,1	0,4	0,1
posición 4	0,6	1,6	1,4	1,6	0,1	0,4	0,1
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>1,5</b>	<b>2,6</b>	<b>1,2</b>	<b>1,4</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>0,1</b>

Tabla 6.11: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $C_{50}$  para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	-6,7	-9,3	-8,5	-7,1	-5,5	-4,1	-1,7
$\sigma$ promedio	1,5	2,6	1,2	1,4	0,5	0,4	0,1
<b>% error</b>	<b>22,4</b>	<b>28,0</b>	<b>14,1</b>	<b>19,7</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>

Tabla 6.12: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de  $C_{50}$  por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
$C_{80}$ posición 1	-5,7	-9,7	-5,7	-3,8	-3,1	-1,6	0,7
$C_{80}$ posición 2	-5,0	-6,9	-5,5	-6,9	-2,5	-1,9	0,5
$C_{80}$ posición 3	-3,6	-5,1	-5,6	-4,0	-3,7	-2,0	0,6
$C_{80}$ posición 4	-4,8	-5,7	-7,4	-3,8	-3,3	-1,8	2,8
<b>promedio</b>	<b>-4,8</b>	<b>-6,9</b>	<b>-6,1</b>	<b>-4,6</b>	<b>-3,2</b>	<b>-1,8</b>	<b>1,2</b>

Tabla 6.13: Valores finales de  $C_{80}$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	1,2	1,7	1,9	0,8	0,3	0,1	0,1
posición 2	1,3	0,9	1,0	0,6	0,3	0,1	0,1
posición 3	1,2	1,1	1,6	0,5	0,3	0,1	0,1
posición 4	1,5	1,3	1,5	0,4	0,3	0,1	0,1
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla 6.14: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $C_{80}$  para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	-4,8	-6,9	-6,1	-4,6	-3,2	-1,8	1,2
$\sigma$ promedio	1,3	1,3	1,5	0,6	0,3	0,1	0,1
<b>% error</b>	<b>27,1</b>	<b>18,8</b>	<b>24,6</b>	<b>13,0</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>

Tabla 6.15: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de  $C_{80}$  por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$t_s$	frecuencia (Hz)						
valor medio	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$t_s$ posición 1	279	400	278	264	212	163	108
$t_s$ posición 2	318	349	276	278	204	158	105
$t_s$ posición 3	269	309	262	242	212	162	103
$t_s$ posición 4	348	331	262	234	206	154	77
<b>promedio</b>	<b>304</b>	<b>347</b>	<b>270</b>	<b>255</b>	<b>209</b>	<b>159</b>	<b>98</b>

Tabla 6.16: Valores finales de  $t_s$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$t_s$	frecuencia (Hz)						
$\sigma$	125	250	500	1k	2k	4k	8k
posición 1	13	43	20	15	7	7	4
posición 2	22	20	3	13	10	10	12
posición 3	55	21	34	7	10	6	2
posición 4	71	15	30	1	18	8	0
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>40</b>	<b>25</b>	<b>22</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>5</b>

Tabla 6.17: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $t_s$  para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$t_s$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	304	347	270	255	209	159	98
$\sigma$ promedio	40	25	22	9	11	8	5
<b>% error</b>	<b>13</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>

Tabla 6.18: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de  $t_s$  por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

## 6.2.2 Medición por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
valor medio	4,00	4,50	3,26	3,31	2,92	2,10	1,26
posición 1	4,00	4,50	3,26	3,31	2,92	2,10	1,26
posición 2	4,65	4,53	3,61	3,59	2,89	2,29	1,33
posición 3	4,38	4,37	3,65	3,61	2,94	2,35	1,35
posición 4	4,75	4,26	3,60	3,54	2,98	2,32	1,44
<b>promedio</b>	<b>4,45</b>	<b>4,42</b>	<b>3,53</b>	<b>3,51</b>	<b>2,93</b>	<b>2,27</b>	<b>1,35</b>

Tabla 6.19: Valores finales de EDT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
posición 1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
posición 2	0,46	0,23	0,23	0,22	0,03	0,07	0,14
posición 3	0,62	0,17	0,20	0,11	0,09	0,09	0,13
posición 4	0,31	0,20	0,17	0,18	0,10	0,20	0,04
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,35</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,13</b>	<b>0,06</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>

Tabla 6.20: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de EDT por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	4,45	4,42	3,53	3,51	2,93	2,27	1,35
$\sigma$ promedio	0,35	0,15	0,15	0,13	0,06	0,09	0,08
<b>% error</b>	<b>7,87</b>	<b>3,39</b>	<b>4,25</b>	<b>3,70</b>	<b>2,05</b>	<b>3,96</b>	<b>5,93</b>

Tabla 6.21: Porcentaje de error final en el cálculo de EDT por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente



RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
valor medio	5,35	4,88	4,73	3,67	3,29	2,14	1,09
posición 1	5,35	4,88	4,73	3,67	3,29	2,14	1,09
posición 2	5,34	4,62	3,89	3,57	3,18	2,20	1,39
posición 3	5,32	4,70	3,72	3,51	3,16	2,20	1,19
posición 4	5,38	4,57	3,83	3,61	3,10	2,27	1,30
<b>promedio</b>	<b>5,35</b>	<b>4,69</b>	<b>4,04</b>	<b>3,59</b>	<b>3,18</b>	<b>2,20</b>	<b>1,24</b>

Tabla 6.22: Valores finales de RT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01	0,01	0,01
posición 1	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01	0,01	0,01
posición 2	0,20	0,20	0,10	0,08	0,19	0,05	0,06
posición 3	0,27	0,23	0,16	0,12	0,20	0,17	0,16
posición 4	0,84	0,22	0,27	0,12	0,14	0,18	0,18
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,33</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>	<b>0,09</b>	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>

Tabla 6.23: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de RT por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	5,35	4,69	4,04	3,59	3,18	2,20	1,24
$\sigma$ promedio	0,33	0,17	0,14	0,09	0,14	0,10	0,10
<b>% error</b>	<b>6,16</b>	<b>3,62</b>	<b>3,47</b>	<b>2,51</b>	<b>4,40</b>	<b>4,55</b>	<b>8,06</b>

Tabla 6.24: Porcentaje de error final en el cálculo de RT por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	-7,3	-7,8	-7,7	-9,7	-1,2	-1,9	-0,5
posición 2	-8,9	-7,3	-7,9	-7,6	-5,0	-3,7	-0,5
posición 3	-7,6	-6,9	-6,8	-7,2	-6,3	-3,1	-0,8
posición 4	-4,8	-6,8	-6,7	-6,3	-6,6	-3,4	-0,9
<b>promedio</b>	<b>-7,2</b>	<b>-7,2</b>	<b>-7,3</b>	<b>-7,7</b>	<b>-4,8</b>	<b>-3,0</b>	<b>-0,7</b>

Tabla 6.25: Valores finales de  $C_{50}$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
posición 2	0,0	0,1	0,7	1,2	0,4	0,8	0,0
posición 3	0,9	0,8	0,4	0,6	0,6	0,7	0,0
posición 4	1,3	1,6	0,5	0,8	0,1	0,2	0,0
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>

Tabla 6.26: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $C_{50}$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	-7,2	-7,2	-7,3	-7,7	-4,8	-3,0	-0,7
$\sigma$ promedio	0,5	0,6	0,4	0,7	0,3	0,3	0,0
<b>% error</b>	<b>6,9</b>	<b>8,3</b>	<b>5,5</b>	<b>9,1</b>	<b>6,3</b>	<b>10,0</b>	<b>0,0</b>

Tabla 6.27: Porcentaje de error final en el cálculo de  $C_{50}$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	-2,2	-6,2	-6,2	-6,5	-0,1	-1,0	4,0
posición 2	-5,4	-4,9	-5,0	-4,8	-2,7	-0,9	2,1
posición 3	-4,5	-5,0	-4,5	-4,3	-3,8	-1,2	3,0
posición 4	-3,3	-4,4	-4,1	-3,7	-4,6	-1,3	1,5
<b>promedio</b>	<b>-3,9</b>	<b>-5,1</b>	<b>-5,0</b>	<b>-4,8</b>	<b>-2,8</b>	<b>-1,1</b>	<b>2,7</b>

Tabla 6.28: Valores finales de  $C_{80}$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,2	0,1	0,2
posición 2	0,7	0,3	0,8	0,4	0,2	0,1	0,2
posición 3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2
posición 4	0,3	1,1	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>

Tabla 6.29: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $C_{80}$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	-3,9	-5,1	-5,0	-4,8	-2,8	-1,1	2,7
$\sigma$ promedio	0,4	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2
<b>% error</b>	<b>10,3</b>	<b>9,8</b>	<b>8,0</b>	<b>8,3</b>	<b>7,1</b>	<b>9,1</b>	<b>7,4</b>

Tabla 6.30: Porcentaje de error final en el cálculo de  $C_{80}$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$t_s$	frecuencia (Hz)						
valor medio	125	250	500	1k	2k	4k	8k
posición 1	266	349	279	270	170	133	66
posición 2	340	310	269	259	204	155	90
posición 3	316	315	270	255	220	153	75
posición 4	308	292	261	255	226	156	89
<b>promedio</b>	<b>308</b>	<b>317</b>	<b>270</b>	<b>260</b>	<b>205</b>	<b>149</b>	<b>80</b>

Tabla 6.31: Valores finales de  $t_s$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$t_s$	frecuencia (Hz)						
$\sigma$	125	250	500	1k	2k	4k	8k
posición 1	1	1	0	1	0	0	0
posición 2	22	27	23	17	5	11	16
posición 3	37	5	6	9	10	11	9
posición 4	41	11	13	7	4	27	3
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>25</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>7</b>

Tabla 6.32: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $t_s$  para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$t_s$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	308	317	270	260	205	149	80
$\sigma$ promedio	25	11	11	9	5	12	7
<b>% error</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>9</b>

Tabla 6.33: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de  $t_s$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

### 6.2.3 Método gráfico

Por estudios previos [18] se sabe que los valores de EDT y RT tienen un error de 10% al ser calculados a partir del método gráfico para una misma frecuencia.

<b>EDT</b>	<b>frecuencia (Hz)</b>						
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	2,09	3,07	2,77	3,00	2,50	1,90	1,22
posición 2	4,35	3,52	3,22	3,07	2,55	2,23	1,27
posición 3	3,30	4,17	3,41	3,10	2,64	2,20	1,19
posición 4	3,26	3,20	2,95	2,95	2,69	1,92	1,35
<b>promedio</b>	<b>3,25</b>	<b>3,49</b>	<b>3,15</b>	<b>3,03</b>	<b>2,60</b>	<b>2,06</b>	<b>1,26</b>

Tabla 6.34: Valores finales de EDT para las cuatro posiciones por el método gráfico

<b>RT</b>	<b>frecuencia (Hz)</b>						
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	4,25	4,25	3,33	3,31	2,78	2,22	1,41
posición 2	4,55	4,60	3,50	3,50	2,55	2,23	1,27
posición 3	4,71	4,17	3,63	3,54	2,94	2,28	1,37
posición 4	5,00	3,85	3,51	3,41	2,85	2,34	1,35
<b>promedio</b>	<b>4,63</b>	<b>4,22</b>	<b>3,49</b>	<b>3,44</b>	<b>2,78</b>	<b>2,27</b>	<b>1,35</b>

Tabla 6.35: Valores finales de RT para las cuatro posiciones por el método gráfico



## 6.2.4 Resultados Finales

Se muestran a continuación los resultados obtenidos para los parámetros antes mencionados de las mediciones en el Auditorio de Física:

- Tiempo de Decaimiento temprano (EDT)

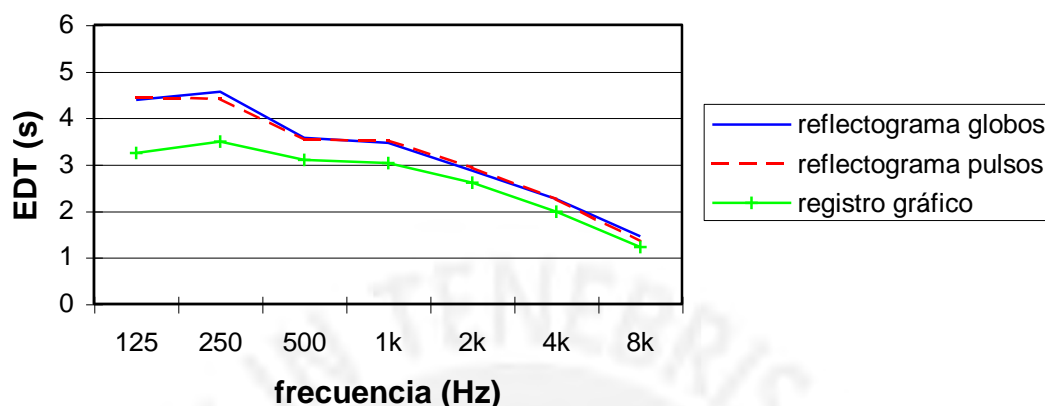


Figura 6.5: Valores finales de EDT para los tres métodos

Se observa que para las frecuencias entre 125 y 500 Hz la medición a partir del registro gráfico difiere de los obtenidos por los otros dos métodos alrededor de 30%, lo cual es un error considerable. Esta es una de las razones por las cuales el método de Schroeder es tan aplicado, estas discrepancias son debidas a las fluctuaciones de la pendiente obtenida en el registrador gráfico y ocurre a bajas frecuencias (aproximadamente hasta 500 Hz) sobre todo debido a la presencia de ondas estacionarias en el recinto. Por ello el error va disminuyendo a medida que la frecuencia aumenta.

- Tiempo de reverberación (RT)

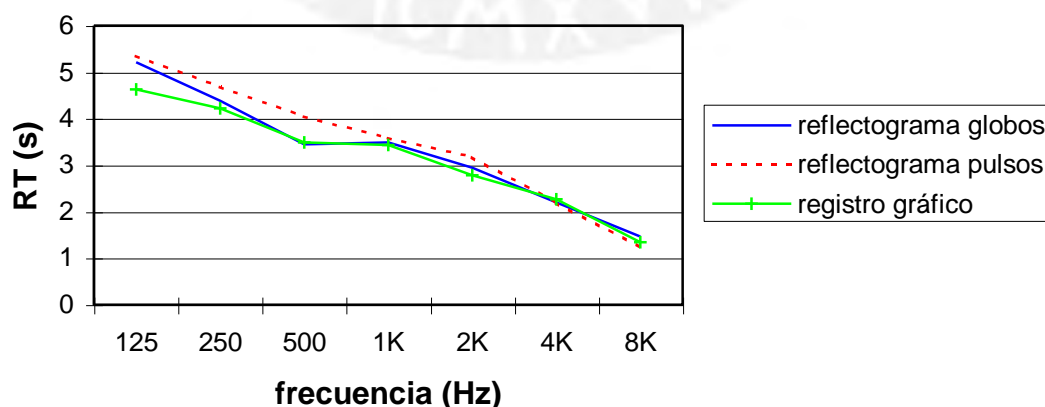


Figura 6.6: Valores finales de RT para los tres métodos.

En este caso se observa un comportamiento similar al caso anterior, pero en menor grado. Esto es debido a que para el cálculo del valor de RT se tiene una variación en dB mayor que para el cálculo de EDT por lo tanto el error cometido en el cálculo de la pendiente es menor y en el mejor de los casos desaparece al aumentar la frecuencia.

- Claridad a 50 ms

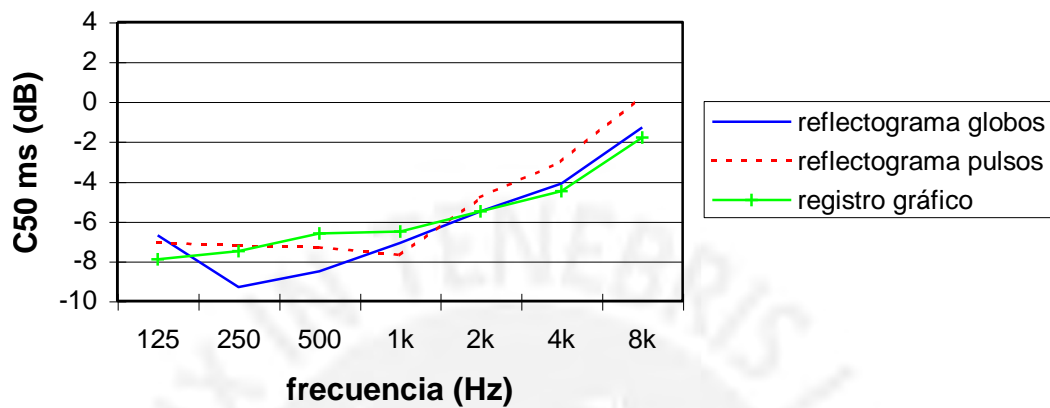


Figura 6.7: Valores finales de  $C_{50}$  para los tres métodos

- Claridad a 80 ms

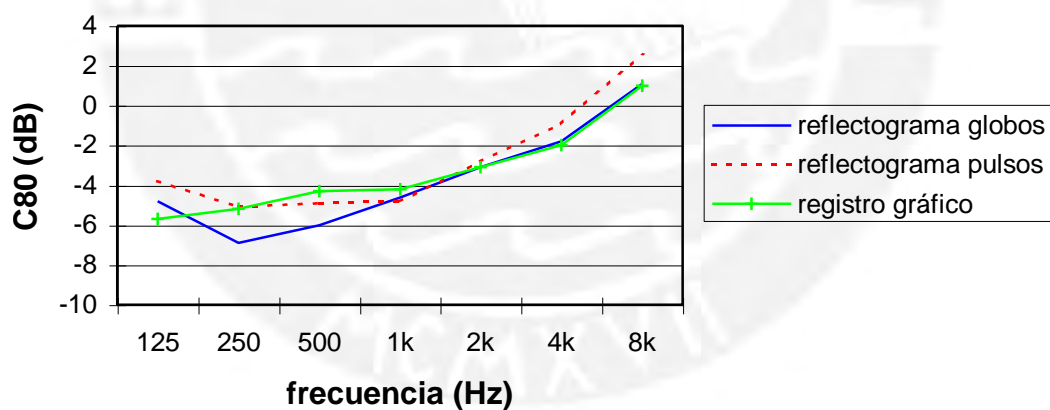


Figura 6.8: Valores finales de  $C_{80}$  para los tres métodos

Según la tabla 6.3 no es posible calcular la claridad a 50 ms, la claridad a 80 ms y el tiempo central a partir del método gráfico, pero se puede hacer un cálculo indirecto de ellos a partir del tiempo de reverberación [17] (ver anexo B). Este cálculo consiste en asumir un decaimiento puramente exponencial de la presión sonora en el recinto.

Se sabe que si un campo sonoro es difuso la presión sonora debe decaer

exponencialmente y esto es precisamente lo que se observa en el Auditorio de Física, pues los valores calculados son muy cercanos a los obtenidos por el método de Schroeder mediante pulsos y globos (las gráficas 6.6 a 6.9 lo muestran claramente), la explicación es que sus paredes son muy reflectivas (concreto) pues no tienen tratamiento acústico y los tiempos de reverberación son bastante largos. El Auditorio de Física es un excelente ejemplo de la validez de esta aproximación, pues cumple con las condiciones para ello.

- tiempo central ( $t_s$ )

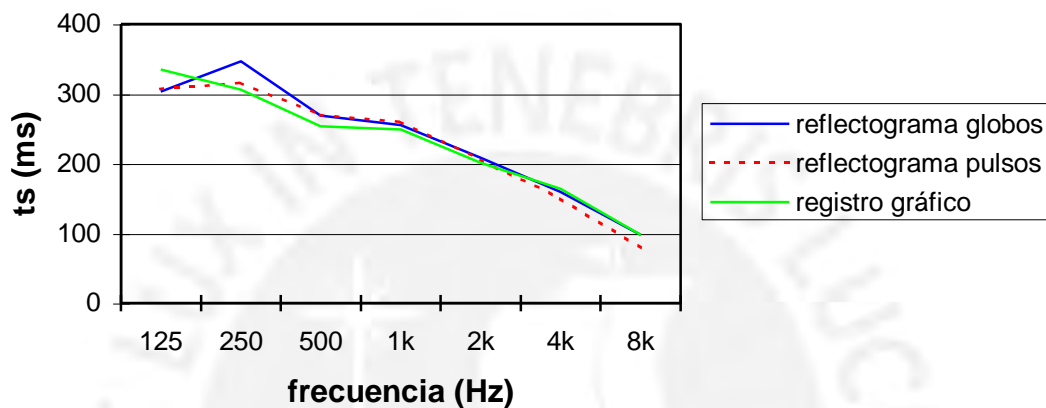


Figura 6.9: Valores finales de  $t_s$  para los tres métodos

### 6.2.5 Conclusiones

- Se logró medir la respuesta impulsiva mediante el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente y mediante la explosión de globos respectivamente.
- Se logró calcular los parámetros objetivos elegidos a partir de la respuesta impulsiva medida por el método de Schroeder.
- Los errores obtenidos en los parámetros objetivos calculados por el método de Schroeder son menores que el error típico de 10% cometido en el método gráfico.
- Este método puede utilizarse para la evaluación acústica objetiva de un recinto cualquiera, es repetible y produce valores confiables.

# Capítulo 6

## APLICACION

### 6.1 Medición de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física

Con la finalidad de utilizar la técnica de medición de la respuesta impulsiva por el método de Schroeder [14] se decidió realizar mediciones en el Auditorio de Física durante los meses de febrero y marzo de 1995. Estas correspondieron a:

- Medición de tiempo de reverberación (RT) y tiempo de decaimiento inicial (EDT) mediante el método convencional de registro gráfico de la curva de decaimiento de energía.
- Medición de la respuesta impulsiva por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente.
- Medición de la respuesta impulsiva por el método de Schroeder utilizando pulsos generados por explosión de globos.

Las mediciones fueron realizadas por bandas de una octava (1/1 octava) y por bandas de un tercio de octava (1/3 octava). En la tabla 6.1 se muestran las frecuencias centrales seleccionadas para las mediciones en cada banda y en la tabla 6.2 se muestran las bandas elegidas para cada método de medición:

<b>banda</b>	<b>frecuencias centrales de cada banda (Hz)</b>
1/1 octava	125, 250, 500, 1k, 2k, 4k y 8k
1/3 octava	63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1,25k, 1,6k, 2k, 2,5k, 3,15k, 4k, 5k, 6,3k y 8k

Tabla 6.1: Frecuencias seleccionadas para cada banda.

Se realizaron cuatro mediciones para cada frecuencia central de cada banda (1/1 octava y 1/3 octava) para los tres métodos en cada una de las posiciones elegidas. Los resultados finales se resumen en bandas de octavas para una posterior comparación con el modelo a escala.

método	medición	
	bandas de 1/1 octava	bandas de 1/3 octava
registro gráfico	si	si
Schroeder (globos)	si	si
Schroeder (pulsos)	si	si

Tabla 6.2: Selección de bandas de medición para cada método.

método	Parámetro				
	EDT	RT	C <sub>50</sub>	C <sub>80</sub>	t <sub>s</sub>
registro gráfico	si	si	no*	no*	no*
Schroeder (globos)	si	si	si	si	si
Schroeder (pulsos)	si	si	si	si	si

\* calculables indirectamente

Tabla 6.3: Relación entre los métodos de medición y el cálculo de los parámetros objetivos seleccionados.

La figura 6.1 muestra la vista en planta del Auditorio de Física con las posiciones (1, 2, 3 y 4) donde fue colocado el micrófono para los tres métodos de medición utilizados. Las cuales describen las posiciones de los oyentes y un orador para un programa en el Auditorio.

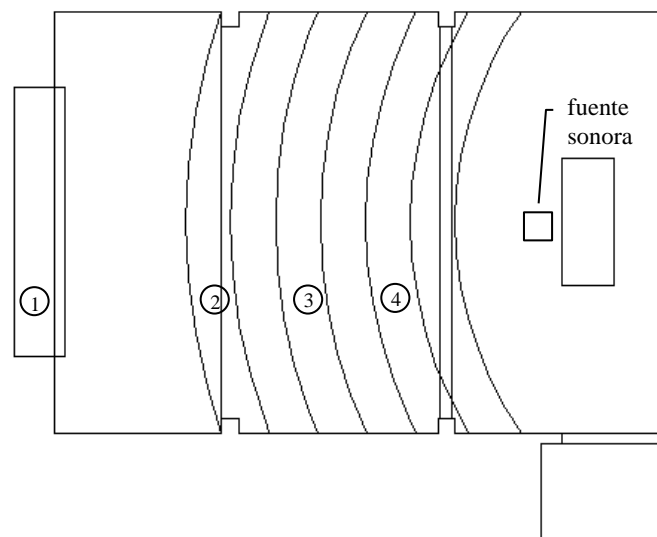


Figura 6.1: Posiciones del micrófono y fuente sonora en el Auditorio de Física.



### 6.1.1 Instrumental utilizado

El equipo utilizado para las mediciones fue proporcionado por el Laboratorio de Acústica de la Sección Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú y consistió en:

- analizador de FFT de dos canales (B&K 2035)
- sonómetro integrador de precisión (B&K 2233)
- micrófono de 1/2 pulgada (B&K 4155)
- registrador gráfico (B&K 2306)
- filtro por octavas (1/1) (B&K 1613)
- filtro por tercios de octava (1/3) (B&K 1625)
- filtro por tercios de octava (1/3) (B&K 1616)
- caja acústica (JBL SR4732A) utilizada como fuente sonora

### 6.1.2 Esquemas de las mediciones realizadas

Un esquema del proceso de mediciones es mostrado en las figuras 6.2 a 6.4 La figura 6.2 corresponde al esquema de la medición de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física mediante pulsos, la figura 6.3 muestra el esquema para la medición de la respuesta impulsiva mediante explosión de globos y finalmente la figura 6.4 muestra el esquema de la medición del tiempo de reverberación utilizando el método gráfico.

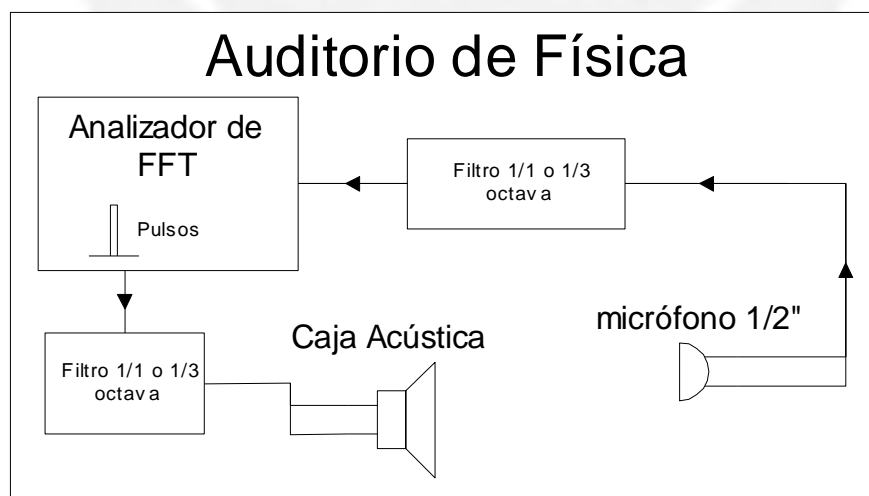


Figura 6.2: Esquema de medición de la respuesta impulsiva mediante pulsos generados electrónicamente en el Auditorio de Física.



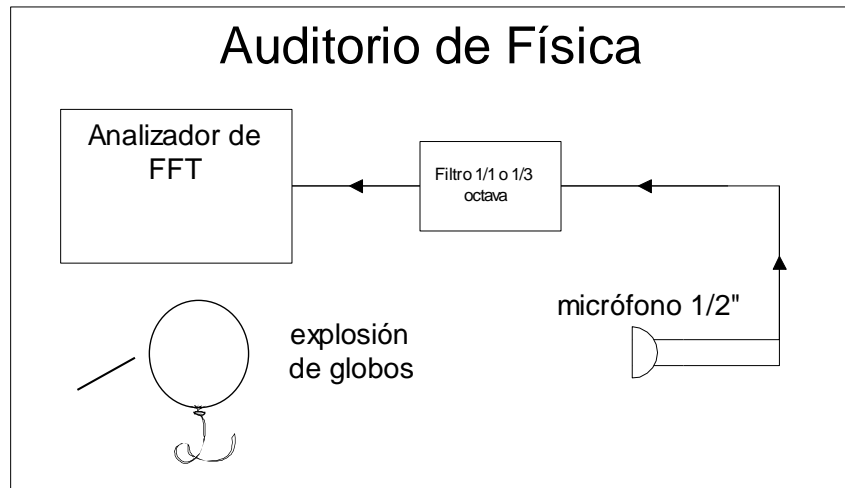


Figura 6.3: Esquema de medición de la respuesta impulsiva en el Auditorio de Física mediante pulsos generados por explosión de globos.

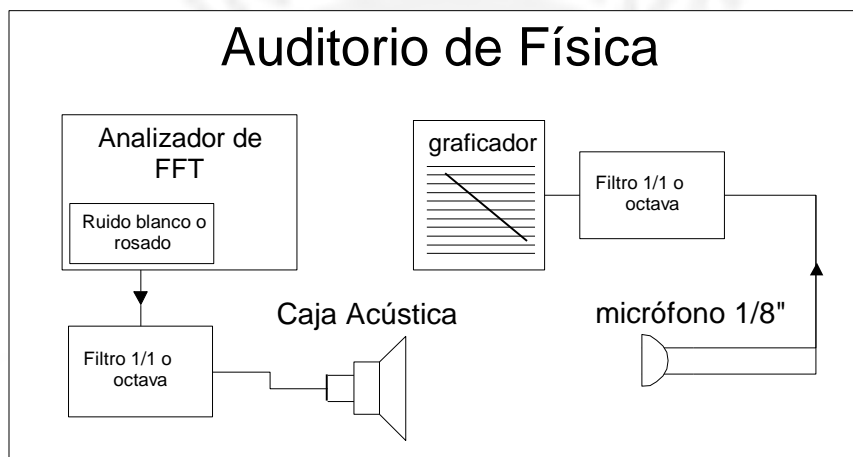


Figura 6.4: Esquema de medición del tiempo de reverberación por el método gráfico en el Auditorio de Física.

### 6.1.3 Desarrollo del software para el procesamiento de datos

Paralelamente a la obtención de datos en el Auditorio de Física, se desarrolló un software que permitió procesar las señales medidas mediante ambas técnicas.

Los parámetros calculados por este programa fueron:

- tiempo de decaimiento temprano (EDT)
- tiempo de reverberación (RT)
- claridad a 50 ms ( $C_{50}$ )
- claridad a 80 ms ( $C_{80}$ )
- tiempo central ( $t_s$ )

## 6.2 Cálculo de parámetros objetivos a partir de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física

Los valores de EDT, RT,  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  y  $t_s$  para un local se calculan tomando el promedio de los valores medios en todas las posiciones en las cuales fue efectuada la medición. Los resultados mostrados a continuación están resumidos en octavas para su posterior comparación con los datos medidos en el modelo a escala.

### 6.2.1 Medición por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
valor medio	3,56	5,03	3,67	3,69	2,99	2,31	1,49
posición 1	3,56	5,03	3,67	3,69	2,99	2,31	1,49
posición 2	4,45	4,39	3,58	3,39	2,87	2,22	1,46
posición 3	4,44	4,42	3,51	3,38	2,77	2,27	1,51
posición 4	5,07	4,39	3,54	3,37	2,81	2,21	1,34
<b>promedio</b>	<b>4,38</b>	<b>4,56</b>	<b>3,57</b>	<b>3,48</b>	<b>2,86</b>	<b>2,25</b>	<b>1,45</b>

Tabla 6.4: Valores finales de EDT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	0,08	0,58	0,29	0,07	0,16	0,02	0,05
posición 1	0,08	0,58	0,29	0,07	0,16	0,02	0,05
posición 2	0,21	0,33	0,32	0,27	0,07	0,04	0,12
posición 3	0,45	0,37	0,46	0,03	0,13	0,07	0,10
posición 4	0,58	0,39	0,17	0,12	0,00	0,11	0,04
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,33</b>	<b>0,42</b>	<b>0,31</b>	<b>0,12</b>	<b>0,09</b>	<b>0,06</b>	<b>0,08</b>

Tabla 6.5: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de EDT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
valor promedio	4,38	4,56	3,57	3,48	2,86	2,25	1,45
$\sigma$ promedio	0,33	0,42	0,31	0,12	0,09	0,06	0,08
<b>% error</b>	<b>7,53</b>	<b>9,21</b>	<b>8,68</b>	<b>3,45</b>	<b>3,15</b>	<b>2,67</b>	<b>5,52</b>

Tabla 6.6: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de EDT por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
RT posición 1	5,61	4,30	3,43	3,49	2,93	2,27	1,58
RT posición 2	4,95	4,55	3,51	3,49	2,90	2,18	1,44
RT posición 3	4,92	4,27	3,39	3,51	3,01	2,17	1,45
RT posición 4	5,35	4,39	3,46	3,47	2,97	2,17	1,43
<b>promedio</b>	<b>5,21</b>	<b>4,38</b>	<b>3,45</b>	<b>3,49</b>	<b>2,95</b>	<b>2,20</b>	<b>1,47</b>

Tabla 6.7: Valores finales de RT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	0,22	0,15	0,15	0,09	0,09	0,04	0,05
posición 2	0,16	0,13	0,31	0,13	0,03	0,08	0,09
posición 3	0,33	0,21	0,18	0,08	0,12	0,14	0,09
posición 4	0,48	0,17	0,23	0,20	0,01	0,08	0,11
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,30</b>	<b>0,17</b>	<b>0,22</b>	<b>0,13</b>	<b>0,06</b>	<b>0,09</b>	<b>0,09</b>

Tabla 6.8: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de RT para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	5,21	4,38	3,45	3,49	2,95	2,20	1,47
$\sigma$ promedio	0,30	0,17	0,22	0,13	0,06	0,09	0,09
<b>% error</b>	<b>5,76</b>	<b>3,88</b>	<b>6,38</b>	<b>3,72</b>	<b>2,03</b>	<b>4,09</b>	<b>6,12</b>

Tabla 6.9: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de RT por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
$C_{50}$ posición 1	-7,6	-11,3	-9,5	-6,8	-5,3	-4,1	-2,0
$C_{50}$ posición 2	-7,6	-9,3	-8,2	-8,9	-4,7	-3,9	-2,2
$C_{50}$ posición 3	-5,1	-8,4	-6,8	-7,3	-6,3	-4,2	-1,6
$C_{50}$ posición 4	-6,6	-8,1	-9,6	-5,6	-5,6	-4,1	-0,9
<b>promedio</b>	<b>-6,7</b>	<b>-9,3</b>	<b>-8,5</b>	<b>-7,1</b>	<b>-5,5</b>	<b>-4,1</b>	<b>-1,7</b>

Tabla 6.10: Valores finales de  $C_{50}$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	1,2	2,4	1,5	1,8	0,1	0,4	0,1
posición 2	2,2	1,4	0,5	0,5	0,1	0,4	0,1
posición 3	2,0	4,8	1,5	1,7	0,1	0,4	0,1
posición 4	0,6	1,6	1,4	1,6	0,1	0,4	0,1
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>1,5</b>	<b>2,6</b>	<b>1,2</b>	<b>1,4</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>0,1</b>

Tabla 6.11: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $C_{50}$  para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	-6,7	-9,3	-8,5	-7,1	-5,5	-4,1	-1,7
$\sigma$ promedio	1,5	2,6	1,2	1,4	0,5	0,4	0,1
<b>% error</b>	<b>22,4</b>	<b>28,0</b>	<b>14,1</b>	<b>19,7</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>

Tabla 6.12: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de  $C_{50}$  por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
$C_{80}$ posición 1	-5,7	-9,7	-5,7	-3,8	-3,1	-1,6	0,7
$C_{80}$ posición 2	-5,0	-6,9	-5,5	-6,9	-2,5	-1,9	0,5
$C_{80}$ posición 3	-3,6	-5,1	-5,6	-4,0	-3,7	-2,0	0,6
$C_{80}$ posición 4	-4,8	-5,7	-7,4	-3,8	-3,3	-1,8	2,8
<b>promedio</b>	<b>-4,8</b>	<b>-6,9</b>	<b>-6,1</b>	<b>-4,6</b>	<b>-3,2</b>	<b>-1,8</b>	<b>1,2</b>

Tabla 6.13: Valores finales de  $C_{80}$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	1,2	1,7	1,9	0,8	0,3	0,1	0,1
posición 2	1,3	0,9	1,0	0,6	0,3	0,1	0,1
posición 3	1,2	1,1	1,6	0,5	0,3	0,1	0,1
posición 4	1,5	1,3	1,5	0,4	0,3	0,1	0,1
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla 6.14: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $C_{80}$  para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	-4,8	-6,9	-6,1	-4,6	-3,2	-1,8	1,2
$\sigma$ promedio	1,3	1,3	1,5	0,6	0,3	0,1	0,1
<b>% error</b>	<b>27,1</b>	<b>18,8</b>	<b>24,6</b>	<b>13,0</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>

Tabla 6.15: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de  $C_{80}$  por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$t_s$	frecuencia (Hz)						
valor medio	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$t_s$ posición 1	279	400	278	264	212	163	108
$t_s$ posición 2	318	349	276	278	204	158	105
$t_s$ posición 3	269	309	262	242	212	162	103
$t_s$ posición 4	348	331	262	234	206	154	77
<b>promedio</b>	<b>304</b>	<b>347</b>	<b>270</b>	<b>255</b>	<b>209</b>	<b>159</b>	<b>98</b>

Tabla 6.16: Valores finales de  $t_s$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$t_s$	frecuencia (Hz)						
$\sigma$	125	250	500	1k	2k	4k	8k
posición 1	13	43	20	15	7	7	4
posición 2	22	20	3	13	10	10	12
posición 3	55	21	34	7	10	6	2
posición 4	71	15	30	1	18	8	0
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>40</b>	<b>25</b>	<b>22</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>5</b>

Tabla 6.17: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $t_s$  para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando explosión de globos

$t_s$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	304	347	270	255	209	159	98
$\sigma$ promedio	40	25	22	9	11	8	5
<b>% error</b>	<b>13</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>

Tabla 6.18: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de  $t_s$  por el método de Schroeder utilizando explosión de globos



## 6.2.2 Medición por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
valor medio	4,00	4,50	3,26	3,31	2,92	2,10	1,26
posición 1	4,00	4,50	3,26	3,31	2,92	2,10	1,26
posición 2	4,65	4,53	3,61	3,59	2,89	2,29	1,33
posición 3	4,38	4,37	3,65	3,61	2,94	2,35	1,35
posición 4	4,75	4,26	3,60	3,54	2,98	2,32	1,44
<b>promedio</b>	<b>4,45</b>	<b>4,42</b>	<b>3,53</b>	<b>3,51</b>	<b>2,93</b>	<b>2,27</b>	<b>1,35</b>

Tabla 6.19: Valores finales de EDT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
posición 1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
posición 2	0,46	0,23	0,23	0,22	0,03	0,07	0,14
posición 3	0,62	0,17	0,20	0,11	0,09	0,09	0,13
posición 4	0,31	0,20	0,17	0,18	0,10	0,20	0,04
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,35</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,13</b>	<b>0,06</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>

Tabla 6.20: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de EDT por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

EDT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	4,45	4,42	3,53	3,51	2,93	2,27	1,35
$\sigma$ promedio	0,35	0,15	0,15	0,13	0,06	0,09	0,08
<b>% error</b>	<b>7,87</b>	<b>3,39</b>	<b>4,25</b>	<b>3,70</b>	<b>2,05</b>	<b>3,96</b>	<b>5,93</b>

Tabla 6.21: Porcentaje de error final en el cálculo de EDT por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	5,35	4,88	4,73	3,67	3,29	2,14	1,09
posición 2	5,34	4,62	3,89	3,57	3,18	2,20	1,39
posición 3	5,32	4,70	3,72	3,51	3,16	2,20	1,19
posición 4	5,38	4,57	3,83	3,61	3,10	2,27	1,30
<b>promedio</b>	<b>5,35</b>	<b>4,69</b>	<b>4,04</b>	<b>3,59</b>	<b>3,18</b>	<b>2,20</b>	<b>1,24</b>

Tabla 6.22: Valores finales de RT para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b><math>\sigma</math></b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01	0,01	0,01
posición 2	0,20	0,20	0,10	0,08	0,19	0,05	0,06
posición 3	0,27	0,23	0,16	0,12	0,20	0,17	0,16
posición 4	0,84	0,22	0,27	0,12	0,14	0,18	0,18
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,33</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>	<b>0,09</b>	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>

Tabla 6.23: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de RT por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

RT	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	5,35	4,69	4,04	3,59	3,18	2,20	1,24
$\sigma$ promedio	0,33	0,17	0,14	0,09	0,14	0,10	0,10
<b>% error</b>	<b>6,16</b>	<b>3,62</b>	<b>3,47</b>	<b>2,51</b>	<b>4,40</b>	<b>4,55</b>	<b>8,06</b>

Tabla 6.24: Porcentaje de error final en el cálculo de RT por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	-7,3	-7,8	-7,7	-9,7	-1,2	-1,9	-0,5
posición 2	-8,9	-7,3	-7,9	-7,6	-5,0	-3,7	-0,5
posición 3	-7,6	-6,9	-6,8	-7,2	-6,3	-3,1	-0,8
posición 4	-4,8	-6,8	-6,7	-6,3	-6,6	-3,4	-0,9
<b>promedio</b>	<b>-7,2</b>	<b>-7,2</b>	<b>-7,3</b>	<b>-7,7</b>	<b>-4,8</b>	<b>-3,0</b>	<b>-0,7</b>

Tabla 6.25: Valores finales de  $C_{50}$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
posición 2	0,0	0,1	0,7	1,2	0,4	0,8	0,0
posición 3	0,9	0,8	0,4	0,6	0,6	0,7	0,0
posición 4	1,3	1,6	0,5	0,8	0,1	0,2	0,0
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>

Tabla 6.26: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $C_{50}$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{50}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	-7,2	-7,2	-7,3	-7,7	-4,8	-3,0	-0,7
$\sigma$ promedio	0,5	0,6	0,4	0,7	0,3	0,3	0,0
<b>% error</b>	<b>6,9</b>	<b>8,3</b>	<b>5,5</b>	<b>9,1</b>	<b>6,3</b>	<b>10,0</b>	<b>0,0</b>

Tabla 6.27: Porcentaje de error final en el cálculo de  $C_{50}$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	-2,2	-6,2	-6,2	-6,5	-0,1	-1,0	4,0
posición 2	-5,4	-4,9	-5,0	-4,8	-2,7	-0,9	2,1
posición 3	-4,5	-5,0	-4,5	-4,3	-3,8	-1,2	3,0
posición 4	-3,3	-4,4	-4,1	-3,7	-4,6	-1,3	1,5
<b>promedio</b>	<b>-3,9</b>	<b>-5,1</b>	<b>-5,0</b>	<b>-4,8</b>	<b>-2,8</b>	<b>-1,1</b>	<b>2,7</b>

Tabla 6.28: Valores finales de  $C_{80}$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\sigma$	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,2	0,1	0,2
posición 2	0,7	0,3	0,8	0,4	0,2	0,1	0,2
posición 3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2
posición 4	0,3	1,1	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>

Tabla 6.29: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $C_{80}$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$C_{80}$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	-3,9	-5,1	-5,0	-4,8	-2,8	-1,1	2,7
$\sigma$ promedio	0,4	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2
<b>% error</b>	<b>10,3</b>	<b>9,8</b>	<b>8,0</b>	<b>8,3</b>	<b>7,1</b>	<b>9,1</b>	<b>7,4</b>

Tabla 6.30: Porcentaje de error final en el cálculo de  $C_{80}$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$t_s$	frecuencia (Hz)						
valor medio	125	250	500	1k	2k	4k	8k
posición 1	266	349	279	270	170	133	66
posición 2	340	310	269	259	204	155	90
posición 3	316	315	270	255	220	153	75
posición 4	308	292	261	255	226	156	89
<b>promedio</b>	<b>308</b>	<b>317</b>	<b>270</b>	<b>260</b>	<b>205</b>	<b>149</b>	<b>80</b>

Tabla 6.31: Valores finales de  $t_s$  para las cuatro posiciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$t_s$	frecuencia (Hz)						
$\sigma$	125	250	500	1k	2k	4k	8k
posición 1	1	1	0	1	0	0	0
posición 2	22	27	23	17	5	11	16
posición 3	37	5	6	9	10	11	9
posición 4	41	11	13	7	4	27	3
<b><math>\sigma</math> promedio</b>	<b>25</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>7</b>

Tabla 6.32: Desviación estándar ( $\sigma$ ) para el cálculo de  $t_s$  para las cuatro mediciones por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

$t_s$	frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
promedio	308	317	270	260	205	149	80
$\sigma$ promedio	25	11	11	9	5	12	7
<b>% error</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>9</b>

Tabla 6.33: Porcentaje de error final en el cálculo del valor de  $t_s$  por el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente

### 6.2.3 Método gráfico

Por estudios previos [18] se sabe que los valores de EDT y RT tienen un error de 10% al ser calculados a partir del método gráfico para una misma frecuencia.

<b>EDT</b>	<b>frecuencia (Hz)</b>						
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	2,09	3,07	2,77	3,00	2,50	1,90	1,22
posición 2	4,35	3,52	3,22	3,07	2,55	2,23	1,27
posición 3	3,30	4,17	3,41	3,10	2,64	2,20	1,19
posición 4	3,26	3,20	2,95	2,95	2,69	1,92	1,35
<b>promedio</b>	<b>3,25</b>	<b>3,49</b>	<b>3,15</b>	<b>3,03</b>	<b>2,60</b>	<b>2,06</b>	<b>1,26</b>

Tabla 6.34: Valores finales de EDT para las cuatro posiciones por el método gráfico

<b>RT</b>	<b>frecuencia (Hz)</b>						
<b>valor medio</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
posición 1	4,25	4,25	3,33	3,31	2,78	2,22	1,41
posición 2	4,55	4,60	3,50	3,50	2,55	2,23	1,27
posición 3	4,71	4,17	3,63	3,54	2,94	2,28	1,37
posición 4	5,00	3,85	3,51	3,41	2,85	2,34	1,35
<b>promedio</b>	<b>4,63</b>	<b>4,22</b>	<b>3,49</b>	<b>3,44</b>	<b>2,78</b>	<b>2,27</b>	<b>1,35</b>

Tabla 6.35: Valores finales de RT para las cuatro posiciones por el método gráfico



### 6.2.4 Resultados Finales

Se muestran a continuación los resultados obtenidos para los parámetros antes mencionados de las mediciones en el Auditorio de Física:

- Tiempo de Decaimiento temprano (EDT)

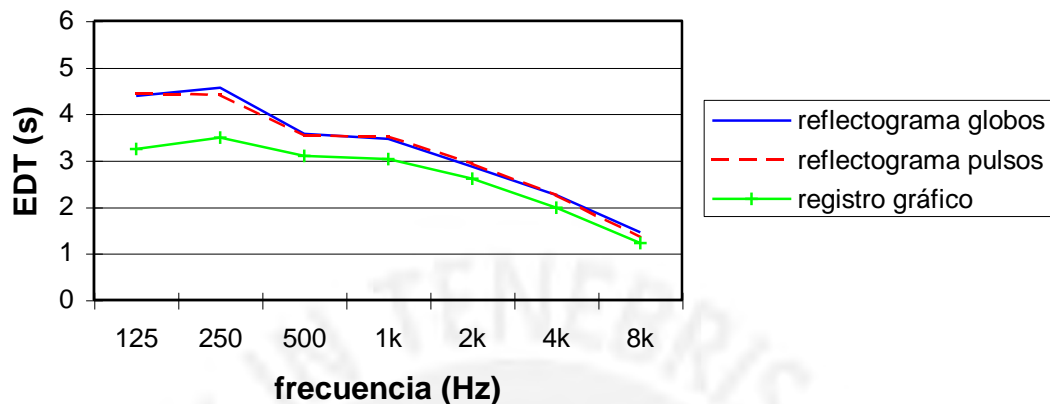


Figura 6.5: Valores finales de EDT para los tres métodos

Se observa que para las frecuencias entre 125 y 500 Hz la medición a partir del registro gráfico difiere de los obtenidos por los otros dos métodos alrededor de 30%, lo cual es un error considerable. Esta es una de las razones por las cuales el método de Schroeder es tan aplicado, estas discrepancias son debidas a las fluctuaciones de la pendiente obtenida en el registrador gráfico y ocurre a bajas frecuencias (aproximadamente hasta 500 Hz) sobre todo debido a la presencia de ondas estacionarias en el recinto. Por ello el error va disminuyendo a medida que la frecuencia aumenta.

- Tiempo de reverberación (RT)

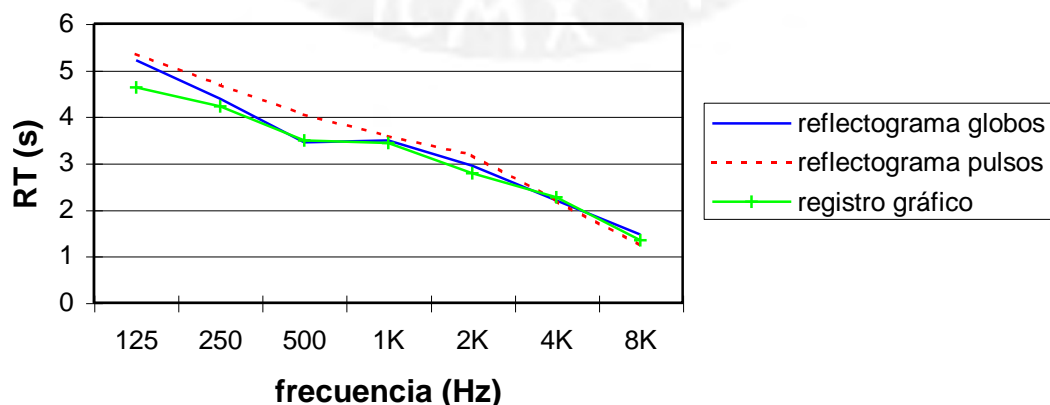


Figura 6.6: Valores finales de RT para los tres métodos.

En este caso se observa un comportamiento similar al caso anterior, pero en menor grado. Esto es debido a que para el cálculo del valor de RT se tiene una variación en dB mayor que para el cálculo de EDT por lo tanto el error cometido en el cálculo de la pendiente es menor y en el mejor de los casos desaparece al aumentar la frecuencia.

- Claridad a 50 ms

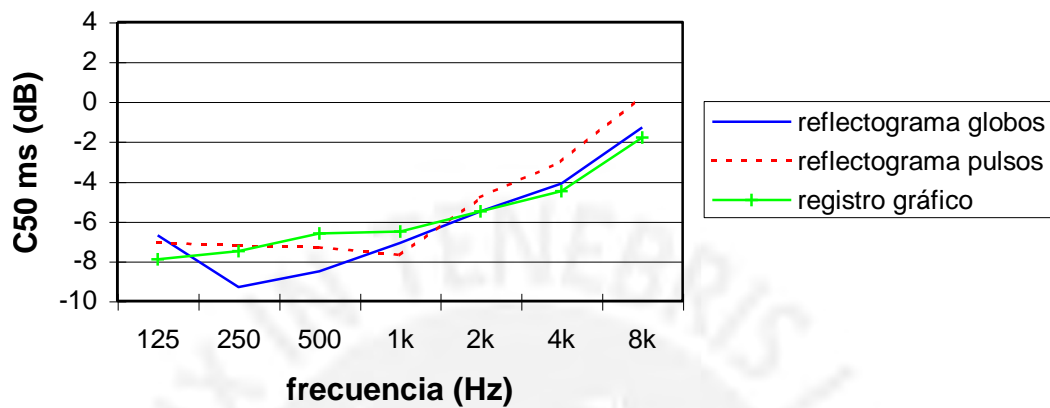


Figura 6.7: Valores finales de C<sub>50</sub> para los tres métodos

- Claridad a 80 ms

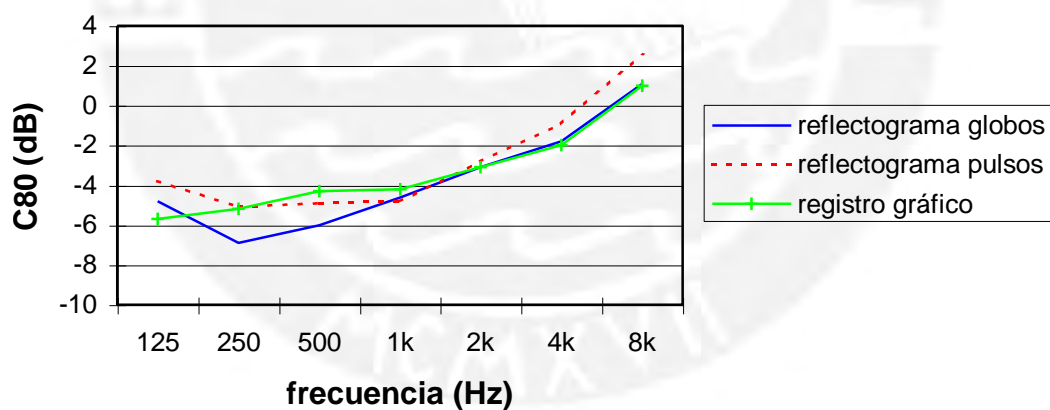


Figura 6.8: Valores finales de C<sub>80</sub> para los tres métodos

Según la tabla 6.3 no es posible calcular la claridad a 50 ms, la claridad a 80 ms y el tiempo central a partir del método gráfico, pero se puede hacer un cálculo indirecto de ellos a partir del tiempo de reverberación [17] (ver anexo B). Este cálculo consiste en asumir un decaimiento puramente exponencial de la presión sonora en el recinto.

Se sabe que si un campo sonoro es difuso la presión sonora debe decaer

exponencialmente y esto es precisamente lo que se observa en el Auditorio de Física, pues los valores calculados son muy cercanos a los obtenidos por el método de Schroeder mediante pulsos y globos (las gráficas 6.6 a 6.9 lo muestran claramente), la explicación es que sus paredes son muy reflectivas (concreto) pues no tienen tratamiento acústico y los tiempos de reverberación son bastante largos. El Auditorio de Física es un excelente ejemplo de la validez de esta aproximación, pues cumple con las condiciones para ello.

- tiempo central ( $t_s$ )

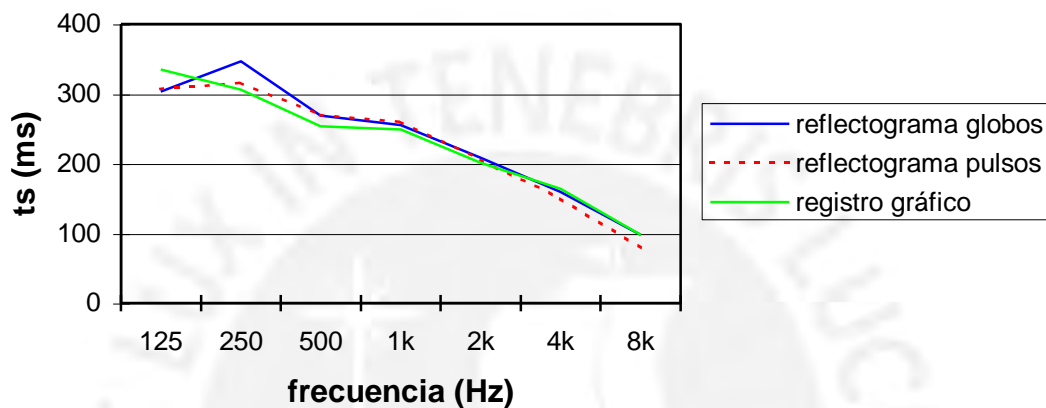


Figura 6.9: Valores finales de  $t_s$  para los tres métodos

### 6.2.5 Conclusiones

- Se logró medir la respuesta impulsiva mediante el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente y mediante la explosión de globos respectivamente.
- Se logró calcular los parámetros objetivos elegidos a partir de la respuesta impulsiva medida por el método de Schroeder.
- Los errores obtenidos en los parámetros objetivos calculados por el método de Schroeder son menores que el error típico de 10% cometido en el método gráfico.
- Este método puede utilizarse para la evaluación acústica objetiva de un recinto cualquiera, es repetible y produce valores confiables.

### 6.3 Medición de la respuesta impulsiva en el modelo a escala del Auditorio de Física

Una vez construido el modelo a escala 1:10 del Auditorio de Física se inició el proceso de diseño de los montajes para las mediciones de la respuesta impulsiva en las mismas posiciones (ver figura 6.1) para el posterior cálculo y comparación de los parámetros objetivos calculados para el Auditorio de Física.

Como se mencionó anteriormente, debido al factor de escala elegido ( $S = 1/10$ ) las frecuencias en el modelo son diez veces mayores (tabla 2.2) que las frecuencias correspondientes en el Auditorio de Física. En la tabla 6.36 se muestran las frecuencias en el modelo a escala correspondientes a las frecuencias de medición en el Auditorio de Física

	frecuencias de medición (Hz)						
Auditorio de Física	125	250	500	1k	2k	4k	8k
modelo 1:10	1,25 k*	2,5 k*	5 k*	10 k*	20 k	40 k*	80 k*

Tabla 6.36: Frecuencias de medición correspondientes en el modelo a escala 1:10 del Auditorio de Física

Para las frecuencias para el modelo mostradas en la tabla 6.36 (ver tabla 6.1), las cuales están indicadas con un asterisco (\*) se utilizaron filtros de 1/3 octava y no de 1/1 octava. Al realizar la medición en el modelo (asi como en el Auditorio), es imprescindible obtener la mayor relación señal a ruido (S/N ratio) posible. Para ello normalmente se ubica un filtro a la salida de la señal (en este caso los pulsos generados electrónicamente) y un filtro a la entrada de la señal (respuesta impulsiva).

### 6.3.1 Instrumental utilizado

El equipo utilizado para las mediciones fue proporcionado por el Laboratorio de Acústica de la Sección Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú y consistió en:

- analizador de FFT de dos canales (B&K 2035)
- sonómetro integrador de precisión (B&K 2233)
- micrófono de 1/8 pulgada (B&K 4138)
- registrador gráfico (B&K 2306)
- filtro de 1/1 octava (B&K 1613)
- filtro de 1/3 octava (B&K 1625)
- filtro 1/3 octava (B&K 1616)
- altavoz dinámico para alta frecuencia (JBL GB07) utilizado para reproducir los pulsos generados electrónicamente

Un esquema del proceso de mediciones de la respuesta impulsiva en el modelo a escala es mostrado en la figura 6.10.

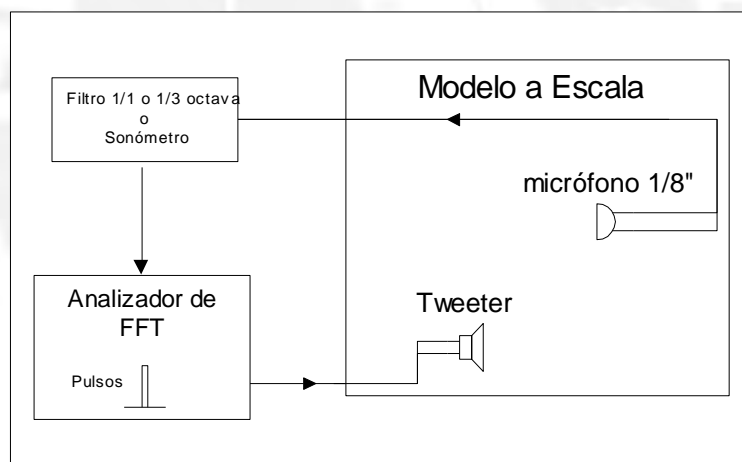


Figura 6.10: Esquema de medición de la respuesta impulsiva en el modelo a escala mediante pulsos generados electrónicamente.

Se utilizó el sonómetro integrador como filtro para la respuesta impulsiva (ver figura 6.10), debido a este tipo de montaje no es posible realizar las mediciones a las frecuencias por encima de 20 kHz, sin embargo, mediante un montaje más complejo es posible obtener mediciones hasta los 100 kHz. Esto no se realizó en principio para permitir un “rápido”



montaje o desmontaje de los equipos debido a su habitual utilización para servicios a terceros y/o dictado de clases.

La respuesta de frecuencia del pulso depende de su duración en tiempo. En el analizador de FFT utilizado esta duración puede ser controlada. El tiempo de captura es el tiempo durante el cual el analizador almacena el sonido que recibe el micrófono a partir de la llegada del sonido directo. Este parámetro es muy importante, pues la parte final de la respuesta impulsiva puede perderse si el tiempo de captura es muy corto y como consecuencia la información respecto al sonido reverberante (reflexiones tardías). Normalmente se trata de optimizar el tiempo de captura de manera de la respuesta impulsiva ocupe entre más de un 80% (cuando es posible), el tiempo de captura sin excederlo.

En el caso del modelo a escala la resolución para todas las frecuencias es la misma esto es debido a que todas las mediciones fueron realizadas con la misma frecuencia de muestreo y con el mismo ancho de banda.

frecuencia (Hz)	duración del pulso (ms)	tiempo de captura (ms)	resolución de la respuesta impulsiva ( $\mu$ s)	ancho de banda (kHz)
1,25 k	0,305	250	3,81	102,4
2,5 k	0,168	125	3,81	102,4
5,0 k	0,092	125	3,81	102,4
10 k	0,046	125	3,81	102,4
20 k	0,031	125	3,81	102,4

Tabla 6.37: Duración del pulso, tiempo de captura, resolución de la respuesta impulsiva y ancho de banda para cada frecuencia de medición en el modelo a escala.

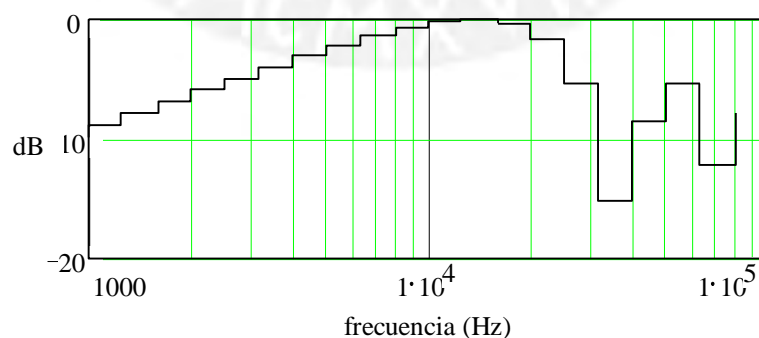


Figura 6.11: Respuesta de frecuencia en bandas de 1/3 octava para un pulso de una duración de 0,031 ms



#### 6.4 Cálculo de parámetros objetivos a partir de la respuesta impulsiva del modelo a escala del Auditorio de Física

Los valores de EDT, RT,  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  y  $t_s$  se calcularon a partir de las respuestas impulsivas medidas en tres de las cuatro posiciones (2, 3 y 4) en el modelo correspondientes a las del Auditorio de Física. La medición en la posición uno (1) presenta dificultades debido al posicionamiento del micrófono, el micrófono debe ser colocado verticalmente. Para ello es necesario hacer un orificio por debajo del modelo, lo cual hasta el momento no se ha podido realizar. Sin embargo, una alternativa, está dada por el teorema de reciprocidad en acústica [26]. Según este teorema, la señal acústica recibida por un receptor (que es en este caso el micrófono) producida por una fuente sonora, debe ser la misma si se intercambian las posiciones de la fuente sonora y el receptor.

Las respuestas impulsivas para cada frecuencia han sido corregidas por la absorción del aire con la distancia, la cual es significativa a frecuencias a partir de 5000 Hz [16]. A pesar de que la absorción por la humedad afecta la medición, no se tomará en cuenta.

EDT	frecuencias (Hz)			
	2,5 k	5 k	10 k	20 k
posición 1	-----	-----	-----	-----
posición 2	3,89	2,76	2,62	1,98
posición 3	3,42	3,08	2,41	1,66
posición 4	3,09	2,32	2,40	1,94
<b>promedio</b>	<b>3,47</b>	<b>2,72</b>	<b>2,48</b>	<b>1,86</b>

Tabla 6.38: Valores de EDT para el modelo a escala

RT	frecuencias (Hz)			
	2,5 k	5 k	10 k	20 k
posición 1	-----	-----	-----	-----
posición 2	3,51	2,47	2,46	2,05
posición 3	2,78	2,73	2,34	2,23
posición 4	2,83	2,87	2,51	1,94
<b>promedio</b>	<b>3,04</b>	<b>2,69</b>	<b>2,44</b>	<b>2,07</b>

Tabla 6.39: Valores de RT para el modelo a escala

$C_{50}$	frecuencias (Hz)			
	2,5 k	5 k	10 k	20 k
posición 1	-----	-----	-----	-----
posición 2	-5,0	-5,2	-7,0	-3,0
posición 3	-5,2	-5,7	-4,8	-2,5
posición 4	-1,6	-5,2	-4,0	-3,9
<b>promedio</b>	<b>-3,9</b>	<b>-5,4</b>	<b>-5,3</b>	<b>-3,1</b>

Tabla 6.40: Valores de  $C_{50}$  para el modelo a escala

$C_{80}$	frecuencias (Hz)			
	2,5 k	5 k	10 k	20 k
posición 1	-----	-----	-----	-----
posición 2	-3,2	-4,4	-4,0	-1,7
posición 3	-3,0	-4,4	-2,6	0,2
posición 4	-0,4	-2,8	-1,0	-3,0
<b>promedio</b>	<b>-2,2</b>	<b>-3,9</b>	<b>-2,5</b>	<b>-1,5</b>

Tabla 6.41: Valores de  $C_{80}$  para el modelo a escala

$t_s$	frecuencias (Hz)			
	2,5 k	5 k	10 k	20 k
posición 1	-----	-----	-----	-----
posición 2	245	300	236	188
posición 3	230	223	175	121
posición 4	185	177	160	150
<b>promedio</b>	<b>220</b>	<b>233</b>	<b>190</b>	<b>153</b>

Tabla 6.42: Valores de  $t_s$  para el modelo a escala

## 6.5 Comparación de resultados entre el Auditorio y su modelo a escala

### 6.5.1 Resultados por posición

Se muestran los valores finales calculados de EDT, RT,  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  y  $t_s$  en el modelo comparados con los valores calculados para cada posición por cada método para el Auditorio de Física.

- Posición 2

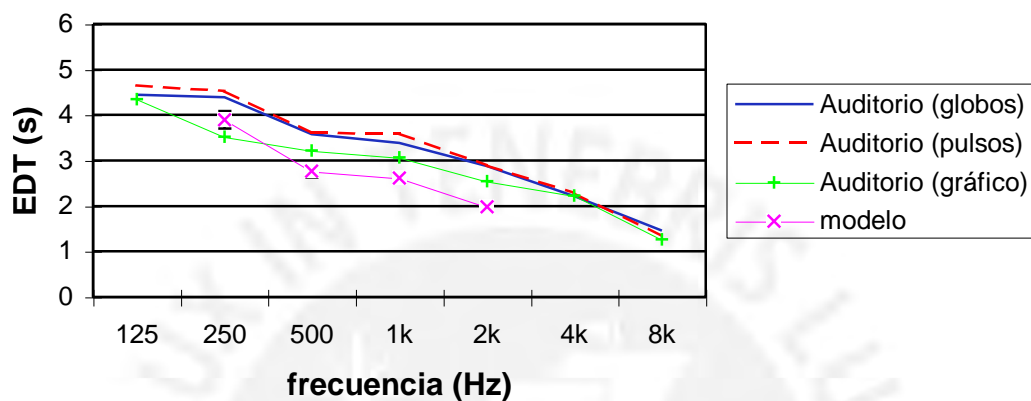


Figura 6.12: Valores de EDT calculados para la posición 2 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

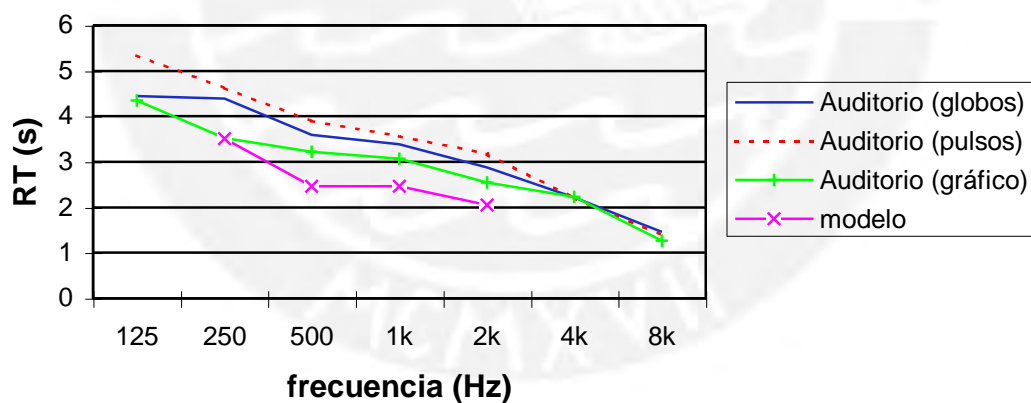


Figura 6.13: Valores de RT calculados para la posición 2 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

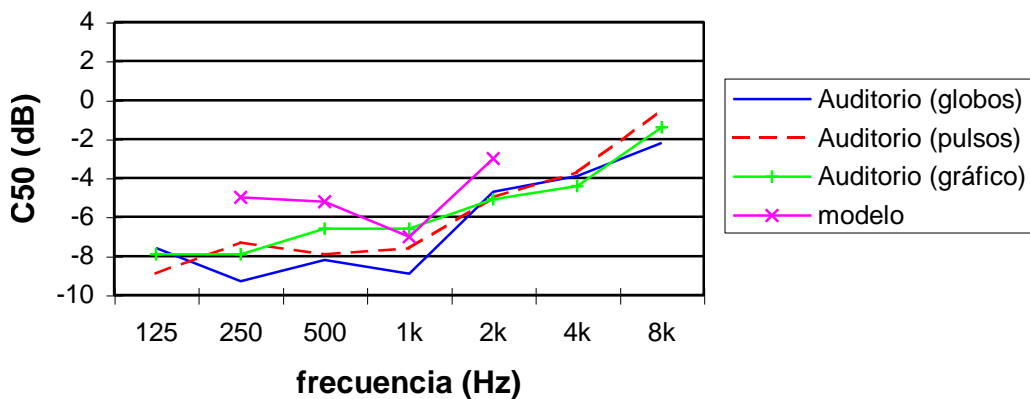


Figura 6.14: Valores finales de  $C_{50}$  calculados para la posición 2 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

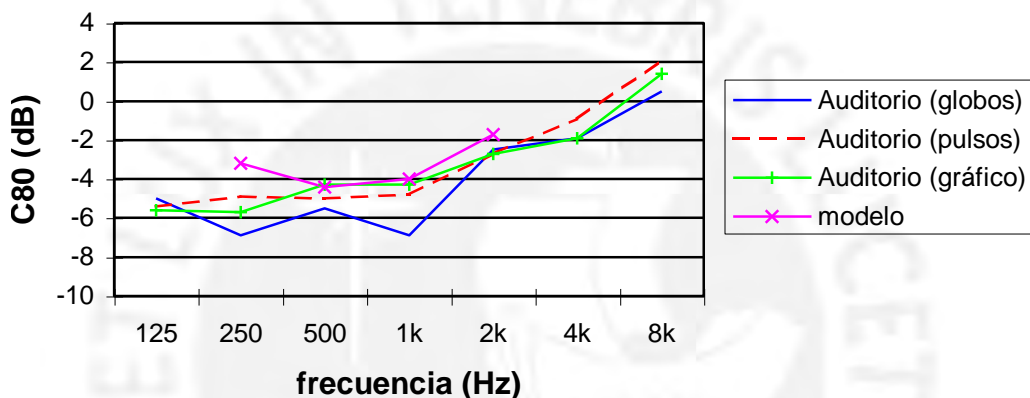


Figura 6.15: Valores finales de  $C_{80}$  calculados para la posición 2 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

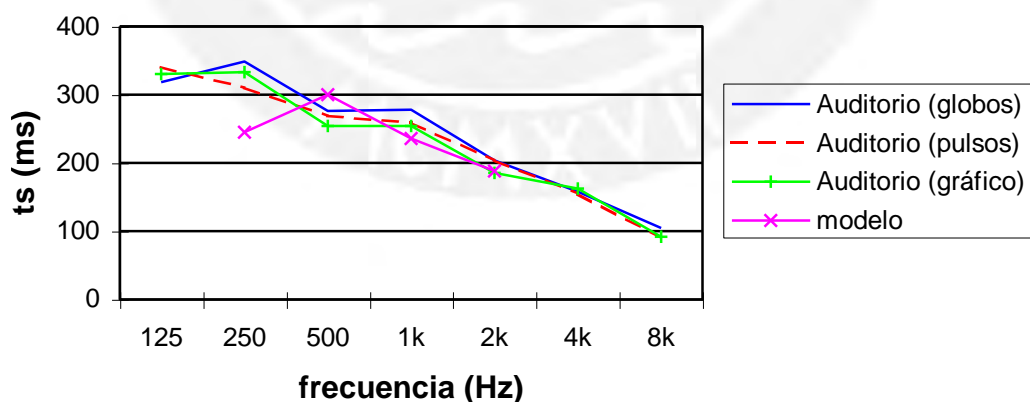


Figura 6.16: Valores finales de  $t_s$  calculados para la posición 2 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

- Posición 3

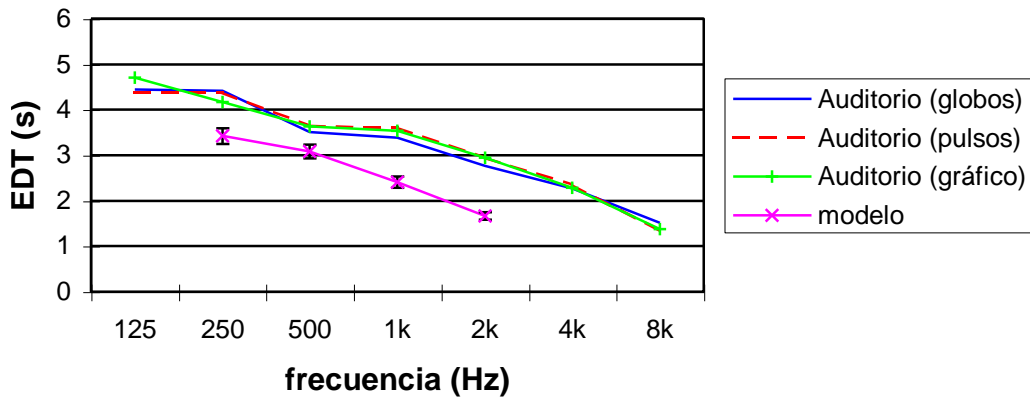


Figura 6.17: Valores finales de EDT calculados para la posición 3 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

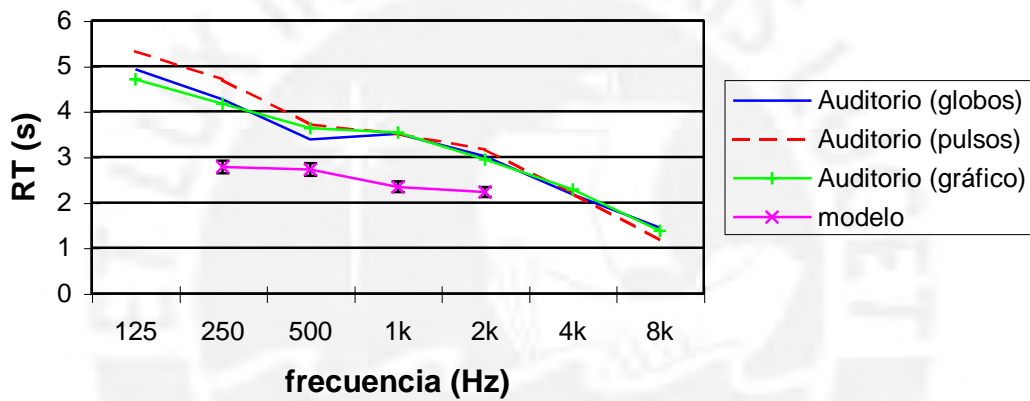


Figura 6.18: Valores finales de RT calculados para la posición 3 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

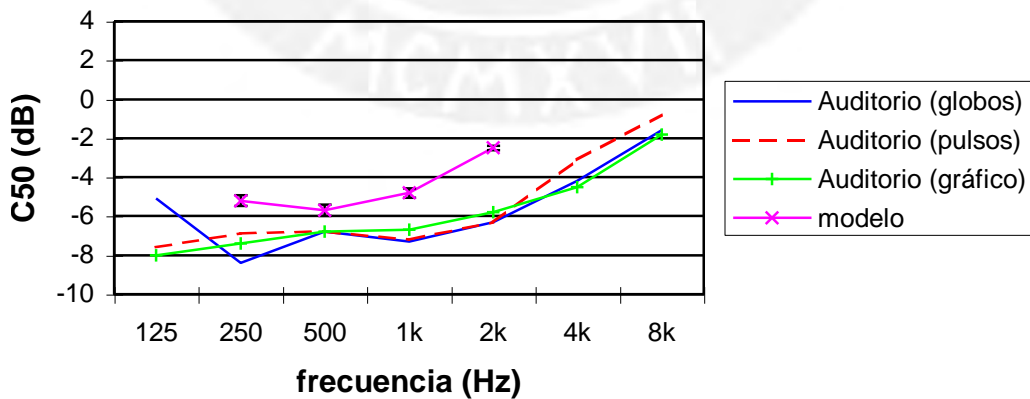


Figura 6.19: Valores finales de C<sub>50</sub> calculados para la posición 3 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

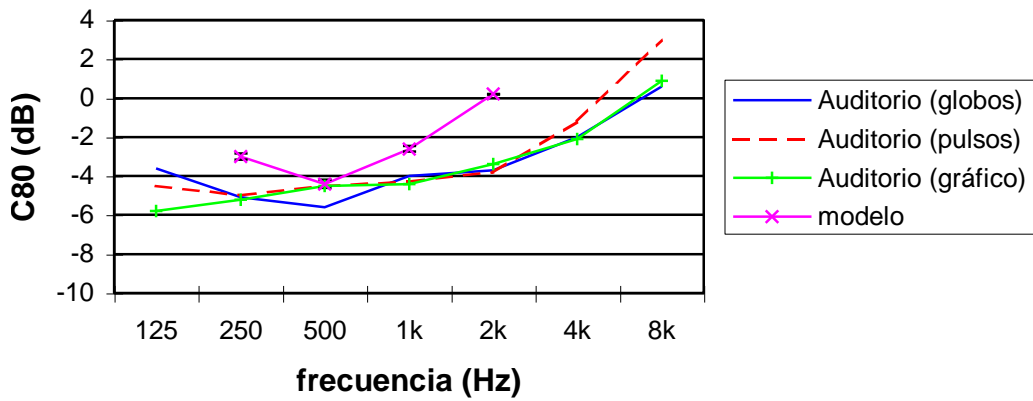


Figura 6.20: Valores finales de  $C_{80}$  calculados para la posición 3 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

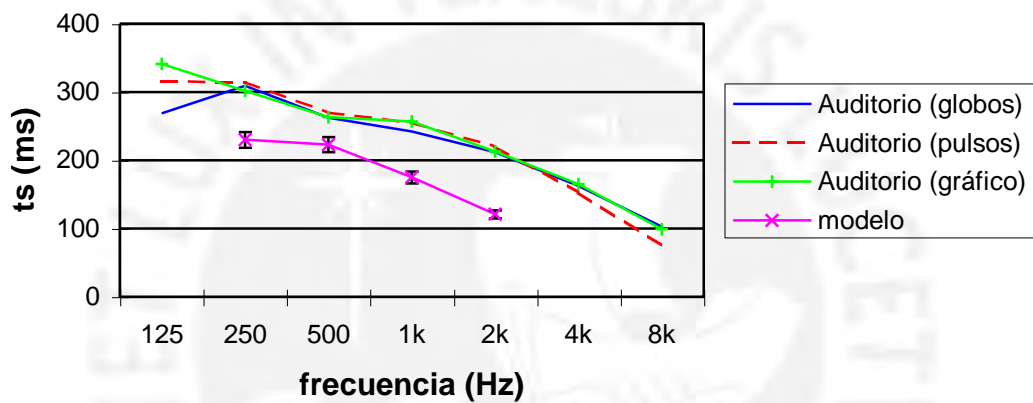


Figura 6.21: Valores finales de  $t_s$  calculados para la posición 3 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.



- Posición 4

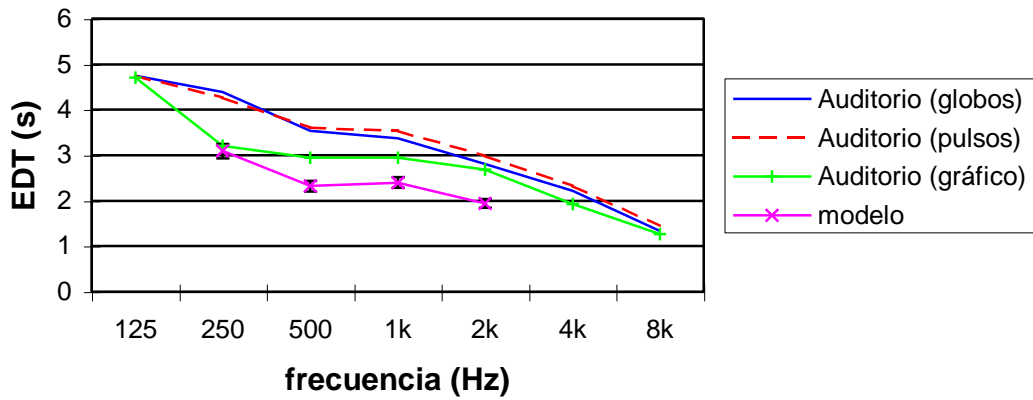


Figura 6.22: Valores finales de EDT calculados para la posición 4 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

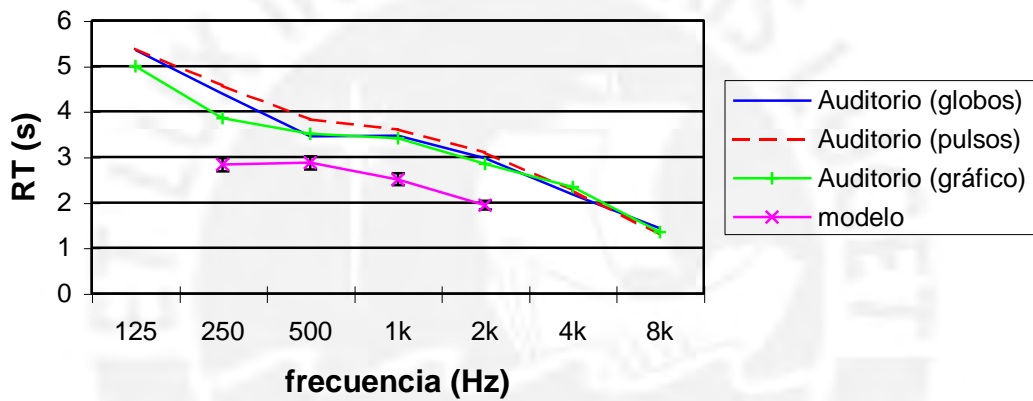


Figura 6.23: Valores finales de RT calculados para la posición 4 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

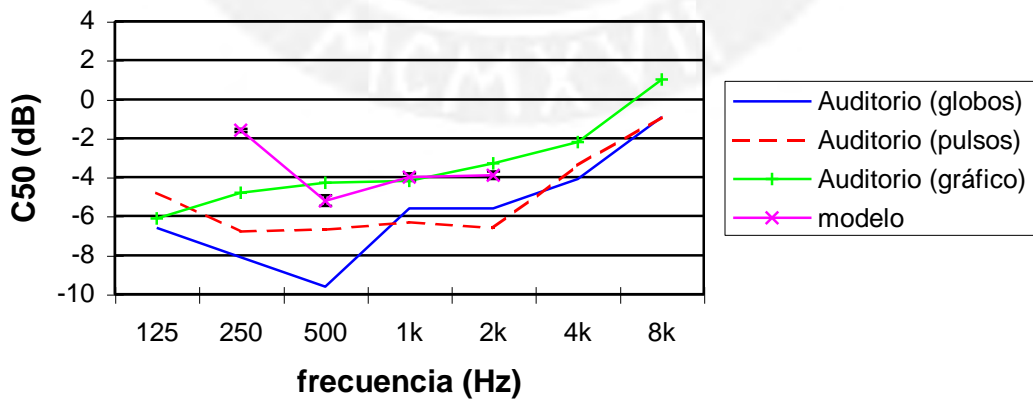


Figura 6.24: Valores finales de C<sub>50</sub> calculados para la posición 4 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

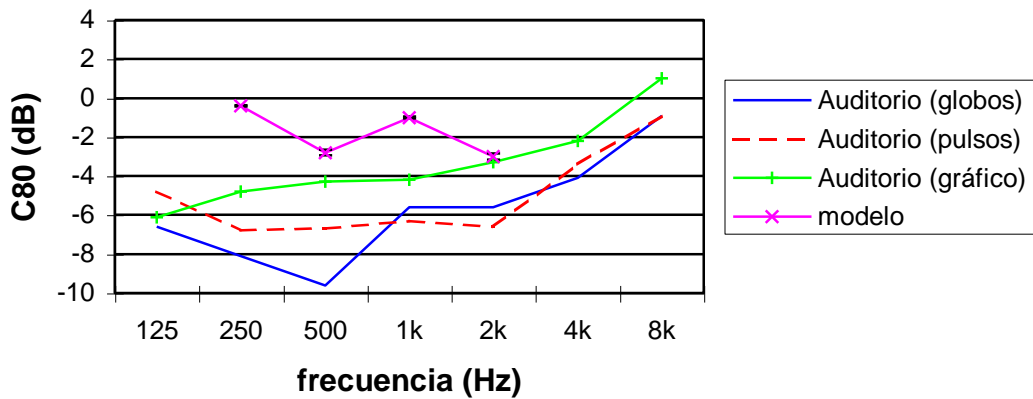


Figura 6.25: Valores finales de  $C_{80}$  calculados para la posición 4 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

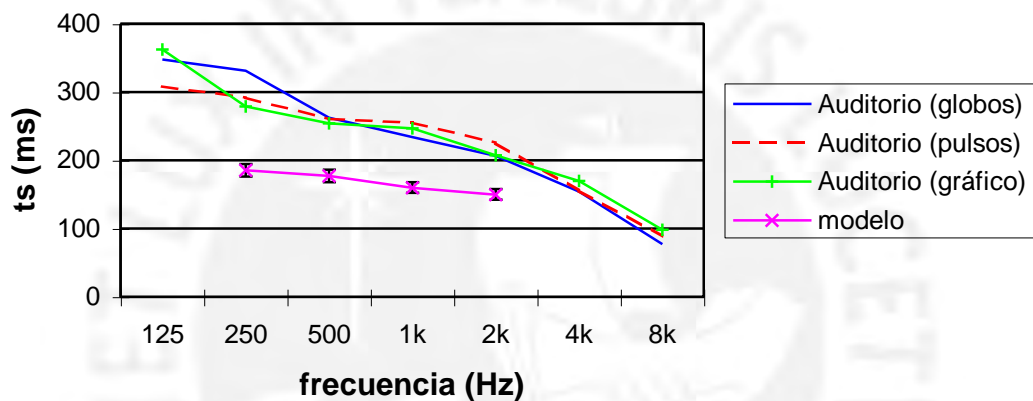


Figura 6.26: Valores finales de  $t_s$  calculados para la posición 4 para el Auditorio de Física y el modelo 1:10.

### Observaciones

Debido a la direccionalidad de fuente utilizada en el modelo y por la cercanía del micrófono, se esperaba que los resultados no fueran muy buenos para esta posición. En general los resultados en el modelo se alejan más de los valores reales en esta posición, sin embargo, se puede observar que la forma para las gráficas sigue siendo representativa del comportamiento de estos parámetros en el Auditorio.

### 6.5.2 Resultados por método

Se muestran los valores finales en el modelo y para el Auditorio de Física.

- Tiempo de Decaimiento temprano (EDT)

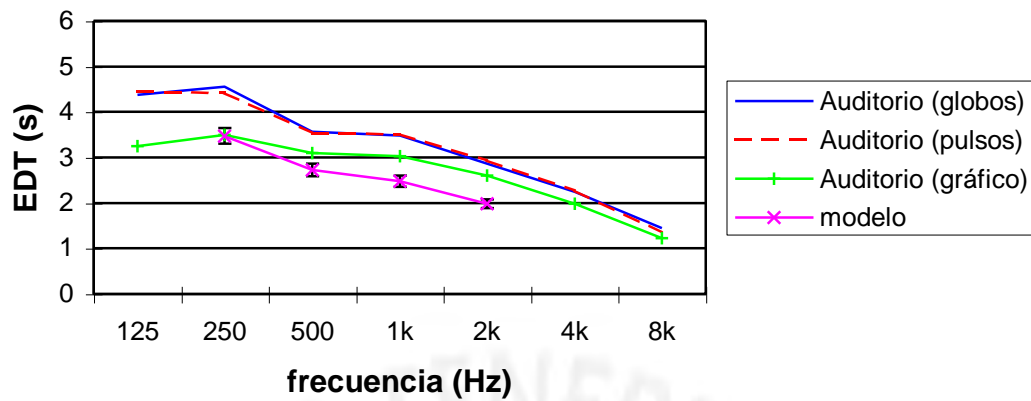


Figura 6.27: Valores finales de EDT para los tres métodos en el Auditorio y el modelo.

- Tiempo de Reverberación (RT)

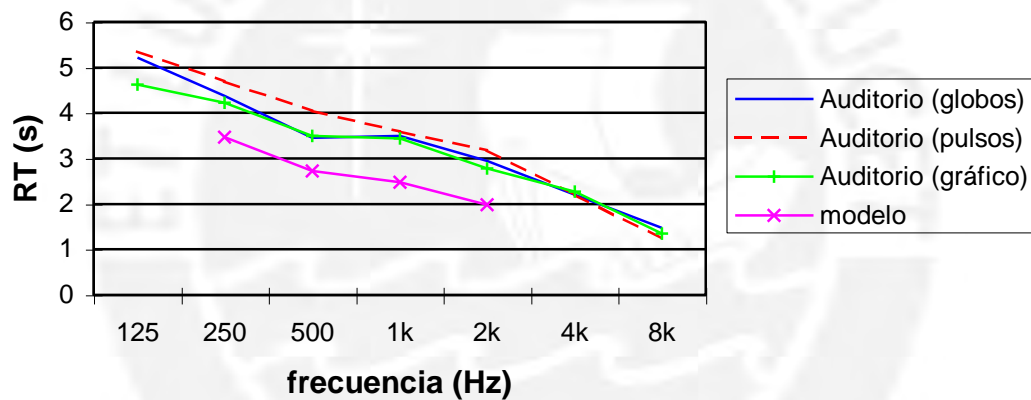


Figura 6.28: Valores finales de RT para los tres métodos en el Auditorio y el modelo.

- Claridad a 50 ms ( $C_{50}$ )

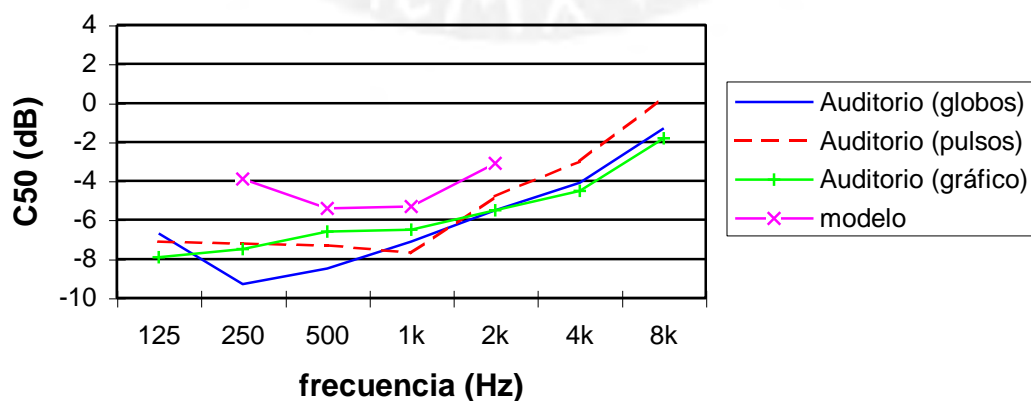


Figura 6.29: Valores finales de  $C_{50}$  para los tres métodos en el Auditorio y el modelo.

- Claridad a 80 ms ( $C_{80}$ )

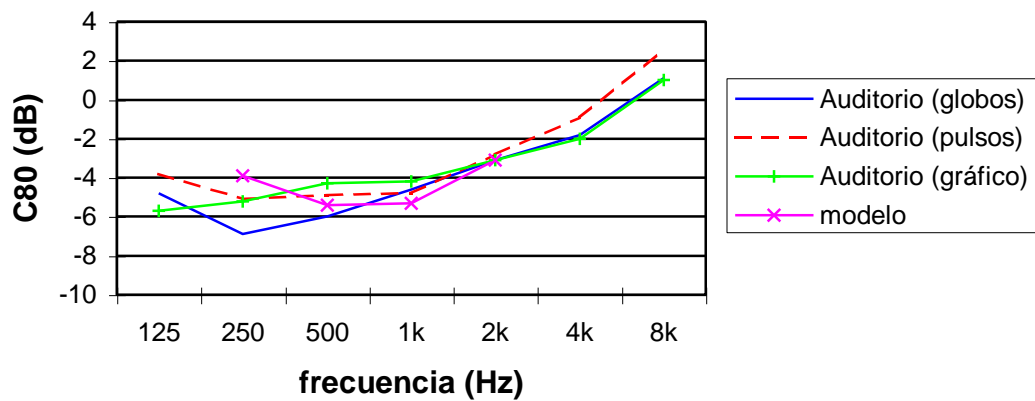


Figura 6.30: Valores finales de  $C_{80}$  para los tres métodos en el Auditorio y el modelo.

- Tiempo central ( $t_s$ )

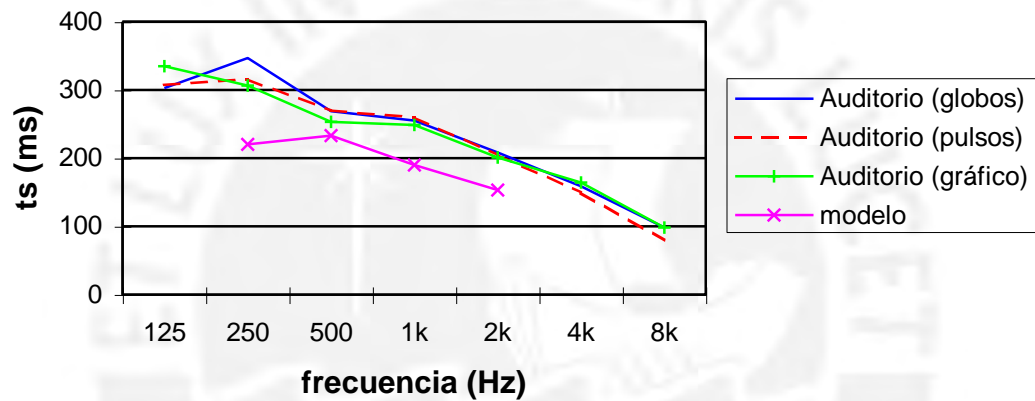


Figura 6.31: Valores finales de  $t_s$  para los tres métodos en el Auditorio y el modelo.

## 6.6 Evaluación de auditorios multipropósito en el Perú

En el año de 1995 se realizaron mediciones de las respuestas impulsivas de varios auditorios multipropósito en el Perú, con la finalidad de obtener sus parámetros acústicos objetivos y someterlos a una evaluación a solicitud del Arq. C. Jiménez Dianderas [24]. Los auditorios evaluados fueron: Auditorio del Museo de la Nación, teatro Municipal del Qosco (Cuzco), Teatro del Centro Cultural Peruano Japonés y Teatro del Norte de Lima (UNI).

## 6.7 Evaluación de una cámara reverberante a escala

Como parte de la tesis del arquitecto Iván Rivas Tejeda de título: “A model reverberant chamber” para optar el “Acoustics, Vibrations & Noise Control Diploma Course” otorgado por la Heriot-Watt University (Edimburg, Escocia) se realizó a inicios del año 1998 la evaluación de una cámara reverberante a escala (escala 1:10) mediante la medición de su respuesta impulsiva en tres posiciones y bajo cuatro condiciones distintas:

- a) Cámara vacía
- b) Cámara vacía con difusores
- c) Cámara con material absorbente
- d) Cámara con material absorbente y difusores

Esta cámara debía ser evaluada midiendo el coeficiente de absorción sonora de una muestra de material según la norma ISO 354, la cual está diseñada para realizarse mediante la medición del tiempo de reverberación a partir de los decaimientos utilizando un registrador gráfico. Esta norma exige que se realicen mediciones en las bandas de 1/3 de octava mostradas en la tabla 6.43.

Frecuencia central de la banda de 1/3 de octava (Hz)					
100	125	160	200	250	315
400	500	630	800	1000	1250
1600	2000	2500	3150	4000	5000

Tabla 6.43. Bandas centrales de medición del coeficiente de absorción sonora según la norma ISO 354.

Según esta norma el número mínimo de mediciones requeridas para cada banda de

frecuencia es:

- a) Doce (12) decaimientos entre 100 y 250 Hz, cada uno con distinta combinación de posiciones de la fuente y el micrófono
- b) Nueve (09) decaimientos entre 315 y 800 Hz, cada uno con distinta combinación de posiciones de la fuente y el micrófono
- c) Seis (06) decaimientos entre 1 000 y 5 000 Hz, cada uno con distinta combinación de posiciones de la fuente y el micrófono

Como puede notarse el número de mediciones para la evaluación de la cámara era demasiado elevado (81 como mínimo) utilizando el método del registrador gráfico, por lo cual se decidió aplicar el método de la respuesta impulsiva. Dado que el número de mediciones por banda es para compensar las fluctuaciones en los decaimientos usando ruido aleatorio, utilizando el método de Schroeder ya no es necesario compensar las fluctuaciones y es suficiente realizar la medición una sola vez por cada banda, de esta manera el número de mediciones se redujo bastante y se pudo hacer un mejor diseño del experimento (análisis de las posiciones micrófono/fuente, número de difusores, etc.). En el gráfico siguiente se muestra el número óptimo de difusores para la cámara.

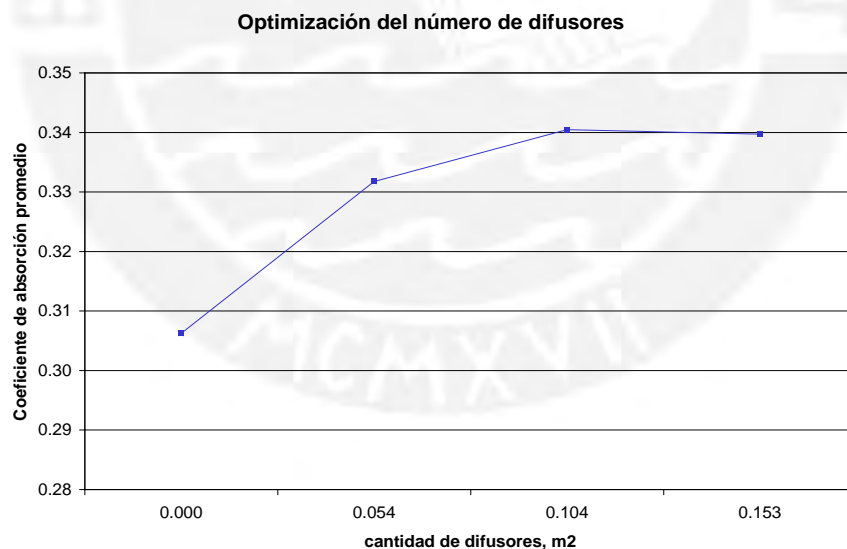


Gráfico 6.32. Número óptimo de difusores para la cámara reverberante a escala 1:10.



# Capítulo 7

## CONCLUSIONES

### 7.1 Medición de la respuesta impulsiva en el Auditorio de Física y cálculo de parámetros objetivos

- Se logró el objetivo de medición de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física mediante el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente y mediante la explosión de globos respectivamente
- Se logró el objetivo de calcular los parámetros acústicos objetivos elegidos a partir de la respuesta impulsiva del Auditorio de Física
- El Auditorio de Física presenta un campo sonoro difuso. El tiempo de reverberación es excesivamente alto para el tipo de programa que fue diseñado (oratoria), necesita un acondicionamiento acústico.
- El ruido de fondo (generado por fuentes externas) en el Auditorio de Física es demasiado alto, esto significó un problema al realizar la medición de su respuesta impulsiva para poder obtener una adecuada relación señal a ruido (S/N)
- Los errores obtenidos en los parámetros objetivos calculados por el método de Schroeder son menores que el error de medición en el método gráfico.
- Es posible realizar la medición de la respuesta impulsiva una sola vez si se tiene una relación señal a ruido (S/N) de 25 dB o mas.

### 7.2 Medición de la respuesta impulsiva en el modelo a escala del Auditorio de Física y cálculo de parámetros objetivos

- Se logró el objetivo de medición de la respuesta impulsiva del modelo a escala del Auditorio de Física mediante el método de Schroeder utilizando pulsos generados electrónicamente
- Se logró el objetivo de calcular los parámetros acústicos objetivos elegidos a partir de la respuesta impulsiva del modelo a escala del Auditorio de Física

### **7.3 Comparación de resultados entre el Auditorio y su modelo a escala**

- La forma de las gráficas de los parámetros obtenidos en el modelo a escala es representativa del comportamiento de los mismos en el Auditorio de Física.
- Es posible la predicción de los valores de los parámetros en el modelo, considerando que no se han realizado las correcciones por absorción de la humedad del aire en las mediciones en el modelo.
- A pesar de que la fuente presenta problemas de direccionalidad las gráficas en las posiciones medidas es representativa de los valores en el Auditorio
- Es interesante el hecho de que los valores en el modelo a escala para la claridad a 80 ms predicen los valores en el Auditorio a 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz.

### **7.4 Conclusiones Finales**

- La simulación acústica en el modelo a escala representa (al menos hasta esta etapa de la investigación) cualitativamente el comportamiento de los parámetros en el recinto a escala real.
- La simulación acústica en el modelo cumple con la finalidad de brindar información del campo sonoro de su correspondiente recinto a escala real.

# Capítulo 8

## ANEXOS

### 8.1 La respuesta impulsiva de un recinto

La respuesta impulsiva es la reacción de un sistema ante un pulso de muy corta duración. La información obtenida en el dominio de la frecuencia depende de la duración del pulso. En la figura 8.1 se muestra un pulso utilizado para mediciones de la respuesta impulsiva.

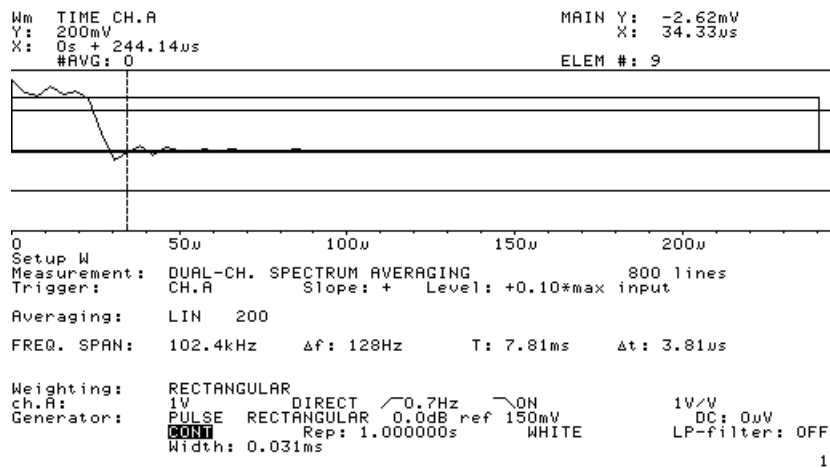


Figura 8.1. Amplitud vs. tiempo para un pulso de 0,031 s de duración.

Se puede observar que el autoespectro (energía) del pulso de la figura 8.1 en función de la frecuencia tiene un ancho de banda útil (figura 8.2). A la frecuencia de aproximadamente 36 kHz la energía es prácticamente nula, en este caso nuestro ancho de banda efectivo será inferior a 36 kHz.

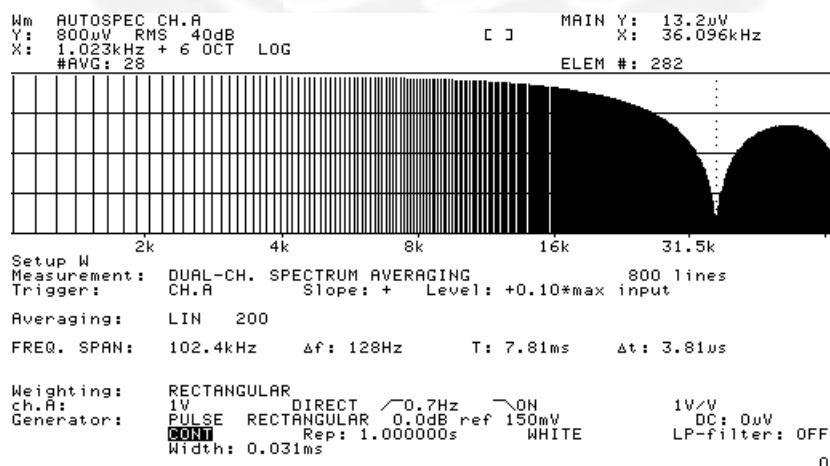


Figura 8.2. Energía de un pulso de duración de 0,031 ms en función de la frecuencia. Este primer cero en la energía del pulso ocurre a la frecuencia  $1/T$  donde  $T$  es la duración

del pulso en segundos. En este caso  $T=0,031s$  y el primer cero ocurrirá alrededor de 32 kHz, lo cual está bastante cerca del primer cero observado (36 kHz), teniendo en cuenta de que el pulso no es realmente rectangular. En la figura 8.3 se muestra el mismo auto-espectro de la figura 8.2 pero en este caso el eje vertical está en escala lineal, se puede observar claramente como la energía decrece en función de la frecuencia.

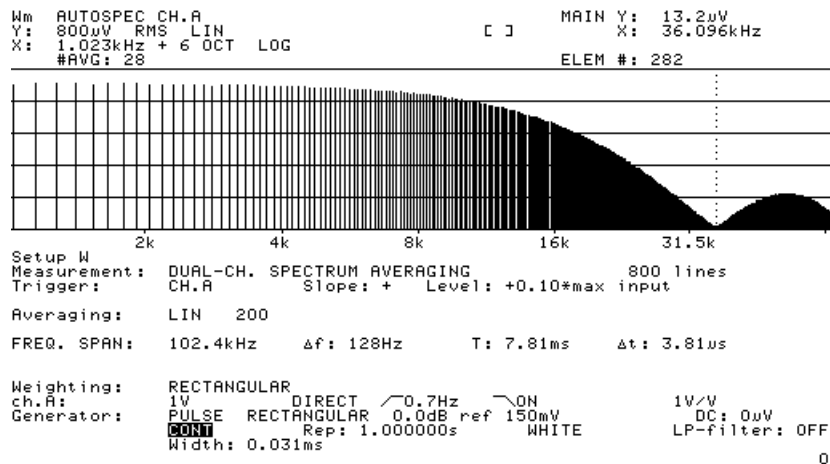


Figura 8.3. Energía de un pulso de duración de 0,031 ms en función de la frecuencia.

En la figura 8.4 se puede observar algo interesante. A pesar de que la energía disminuye en las cercanías de la frecuencia de 36 kHz, cuando representamos este auto-espectro en bandas de 1/3 de octava podemos notar que a pesar de que la energía no tiene un espectro plano, sí tenemos energía en todas las bandas. Por esta razón es conveniente hacer la medición en bandas de una octava o fracciones de octava.

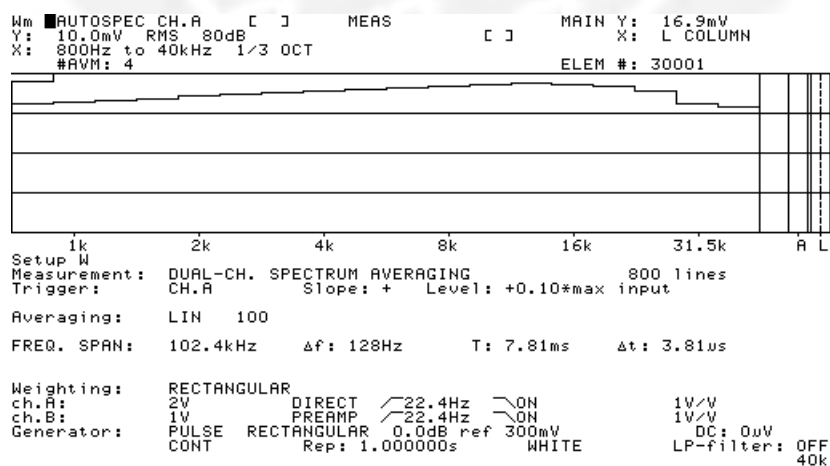


Figura 8.4. Energía de un pulso en bandas de 1/3 de octava.

La energía del pulso emitido es directamente proporcional a su amplitud y duración, esto debe ser considerado pues a medida que las dimensiones del recinto aumentan será

necesaria más energía para poder medir la respuesta impulsiva. La onda sonora directa y las reflexiones sonoras originadas por las superficies y otros elementos dentro del auditorio (figura. 8.5) son recibidas por un micrófono. Primero el sonido directo y luego llegarán, una a una, las reflexiones provenientes de las superficies interiores.

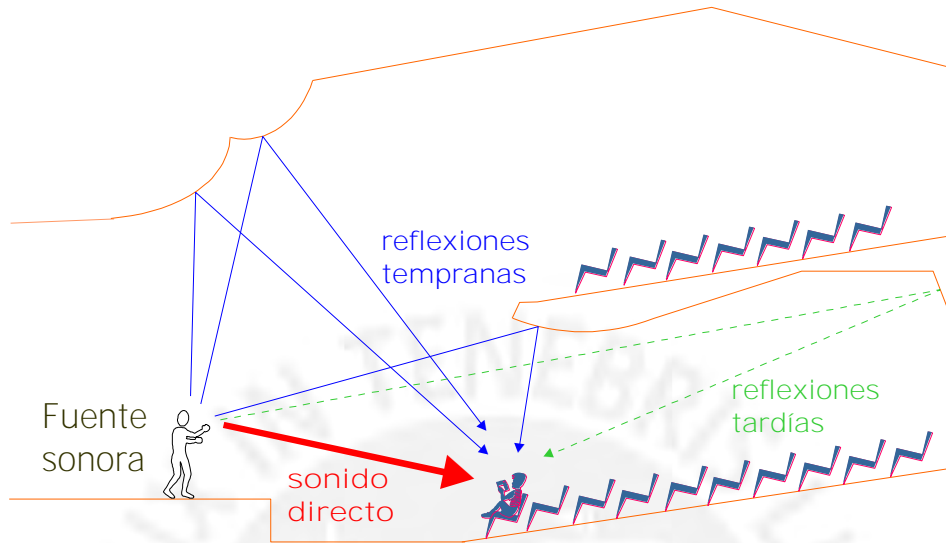


Figura 8.5: Esquema de la generación de la respuesta impulsiva de un recinto.

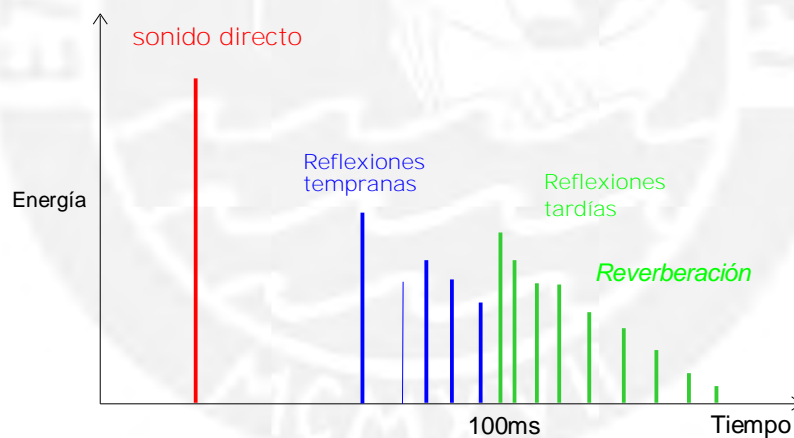


Figura 8.6: Esquema de una respuesta impulsiva típica.

Las reflexiones que llegan al micrófono hasta los 100 ms después del sonido directo se conocen con el nombre de “reflexiones tempranas” y las que llegan posteriormente se conocen con el nombre de reflexiones tardías, a ellas se le atribuye la sensación de reverberación.



## 8.2 Cálculo de $C_{50}$ , $C_{80}$ y $t_s$ para el método gráfico

Si se asume que la presión sonora en un recinto presenta un decaimiento exponencial luego de que una fuente deja de emitir ondas sonoras y se grafica la señal recibida por un micrófono en función del tiempo, se obtendrá una gráfica como la que se muestra. A partir de ella puede calcular el tiempo de reverberación (RT), el cual se define como el tiempo transcurrido para que la presión decaiga 60 dB a partir de que la fuente cesa de emitir señal.

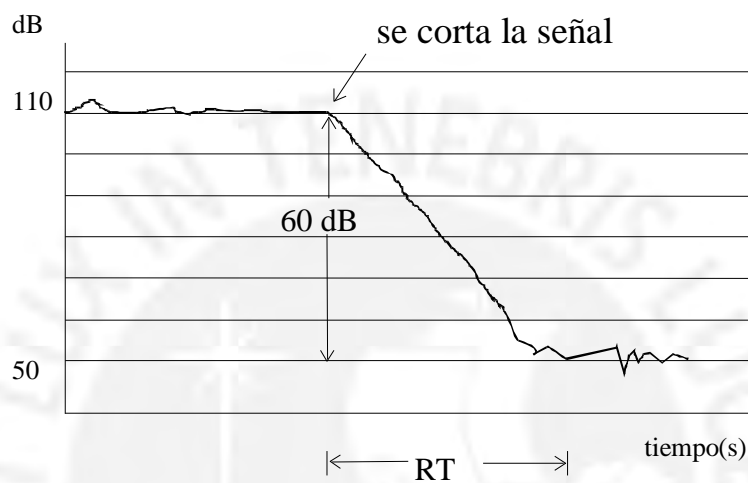


Figura 8.7: Definición del tiempo de reverberación.

Si tenemos un recinto en el cual ninguna frecuencia presenta una resonancia, es decir tenemos un campo sonoro uniforme en cualquier lugar del recinto. El decaimiento de la presión en el tiempo en cualquier punto del recinto será de la forma [26]

$$P^2(t) = P_0^2 e^{-\alpha t} \quad (8.1)$$

y la respuesta impulsiva debe tener también un decaimiento exponencial puro

$$P^2(t) = P_0^2 e^{-\alpha t} \quad (8.2)$$

entonces

$$P_0^2 e^{-\alpha t} = \int_t^{\infty} h_0^2 e^{-2\beta t} dt$$

$$h_0^2 = \alpha P_0^2 \quad y \quad \alpha = 2\beta$$

$$h(t) = \alpha^{1/2} P_0 e^{-\frac{\alpha}{2} t} \quad (8.3)$$

Sabine definió el tiempo de reverberación como el tiempo en el cual el sonido en un recinto decae 60 dB en su nivel de presión sonora inicial. El nivel de presión sonora se



define como

$$L_p(t) = 10 \log \left( \frac{P^2(t)}{P^2_{ref}} \right) \text{ dB}, \text{ donde } P_{ref} = 20 \mu\text{Pa} \quad (8.4)$$

Entonces asumiendo nuevamente un decaimiento exponencial (ecuación 4.1)

$$L_p(t) = 10 \log \left( \frac{P^2(t)}{P^2_{ref}} \right) = 10 \log \left( \frac{P_0^2 e^{-\alpha t}}{P^2_{ref}} \right) \quad (8.5)$$

Luego

$$L_p(t) = L_p(0) - 10\alpha(\log e)t \quad (8.6)$$

$$\text{donde } L_p(0) = 10 \log \left( \frac{P_0^2}{P_{ref}^2} \right)$$

La ecuación 4.5 corresponde a una recta.

Según Sabine, el tiempo de reverberación (RT, T, T<sub>60</sub>) se define como el tiempo en el cual el nivel de presión sonora inicial en un recinto decae 60 dB, entonces

$$L_p(t) - L_p(0) = -60 = -10\alpha(\log e)T_{60} \quad (8.6)$$

$$T_{60} = \frac{6}{\alpha \log e} \text{ s} \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{6}{T_{60} \log e} \cong \frac{13.816}{T_{60}}$$

Nos interesa reemplazar el valor de  $\alpha$  en la ecuación 4.3, esto con la finalidad de tener la respuesta impulsiva del recinto en función de su tiempo de reverberación, entonces

$$h(t) = \left[ \frac{13.816}{T_{60}} \right]^{\frac{1}{2}} P_0 e^{-\frac{6.908t}{T_{60}}} \quad (8.7)$$

Una vez hallado el valor de T<sub>60</sub> se pueden calcular los valores esperados para C<sub>50</sub>, C<sub>80</sub> (Claridad a 50 y 80 ms) y t<sub>s</sub> (tiempo central)

## Claridad

$$C(t) = 10 \log \frac{\int_0^t h^2(t) dt}{\int_t^\infty h^2(t) dt} = 10 \log \frac{\int_0^\infty h^2(t) dt - \int_t^\infty h^2(t) dt}{\int_t^\infty h^2(t) dt} \quad (8.8)$$

$$C(t) = 10 \log \left[ \frac{P^2(0) - P^2(t)}{P^2(t)} \right] = 10 \log \left[ \frac{P^2(0)}{P^2(t)} - 1 \right] = 10 \log \left[ \frac{P^2(0)}{P^2(0)e^{-\alpha t}} - 1 \right] \quad (8.9)$$

$$C(t) = 10 \log [e^{\alpha t} - 1] \quad (8.10)$$

Tomando los valores correspondientes de tiempo iguales a 50 ms y 80 ms [17] respectivamente se obtienen las siguientes expresiones:

$$C_{50} = 10 \log \exp \left[ \frac{0,691}{RT} - 1 \right] dB \quad (8.11)$$

$$C_{80} = 10 \log \exp \left[ \frac{1,105}{RT} - 1 \right] dB \quad (8.12)$$

## Tiempo Central

$$ts = \frac{\int_0^\infty t h^2(t) dt}{\int_0^\infty h^2(t) dt} = \frac{\int_0^\infty t \alpha P_0^2 e^{-\alpha t} dt}{\int_0^\infty \alpha P_0^2 e^{-\alpha t} dt} = \frac{\int_0^\infty t e^{-\alpha t} dt}{\int_0^\infty e^{-\alpha t} dt} \quad (8.13)$$

$$ts = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[ \frac{te^{-\alpha t} + \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha}}{e^{-\alpha t}} \right] + \frac{1}{\alpha} \quad (8.14)$$

El límite de la expresión entre corchetes es cero por lo tanto el valor del tiempo central en segundos para un decaimiento exponencial será  $1/\alpha$ . Normalmente este parámetro se expresa en milisegundos, por lo tanto, la expresión final será

$$t_s = \frac{RT}{0,0138} ms \quad (8.15)$$

# Capítulo 9

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Cremer, H. Müller y T. S. Schultz, *Principles & Applications of Room Acoustics*, (Applied Science, London, 1982), vols. 1 y 2.
- [2] “Symposium on Modelling Techniques in Architectural Acoustics,” *J. Acoust. Soc. Am.* 47, 401-431 (1970).
- [3] F. Spandock, "Akustische Modellversuche, " *Ann. Phys. (Leipzig)* 20 (5), 345-360 (1934).
- [4] F. H. van den Dungen, “Acoustique des Salles,” in *Institut Belge de Recherches Radio-Scientifiques*, (Gauthier-Villars, Paris, 1934).
- [5] M. Barron, “Auditorium Acoustics Modelling Now,” *Appl. Acoust.* 16, 279-290 (1983).
- [6] M. Barron, “The subjective effects of first reflections in concert halls,” *J. Sound Vibr.* 15, 475-494 (1971).
- [7] M. R. Schroeder, “Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces,” S5 en ref. [2].
- [8] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, (Applied Sciences, London, 1973).
- [9] B. G. Watters, “Instrumentation fo Acoustics Modeling,” item S.3 en la ref. [2].
- [10] R. Thiele, “Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruck Wurfe in Raumen,” *Acustica*, vol. 3, 291-302 (1953).
- [11] L. Beranek, “Concert hall acoustics-1992,” *J. Acoust. Soc. Am.* 92 (1) 1-39, 1992.
- [12] V. L. Jordan, “Music Room Acoustics, Part 1: Acoustical Criteria and Acoustical Qualities of Concert Halls,” *The Royal Swedish Academy of Music*, Stockholm (1977).
- [13] H. Marshall, M. Barron, “Spatial Impression Due to Early Lateral Reflections in Concert Halls: The Derivation of a Physical Measure,” *J. Sound Vibr.* 77, 211-232 (1981).
- [14] M. R. Schroeder, “New method of measuring reverberation time,” *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 409-412.
- [15] J. D. Polack, “Digital evaluation of the acoustics of small models: The MIDAS package,” *J. Acoust. Soc. Am.* 85 (1) 185-193 (1989).
- [16] M. Barron, C. B. Chinoy, “1:50 Scale Acoustics Models for Objctive Testing of

Auditoria,” *Appl. Acoust.* 12, 361-375 (1971).

[17] A. C. Gade, “Acoustical Survey of eleven European Concert Halls - A basis for discussion of halls in Denmark,” The Acoustics Laboratory. Technical University of Denmark. Report No. 44, 1989.

[18] M. Vorländer, H. Bietz, “Comparision of Methods for Measuring Reverberation Time,” *Acustica* Vol. 80, 205-215 (1994).

[19] Y. Ando, “A Diagnostic System for Global and Individual Subjetive Evaluations of Sound Field at Each Seat in a Concert Hall,” *Proceedings of W. C. Sabine Centennial Symposium*, 203-206 (1994).

[20] R. Moscoso, J. Moreno, C. Jiménez, R. Piscocoya, J. Moy, “Simulación Acústica en Modelos a Escala,” *Memorias del 2<sup>do</sup> Encuentro Internacional de Acústica en Chile 20-22 octubre de 1995*, Ingeacus 95, Universidad Austral de Chile.

[21] R. Moscoso, J. Moreno, C. Jimenez, R. Moscoso, R. Piscocoya, J. Moy, “Mediciones Acústicas en Modelos a Escala,” *XI Simposio Peruano de Física 18-22 de agosto de 1995*.

[22] R. Piscocoya, “Diseño Acústico de Auditorios empleando trazado de rayos,” *Memorias del 2<sup>do</sup> Encuentro Internacional de Acústica en Chile 20-22 octubre de 1995*, Ingeacus 95, Universidad Austral de Chile.

[23] C. Jiménez Dianderas, M. Panduro Manrique, “Acústica de un local de audición para música concertística y arte lírico en la ciudad de Lima,” *Tesis de la Facultad de Arquitectura, Universidad Ricardo Palma, Lima nov. 1986*.

[24] C. Jiménez Dianderas, “Acoustical Design of Multipurpose Auditoria in Perú,” *Proceedings of the 15th ICA 95, Noruega, 26-30 Junio 1995*.

[25] C. Jiménez Dianderas, “Diseño Arquitectónico del Gran Teatro del Norte de Lima,” *Memorias del 2<sup>do</sup> Encuentro Internacional de Acústica en Chile 20-22 octubre de 1995*, Ingeacus 95, Universidad Austral de Chile.

[26] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coopens, J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, (John Wiley & Sons, 1982).

[27] V. L. Jordan, “A Group of Objctive Acoustical Criteria for Concert Halls,” *Appl. Acoust.* 14, 253-266 (1981).

[28] Ref. [1], pp. 610-622, 626, 627, 605, 437 y 440.

[29] J.S. Bradley, Data from 13 North American Concert Halls, Internal Report No. 688, IRC-CNRC, July 1994.