

UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO  
Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

# **SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DEL ESPACIO ARQUITECTÓNICO EN MODELOS FÍSICOS A ESCALA**

**Luz del Carmen González Rodríguez**

Tesis para optar por el grado de **Maestra en Diseño**  
Línea de Investigación: Arquitectura Bioclimática

Miembros del Jurado:

**Mtro. Fausto E. Rodríguez Manzo**  
*Director de la Tesis*

Dr. Rafael Trovamala Landa  
Dr. Gerardo Alejandro Valentino Orozco  
Dra. Esperanza García López  
Mtro. Víctor Fuentes Freixanet

México D.F.  
julio de 2009

## **Dedicatoria**

A mis padres, por ser mis eternos guías, mi motivación y ejemplo. Por todo el amor, consejos y apoyo.

A mis hermanos, por su amor, su amistad, y enseñarme que siempre hay que intentar más...

A Oscar, por la bendición de su compañía, por todo el amor, consejo y apoyo, por ser mi gran ejemplo de superación y realización. Por el pasado, el presente y el futuro. Por el milagro de Regina.

A mi familia, mis abuelos, tíos y primos por todo su cariño, sus risas, atención y amor.

A mis amigos, Eugenia, Paola, Mónica, Andrea, Audrey, Luis Miguel, por todo el amor y la compañía, por ser parte de mi vida, por enseñarme tanto...

A Rocío Sandoval y Miguel Ángel Ornelas, por la bendición de haber formado parte de mi vida.

## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a toda la gente que me auxilió en la creación de este documento, al CONACYT por las facilidades obtenidas, al personal académico del CCADET de la UNAM por su tiempo y atenciones; al Dr. Rafael Trovamala Landa, Presidente de la Academia de Mecatrónica de la UPIITA del IPN, por su dedicación y por la introducción a las herramientas de medición, así como a los Ing. en Biónica Laura Denis Arias Paredes, Ing. en Biónica Gonzalo Flores Ortega, e Ing. en Biónica Rodolfo Reyes Agustín, por sus enseñanzas en el laboratorio; al Dr. Gerardo A. Valentino Orozco, Maestro Decano de la UPIITA del IPN, por sus consejos y correcciones en la revisión de este documento. Al DCG Rafael Villeda Ayala por su valiosísima ayuda y disposición en la construcción del modelo físico a escala, al Act. Luis Miguel Alonso Pérez y Dra. Act. Karla Medina Díaz, por su asesoría. Asimismo, quiero reconocer y agradecer la labor de mis maestros, en especial a la Dra. Esperanza García López, Dr. Manuel Rodríguez Viqueira, Mtro. Víctor A. Fuentes Freixenet, Mtra. Verónica Huerta Velázquez por su continuo apoyo y orientación. De igual forma al personal de los departamentos de la División de CyAD, Medio Ambiente y Procesos y Técnicas, en especial a María de la Luz Ruiz y Mercedes Rangel. Agradezco también la motivación, ejemplo y apoyo de mis compañeros y amigos Arq. Andrea Fernández Meza, Arq. Elisa Garay Vargas, Arq. Ana Julieta Acuña, Arq. Miriam Arauza Franco y Arq. Javier Cuevas Cruz.

En especial quiero agradecer a mi tutor, Mtro. Fausto E. Rodríguez Manzo, por su tiempo, ayuda, entusiasmo, dedicación, motivación y por haberme introducido al universo de la acústica arquitectónica.

*Desde hace veinticinco siglos el saber occidental  
intenta ver el mundo.  
Todavía no ha comprendido que el mundo no se mira,  
se oye. No se lee, se escucha.  
(Attali, 1995)*

## **RESUMEN**

Como respuesta a algunos de los problemas actuales de contaminación y abusos en los consumos energéticos, los responsables de diseño y construcción de espacios debemos tomar mayor conciencia de lo que cada decisión y elemento de diseño generará tanto en el exterior, hacia el medio ambiente, como al interior de los espacios, logrando una armonía entre forma y función.

El confort acústico influye de manera significativa en la función de un espacio arquitectónico, ya que todas las actividades humanas tienen que ver con algún aspecto del sonido o la ausencia del mismo, y es uno de esos elementos que los arquitectos, por lo general, no están acostumbrados a diseñar. Es así que para dar soluciones espaciales adecuadas se hace indispensable analizar el comportamiento del sonido dentro de los espacios proyectados, y para tal efecto es necesario aplicar procedimientos de medición y prueba para determinar la efectividad de los elementos, materiales y sistemas acústicos propuestos en la etapa de diseño.

En la presente investigación se propone un modelo de predicción acústica por medio de modelos físicos a escala, método que facilitará el estudio de un fenómeno puramente auditivo con el apoyo de elementos visuales, y que servirá como herramienta didáctica auxiliar en la enseñanza y aprendizaje de los conceptos fundamentales del diseño acústico de recintos, al utilizar el lenguaje propio del diseño.

Palabras clave: confort acústico, sonido, medición, prueba, predicción, modelos físicos a escala, simulación

## **ABSTRACT**

Due to problems associated with pollution and abuse in energy consumption we should take greater conscience, as design and construction planners, in what each interior and exterior design decision will generate to the environment.

Nowadays it is very important to know the way in which architectural spaces react to different conditions, so as to predict, even during the design phase, their response. To manage this, it is convenient to use some sort of model to simulate different situations.

Sound has to be integrated as a design concept in architecture, but architects need tools for the better understanding of the way to reach, not only good acoustics, but also good architectural design. The benefit in the use of these models by interior designers and architects is the consideration of sound as an important design element and applies directly to the achievement of acoustical quality of rooms. Designers and architects are used to work with physical scale models to visualize many design issues, so the approach of acoustic consideration and design can be better understood with these acquainted tools.

The main goal of this work is to prove that the same method of prediction of sound behaviour in rooms can be applied to scale models, in order to obtain reliable results and to apply them in the creation of architectural spaces in which sound is integrated for the benefit of their users and activities.

Key words: sound, simulation model, acoustic quality, physical scale model.

**Índice**

---

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	4
ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	4
<b>ESTADO DEL ARTE</b>	5
CONFORT AMBIENTAL	7
CONFORT ACÚSTICO	8
ACÚSTICA	10
PERSPECTIVA HISTÓRICA	13
PERSPECTIVA PSICOLÓGICA	19
PERSPECTIVA SOCIAL	20
<b>1. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA</b>	22
1.1 CONCEPTOS DE ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	24
1.2 CALIDAD ACÚSTICA	28
1.2.1 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS Y LAS CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS	32
1.2.2 TIEMPO DE REVERBERACIÓN COMO PARÁMETRO DETERMINANTE EN LA CALIDAD ACÚSTICA DE RECINTOS	34
1.2.3 NORMA ISO 3382:1997: <i>MEDICIÓN DEL TIEMPO DE             REVERBERACIÓN DE RECINTOS CON REFERENCIA             A OTROS PARÁMETROS ACÚSTICOS</i>	35
1.2.3.1 POSICIONES DEL EQUIPO DE MEDICIÓN	37
1.2.3.2 MEDICIÓN DE BAJA COBERTURA	38
1.2.3.3 MEDICIÓN DE COBERTURA NORMAL	38

<b>2. PREDICCIÓN Y EXPERIMENTACIÓN EN ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA</b>	39
2.1 DEFINICIÓN DE LABORATORIO	40
2.2 LABORATORIOS DE ACÚSTICA	41
2.2.1 CÁMARAS	41
2.2.2 ESTUDIOS REALIZADOS EN LABORATORIOS DE ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	43
2.3 MODELOS DE SIMULACIÓN ACÚSTICA	45
2.3.1 MODELOS FÍSICOS	46
2.3.2 MODELOS MATEMÁTICOS	52
2.3.3 MODELOS COMPUTARIZADOS	52
2.3.4 SIMULACIÓN AURAL	54
<b>3. EL LABORATORIO DE ANÁLISIS Y DISEÑO ACÚSTICO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA, UNIDAD AZCAPOTZALCO</b>	56
3.1. CÁMARA SONOAMORTIGUADA DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS Y DISEÑO ACÚSTICO	58
3.2 INSTRUMENTACIÓN	61
3.2.1 ANALIZADOR DE ESPECTRO	61
3.2.2 AMPLIFICADOR DE SEÑALES	62
3.2.3 ALTAVOZ	63
3.2.4 MICRÓFONO	64
3.2.5 SISTEMA DE MEDICIONES	66
3.3 MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN LA CÁMARA SEMIANECÓICA DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS Y DISEÑO ACÚSTICO DE LA UAM-A	68
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA SONOAMORTIGUADA DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS Y DISEÑO ACÚSTICO DE LA UAM-A	71

<b>4. PROPUESTA DEL MODELO DE EXPERIMENTACIÓN PARA LA SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS EN MODELOS FÍSICOS A ESCALA</b>	74
4.1 MÉTODO SELECCIONADO	76
4.2 MODELO DE EXPERIMENTACIÓN PROPUESTO	77
<b>5. APLICACIÓN DEL MODELO</b>	80
5.1 CASO DE ESTUDIO. ELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ESPACIO	82
5.2 MODELO FÍSICO	84
5.2.1 FACTORES DETERMINANTES DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MODELO FÍSICO APLICABLE A LA CÁMARA SONOAMORTIGUADA	84
5.2.2 ESCALA Y MATERIALES	87
5.3 PARÁMETROS ACÚSTICOS A VERIFICAR EN EL MODELO	89
5.4 MEDICIONES Y EXPERIMENTACIÓN	90
5.5 RESULTADOS OBTENIDOS Y OBSERVACIONES	92
5.5.1 MEDICIONES EN EL ESPACIO REAL	93
5.5.2 MEDICIONES EN EL MODELO FÍSICO A ESCALA PROPUESTO	95
5.6 VERIFICACIÓN DEL MODELO FÍSICO A ESCALA PROPUESTO	99
5.7 VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	102
5.8 DISCUSIÓN	106
<b>CONCLUSIÓN.</b>	111
A. DESCRIPCIÓN DE LOS HECHOS	112
B. LO QUE SE OBTUVO	113
C. LO QUÉ SE APORTA	114
D. ¿QUÉ SIGUE?	115

## **APÉNDICES**

I. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN CON EL ANALIZADOR NORSONIC NOR-840	117
II. CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA MINIATURA	122
III. TABLA DE VALORES CUANTILES DE LA DISTRIBUCIÓN t DE <i>STUDENT</i>	126
IV. LISTADO DE LABORATORIOS DE ACÚSTICA	128

## **GLOSARIO**

135

## **REFERENCIAS**

139

## **CURRICULUM VITAE**

147

## Índice de Figuras y Tablas

# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. i.1. Características físicas del sonido	11
Fig. i.2. Gran templo de Abydos	13
Fig. i.3. Pintura de la tumba de Djeser-Kere-Somb	14
Fig. i.4. Teatro de Epidauro	15
Fig. i.5. Arena romana en Verona	15
Fig. i.6. Wallace Clement Sabine	17
Fig. 1.1. Representación del fenómeno de la absorción acústica	25
Fig. 1.2. Gráfica ejemplo de la respuesta de TR de un recinto	25
Fig. 1.3. Gráfica de tiempos de reverberación óptimos	25
Fig. 2.1. Cámara anecoica del Nacional Metrology Institute of Japan	41
Fig. 2.2. Cámara semianecoica del Niosh Mining Laboratory	42
Fig. 2.3. Cámara reverberante del Institute of Communication Acoustics	42
Fig. 2.4. Objetivo de los modelos	45
Fig. 2.5. Fotografía con la técnica de Schlieren	47
Fig. 2.6. Modelo físico a escala para pruebas acústicas de una sala de conciertos	48
Fig. 2.7. Modelo computarizado de la Gateshead Concert Hall	53
Fig. 3.1. Planta e isométrico de la cámara sonoamortiguada del LADAc de la UAM-A	58
Fig. 3.2. Vistas del interior de la cámara sonoamortiguada del LADAc de la UAM-A	58
Fig. 3.3. Detalle del panel de recubrimiento interior de la cámara sonoamortiguada	59
Fig. 3.4. Placa de conexiones del interior de la cámara sonoamortiguada	60
Fig. 3.5. Analizador Nor-840 de Norsonic	61
Fig. 3.6. Amplificador Norsonic 260	62
Fig. 3.7. Altavoz hemidodecaédrico Norsonic	63
Fig. 3.8. Fuente sonora miniatura	64
Fig. 3.9. Micrófono de patrón omnidireccional y preamplificador de ½" Norsonic	65
Fig. 3.10. Micrófono y preamplificador Norsonic	65
Fig. 3.11. Micrófono de patrón omnidireccional de ¼" Gras	66
Fig. 3.12. Representación gráfica de la forma en la que las señales son reproducidas, captadas y procesadas para su visualización	67
Fig. 3.13. Gráfica ejemplo de la respuesta al impulso, visible a través de la pantalla del analizador	67
Fig. 3.14. Gráficas de la respuesta al impulso de la cámara semianecoica, curva de decaimiento y resultados numéricos por frecuencia	68

Figs. 3.15 y 3.16. Gráficas de la respuesta al impulso de la cámara semianecóica, curva de decaimiento y resultados numéricos por frecuencia	69
Fig. 3.17. Espectro obtenido a la altura de 96 cm tomados de la primera columna de medición	72
Fig. 3.18. Espectro y su FFT	72
Fig. 3.19. Comportamiento de la frecuencia de 60 Hz a 96 cm del nivel del piso	73
Fig. 4.1. Modelo de experimentación propuesto	77
Fig. 5.1. Planta y corte de la Sala de Consejo Divisional de CyAD, edificio H-P	83
Fig. 5.2. Vistas del interior de la Sala de Consejo Divisional de CyAD, edificio H-P	83
Fig. 5.3. Fuente sonora miniatura para modelos a escala	86
Figs. 5.4 y 5.5. Corte de las piezas de macocel que conforman muros, piso y techo	88
Fig. 5.6. Ensamble de las piezas para formar muros	88
Fig. 5.7. Ensamble de elementos perimetrales	88
Fig. 5.8. Modelo terminado	89
Fig. 5.9. Interior del modelo físico	89
Fig. 5.10. Posiciones de la fuente sonora y el micrófono para las mediciones de RT dentro del caso de estudio	90
Fig. 5.11. Vista isométrica de las posiciones de la fuente sonora y el micrófono para las mediciones de RT dentro del caso de estudio	91
Figs. 5.12, 5.13 y 5.14. Diferentes posiciones del equipo de medición dentro de la Sala de Consejo Divisional de CyAD	92
Fig. 5.15. Primera gráfica de la energía alcanzada mediante la excitación del recinto real por medio de ruido rosa	92
Fig. 5.16. Gráfica del RT del espacio real medido en los puntos A2B1 para 500 Hz	93
Fig. 5.17. Gráfica del RT del espacio real medido en los puntos D1C2 para 500 Hz	93
Fig. 5.18. Micrófono de ¼"	95
Fig. 5.19. Fuente sonora miniatura	95
Figs. 5.20 y 5.21 Posición de fuente y micrófono dentro de la maqueta	95
Fig. 5.22. Curva de decaimiento dentro del modelo a escala en el punto D1B2 a 10 kHz	97
Fig. 5.23. Máximo nivel sonoro alcanzado en el punto D1B2 a 5 kHz	97
Fig. 5.24. Posición rotada de la fuente miniatura para las mediciones	101
Fig. 5.25. Curva de decaimiento en la posición D1B3 a 500 Hz	107
Fig. 5.26. Curva de decaimiento en la posición D1B3 a 5 kHz	107
Fig. 5.27. Curva de decaimiento en la posición D1C2 a 1 kHz	107
Fig. 5.28. Curva de decaimiento en la posición D1C2 a 10 kHz	108
Fig. 5.29. Filtrado de ruido	108

Fig. x.1. Teclado de funciones del analizador Norsonic Nor 840	118
Fig. x.2. Ventana emergente de la condición de disparo de la prueba	118
Fig. x.3. Ventana de tipo de ruido a generar: filtrado	119
Fig. x.4. Ventana de tipo de ruido a generar: rosa	119
Fig. x.5. Ventana de tipo de excitación: ruido	119
Fig. x.6. Ventana de tipo de excitación: impulso	119
Fig. x.7. Ventana de máximo nivel alcanzado en espacio real	120
Fig. x.8. Ventana de máximo nivel alcanzado en modelo a escala	120
Fig. x.9. Ventana de listado de valores T20 y T30 para todas las frecuencias de medición	120
Fig. x.10. Curva de decaimiento en el espacio real	121
Fig. x.11. Curva de decaimiento en el modelo a escala	121
Fig. x.12. Ventana de apertura de archivo guardado	121
Fig. xx.1. Micrófono a 0°-360°	122
Fig. xx.2. Micrófono a 30°	122
Fig. xx.3. Micrófono a 60°	122
Fig. xx.4. Micrófono a 90°	122
Fig. xx.5. Micrófono a 120°	123
Fig. xx.6. Micrófono a 150°	123
Fig. xx.7. Micrófono a 180°	123
Fig. xx.8. Micrófono a 270°	123
Fig. xx.9. Micrófono a 300°	123
Fig. xx.10. Micrófono a 330°	123
Fig. xx.11. Diagrama polar del altavoz miniatura usado en las pruebas dentro del modelo físico a escala	124
Fig. xx.12. Comparación de patrones de directividad de los altavoces miniatura y hemidodecaédrico.	125

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tabla de tiempos de reverberación recomendados	27
Tabla 1.2. Tabla de relación entre parámetros acústicos y la percepción acústica en el espacio arquitectónico	33
Tabla 5.1. Tabla de relación de uso de diferentes escala según diversos autores	85
Tabla 5.2. Resultados del RT de las mediciones realizadas en el espacio real	94
Tabla 5.3. Resultados del RT de las mediciones realizadas en el modelo físico a escala	96
Tabla 5.4. Tabla de comparación de resultados de T20 y T30 para el recinto real y su modelo físico a escala a 500 Hz y 5 kHz respectivamente	98
Tabla 5.5. Tabla de comparación de resultados de T20 y T30 para el recinto real y su modelo físico a escala a 1 kHz y 10 kHz respectivamente	98
Tabla 5.6. Tabla comparativa entre los métodos experimentales y numéricos para la obtención de RT en el recinto real y su modelo físico a escala	101
Tabla xxx.1. Tabla de valores cuantiles de la distribución $t$ de Student	126

# ABREVIATURAS

CyAD	Ciencias y Artes para el Diseño
$C_{80}$	Índice de claridad
EDT	Tiempo de decaimiento temprano
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> . De gran importancia en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento digital de señales y filtrado digital en general, a la resolución de ecuaciones diferenciales parciales o los algoritmos de multiplicación rápida de grandes enteros.
G	Sonoridad
IACC	Coefficiente de Correlación Interaural Cruzada
ISO	International Standard Organization
LADAc	Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico
LEF	Fracción Lateral de Energía
$L_p$	Nivel total de presión sonora
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> . Tablero aglomerado de fibras de madera de mediana densidad
NRC-IRC	National Research Council Institute for Research in Construction
RT	Tiempo de Reverberación
SRI	Índice de Reducción Sonora
SPL	<i>Sound Pressure Level</i> . Nivel de presión sonora
UAM-A	Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco
UCLA	University of California, Los Angeles

# SIMBOLOGÍA

dB	decibel
$f$	Frecuencia
Hz	Hertz
kHz	1000 Hertz
$\lambda$	Longitud de onda
m	metros
ms	milisegundos
s	segundos
$T_{20}$	Tiempo de reverberación obtenido mediante el registro del decaimiento sonoro entre -5 dB y -25 dBm extrapolado hasta un decaimiento total de 60 dB
$T_{30}$	Tiempo de reverberación obtenido mediante el registro del decaimiento sonoro entre -5 dB y -35 dB extrapolado hasta un decaimiento total de 60 dB

## **Introducción**

---

# **INTRODUCCIÓN**

El interés por abordar el tema del confort acústico y su relación con la arquitectura surge al estudiar los diferentes conceptos que conforman la arquitectura bioclimática, así como la forma en la que cada uno de sus componentes determinan el bienestar de los usuarios de los espacios con respecto a las actividades que ahí desarrollan.

El tema del confort acústico poco se ha explorado en investigaciones nacionales dentro del ejercicio de la arquitectura y el diseño, y los problemas asociados a esta deficiencia cotidianamente se delegan a profesionales especializados. Sin embargo parece ilógico que los creadores de los espacios se ocupen de la estética, la iluminación, ventilación, paisaje y otros componentes e ignoren los factores acústicos que se generarán dentro de los espacios, factores determinados su propia configuración espacial.

Además de esta visión, referida a la búsqueda continua de los componentes del confort dentro de los espacios, también viene implícita una postura ecológica, al evitar intervenciones que pueden soslayarse si se consideran desde el principio todos los componentes que intervendrán dentro de un espacio en función de las actividades que se desarrollen alrededor de él. Las modificaciones en los recintos pueden llegar a ser agresiones en contra de la ecología al involucrar procesos contaminantes tanto de producción de materiales como la actividad constructiva misma. Si desde la etapa de diseño se consideran los componentes del confort integral y el correcto funcionamiento de los espacios arquitectónicos de acuerdo con las actividades de sus ocupantes, contribuiremos a mejorar la calidad del producto final y con ello, nuestra calidad de vida.

Actualmente en la práctica del diseño y construcción de espacios el factor al que menos se atiende es al acústico. Cotidianamente se deben hacer intervenciones en edificios y en espacios en donde existen problemas relacionados con el sonido y la actividad que ahí se desarrolla debido a la falta de previsión en este sentido. Algunas características

no deseadas dentro de los recintos como son la reverberación excesiva y ruidos intrusivos podrían ser evitadas si los arquitectos tuviésemos una mejor formación y desarrollo de la percepción acústica de los espacios que diseñamos y construimos.

Sin embargo existe un vacío de información entre la literatura relacionada con la acústica y la que aborda el diseño de espacios arquitectónicos de uso común. Hace falta mayor información dirigida a los profesionales del diseño que tenga por objetivo mostrar los fenómenos acústicos relevantes que ayuden al óptimo funcionamiento de espacios arquitectónicos cotidianos. En la búsqueda de este tipo de información y de métodos que resulten familiares en un lenguaje común de diseño se realizó esta investigación, buscando que los arquitectos no se conviertan en expertos en acústica, pero que tengan bases suficientes para que la intervención de especialistas en el proceso de diseño de un recinto sólo enriquezca a las propuestas de diseño originales.

Los objetivos del Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAc) de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-A) se centran en sus funciones didácticas y de investigación, al auxiliar en la formación de estudiantes de arquitectura y diseño bajo el concepto de la integración del confort acústico dentro de los recintos, así como la posibilidad de ser una herramienta para los profesionales del diseño y construcción en la precisión de algunos parámetros acústicos, a fin de lograr la integración de sensaciones en los espacios y dotar a éstos de *calidad acústica*.

El trabajo que a continuación se presenta propone un modelo de experimentación a través de modelos físicos a escala dentro del ambiente controlado del LADAc de la UAM-A.

El presente documento está estructurado por seis capítulos. El primero describe los conceptos de la acústica arquitectónica, la calidad acústica y presenta la norma internacional ISO 3387:1997, la cual establece un método en el proceso de mediciones y experimentación en recintos construidos aplicable a modelos físicos a escala. En el segundo capítulo se definen los laboratorios como ambientes controlados para realizar investigaciones diversas, para después específicamente hablar sobre laboratorios de acústica y los estudios que se han llevado a cabo en los últimos años y que resultan relevantes en la presente investigación. El tercer capítulo describe el LADAc de la UAM-A y sus componentes, así como el equipo de medición para las pruebas acústicas. El capítulo cuarto presenta el modelo de experimentación propuesto para la obtención del parámetro RT en modelos físicos a escala comparado con el método usado en espacios a escala natural. El capítulo quinto describe el caso de estudio así como la validación del modelo por medio del análisis de los resultados obtenidos, haciendo del modelo presentado una herramienta de comprensión del comportamiento del sonido dentro de los recintos así como de predicción acústica en las primeras etapas del diseño.

En cuanto a los resultados y las aportaciones obtenidas gracias a esta investigación, se puede mencionar que el uso de modelos físicos para la simulación del comportamiento del sonido resulta apropiado como método de predicción aplicable para el diseño arquitectónico, al usar un lenguaje y métodos familiares para arquitectos y diseñadores logrando resultados relativamente similares entre las mediciones reales y las realizadas dentro de los modelos a escala.

## **OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN**

Correlacionar las características acústicas de espacios arquitectónicos reales con las características de modelos físicos a escala, obtenidas dentro de una cámara sonoamortiguada.

## **ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación concluirá con la propuesta de un modelo de experimentación en modelos físicos a escala en la cámara sonoamortiguada del LADAc de la UAM-A. Se propone un método para la realización de pruebas acústicas dentro de los modelos físicos con el objetivo de evaluar su diseño con respecto a sus requerimientos acústicos según las actividades que ahí se lleven a cabo.

**Estado del Arte**

---

## **ESTADO DEL ARTE**

La práctica de la arquitectura contemporánea busca cada vez con mayor insistencia responder a la moda y a la estética, muchas veces dejando de lado los conceptos fundamentales para concebir un espacio. Es común en el ejercicio del diseño arquitectónico que se ignoren factores como el asoleamiento, la iluminación y la ventilación naturales. La globalización y el rápido crecimiento de las ciudades han influido en la actitud despreocupada de los responsables de las nuevas edificaciones basándose en el avance tecnológico y la estética, con una tendencia a ignorar casi por completo al medio ambiente.

La arquitectura ambiental o bioclimática es aquella que optimiza sus relaciones bioenergéticas con el entorno medioambiental mediante su propio diseño arquitectónico. La arquitectura bioclimática se adapta al medio ambiente, es sensible al impacto que provoca en la naturaleza e intenta optimizar el consumo energético y con ello minimizar la contaminación ambiental (*Ambientum*, 2003).

A pesar de que pareciera ser un concepto nuevo, los conceptos fundamentales de la arquitectura bioclimática son los usados por la arquitectura tradicional y vernácula, en donde las viviendas y espacios de uso común están perfectamente adaptados al medio ambiente natural y a las necesidades de sus ocupantes.

Como diseñadores y responsables de los procesos constructivos debemos considerar y retomar la sabiduría que la arquitectura tradicional encierra con el objeto de crear espacios mejor adaptados al entorno ambiental, social y cultural que los rodeen.

## **CONFORT AMBIENTAL**

El bienestar humano es el concepto más importante dentro del diseño arquitectónico bioclimático y se refiere al estado mental del hombre en el cual expresa satisfacción o bienestar físico y psicológico ante el medio ambiente que lo rodea. Un ambiente confortable es aquel en donde las actividades puedan realizarse sin perturbaciones físicas o mentales (Rodríguez, 2001). Es necesario manejar el concepto de bienestar en cualquier espacio en que se realice actividad humana, de lo contrario se afectan la eficiencia y productividad del hombre hasta llegar a producir trastornos físicos, psicológicos y de salud en general (Calle, 2006).

Comprender el concepto de confort ambiental dada la complejidad de la naturaleza humana en relación con un entorno saludable para el hombre, donde inciden no sólo aspectos de confort térmico sino también incluye el lumínico, olfativo, acústico, psicológico, social, espacial y ambiental, es fundamental para la optimización de recursos energéticos, así como para disminuir el impacto negativo que genera el crecimiento de las ciudades.

En atención a que cada vez hay un mayor grado de conciencia ambiental dentro de la sociedad, los diseñadores de los espacios, sean éstos arquitectos o ingenieros, deben considerar nuevos aspectos y cualidades en los recintos proyectados, características que a favor y en beneficio de sus usuarios deben tomarse en cuenta desde las primeras etapas del diseño, en la idea y concepción misma del espacio.

El medio ambiente natural y construido se percibe con los sentidos de la vista, el olfato, el oído y el tacto, sin embargo estamos acostumbrados a que toda referencia de los espacios se hace con respecto a la percepción visual y pocas veces se toman en cuenta los otros sentidos. Actualmente vivimos en la “civilización de la imagen” (Palmese y Carles, 2005) sin embargo, la conjunción de todos los sentidos en la

percepción integral de los espacios contribuirán a una experiencia completa dentro de los mismos. Sería erróneo continuar con la tendencia de que el diseño de espacios sólo se enfoque a la experiencia visual, ya que como C. Palmese y J. Carles (2005) afirman, “la vista separa, divide, marca límites, mientras que el oído atraviesa los límites, reúne y da continuidad”.

Es así que en la fase de diseño y proyecto de todo espacio el nivel de confort acústico debe considerarse dentro de los parámetros adecuados en beneficio de sus propios usuarios, como F. Rodríguez (2001: 181) afirma “la arquitectura bioclimática considera que todo espacio donde se desarrollen actividades humanas debe estar dentro de parámetros de confort y esa consideración alcanza al aspecto acústico también”.

## **CONFORT ACÚSTICO**

Se define como “un estado de bienestar físico y mental del ser humano en su percepción auditiva, en un momento dado y en un ambiente específico” (Rodríguez, 2001:184). Con un adecuado control sonoro de los recintos se pueden generar o incrementar beneficios en las actitudes y habilidades de sus ocupantes en las actividades que realizan cotidianamente, ya que, como afirman G. Siebein y B. Kinzey (1998: 236): “la necesidad de una atención especial a la acústica es evidente en una sala de conciertos o un estudio de radio, sin embargo los grandes problemas surgen en los espacios ordinarios, en donde la gente trabaja y vive”. El confort acústico es una característica necesaria de los espacios arquitectónicos, ya que consciente o inconscientemente todas las actividades humanas tienen que ver con algún aspecto de la acústica (Rodríguez, 2001).

Sin lugar a duda, un espacio en el cual se considera el acondicionamiento acústico como uno de sus requerimientos a satisfacer, asegura la distribución y comportamiento eficiente del sonido así como la exclusión de elementos indeseables, independientemente si se trata de un proyecto complejo como podría ser una sala de conciertos o un estudio de grabación, en donde el comportamiento acústico es parte fundamental de la concepción de dicho espacio; sin embargo las viviendas, hospitales, oficinas, fábricas, salones de clases, y demás espacios en donde se desarrollan actividades por periodos de tiempo más largos, también deben estudiarse acústicamente para garantizar el funcionamiento armonioso de éstas, desde su configuración espacial, materiales y sistemas constructivos, así como la forma en que éstos se colocan, hasta el entorno en donde dichos espacios se ubiquen.

Integrar el confort acústico dentro de los espacios arquitectónicos proyectados, beneficiará a sus usuarios al permitirles sentir el espacio, vivirlo y aprovechar sus cualidades acústicas en favor de las actividades que ahí realicen. Además, prever el comportamiento que el espacio tendrá con respecto al sonido evitará intervenciones posteriores para solucionar problemas acústicos. Los beneficios de esta prevención también son económicos, al evitar modificaciones futuras por medio de un correcto diseño, y ecológicos al descartar remodelaciones e intervenciones cuyos procesos son altamente contaminantes. Es así como se hace importante conocer el comportamiento del sonido dentro de los espacios proyectados y para tal efecto es necesario aplicar algunos procedimientos de medición para determinar la efectividad de elementos, materiales y sistemas acústicos propuestos desde la etapa de diseño.

Lo expuesto anteriormente da sustento a la trascendencia que tiene el *diseño acústico* dentro del diseño de espacios arquitectónicos. De esta manera se hace evidente la urgencia de comprender el comportamiento del sonido de los recintos ya que éste redundará en una previsión de los efectos que podrían tener ciertas propuestas de diseño.

# ACÚSTICA

La palabra *acústica* surge del griego *akouein*, oír, escuchar. La acústica es la rama de la Física que estudia el sonido, que es la variación de la presión en el aire dentro del rango audible (Ziobrosky y Powers, 2005), y a partir de la cual se propaga una onda cuyas propiedades y características dependen del medio en el cual se transmitan (Cavanaugh, 1999). El sonido es definido por la Real Academia de la Lengua como la "sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire" (Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, 2001).

El comportamiento del sonido dentro de un recinto puede entenderse como el "National Research Council Institute for Research in Construction" (NRC-IRC, 2006) define en su norma: "El sonido se dispersa en todas direcciones a partir de la fuente, y puede ser reflejado, absorbido y/o transmitido en el momento en el que hace contacto con cualquier superficie".

El sonido posee propiedades y características físicas, como la **frecuencia** ( $f$ ) de una onda sonora, que es el número de veces u oscilaciones que repite su patrón en una unidad de tiempo (Warnock, 1985). La frecuencia se mide en Hz y se relaciona con el tono del sonido (agudo o grave). Por lo general, los sonidos normales que percibimos están compuestos por varias frecuencias <sup>1</sup> (NRC-IRC, 1993).

---

<sup>1</sup> El oído humano normal, entre los 18 y 25 años, es capaz de percibir frecuencias entre 20 y 20,000 Hz aprox. (Cowan, 2000).

La **longitud de onda** ( $\lambda$ ) es la distancia que recorre una onda antes de que se repita (fig. i.1), y es inversamente proporcional a la frecuencia, es decir, a mayor frecuencia, menor longitud de onda [1]:

$$\lambda = \frac{\text{velocidad}}{\text{frecuencia}} \quad [1]$$

Por ejemplo, en el aire, bajo condiciones normales, la frecuencia de 20 Hz tiene una longitud de onda de 17 m., mientras que a 20,000 Hz le corresponde una longitud de onda de 0.02 m (Cowan, 2000).

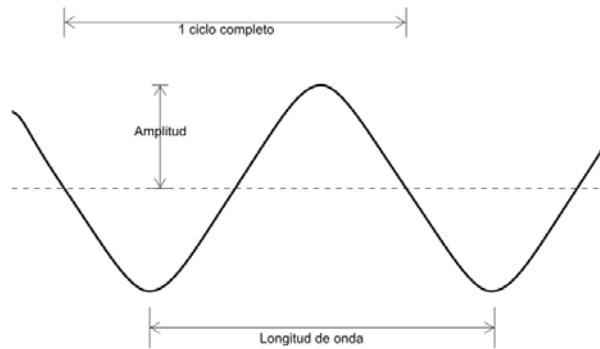


Fig. i.1 Características físicas del sonido

La **velocidad de propagación del sonido** está determinada en función de la elasticidad y densidad del medio en el cual se propague, en general se propaga a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases, ya que mientras la velocidad de propagación del sonido en el aire, en condiciones normales de presión (1 atmósfera y 22°C), es de aproximadamente 345 m/s (Carrión, 1995), en el agua (a 15°C) se propaga a 1450 m/s y en el acero a 5000 m/s (Burbano, 2003).

En documentos del NRC-IRC, Crocker (1998) afirma que el nivel de presión acústica está representado por una medida relativa, una relación logarítmica denominada decibel, **dB**, que es la unidad para expresar la intensidad relativa de los sonidos en una escala que empieza en 0 para los sonidos que en promedio menos se perciben, hasta 130, que es el umbral del dolor promedio (Ziobroski y Powers, 2005).

El sonido posee cualidades acústicas:

**Duración**, es el tiempo de vibración del objeto, expresado en unidades de tiempo.

**Tono**, número de vibraciones o frecuencia por segundo. Mientras mayor número de vibraciones el sonido será más agudo, así como grave a menor número de ellas.

**Timbre**, característica que hace posible distinguir entre dos sonidos de igual frecuencia e intensidad emitidos por fuentes de diferente naturaleza (Llinares, Llopis y Sancho, 1991).

**Intensidad**, amplitud de onda o potencia. El sonido propagado por área (unit area), en una dirección dada y medido sobre un área perpendicular a la dirección de propagación. Las unidades de la intensidad sonora se expresan en  $W/m^2$  (Ziobroski y Powers, 2005). Distingue entre sonidos fuertes y tenues (sonoridad) y se relaciona con la presión acústica (Pérez, 1969 y Laforga, 2000).

Los aspectos mayormente abordados por la Acústica moderna son: generación y propagación del sonido, así como los fenómenos de absorción, reflexión y difusión del sonido al interactuar con el medio, y la percepción y respuesta de los humanos ante los estímulos sonoros.

En la actualidad la acústica ha dejado de ser una simple herramienta de la industria de las telecomunicaciones, estrategias militares y la investigación musical para convertirse en un factor de investigación, preocupación y atención común (Beranek, 1954), al considerar el concepto de confort acústico un parámetro necesario para la salud física y mental de los humanos (Raichel, 2000).

## Perspectiva Histórica

En la antigüedad la importancia del sonido ocupó un lugar fundamental para la supervivencia de los humanos, definiendo su espacio y actividades. Poco a poco, la relación generada entre el sonido y el medio fue reconocida e incluso estudiada con diversos objetivos, se sabe de escritos, tradiciones orales, restos de monumentos o sitios en donde se demuestran conocimientos acústicos en diferentes épocas (Palmese, et al., 2005). Sin embargo estos estudios eran prácticamente un arte, ya que los expertos usaban principalmente sus oídos y criterio, no contaban con herramientas o equipos de precisión (Beranek, 1954).

El conocimiento del comportamiento del sonido dentro de los recintos surge ligado con la música y su ejecución dentro de templos y espacios destinados a tal fin, y se demuestra por el uso de la geometría sagrada en el diseño y la construcción, y la subsecuente calidad y resonancia del sonido dentro de ellos, ejemplo de ello es el Gran Templo de Abidos (fig. i.2), en donde la música y los cantos (fig. i.3) fueron elementos fundamentales de los rituales y ceremonias egipcias (MacDonald y Rice, 2003).



Fig. i.2. Gran Templo de Abidos, construido por Seti I, en el Alto Egipto, foto de <http://www.all-about-egypt.com/abydos.html>



Fig. i3. Pintura de la tumba de Djoser-Kere-Somb, en Tebas, foto de <http://www.anitasifletto.com/2006/02/21/la-musica-en-el-antiguo-oriente-medio-segunda-parte/>

Sin embargo la civilización griega es la que marca el vínculo para el origen de la acústica arquitectónica, al ser los primeros en documentar sus estudios en la creación de espacios destinados a la actividad de escuchar (Thomson, 2002). Los primeros estudios documentados en el tema de los fenómenos acústicos y musicales corresponden a **Pitágoras** (582-500 a.C.), (según *Aecio*, el doxógrafo griego) con el desarrollo de su concepto de la *armonía de las esferas*, en la cual establece que los planetas girando sobre su propia órbita y las distancias entre cada uno de ellos, producen un auténtico concierto de consonancias y así todos los elementos entran en resonancia gracias a este acorde universal del microcosmos y el macrocosmos (Palmese et al., 2005).

Creando los fundamentos de la acústica geométrica, **Arquímedes** (287-212 a.C.) determinó el principio del llamado “inverso del cuadrado de la distancia para la intensidad acústica y lumínica”, principio que formó parte de la base del diseño de los teatros griegos (Guarinos, 2001).

Las primeras referencias existentes de la relación entre las formas arquitectónicas y su efecto acústico corresponden al arquitecto romano **Vitruvio**, en el siglo I a.C. (Doelle, 1972). Él consideraba que las formas tradicionales de los teatros griegos, en forma de abanico (Fig. i.4), y los romanos (Fig. i.5) correspondían a necesidades y funciones específicas para cada caso (Carrión, 1995).



Fig. i.4. Teatro griego de Epidauro. Construido a finales del siglo IV a. C. por Policleto el Joven. Foto de: <http://www.artehistoria.jcyl.es/historia/obras/7930.htm>



Fig. i.5. Arena romana en Verona. Foto de: <http://www.verona-turismo.it/web/verona/img/arena.jpg>

**Galileo Galilei** (1564-1642) comienza los primeros estudios científicos del sonido, la música y las vibraciones, así como de la correlación entre frecuencia, longitud, diámetro, densidad y tensión de las cuerdas en su obra "*Discursos Matemáticos concernientes a dos nuevas ciencias*" (1638) (Stolik, 2005). **Marin Mersenne** (1588-1648) un monje jesuita francés, con su obra "*Harmonie universelle, contenant la théorie et la pratique de la musique*" (1636), es considerado el pionero en el estudio científico de las ondas acústicas (Whitman, 2005). **Isaac Newton** (1643-1727) calculó la velocidad del sonido en el aire y fue el primero en realizar un tratado matemático acerca del sonido en 1687 en su obra "*Philosophiæ naturalis principia mathematica*" (Whitman, 2005).

Del siglo XVI al XVII se hicieron investigaciones y tratados diversos acerca del sonido, algunos de los físicos que aportaron conocimientos y estudios para la creación de esta ciencia fueron, entre otros, **Giovanni Alfonso Borelli** (1608-1679), **Robert Hooke** (1635-1703), **James Bernoulli** (1654-1705), **Johann Bernoulli** (1667-1748), **Leonard Euler** (1707-1783), **Georg Simon Ohm** (1789-1854), **Félix Savart** (1791-1841), **Daniel Bernoulli** (1700-1783), **Joseph-Louis de Lagrange** (1736-1813), **Pierre Simon Laplace** (1749-1827), **Adrian Marie Legendre** (1736-1833), **Joseph Fourier** (1768-1830). **Joseph Sauveur** (1653-1716) en el siglo XVIII promovió el término *acústica* para designar al estudio del sonido (Raichel, 2000).

A finales del siglo XIX surge una serie de estudios que en su conjunto se denominan acústica arquitectónica, sin embargo era considerada una ciencia inexacta, carente de explicaciones lógicas para su época ya que continuamente se explicaban de forma esotérica los fenómenos acústicos dentro de los recintos, sin embargo a pesar del desconocimiento en la materia, se sabe que los compositores escribían su música considerando específicamente el recinto en donde sería interpretada (Doelle, 1972), incluso como afirma A. Carrión (1995: 24), "la adecuaban para que el resultado en la ejecución fuera el óptimo".

En el siglo XIX los trabajos realizados por **W. Herschell** (1738-1822), **W.E. Weber** (1804-1891), **Stokes** (1819-1903), **Thomson** (1856-1940), **Lamb** (1913- ), **König** (1832-1901), **Tyndall** (1820-1893), **Fetchner** (1801-1887), **Kundt** (1839-1894), **Hermann F.L. von Helmholtz** (1821-1894), **Lord Rayleigh** (1842-1919), **Alexander Graham Bell** (1847-1922) y algunos otros físicos y matemáticos formaron la base de esta rama de la acústica y aún hoy sirven de referencia (Whitman, 2005).

A finales del siglo XIX, el físico norteamericano **Wallace Clement Sabine** (1868-1919) (fig. i.6) comenzó su trabajo pionero en la aplicación de los principios de la acústica a la arquitectura, al establecer que las propiedades acústicas de un recinto están determinadas por la proporción de energía sonora absorbida por muros, pisos, techos y objetos, así como la relación entre los elementos que intervienen en la reverberación, la cual establece que la proporción del sonido absorbido está ligado al tiempo en el que un sonido emitido en el recinto desaparece después de apagarse la fuente emisora (Bradley, 1985).



Fig. i.6. *Wallace Clement Sabine (1868-1919) foto de <http://www.kuleuven.ac.be/bwf/onderwijs/zaal/wcsabine.htm>.*

El rápido desarrollo en las comunicaciones, la radio y la televisión empezaron a presentar nuevos problemas acústicos, y generaron un nuevo interés en la forma en la que se escucha dentro de un espacio (Doelle, 1972). Gracias a la evolución de los equipos electrónicos de medición fue posible el desarrollo en la caracterización de parámetros acústicos en los recintos, así como la determinación de causas y posibles soluciones de acuerdo a la actividad primordial que en ellos se realice (Mooney, 1999).

En el siglo XX el avance en el estudio de la acústica en diferentes aplicaciones ha sido extenso, desde la investigación de la ingeniería acústica por parte de investigadores como **Leo Beranek**, **Richard Bolt**, **Phillip M. Morse** y **Eugen Skudryk**, quien se dedicó a investigar casi todas las ramas de la acústica y escribió textos reconocidos de acústica física. **Bruce Lindsay** y **Robert T. Beyer**, de la Universidad de Brown han contribuido al estudio de la acústica no lineal. **Sir James Lighthill**, de Cambridge, estableció los cimientos de la aeroacústica moderna, basado en los estudios previos de Lord Rayleigh. **Isadore Rudnick**, de la UCLA, realizó experimentos en hidrodinámica de superfluidos, involucrando la propagación del sonido en helio a temperaturas criogénicas, así como estudios de modos de vibración de cuerpos elásticos y atenuación del sonido en agua de mar. En el estudio de la acústica fisiológica y la medicina, **Karl Kryter** estudia los efectos fisiológicos del ruido en los humanos. En la Universidad de Washington, **Lawrence A. Crum** dirige investigaciones en sonofluorescencia así como de aparatos terapéuticos y de diagnóstico por medio de ultrasonido. **Kenneth S. Suslick** en la Universidad de Illinois ha realizado contribuciones importantes en el área de la sonoquímica. En el campo de la acústica musical, **Carleen Hutchkins** se dedica al desarrollo y construcción de nuevos instrumentos de cuerdas, **Karl A. Stetson** y **Lothar Cremer** aplican interferometría de láser para visualizar las vibraciones del cuerpo de los violines (Raichel, 2000).

Específicamente en el área de la acústica arquitectónica surgen investigadores como **John S. Bradley**, del NRC de Canadá, quien se ha enfocado a estudiar la acústica en aulas y los diferentes parámetros que influyen en la inteligibilidad de la palabra para espacios con este uso. **Trevor Cox**, de la Universidad de Salford, conduce investigaciones diversas en el campo de la difusión. **Michael Barron**, de la Universidad de Bath, ha investigado nuevos parámetros para determinar la calidad acústica de salas de concierto y espacios acústicamente especializados. Investigadores como **M.R. Schroeder**, **V.L. Jordan**, **J.S. Bradley**, **G.A. Soloudre** y **Yoichi Ando**, entre otros, han enfocado sus estudios a establecer intervalos en los parámetros subjetivos y objetivos que determinan la calidad acústica de los recintos.

## **Perspectiva psicológica**

Desde un punto de vista psicológico, la acústica se estudia como la relación existente entre un estímulo de carácter físico y la respuesta de carácter psicológico que provoca, es decir, “la relación entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que hace de ellas el cerebro” (Maggiolo, 2003). Para Vargas y Duque, (2001) la *psicoacústica* es “el estudio psicológico de la audición en los humanos” es decir, estudia la percepción subjetiva de las características del sonido: intensidad, tono y timbre (Llinares, et al., 1991).

El objetivo de la investigación psicoacústica se basa en la comprensión del proceso de la audición desde que el sonido llega a los oídos y viaja hasta el cerebro, así como la forma en que éste lo traduce en información útil acerca del entorno de un individuo. Los humanos interpretamos el sonido por medio del cerebro. La subjetividad de esta interpretación no sólo define la diferencia entre música y ruido, sino que también establece el concepto de calidad de comunicación dentro de un recinto (Cowan, 2000).

## Perspectiva social

Actualmente la mayor preocupación que la humanidad ha desarrollado en relación al problema del ruido y al medio ambiente ha hecho que se reconsidere la importancia de la acústica para la prevención y solución de problemas referentes al sonido.

En el medio ambiente y en el ámbito de la comunicación sonora se define como *ruido* a todo sonido no deseado<sup>2</sup> (Lavilla, 2004). El término *ruido*, del latín *rugitus* rugido, puede ser usado como un sinónimo de contaminación acústica y se refiere a un sonido que interfiere en la comunicación entre las personas o en sus actividades<sup>3</sup>, e incluso puede resultar perjudicial para la salud humana (Calle, 2006).

La contaminación acústica produce efectos diversos en la salud a corto, mediano y largo plazos. Entre las enfermedades fisiológicas se pueden citar daños como la pérdida parcial o total de la audición debido a las altas intensidades de ruido (por encima de 120 dB) a las que se ven sometidos los oídos por ambientes laborales sin protección auditiva, enfermedades nerviosas como irritabilidad, náuseas, ansiedad, depresión, manías, y neurosis o psicosis en personas predispuestas, así como cardiovasculares como hipertensión, isquemias y aumento de las posibilidades de ataques al corazón, etc. (Berglund, Lindvall, y Schwella, 1999).

Entre los efectos psicológicos que genera el ruido se pueden citar la tendencia al insomnio, lo que acarrea un cansancio crónico, reduce la capacidad de atención y concentración, dificultando el aprendizaje y disminuyendo el rendimiento. De igual forma, puede producir alteraciones en la conducta como aislamiento, hostilidad, intolerancia y/o agresividad (Berglund et al., 1999).

---

<sup>2</sup> Subjetivamente quien determinará lo que es *ruido* será quien lo escuche, pues mientras, por ejemplo, una sinfonía podría pensarse como un sonido agradable, depende del usuario y la actividad que esté realizando el que sea considerada como ruido en un momento dado.

<sup>3</sup> Para efectos de esta investigación se considera de la misma forma al ruido, pues el objetivo final del diseño acústico en la arquitectura es garantizar el confort, en términos de acústica, de los usuarios en función de sus actividades.

Así se demuestra que el ruido acústico es un problema que tiene componentes físicos, efectos sobre la salud, pero también consecuencias sociales y económicas, así como influencias negativas sobre la fauna, al impedir los sistemas de comunicación entre especies, nidificación de las aves, entre otros, y dependiendo de la conciencia social sobre este problema, las soluciones que puedan darse (García y Garrido, 2003).

# **1. Acústica Arquitectónica**

---

# 1. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

Es una rama de la Acústica, que a su vez es parte de la Física, y estudia el comportamiento del sonido dentro del ambiente construido. De muchas formas, especialmente con la música, este campo es controversial debido a la subjetividad en cuanto a gustos y preferencias, sin embargo, la ciencia de la acústica arquitectónica trabaja con principios científicos comprobados (Cowan, 2000).

El estudio de esta ciencia se basa fundamentalmente en tres aspectos: el **aislamiento acústico**, que es la protección contra ruidos y vibraciones. El conjunto de intervenciones dirigidas a mejorar la calidad acústica dentro de los recintos así como adaptarlos al uso al que están destinados es denominado  **acondicionamiento acústico**. El conjunto de acciones para asegurar la protección contra ruidos externos de zonas urbanas, se denomina **acústica urbanística** (Linares et al., 1991).

Específicamente en el presente documento se abordarán temas correspondientes al acondicionamiento acústico. En general, el objetivo de la investigación actual dentro de este aspecto de la acústica arquitectónica se refiere al desarrollo de nuevos métodos de predicción, evaluación, modelado y simulación de las características y cualidades acústicas de los espacios arquitectónicos.

## 1.1 CONCEPTOS DE ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

El correcto funcionamiento, en términos de acústica, de los espacios arquitectónicos depende de una adecuada combinación de algunos elementos que dotarán al espacio de un carácter y calidad acústicos. A continuación se explican algunos de los conceptos que determinan las características acústicas de los espacios arquitectónicos:

**La configuración del espacio.** La geometría, dimensiones y proporciones del espacio determinan la calidad acústica (Moore, 1988). De sus características (altura, tamaño, forma y material de sus superficies) dependen diversos parámetros como el tiempo de reverberación, claridad del sonido, sensación de envolvimiento y otros. J. Bradley (1985) menciona que tanto la geometría como la elección de materiales deben ser cuestiones primordiales para garantizar los beneficios que las reflexiones tempranas proporcionan a los usuarios dentro de los espacios.

**Nivel de presión sonora.** (SPL) Las fluctuaciones existentes en el aire medido en la escala de decibeles (Ziobroski y Powers, 2005). Se refiere a la intensidad con la que se puede percibir el sonido dentro de un espacio y está determinada por una combinación tanto de las condiciones propias del recinto, las propiedades de la fuente emisora, así como la distancia de la fuente al receptor (Bradley, 1985).

**Absorción sonora.** El proceso por medio del cual la energía sonora se transforma en calor al hacer contacto o atravesar una superficie, resultando en la disminución del nivel de presión sonora (Ziobroski y Powers, 2005) (Fig. 1.1) La absorción sonora de los materiales se cuantifica por medio del coeficiente  $\alpha$ , el cual representa el porcentaje de la energía que no es reflejada (Pirn, 1999).

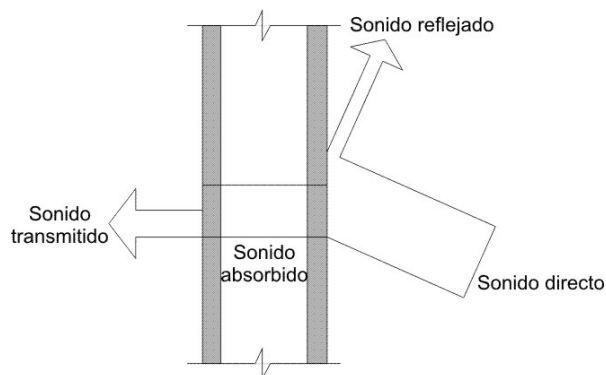


Figura 1.1 Representación del fenómeno de la absorción acústica de un elemento constructivo según sus materiales, basada en Mehta, M. (1999)

**Tiempo de Reverberación.** El tiempo que es requerido por la densidad de la energía sonora promedio dentro de un recinto para decrecer a  $10^{-6}$  de su valor inicial (alrededor de 60 dB), después de que la fuente sonora ha cesado (International Standardization Organization, 1995).

Es el tiempo que necesita un sonido, tras su emisión, para ser inaudible o para descender 60 dB (Smith, 1996) (Fig. 1.2). Es directamente proporcional con el volumen del recinto e inversamente proporcional a la absorción total de dicho recinto. G. Siebein (1999: 261) explica: “La reverberación es causada por las reflexiones múltiples del sonido en las superficies del recinto”.

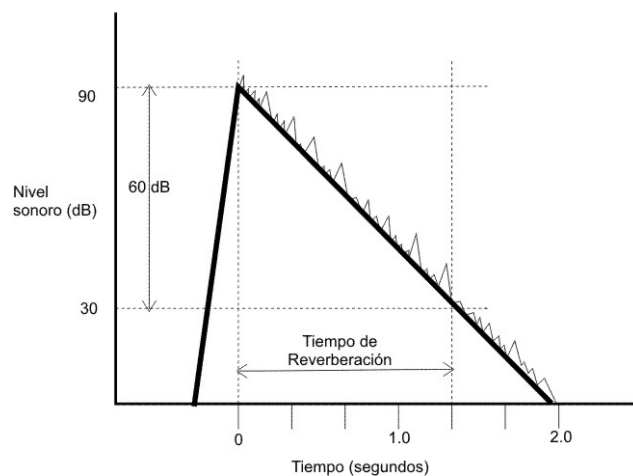


Figura 1.2 Gráfica ejemplo de la respuesta de RT de un recinto, basado en Mehta, M. (1999).

Dependiendo de la actividad que se desarrolle dentro de un espacio se ha determinado un intervalo idóneo del tiempo de reverberación (Fig. 1.3 y tabla 1.1), es decir, existen valores de tiempo de reverberación “óptimos” para diferentes tipos de espacios, y el que un recinto los cumpla garantizará, en mayor medida, el confort acústico de sus ocupantes.

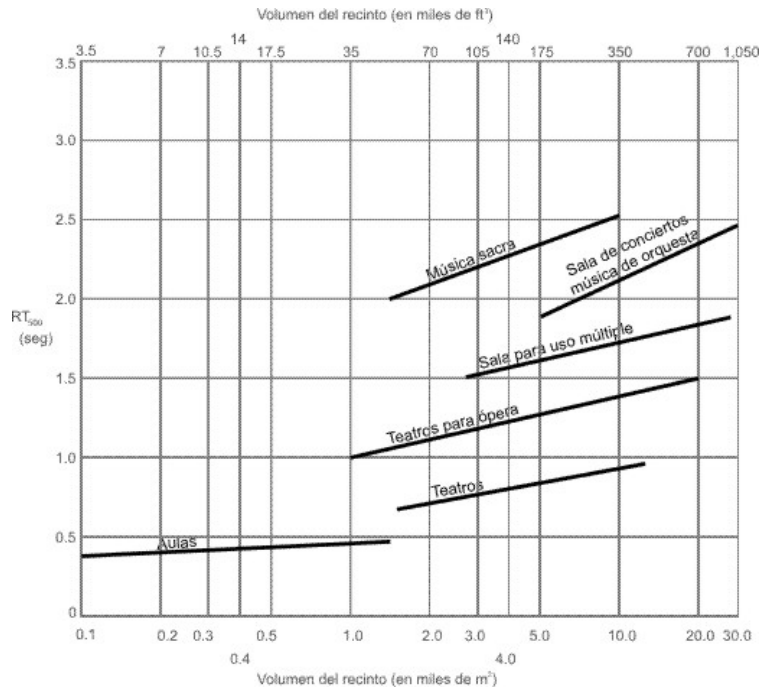


Fig. 1.3. Gráfica de tiempos de reverberación óptimos para diferentes tipos de espacios, adaptado de Apfel (1998) y Mehta (1999).

Esta gráfica (Fig. 1.3) presenta diferentes tipos de espacios arquitectónicos, con proporciones espaciales (volumen) de acuerdo a funciones acústicas distintas y tiempos de reverberación afines a éstas, pues mientras las aulas y los teatros tienen como requerimiento acústico la inteligibilidad de la palabra (y por lo tanto tiempos de reverberación cortos), también se muestran espacios como teatros de ópera, salas de conciertos y espacios para música sacra, cuyo requerimiento es la permanencia del sonido en el espacio, y por lo tanto tiempos de reverberación más largos.

<b>Tipo de espacio</b>	<b>Tiempo de reverberación</b>	<b>T60 en s</b>	<b>Actividad auditiva genérica</b>
Estudios de grabación y radiodifusión	muy corto	0.4 - 0.6	silencio - lenguaje
Aulas escolares	corto	0.5 - 0.9	atención - lenguaje
Foros de teatro, producciones dramáticas privadas	corto a medio	0.8 - 1.2	audición - lenguaje
Salas de conferencia	corto a medio	0.6 - 1.4	atención, privacidad - lenguaje
Cines	corto a medio	0.7 - 1.3	atención - lenguaje
Teatros pequeños	medio	1.1 - 1.5	audición - lenguaje, música
Auditorios escolares	medio a prolongado	1.3 - 1.9	audición - lenguaje, música
Auditorios generales	medio a prolongado	1.4 - 1.9	audición - lenguaje, música
Iglesias a Catedrales	prolongado	1.2 - 3.4	audición - lenguaje, música

Tabla 1.1. *Tiempos de reverberación recomendados para algunos espacios (Rodríguez, M.F., 2000: 192).*

## 1.2 CALIDAD ACÚSTICA

La calidad acústica de un espacio arquitectónico depende de algunas de sus características físicas como volumen, superficie, forma, coeficiente de absorción de los materiales que lo conforman, direccionalidad y emplazamiento de la fuente, etc. (Giménez, Marín, Sanchis, Romero, Cerdá y Jorge, 2001), así como de factores como tiempo de reverberación adecuado al uso y tamaño del espacio, balance adecuado entre sonido directo y reverberante, así como una buena difusión del sonido en el espacio, que se traduce en la obtención de un sonido homogéneo (Siebein y Kinzey, 1998).

F. Rodríguez (2002: 197) define a la calidad acústica como "la característica que permite considerar el grado en que un recinto es acústicamente adecuado para alguna actividad específica, tiene que ver con la forma en que el espacio arquitectónico influye sobre el sonido".

Tradicionalmente se ha ligado el concepto de calidad acústica a recintos en donde la percepción del sonido es la razón misma del espacio, como estudios de grabación, auditorios, teatros, cines, salas de concierto, etc., sin embargo debemos considerar que casi cualquier actividad humana involucra al sonido, y su adecuada percepción puede influir en la realización de ella, como afirma F. Rodríguez (2002: 198): "No podemos negar que el sonido es uno de los indicadores sensibles del espacio que puede darnos información acerca de la configuración del mismo, y desde este punto de vista cualquier espacio arquitectónico es susceptible de poseer calidad acústica" .

Existen condiciones para considerar una calidad acústica adecuada en los espacios arquitectónicos como las que R.E. Apfel (1998), Y. Ando (1998), así como L. Beranek (1962), J. Bradley (1985) y F. Rodríguez (2000) consideran:

- a.** La intensidad del sonido debe ser adecuada en cualquier punto del recinto, lo cual implica cuidar los grados de reflexión y absorción sonora en el espacio, así como considerar el diseño de superficies reflejantes para evitar concentraciones y/o áreas muertas.
  
- b.** El espacio debe ofrecer una claridad o definición adecuadas, controlando la cantidad y distribución de las superficies absorbentes del recinto. En espacios en donde la inteligibilidad de la palabra es importante, en la medida en que las superficies del recinto eviten que la onda sonora recibida vuelva a reflejarse hacia el espacio, favorecerán la claridad auditiva, evitando el traslape entre sonidos emitidos en intervalos temporales próximos, es decir, la adecuada relación entre las reflexiones tempranas y las tardías.
  
- c.** El control del sonido reflejado, evitando los retardos excesivos para obtener ambientes con buena inteligibilidad, es decir, espacios en donde se entienda la información verbal.
  
- d.** Control de sonidos externos indeseables para las actividades realizadas en espacios interiores. El denominado ruido de fondo es un componente externo muy importante para el ambiente acústico del recinto, ya que puede enmascarar el sonido generado en el mismo espacio, sin embargo el nivel de ruido de fondo debe limitarse a un valor máximo adecuado para la actividad que se desarrolle dentro de un espacio.

Según la norma ISO 3382:1997, los parámetros acústicos que a continuación se explican son necesarios para una evaluación completa de la calidad acústica de los recintos. Dichos parámetros objetivos (medibles) se han establecido a través de diversos estudios por medio de la relación con las preferencias subjetivas.

La definición de **tiempo de reverberación,  $RT$**  (Reverberation Time) es “*el tiempo, expresado en segundos, que se requiere para disminuir el nivel de presión sonora en 60 dB* (International Organization for Standardization, 1997). Es decir, el tiempo que transcurre desde que la fuente sonora se apaga hasta el momento en que el nivel de presión sonora cae 60 dB con respecto a su valor inicial, o el proceso de persistencia de la energía sonora y su decaimiento después de que la fuente ha cesado su emisión, y se debe a las múltiples reflexiones de la onda sonora sobre las superficies, mobiliario y objetos del recinto (Rodríguez, 2003).

Además, el tiempo de reverberación determina e influencia a otros parámetros que determinan la calidad acústica de un recinto (Kuttruff, 2000) y son: índice de claridad ( $C_{80}$ ), tiempo de decaimiento temprano ( $EDT$ ) y sonoridad ( $G$ ).

El **índice de claridad ( $C$  o  $C_{80}$ )** está constituido por las denominadas primeras reflexiones. Estas relaciones energéticas corresponden al sonido reflejado y su conexión con el sonido directo. El índice de claridad  $C_{80}$  indica la relación entre la energía sonora que llega al receptor antes de los primeros 80 ms, integrados junto con el sonido directo y la que le llega después de ellos (Carrión, 1995),

F. Rodríguez (2003: 217) lo define como “el grado de detalle con el que percibimos la señal acústica por efecto del espacio arquitectónico”.

El **Tiempo de Decaimiento Temprano,  $EDT$**  (Early Decay Time) es el tiempo que transcurre desde que el foco emisor se apaga hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB, multiplicado por 6 (para expresarlo en función de 60 dB relacionados con el Tiempo de Reverberación). El EDT también depende de la frecuencia del sonido. G. Siebein (1998) hace referencia a Cervone (1990) quien demostró una relación

significativa entre el EDT y la impresión acústica percibida por la audiencia en representaciones en vivo. La razón por la que es importante medir el descenso de los primeros 10 dB es porque para la impresión subjetiva de la reverberación son importantes los primeros niveles percibidos, así como el hecho de que al seguir disminuyendo la energía sonora, se enmascara con el ruido de fondo, como sugiere A. Lawrence (1970: 138), “cuando se está escuchando música o habla continua, es difícil percibir un descenso de 60 dB, porque la última porción de este descenso se enmascara por los siguientes sonidos”.

El parámetro denominado **Sonoridad**, o **Fuerza**, (*G*, Strength), se relaciona con la energía o fuerza de las primeras reflexiones y la reverberación del espacio.

Lehmann propone la sonoridad como una medida del grado de amplificación de la sala (Giménez, et al., 2001). Carrión (1995: 228), hace referencia a Lehmann (1976) cuando menciona “la sonoridad se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora  $L_p$  producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de una sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en condiciones de *campo libre*<sup>4</sup> y medido a una distancia de 10 m, denominado nivel de referencia”.

La **Fracción Lateral de Energía**, **LEF** (Lateral Energy Fraction) es la relación entre la energía que le llega lateralmente al receptor dentro de los primeros 80 *ms* desde el arribo del sonido directo y la energía recibida de todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo. Cuanto mayor sea el valor de LEF, mayor será la percepción de amplitud de la fuente sonora así como el grado de espacialidad del recinto (Siebein, et al., 1999).

---

<sup>4</sup> Ambiente en donde no existen superficies reflejantes.

El **Coefficiente de Correlación Interaural Cruzada, IACC** (Inter-aural cross correlation coefficient) mide el grado de similitud existente entre las señales que llegan a los oídos izquierdo y derecho del oyente, estando éste frente a la fuente sonora. El  $IACC_E$  o  $IACC_{80}$  se refiere a los primeros 80 *ms* desde la llegada del sonido directo y se asocia con el grado de espacialidad del recinto, y el  $IACC_L$  se calcula desde los 80 *ms* hasta 1 s, e indica el grado de difusión en la sala, y por lo tanto, la sensación de envolvimiento en la misma (Beranek, 1992).

Es importante comprender la forma en que los detalles de diseño influyen los resultados en las mediciones objetivas para el perfeccionamiento del diseño acústico de recintos, en donde, sea cual fuere la actividad primordial que dentro de ellos se realice, debe dársele el peso adecuado a cada uno de los diferentes parámetros, de manera que correspondan tanto el objetivo primordial del espacio como su respuesta acústica.

### **1.2.1. Relación entre los parámetros acústicos y las características arquitectónicas**

El sonido y el espacio están estrechamente relacionados. Como se ha mencionado anteriormente, el sonido se comporta de maneras distintas dependiendo de las formas, volúmenes y materiales que conforman el espacio. Así, el sonido producido en un espacio da información inmediata de las características físicas de dicho espacio, si es grande o pequeño, abierto o cerrado, de techos altos o bajos, los materiales de los que está compuesto, etc. Además de esta información, el sonido dentro de un espacio también aporta contenidos informativos, como su uso, así como contenidos emocionales, contribuyendo, junto con la información visual, olfativa y táctil, a la percepción integral del lugar (Palmese et al., 1995).

En investigaciones recientes, la tendencia está marcada por los estudios de geometría, proporciones, secciones transversales, formas de las cubiertas, etc., con el objetivo de proporcionar una buena impresión espacial (Giménez et al., 2001), la cual depende directamente de las primeras reflexiones.

En la siguiente tabla (Tabla 1.2) se presentan los parámetros acústicos y los elementos físicos del espacio que los generan, así como la percepción que crean dentro de un recinto.

Indicador acústico	Cualidad acústica	Característica arquitectónica	Evento acústico
Fración Lateral de Energía (LEF)	Envolvimiento y amplitud de la fuente	Espacios estrechos de 20 a 25 m	Reflexiones sonoras tempranas arribando al oyente lateralmente
Índice de claridad ( $C_t$ ). Relación de la energía temprana y la tardía	Claridad	plafón relleante, plafón suspendido, muros de plateas	reflexiones sonoras que llegan inmediatas al sonido directo
Tiempo de reverberación $T_{60}$ o RT	Reverberación	volumen grande del recinto, materiales reflejantes, forma de paralelepípedo, pantallas acústicas y cámaras reverberantes	Prolongación del sonido en el recinto.
Nivel sonoro (L) o Fuerza relativa (G)	Sonoridad	Tamaño del recinto, proximidad a la fuente y a los rayos de audición	Reflexiones sonoras prontas provenientes del plafón y de las paredes después del sonido directo
Correlación interaural cruzada (IACC)	Espacialidad	Superficies texturizadas y materiales difusores del sonido; gran volumen del recinto	Energía sonora tardía arribando lateralmente

Tabla 1.2. Relación entre parámetros acústicos y la percepción acústica en el espacio arquitectónico (Rodríguez, M.F., 2002: 202).

## 1.2.2 Tiempo de reverberación como parámetro determinante en la calidad acústica de recintos

El tiempo de reverberación  $RT$  es determinante en la calidad acústica de los recintos debido a que es un parámetro que puede predecirse con un grado de certidumbre adecuado, además, puede obtenerse a partir de datos espaciales del recinto como el área y volumen. Asimismo, hoy en día se conoce la información acerca del  $RT$  idóneo de diversos recintos para diferentes frecuencias y esto puede ser usado como un factor de comparación y evaluación de mediciones y cálculos (Kuttruff, 2000).

Por otro lado, el tiempo de reverberación depende del grado de absorción de los materiales que conforman un recinto y éste afectará la persistencia del sonido una vez que se haya apagado la fuente sonora (Moore, 1988). Es decir, para obtener un adecuado tiempo de reverberación, dependiendo de la actividad que se desarrolle dentro de un recinto (acústicamente especializado o no), será necesario el control de la absorción por parte de materiales y elementos que conformen el espacio. Cuando los materiales que constituyen un recinto son muy absorbentes, el tiempo de reverberación es pequeño y el recinto es denominado *anecóico, sordo o muerto*. Si sus materiales son duros, entonces se reflejará el sonido y así el tiempo de reverberación será muy grande y los sonidos se percibirán entremezclados y confusos, denominando al recinto *resonante, reverberante o vivo* (Bradley, 1985).

Por lo general el tiempo de reverberación ( $RT$ ) varía dependiendo de la frecuencia es decir, mientras mayor sea la frecuencia, menor tiempo de reverberación y viceversa. Este fenómeno se debe al mayor grado de absorción de los materiales y del aire con respecto a las frecuencias altas (Carrión, 1995).

### **1.2.3. Norma ISO 3382:1997: Medición del Tiempo de Reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos**

La utilización de esta norma como herramienta metodológica y de análisis de resultados responde a que define la calidad acústica en los recintos para una actividad especializada en términos de sonido y propone un método de medición y pruebas para determinar el nivel de confort acústico dentro de ellos, por lo tanto puede ser usada como referencia para medir los espacios de uso común como fábricas, salones de clase, oficinas y viviendas, ya que especifica algunos parámetros acústicos que garantizarán el correcto funcionamiento de las actividades que ahí se lleven a cabo. De la misma forma, la descripción de los métodos de prueba servirá como base teórica de la experimentación a través de modelos físicos a escala y su comparación con los resultados obtenidos en el espacio a escala natural. Los resultados de las mediciones de acuerdo a la norma ISO 3382:1997 determinarán cuán apropiado es un recinto para determinada actividad, ya que en ésta se establecen pautas de medición, posiciones y equipos de prueba, número de mediciones, tipos de impulso, correcciones numéricas, etc.

M. Barron (2005) afirma que las decisiones de diseño derivadas de las mediciones objetivas de los parámetros acústicos que se describen en la norma ISO 3382:1997 sirven para incrementar la calidad acústica de un recinto, sin embargo, los resultados obtenidos deben ser analizados meticulosamente ya que podrían ser malinterpretados, por lo que sugiere una cuidadosa calibración del equipo, la selección adecuada de puntos de medición, así como las correcciones para considerar el estado de ocupación del recinto.

Debe mencionarse que el tiempo de reverberación depende del estado de ocupación del recinto. La norma ISO 3382:1997 define estos estados de ocupación como *estado desocupado*, cuando no están presentes oradores, orquesta, o público, sin embargo se toma en cuenta el mobiliario. El *estado de ensayo*, cuando el espacio está ocupado por

músicos u oradores, sin presencia de público, y el *estado ocupado* se considera cuando el recinto está del 80% al 100% de su capacidad (ISO 3382:1997).

Se recomienda que las mediciones sean tomadas en las seis bandas medias de octavas, es decir, desde 125 hasta 4000 Hz. La norma sugiere promediar resultados de pares de octavas para dar valores en frecuencias bajas, medias y altas.

Normalmente en los recintos construidos se toman mediciones y pruebas en estado desocupado, sin embargo, es importante conocer el valor de los parámetros en estado ocupado. Por lo tanto resulta apropiado corregir valores para cambiar el tiempo de reverberación RT entre los estados ocupado y desocupado (Barron, 2005).

M. Barron (2005) afirma que en el caso de mediciones en modelos a escala, el tiempo de reverberación a escala podrá ser diferente al que se espera en un espacio a escala real, probablemente por las sutiles diferencias en los coeficientes de absorción de los materiales del modelo. Debido a esto es conveniente hacer correcciones en el RT resultante.

Según la norma ISO 3382:1997 el número de mediciones estará determinado por el requerimiento de cobertura, es decir, será necesario promediar un número determinado de mediciones en cada posición para obtener repetibilidad y confiabilidad en los resultados, como afirma A. Carrión (1995: 66) “la manera práctica de obtener el valor del RT representativo de una sala, a cada de frecuencia de trabajo, consiste en promediar los valores medidos en diferentes puntos de la misma (habitualmente entre 10 y 15 puntos, según su volumen”. Por lo tanto deben realizarse un mínimo de 3 mediciones en cada posición, y sus resultados deben ser promediados.

La fuente debe ser lo más omnidireccional (procedente de todas las direcciones) como sea posible. Debe producir un nivel sonoro suficiente para proporcionar curvas de decaimiento con el intervalo mínimo requerido sin contaminarse con el ruido de fondo.

### 1.2.3.1 Posiciones del equipo de medición

Debido a que las mediciones pueden ser requeridas para diferentes objetivos, el número de posiciones de las mediciones deben considerarse para lograr una cobertura apropiada. Según la norma ISO 3382:1997 las posiciones del micrófono deben estar separadas al menos una vez la longitud de onda, es decir, una distancia mínima de 2 m aproximadamente, para el intervalo de frecuencias normales.

La distancia para cualquier posición del micrófono hacia la superficie reflejante más próxima, incluyendo el piso, debe ser de al menos  $\frac{1}{4}$  veces una longitud de onda, aproximadamente 0.5 m.

De acuerdo con la norma internacional ISO 3382:1997, ninguna posición del micrófono debe estar muy cerca de la fuente sonora para evitar influencias del sonido directo. La distancia mínima  $d_{\min}$ , podrá ser calculada por la siguiente expresión [2]:

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{V}{CT}} \quad [2]$$

en donde:

V es el volumen en  $m^3$

C es la velocidad del sonido, en m/s

T es RT, en s

### **1.2.3.2 Medición de baja cobertura**

Estas mediciones son realizadas para la evaluación de la cantidad de absorción sonora del recinto, incluyéndose mediciones del índice de reducción sonora (SRI Sound Reduction Index) o la evaluación del tiempo de reverberación para cálculos de sistemas de sonido.

Para realizar mediciones del tiempo de reverberación **RT** para dos posiciones de la fuente, que serán representativas de aquellas en donde se localizan las fuentes sonoras reales, se debe obtener un promedio de resultados de 3 o 4 posiciones del receptor (micrófono) en las áreas en donde normalmente no haya personas, o en “el centro del área de la sala”. Si la desviación entre los resultados de las posiciones rebasa las tolerancias establecidas para el propósito de las mediciones, deben usarse más posiciones.

### **1.2.3.3 Medición de cobertura normal**

Estas mediciones se realizan para la verificación del cumplimiento de un recinto contra requerimientos específicos de diseño. Se debe escoger el número y localización de las posiciones de la fuente para incluir todas las áreas que serán ocupadas por los intérpretes (o fuentes sonoras). Se usará un mínimo de dos posiciones de fuente sonora.

La distancia de las posiciones de micrófono (o receptores del sonido) serán seleccionadas a partir de la anticipación de las mayores influencias que puedan causar diferencias en el tiempo de reverberación a lo largo del recinto. Por ejemplo las diferentes posiciones en el área del recinto cerca de muros, debajo de elementos estructurales como palcos, entre otras. La altura del micrófono debe ser de 1.2 m correspondientes al promedio de la altura del oído humano en la posición de sentado.

## **2. Predicción y experimentación en acústica arquitectónica**

---

## **2. PREDICCIÓN Y EXPERIMENTACIÓN EN ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA**

Para conocer el comportamiento del sonido dentro de los espacios arquitectónicos desde hace casi cien años se ha experimentado con diferentes tipos de modelos dentro de laboratorios acústicos. Uno de los objetivos de la experimentación en acústica arquitectónica consiste en estudiar el comportamiento del sonido dentro de un recinto por medio de mediciones objetivas, así como estudiar los efectos que tienen las diferentes propuestas de diseño en la respuesta acústica de los recintos proyectados, para así determinar si la respuesta acústica de un recinto es adecuada o no con respecto a la actividad que ahí se desarrolle. A través del diseño acústico en función del uso del espacio se podrá garantizar el confort acústico de un recinto.

### **2.1 DEFINICIÓN DE LABORATORIO**

Un laboratorio se define como: “un espacio equipado y usado para estudios, investigaciones, experimentos, análisis, pruebas o preparaciones (normalmente a escala) de cualquier rama de la ciencia” (New Webster’s Dictionary of the English Language, 1992). Asimismo, la Enciclopædia Británnica (2007) afirma que un laboratorio es un “lugar en donde se lleva a cabo la investigación, el desarrollo y el análisis, en contraste con el campo. Muchos se caracterizan por la uniformidad y condiciones controladas de humedad, temperatura y asepsia, usando un gran cantidad de herramientas y equipo para estudiar, sistematizar o cuantificar el objeto de su atención y estudio”.

El objetivo de la experimentación dentro de un laboratorio es controlar y normalizar las condiciones ambientales, en beneficio de la coherencia, certeza y confiabilidad del resultado del experimento, como afirma Yerges (1978: 201): “el proceso de pruebas y

mediciones es un medio para hacer evaluaciones objetivas, estableciendo estándares y criterios y especificando requerimientos de acción”.

## 2.2 LABORATORIOS DE ACÚSTICA

Los estudios y mediciones de las características del sonido se realizan en instalaciones especiales dependiendo de las características acústicas necesarias para dichos estudios, ya sea absorción, reflexión, difusión o transmisión.

### 2.2.1 Cámaras

Las **cámaras anecóicas**, *sin eco*, son aquellas en donde todas sus superficies interiores están recubiertas de material absorbente (Fig. 2.1) de manera que no existan reflexiones (Smith, 1996). Las pruebas y análisis que se llevan a cabo en estos ambientes son: mediciones de equipos como micrófonos, altavoces, instrumentos musicales, así como para la medición del nivel de ruido que emiten en su funcionamiento algunos componentes de los circuitos, transformadores, resonancias, etc. (Pérez, 1969). Asimismo, se hacen estudios y mediciones de preferencia subjetiva.

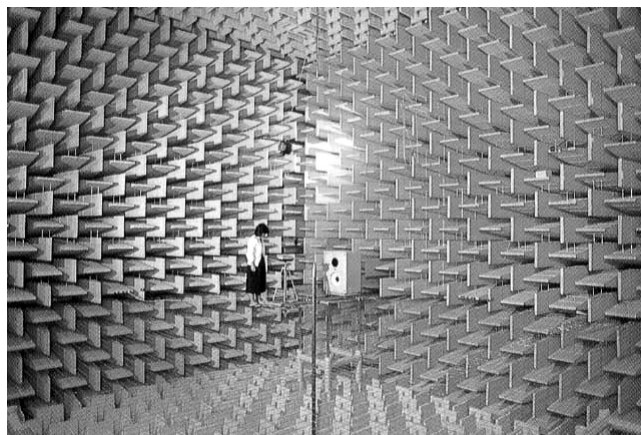


Fig. 2.1. Cámara anecóica del Nacional Metrology Institute of Japan, de <http://www.nmij.jp/acs-ultsn/acoustics/anechoic-e.html>

**Cámaras semianecóicas**, aquellas cuyos muros y techo son anecóicos, o absorbentes y el piso es reflejante (Smith, 1996). En este tipo de cámaras se hacen pruebas de equipos como altavoces, micrófonos, pruebas de ruido con motores, etc. (fig. 2.2)<sup>5</sup>.

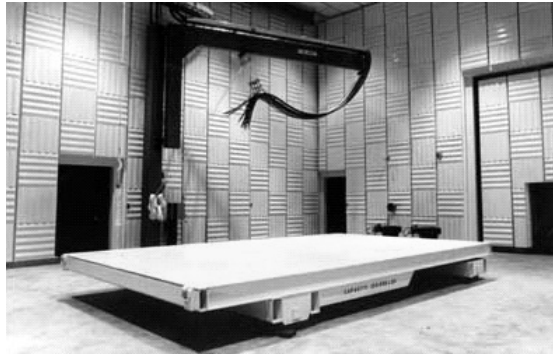


Fig. 2.2. Cámara semianecóica del Niosh Mining Laboratory, Pittsburgh Research Laboratory, obtenida de <http://www.cdc.gov/niosh/mining/aboutus/labdetails36.htm>

Las **cámaras reverberantes** son ambientes de medición y prueba diseñados especialmente para producir condiciones difusas en el sonido dentro del espacio, las cuales son obtenidas mediante la irregularidad de sus superficies (Templeton, 1993). Una de las pruebas que ahí se llevan a cabo es la obtención de coeficientes de absorción de materiales para la construcción, revestimiento y control acústico, así como algunos procesos normados a nivel internacional (fig. 2.3).



Fig. 2.3. Cámara reverberante del Institute of Communication Acoustics de Ruhr Universität Bochum, Alemania, obtenida de [http://www.ruhr-uni-bochum.de/ika/ika/institut/institut\\_engl.htm](http://www.ruhr-uni-bochum.de/ika/ika/institut/institut_engl.htm)

<sup>5</sup> La cámara existente en la UAM-A se denomina **sonoamortiguada** por la naturaleza aislante de sus materiales, y presenta todas sus superficies absorbentes excepto el piso, que es reflejante.

Un listado de algunos de los laboratorios que se dedican a la investigación y desarrollo del comportamiento acústico en general, así como su equipamiento y tipos de estudios que realizan puede encontrarse en el Apéndice IV.

### **2.2.2 Estudios realizados en Laboratorios de acústica arquitectónica**

La importancia de los modelos acústicos radica en que además de obtener resultados determinantes para el diseño de espacios arquitectónicos acústicamente confortables, se explicará y entenderá el fenómeno acústico al involucrar al sentido de la vista en las pruebas.

Con los resultados obtenidos y el debido análisis de éstos se podrán prever problemas, anticipar el comportamiento del sonido dentro de los recintos, así como garantizar soluciones acordes con la actividad que se desarrollará dentro de ellos.

Por medio de pruebas en laboratorios acústicos se han aportado conocimientos y mejoras en el área de la Acústica Arquitectónica. Se tienen registros de trabajos como los de N.W. Potter y C. Everbach (1992), quienes comparan mediciones y procesos hechos en modelos a escala contra los hechos en espacios reales, para establecer técnicas repetibles de análisis y diseño para algunos parámetros acústicos. En esta misma línea de investigación, existen los estudios de F. Satoh, Y. Shimada y H. Tachibana (1996) quienes describen los resultados obtenidos en modelos a escala 1:10 y los de espacios reales de salas de concierto. Asimismo, existe un estudio comparativo entre modelos a escala y modelos computarizados desarrollado por D. Commins (2002), para el diseño del Teatro degli Arcimboldi en Milán. Este tipo de investigaciones analiza los métodos de prueba y medición y sugiere la combinación de ambos modelos de predicción para obtener resultados más confiables.

M. Sakurai, S. Aizawa, Y. Suzumura y Y. Ando (2000) han llevado a cabo estudios acústicos especializados y quienes han desarrollado sistemas para el análisis del sonido con respecto a parámetros acústicos como las primeras reflexiones, el tiempo de reverberación y la correlación interaural cruzada para espacios especializados como salas de concierto.

Michael Barron (2005) hace un estudio acerca del estado actual del diseño acústico de salas de concierto y ópera, al analizar métodos como el uso de modelos a escala, métodos gráficos, computarizados y matemáticos, concluyendo que para la precisión en los resultados conviene utilizar métodos híbridos y experimentar simultáneamente con varios modelos de simulación.

J. Veen, J. Pan y P. Saha (2005) proponen procedimientos para pruebas de materiales en salas de ensayo acústico, logrando niveles de resultados consistentes y repetibles en técnicas y procedimientos de experimentación en laboratorios acústicos.

K. Horoshenkov, D. Hothersall y K. Attenborough (1996) estudiaron dentro de laboratorios acústicos específicos las propiedades de los materiales para ser usados en modelos a escala de espacios exteriores, ya que la precisión de los resultados derivados de la experimentación por medio del uso de modelos a escala depende en gran medida de la elección de los materiales adecuados, considerando que éstos deben también representar en nivel de absorción de los materiales en escala real.

La validación de la construcción de laboratorios acústicos para hacer pruebas en modelos a escala, materiales, sistemas y dispositivos con fines arquitectónicos ha sido tratada por D. Copley, Schmitt, Campanella y Black (2003) quienes describen el proceso de planeación, análisis y diseño del laboratorio de investigación de Caterpillar en Mossville, IL. Asimismo, B. Cooper (2000) describe los requerimientos y características de un laboratorio de ensayos acústicos en las instalaciones de la NASA, en EUA.

Existe normatividad en el ámbito internacional con respecto a la construcción de laboratorios acústicos y cámaras anecóicas, semianecóicas y reverberantes. El trabajo de J. Segura (2001) se centra en los resultados obtenidos en una cámara anecóica electromagnética, para validar su uso para mediciones y experimentación acústicas. El trabajo de R.A. Noreen (1998) también se encuentra enfocado a la caracterización y validación de espacios de experimentación de acústica de recintos.

## 2.3 MODELOS DE SIMULACIÓN ACÚSTICA

Un *modelo* es una descripción simplificada de la realidad, una analogía de un fenómeno (Giancoli et al., 2006). Para Tucker (2002) el propósito de los *modelos* es proporcionar una imagen mental o visual para predecir y controlar la relación entre variables.

F. Rodríguez (2001) destaca el objetivo de los modelos como: "una forma de representar la realidad antes de enfrentarla propiamente, con las ventajas de ajustarla a escenarios límite que simulen las condiciones de diseño propuestas, variándolas cuantas veces sea necesario hasta obtener los resultados deseados". Una representación del uso de los modelos en la solución de problemas puede verse en la Fig. 2.4.

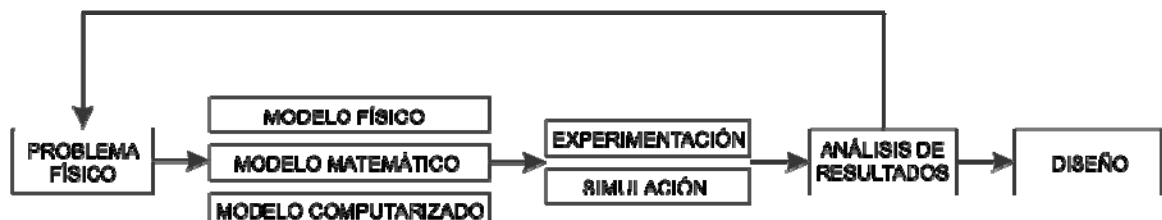


Fig. 2.4 El objetivo de los modelos es optimizar el funcionamiento de un proceso o dispositivo con un objetivo específico de diseño.

En el pasado, cuando los avances tecnológicos eran muy limitados, la experimentación por medio de modelos físicos a escala era útil para explicar y predecir el comportamiento acústico de las edificaciones reales. Con el avance de la tecnología se han desarrollado nuevos métodos de predicción y pruebas en diferentes tipos de modelos. A continuación se explica brevemente cada una de estas clasificaciones.

### **2.3.1 Modelos físicos**

De los diferentes tipos de modelos, existen en el ámbito de la Ciencia, los modelos físicos, los cuales en varios contextos son una representación de algo, que puede ser desde un objeto hasta un sistema (Concari, 2000). Frecuentemente, en términos geométricos, el modelo y el objeto al que representa corresponden en escala. Los modelos a escala permiten mediciones de situaciones y problemas tridimensionales con ventajas como la reducción del tamaño con el fin de su análisis dentro de laboratorios.

Algunos aspectos atractivos del trabajo con modelos a escala es el control del ambiente, la flexibilidad en el arreglo de las mediciones y el relativamente bajo costo de los modelos de estudio (TNO, 2006).

"El empleo de maquetas puede simplificar notablemente el estudio acústico de un local; además, el fenómeno sonoro queda configurado en un plano visual y por lo tanto más sugestivo y apto para ser comprendido" (Pérez, J., 1969: 350).

En la historia de la simulación acústica se tiene memoria de trabajos realizados por W.C.Sabine y otros investigadores desde 1913. En este año, Sabine publicó un artículo en donde describía el uso de ondas ultrasónicas y la técnica fotográfica Schlieren (fig. 3.5) para visualizar las reflexiones de las ondas desde el techo y muros en secciones bidimensionales de un modelo a escala.

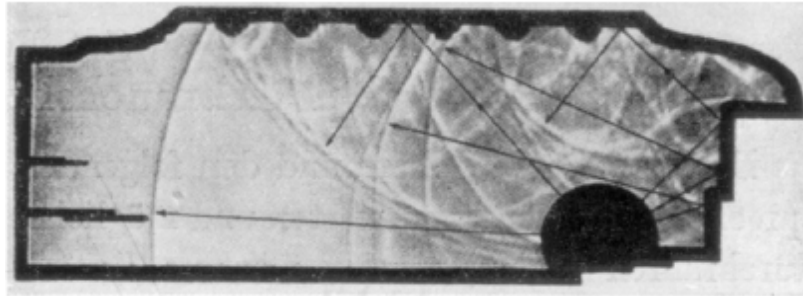


Figura 2.5 Fotografía con la técnica de Schlieren mostrando las reflexiones ultrasónicas en un corte por sección de la sala Gewandhausaal, en Leipzig. Rindel, 2002.

Una vez determinado el concepto de la propagación del sonido por medio de ondas, una de las formas para visualizarlo fue a través de modelos con agua, concepto que W. Whitman (2005) sugiere que desde el siglo XVII había sido estudiado por Gaspare P. Schotto (1608-1666), un monje jesuita que se dedicaba al estudio de la física, en su obra *Magiae universalis* (1657). Los estudios de acústica de recintos utilizando tanques de agua se llevaban a cabo haciendo cortes por sección de los espacios a analizar en láminas delgadas de metal, posteriormente éstas eran introducidas en tanques transparentes poco profundos llenos de agua. Se determinaba un punto en el corte simulando al emisor del sonido y se creaban ondas a partir de éste. La fuente sonora era simulada a través de varios medios, dejando caer una gota de agua, removiendo un objeto pequeño previamente sumergido o teniendo un objeto vibrando. Si el modelo se ilumina desde abajo, las ondas se hacen visibles y pueden ser fotografiadas (Cremer, 1978).

Existen limitaciones en este tipo de estudios, ya que trata de explicarse un comportamiento tridimensional por medio de un modelo bidimensional, además de que las ondas de agua se dejan de percibir después de dos o tres reflexiones, mientras que las ondas sonoras son audibles aún después de cientos de ellas (Mooney, 2000). Además, con las ondas de agua no existe dispersión y la velocidad de propagación es la misma para todas las frecuencias, sin embargo, este método puede ser utilizado como una herramienta didáctica.

Toepler demostró en 1864 que cuando un haz de rayos paralelos atraviesa perpendicularmente un campo sonoro definido en un plano, una parte de la onda sonora corta tangencialmente con los rayos luminosos, produciendo dos líneas visibles muy juntas, una clara y otra oscura, por efecto de la refracción de la luz (Recuero, 2001). Este fenómeno se puede proyectar en una pantalla una imagen del frente de onda sonoro y ahí puede ser estudiado directamente o fotografiado.

La claridad con la que el método Schlieren-Toepler representa las ondas sonoras reflejadas por los más pequeños obstáculos (columnas, esquinas, etc.) y su representación precisa de la difracción y difusión de las reflexiones hace este método muy adecuado para el estudio de estos detalles en investigaciones de acústica de recintos (Cremer, 1978: 176).

Otra forma de representar el efecto sonoro dentro de un recinto era la construcción a escala de éste con espejos (Furrer, 1964). Se colocaba una fuente de luz simulando al emisor del sonido, y se manipulaban los espejos de techos y muros hasta que toda la zona de la sala estaba bien iluminada. Esta técnica fue usada por R. Vermeulen y J.de Boer (Rindel, 2002) en 1936 para el diseño del Teatro Philips en Eindhoven. El uso de luz para visualizar las primeras reflexiones dentro de un modelo aún es usado al incorporar la tecnología de rayos láser.

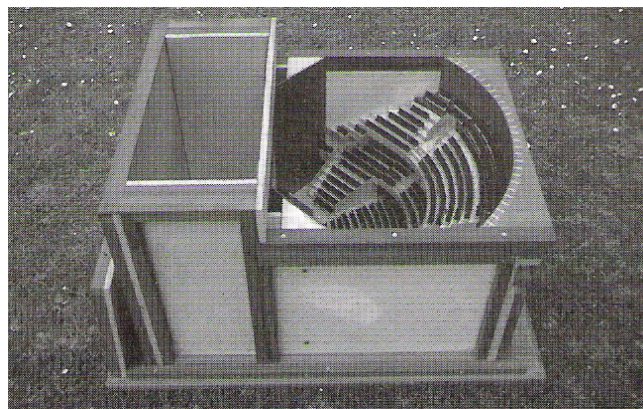


Fig. 2.6 *Modelo físico a escala para pruebas acústicas de una sala de conciertos. Templeton, 1993:64.*

El uso de modelos tridimensionales fue perfeccionándose con el desarrollo en equipos de prueba y medición, así como con los trabajos de F. Spandök en 1934, quien fue el primero en escalar también la frecuencia del sonido (Rindel, 2002).

A partir de 1940 y con los avances tecnológicos surgidos de la Segunda Guerra Mundial, se desarrolló enormemente la ciencia del sonido, al formarse científicos, tecnólogos y especialistas que profundizaron en los estudios para la creación de nuevas herramientas e instrumentos, utilizando para ello modelos a escala de barcos y submarinos así como espacios arquitectónicos (Mooney, 2000).

Rindel (2000) afirma que V.L. Jordan (1941) perfeccionó estos estudios, demostrando la influencia de la absorción sonora para la inteligibilidad del habla dentro de un espacio arquitectónico. El desarrollo en la técnica de modelos a escala se fue perfeccionando hasta llegar a la década de los setentas y su propósito en general fue el de reducir la escala de trabajo, desde 1:5 hasta 1:50, haciendo así una herramienta más eficiente para objetivos de diseño (Rindel, 2002). Sin embargo, a estas pequeñas escalas es aún difícil controlar aspectos como los coeficientes de absorción de los materiales.

Actualmente, se sabe que el modelo más acertado es aquel en el cual no sólo se escala su tamaño (fig. 3.6), sino también la frecuencia de trabajo, además del nivel de absorción del aire, resistencia y coeficiente de absorción de sus materiales, etc. Desgraciadamente, no siempre son posibles todas estas condiciones, y por lo tanto, en algunos casos, se deben hacer correcciones matemáticas para ajustar los resultados (Mooney, 2000).

La investigación actual en el área de modelos físicos a escala se dirige hacia el desarrollo de componentes sonoros en miniatura, para propagar y captar el sonido en el recinto construido a escala, correcciones matemáticas para la absorción del aire en las maquetas así como el uso de maniqués a escala para el análisis de los parámetros binaurales del sonido (Siebein, et al., 1998).

Investigadores como Michael Barron (2000) concluyen después de numerosos estudios e investigaciones que utilizando diferentes modelos de predicción acústica simultáneamente pueden aprovecharse los beneficios de cada uno de ellos, dependiendo lo que se investigue, como afirma Rettinger (1977: 204): “el valor del modelo y del estudio que en él se haga dependerá en la condición acústica que uno quiera evaluar”. Ejemplo de esto son los reportes de Shield y Cox (2000) acerca de las mediciones hechas por Kirkegaard & Associates al Royal Festival Hall y al Bridgewater Hall, en donde se compararon los resultados de las mediciones hechas en modelos a escala (1:20 y 1:50 respectivamente) contra las mediciones hechas en los espacios reales.

A pesar de las ventajas que ofrece la construcción de modelos a escala, también surgen algunos conflictos que dificultan la exactitud en los resultados que se pueden obtener de ellos.

1. Absorción. Casi todos los materiales de construcción de recintos proporcionan información sobre sus coeficientes de absorción para las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz. Sin embargo para estudios con modelos a escala se trabaja con frecuencias mayores y no existe tal información, por lo que deben hacerse correcciones o bien permitirse imprecisiones en los resultados.
2. Frecuencias resonantes. Cada recinto está conformado por ciertas *láminas*, como la parte inferior de las sillas, paneles de muros, ventanas, etc., que vibrando contribuyen a la absorción total. Cuando se construye un modelo a escala debe recordarse que la frecuencia fundamental de las membranas que parecen capas delgadas (*thin membrane-like layers*) será inversamente proporcional al doble de sus dimensiones. Con esto, el modelo entero no debería ser construido a la misma escala, y esta inexactitud puede llegar a ser significativa.

3. La absorción del aire a frecuencias más altas, las cuales serán usadas para estudios en modelos a escala, depende enormemente de la humedad relativa así como en un menor grado, de la temperatura, (Lawrence, 1970) por lo que en algunos casos se intenta minimizar la variación en la absorción del aire sustituyéndolo por aire completamente seco o nitrógeno puro, o una serie de repeticiones en la calibración del equipo.

A pesar de que un modelo físico a escala resulta caro en su construcción y se requiere de un gran cuidado de los equipos y del método experimental, el costo de no prever efectos acústicos no deseados en el espacio real resultaría en modificaciones que sería necesario realizar. Hay áreas dentro del diseño y la construcción que deben ser contempladas por especialistas, sin embargo los diseñadores y arquitectos, con el uso de modelos de simulación, pueden comprobar la eficiencia de su diseño y asegurar que la intervención de especialistas consistirá únicamente en afinar, detallar y calcular las propuestas hechas.

Básicamente, cualquier medida acústica que se pueda llevar a cabo en un espacio real puede hacerse en un espacio a escala, y sus resultados serán válidos mientras que las propiedades físicas de los materiales escogidos para el modelo correspondan a los reales.

En ausencia de información disponible acerca de las características de absorción de materiales para altas frecuencias, posteriormente será necesaria la investigación y construcción de un equipamiento o dispositivo que permita hacer mediciones similares a las determinadas en la norma internacional ISO R354:1963, la cual especifica el método para medir el coeficiente de absorción sonora de materiales usados como tratamiento acústico en techos o muros, así como el área de absorción sonora equivalente de objetos, como mobiliario, personas y otros objetos absorbentes (ISO, 2003), para futuras investigaciones con modelos a escala dentro del LADAc de la UAM-A.

### **2.3.2 Modelos matemáticos**

Son métodos usados para reducir problemas físicos complejos a su forma más simple. Es decir, son técnicas para deducir información acerca de un fenómeno mediante una ecuación dimensionalmente homogénea entre ciertas variables. (Horta, 2001).

El uso de modelos matemáticos como herramienta de predicción acústica no es una técnica nueva, los diferentes tipos de modelos matemáticos han sido creados y perfeccionados por diversos investigadores hasta llegar a su sistematización, que se traduce a programas computarizados para simplificar su uso aunque éste en numerosas ocasiones, requiere del dominio de conceptos matemáticos para su operación.

### **2.3.3 Modelos computarizados**

Desde el siglo pasado se desarrollaron una serie de ideas y métodos para entender el comportamiento del sonido en beneficio de lograr mejores diseños de espacios arquitectónicos. Con el desarrollo en el uso de modelos computarizados es posible combinar las mejores características de los viejos modelos físicos, principios geométricos y la sistematización de los modelos matemáticos con el fin de obtener resultados confiables y parámetros acústicos objetivos (Siebein, et al., 1998).

G. Siebein (1998) afirma que los modelos computarizados se desarrollan a partir de un modelo tridimensional de un recinto propuesto, que puede ser importado desde el programa de diseño hasta el acústico (fig. 3.7). Dentro del recinto virtual el sonido es propagado por fuentes emisoras en sitios específicos. Los diferentes programas permiten estimar la respuesta al impulso para diferentes puntos del espacio.

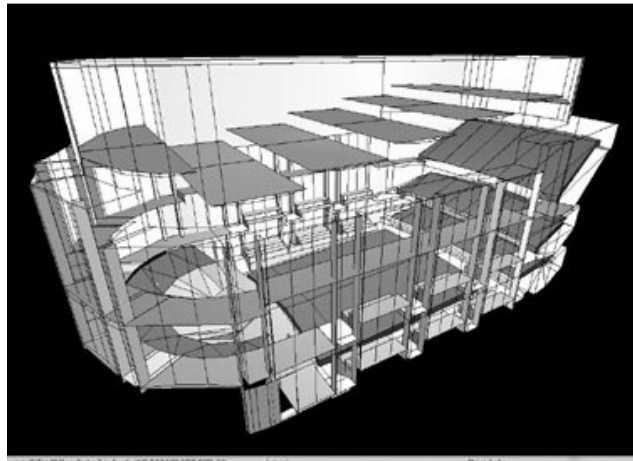


Fig. 2.7. Modelo computarizado de la Gateshead Concert Hall, obtenido de: <http://www.arup.com/acoustics/skill.cfm?pageid=4681>

El modelo de trazado de rayos fue el primero en ser usado con fines prácticos en el diseño de teatros y auditorios. En este tipo de modelos se trazan rayos desde una fuente sonora siguiendo las leyes geométricas y ópticas de reflexión y posteriormente se asignan coeficientes de absorción sonora a las diferentes superficies del recinto. Los rayos se reflejan sobre las superficies del recinto, simulando las ondas sonoras. La amplitud y tiempo de arribo de las reflexiones son obtenidas para diferentes puntos del modelo. El conjunto de los resultados de las reflexiones del sonido forman la estimación de la respuesta al impulso del recinto modelado (Siebein, et al., 1998).

El modelo de la reflexión de la fuente en espejo (image source model) trabaja al revés. El programa localiza todas las superficies de la posición de un receptor y puede proyectar reflexiones desde la fuente. Se trazan rayos desde el receptor, hacia las superficies y luego hacia la fuente localizada en un punto específico (Siebein, et al., 1998). M. Recuero (2001) menciona que J. Borish (1984) perfeccionó el método para aplicarse en espacios con formas irregulares o más complejas formalmente. Siguiendo estos principios geométricos, también existen los modelos de Trazado Cónico y el modelo de Radiosidad.

Los modelos computarizados muestran la distribución de los niveles de presión sonora, permiten visualizar el recorrido de los rayos desde el emisor hasta el receptor, estiman la respuesta al impulso para diferentes posiciones, tanto de la fuente como del receptor, así como también permiten calcular muchos parámetros acústicos necesarios para el diseño.

Para Cremer (1978) la utilidad de los modelos computarizados consiste en estudiar los efectos de un número importante de pequeñas variaciones en el diseño de recintos.

#### **2.3.4 Simulación aural**

La respuesta al impulso que se obtiene de un modelo físico a escala o de un modelo computarizado tridimensional puede utilizarse para simular el sonido dentro del modelo desde la etapa de diseño. Las cualidades acústicas de un recinto de prueba incluyendo las reflexiones tempranas y reverberación pueden ser añadidas a la música o la palabra hablada para experimentarlas y evaluarlas estando virtualmente dentro del espacio proyectado (Siebein, et al., 1998).

La auralización es un término análogo a la visualización, y se refiere a que se puede escuchar el sonido generado dentro de un recinto que sólo existe en una computadora o que apenas es una maqueta (Shield y Cox, 2000), diciéndolo de otro modo, la auralización es un término usado para crear y describir campos sonoros audibles que no existen físicamente. Este tipo de simulación es usado como herramienta didáctica e investigación acústica, en donde se indaga la relación entre los parámetros acústicos cuantitativos y la preferencia subjetiva.

La fuente emisora virtual puede variar enormemente, desde un orador, hasta una orquesta entera, según los requerimientos especiales de diseño. El sonido es grabado en un ambiente anecóico para después reproducirlo dentro del modelo sin que existan reflexiones adicionales a los del propio recinto simulado (Siebein, et al., 1998) y así evaluar el recinto proyectado para hacer las correcciones necesarias desde la etapa de diseño.

M. Barron (2000) concluye a partir de una serie de investigaciones y observaciones que a pesar de que los programas por computadora parecieran el tipo de modelo ideal para la simulación de las características acústicas en los espacios arquitectónicos, existen algunas dificultades para representar aspectos como la difracción y la difusión, las cuales están presentes en todo recinto. Estas características se relacionan directamente con la geometría del espacio y las superficies que lo conforman, y para ello resulta ideal la simulación con modelos físicos a escala, por lo que sería conveniente utilizar varios modelos de simulación para obtener resultados más certeros.

K. Oguchi (2003) afirma que el uso de modelos físicos a escala es mucho más exacto que el uso de los modelos por computadora, y se basa en el hecho de que son mejores las posibilidades para reproducir el fenómeno de la onda sonora en los modelos físicos a escala que en los de computadora. Por su parte, W. Anhert, S. Feistel y O. Schmitz (2003) opinan que los modelos físicos han sido y seguirán siendo útiles hasta que ciertas correlaciones de onda puedan reproducirse dentro de modelos hechos por computadora, a costos académicos muy elevados.

### **3. El Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco**

---

### **3. EL LABORATORIO DE ANÁLISIS Y DISEÑO ACÚSTICO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA, UNIDAD AZCAPOTZALCO**

Para determinar las cualidades acústicas de los recintos se han establecido parámetros objetivos que determinan qué tan adecuado es un lugar para cierta actividad. De acuerdo a los resultados en las pruebas se podrán establecer acciones de corrección en los espacios proyectados o por construir.

Dentro de la cámara sonoamortiguada del LADAc de la UAM-A se harán pruebas y mediciones para anticipar el comportamiento acústico de espacios arquitectónicos por medio de modelos físicos a escala, determinando así las cualidades acústicas de los recintos y garantizando el correcto funcionamiento, en términos de confort acústico, de las actividades que ahí se desarrollen.

De los parámetros establecidos en la norma internacional ISO 3382:1997 solamente podemos obtener los referentes al Tiempo de Reverberación, es decir,  $T_{30}$ ,  $T_{20}$ , EDT y los que dependan directamente de éstos. Parámetros como LEF e IACC estarán fuera de nuestro alcance, ya que para su obtención se requiere un maniquí para hacer mediciones binaurales.

### 3.1 CÁMARA SONOAMORTIGUADA DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS Y DISEÑO ACÚSTICO

La cámara sonoamortiguada instalada es un espacio controlado para realizar mediciones acústicas, ya que permite llevarlas a cabo bajo condiciones equiparables a las de campo libre y con un nivel de ruido de fondo<sup>5</sup> muy bajo<sup>6</sup>. Esta cámara tiene unas dimensiones interiores de 6.20 x 2.90. La altura es de 2.90 en la parte más alta y 2.30 la parte más baja (fig. 3.1 y 3.2).

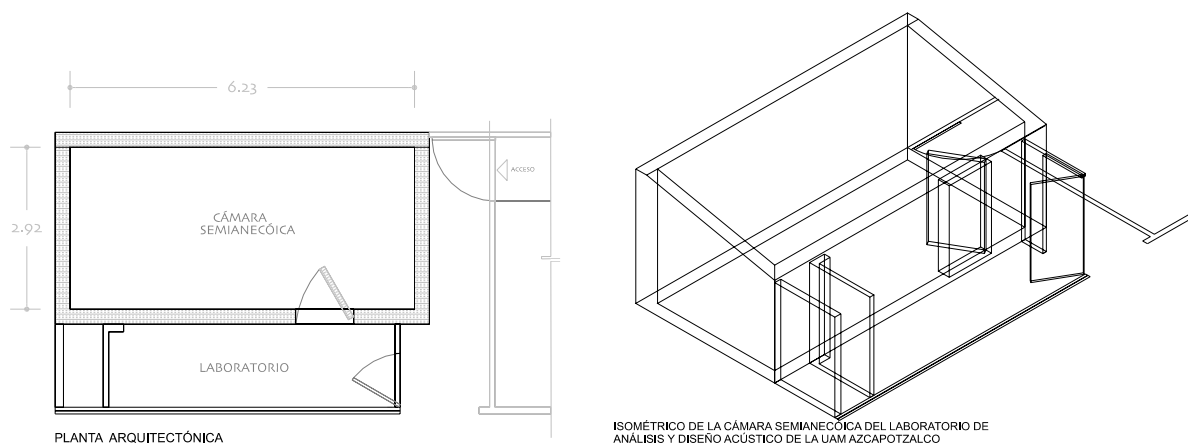
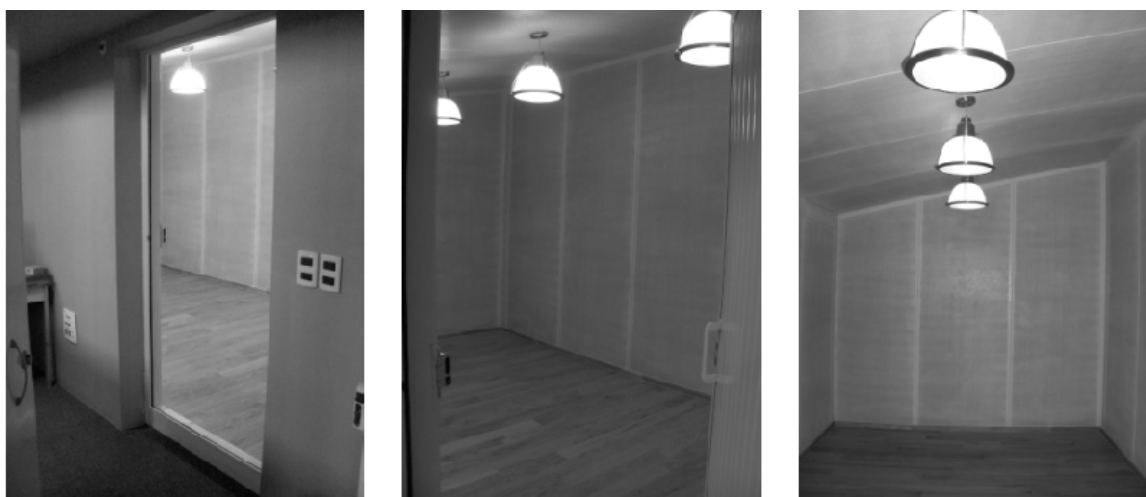


Fig. 3.1 Planta e isométrico de la cámara sonoamortiguada del LADAc de la UAM-A.



INTERIOR DE LA CÁMARA SEMIANECÓICA DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS Y DISEÑO ACÚSTICO DE LA UAM AZCAPOTZALCO

Fig. 3.2 Vistas del interior de la cámara sonoamortiguada del LADAc de la UAM-A.

<sup>5</sup> Nivel de ruido prevaleciente en un ambiente específico medido en ausencia del ruido estudiado.

<sup>6</sup> Debido a la naturaleza absorbente de los materiales con los que está recubierta, la cámara sonoamortiguada tiene la capacidad de aislar los ruidos que pueden interferir en las mediciones al interior de ella.

El recubrimiento interior de la cámara es de un tipo de panel acústico (fig. 3.3) para aplicaciones de muros, divisiones verticales y plafón con una alta resistencia al fuego, absorción y aislamiento sonoros (marca Metecno, espesor de 10 cm). Consiste en dos láminas exteriores de acero galvanizado pintado y perforado, y entre ellas se encuentra un alma de lana mineral de alta densidad. Su característica principal es que es fonoabsorbente y fonoaislante.

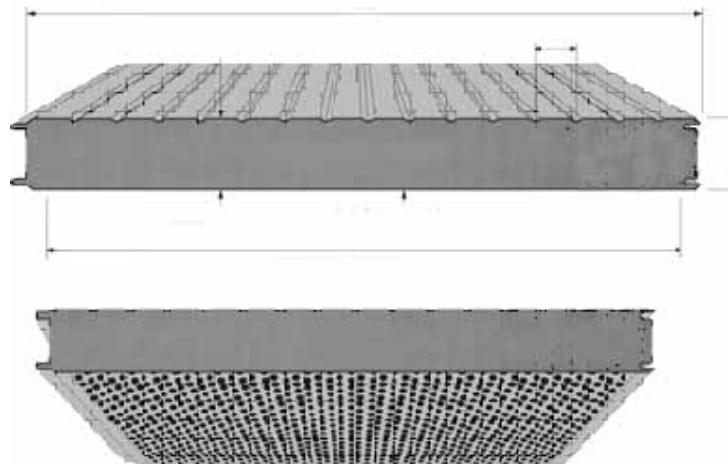


Fig. 3.3. Detalles del panel de recubrimiento interior de la cámara sonoamortiguada, obtenido de: <http://www.metecnomexico.com/HIPWALS2.HTM>

El piso de la cámara sonoamortiguada es de madera y está separado del piso de concreto, para contribuir al aislamiento de la cámara, y por sus características físicas no comparte las mismas propiedades (absorción) del resto de las superficies interiores, por lo que la cámara proporciona características de campo libre.

La puerta es un elemento que también reúne las características adecuadas de aislamiento, debido a los materiales con la que está construida.

La cámara dispone en su interior de diferentes conexiones para dispositivos y equipos localizados en el exterior, área de laboratorio o análisis (Fig. 3.4).

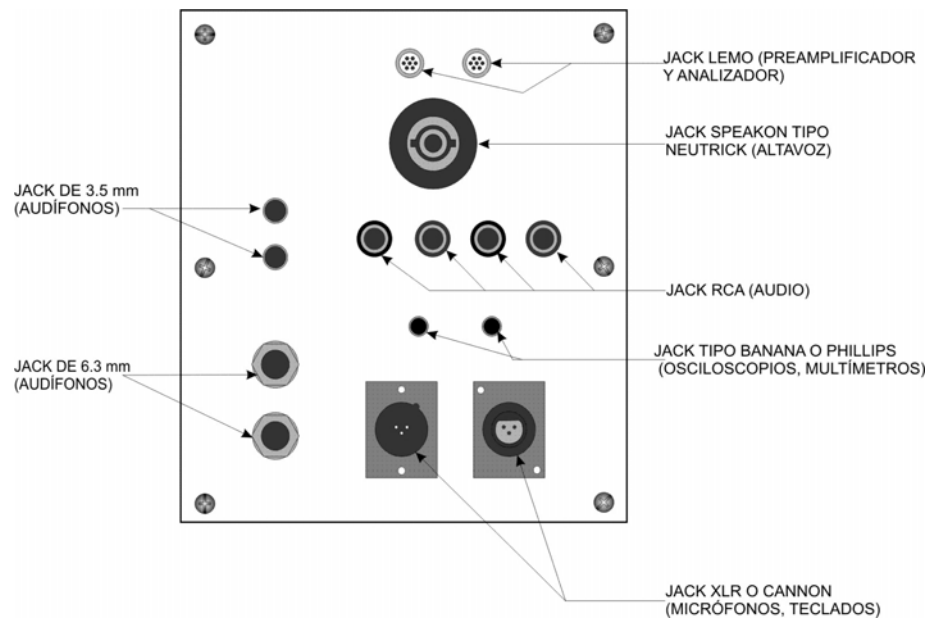


Fig. 3.4. Placa de conexiones del interior de la cámara semianecóica.

## 3.2 INSTRUMENTACIÓN

El equipo de medición y pruebas del Laboratorio es de vital importancia para conocer el comportamiento acústico de los espacios arquitectónicos proyectados a través de modelos físicos a escala. Antes de explicar los procesos de medición que pueden obtenerse dentro de la cámara semianecóica, conviene describir cada uno de los aparatos y su funcionamiento en conjunto.

### 3.2.1 Analizador de espectro

Es un instrumento electrónico que proporciona la representación gráfica en una pantalla de las componentes espectrales o frecuenciales de las señales presentes en la entrada, conocidas habitualmente como *armónicos*<sup>7</sup> (Fernández, García, Orcajo, Cano y Solares, 1998).



Fig. 3.5. Analizador Nor-840 de Norsonic, de [http://www.norsonic.cz/web\\_pages/nor-840\\_page.html](http://www.norsonic.cz/web_pages/nor-840_page.html)

---

<sup>7</sup> Los armónicos se refieren a las componentes u ondas simples que acompañan a la frecuencia fundamental y son múltiplos de ésta. También son llamados hipertonos, sobretonos o parciales.

El analizador del Laboratorio es de la marca noruega Norsonic, modelo Nor-840 (fig. 3.5). Las mediciones disponibles se pueden realizar en dos canales en bandas de octava y tercios de octava. El rango de frecuencias en los dos canales pueden ir desde 0.1 Hz hasta 20 kHz. Es capaz de medir un rango dinámico de 80 dB. Entre otras funciones es capaz de realizar mediciones de tiempo de reverberación y mostrar resultados numéricos, con un generador de ruido blanco/rosa/filtrado interno para excitar las fuentes sonoras reales y a escala, y es adecuado para mediciones de campo.

### 3.2.2 Amplificador

Es un sistema electrónico que produce una señal eléctrica de salida idéntica (idealmente) a la de entrada (en forma de onda y frecuencia) pero de una amplitud mayor. La amplificación de sonido normalmente implica la incorporación de diferentes etapas individuales, algunas de las cuales son amplificadores de voltaje (etapas tempranas) y otras son amplificadores de potencia (etapa de salida y la que la precede) (Floudas, 1995).



Fig. 3.6. Amplificador Norsonic 260

El amplificador del LADAc es de la marca noruega Norsonic modelo 260 (fig. 3.6), su respuesta en frecuencia va desde 3 Hz hasta 40 kHz. Deberá ser operado en intervalos de temperatura desde -20 °C hasta 40 °C, y humedad relativa de 0% a 90%.

### 3.2.3 Altavoz, Fuente sonora

Es el transductor electroacústico cuyo propósito es la reproducción de sonido por medio de la conversión de la señal eléctrica que le llega del micrófono en ondas sonoras (Floudas, 1995). La eficiencia del altavoz corresponderá al porcentaje de energía eléctrica que es transformada en sonido (Rossing, 1989). Las principales características de un altavoz son: respuesta en frecuencia, impedancia, potencia, sensibilidad, rendimiento, distorsión y directividad.

La forma más gráfica de representar la directividad es mediante un diagrama polar<sup>8</sup>, que normalmente se muestra en las especificaciones, ya que cada modelo tiene una respuesta concreta, y ésta puede ser omnidireccional, bidireccional o de tipo cardioide.

El altavoz con el que cuenta el LADAc para las mediciones en espacios reales es hemidodecaédrico (fig. 3.7), de patrón omnidireccional de la marca Norsonic y cumple con las características direccionales descritas en las normas internacionales (ISO 140-3, ISO 140-4 Anexo A, ISO 354, ASTM E-90 y E-336) para pruebas acústicas, por lo que resulta adecuado para los estudios que se realizarán dentro del laboratorio.<sup>9</sup>



Fig. 3.7. Altavoz hemidodecaédrico Norsonic, de <http://www.norsonic.com/index.php?sideID=2437&ledd2=1272&ledd1=943>.

<sup>8</sup> Un diagrama polar es un dibujo técnico que refleja la radiación del altavoz en el espacio en grados para cada punto de sus ejes (horizontal y vertical).

<sup>9</sup> Los diagramas polares del altavoz usado en las pruebas en el espacio existente de la UAM-A así como el de la fuente sonora miniatura pueden ser consultadas en el apéndice II.

La fuente sonora miniatura (fig. 3.8) utilizada en las pruebas dentro del modelo físico a escala fue fabricada por la compañía Ik'Atl especialmente para este fin, a partir de audífonos con características especiales, basándose en los estudios documentados por K. Oguchi (2006 y 2007).



Fig. 3.8. Fuente sonora en miniatura.

### 3.2.4 Micrófono

El micrófono es un transductor electroacústico. Su función es convertir la señal acústica en eléctrica. Posteriormente, esta señal eléctrica es amplificada antes de alimentar al sistema de altavoces (Lawrence, 1970).

La *calidad* de un micrófono está determinada por algunas de las siguientes características:

- **Sensibilidad**, que puede medirse en términos de salida de voltaje o en términos de salida de poder, para una determinada presión sonora. A mayor calidad se tiene mayor sensibilidad para una amplia gama de frecuencias. (Josse, 1975)
- **Fidelidad** Es la respuesta que dé el micrófono a diferentes frecuencias, expresada en dB.

- **Direccionalidad** Determina en que dirección capta mejor el sonido, dependiendo de la directividad encontramos diferentes tipos de micrófonos: omnidireccionales y direccionales (Mehta, 1999).
- **Factor de ruido y grado de distorsión** La propiedad de captar un sonido y generar su señal eléctrica sin aportar perturbaciones o deformaciones (Matilla, 2003).

En el LADAc existen los micrófonos de ½” de marca Norsonic (fig. 3.9 y 3.10), utilizados para mediciones en espacios reales así como para mediciones en condiciones de campo libre, al igual que los de ¼” marca GRAS (fig. 3.11), que por su tamaño y características, son adecuados para las mediciones dentro de los modelos físicos a escala.



Fig. 3.9 Micrófono de patrón omnidireccional y preamplificador de ½” marca Norsonic, de <http://www.norsonic.com/index.php?sideID=2279&ledd1=931>



Fig. 3.10. Micrófono y Preamplificador Norsonic sobre un tripie para hacer las mediciones dentro de la cámara sonoamortiguada.



Fig. 3.11. *Micrófono de patrón omnidireccional de 1/4" marca Gras para medición dentro del modelo a escala, de <http://www.gras.dk/00012/00013/00028/00037/>.*

### 3.2.5 Sistema de mediciones

La medición de algunos parámetros, como el tiempo de reverberación RT, requiere del conjunto de herramientas con las que dispone el LADAc, para obtener valores que permitan el análisis y concluir en propuestas de diseño de acuerdo a los requerimientos de uso de los espacios.

El sistema de mediciones está conformado por el altavoz y el amplificador, los cuales forman un **sistema de reproducción**; el micrófono y el preamplificador, que conforman el **sistema de captura**; y el analizador, que cumple la función de **procesar** los datos de entrada y salida de las señales (Fig. 3.12)

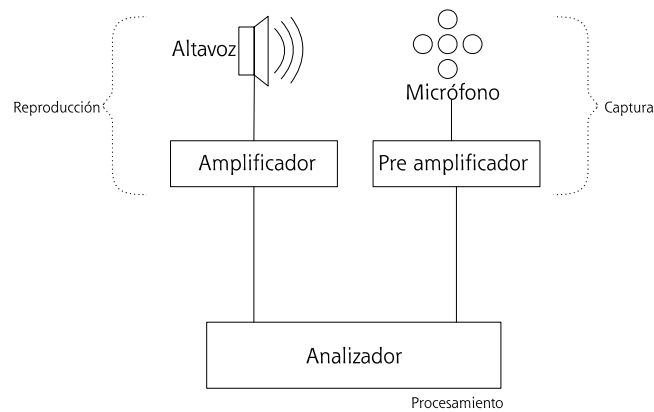


Fig.3.12. Representación gráfica de la forma en la que las señales son reproducidas, captadas y procesadas para su visualización, basada en Okubo, H., Otani, M., Ikezawa, R., Komiyama, S., (2000).

Este proceso se puede explicar de la siguiente forma: la señal, dependiendo del método de generación (puede ser por impulso o por ruido blanco o rosa), es creada a partir del analizador el cual la transmite al amplificador y la hace audible a través del altavoz. Una vez que la señal es transmitida y reproducida, el micrófono la recoge y la pasa al preamplificador el cual transforma la energía sonora en vibraciones (energía mecánica) y de ahí a energía eléctrica, ésta es transferida al analizador de señales que hace visible la señal de la respuesta al impulso, arroja datos y cálculos para su posterior análisis y obtención de conclusiones (fig. 3.13).

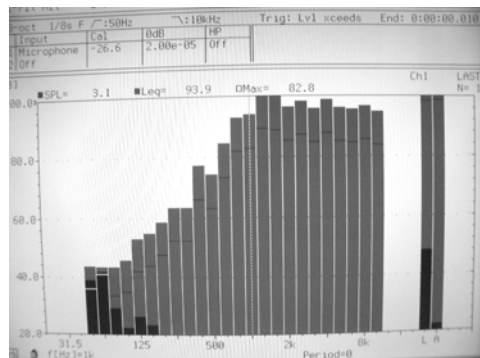


Figura 3.13. Gráfica ejemplo de la respuesta al impulso, visible a través de la pantalla del analizador.

### 3.3 MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN DE LA CÁMARA SONOAMORTIGUADA DEL LADA<sub>c</sub> DE LA UAM-A

Como se mencionó anteriormente esta cámara ofrece un ambiente semejante al encontrado en un espacio al aire libre, donde idealmente, no se presentan superficies de reflexión durante la propagación de las ondas acústicas, a excepción del piso. Sin embargo se requiere de la caracterización del recinto y de sus modos de vibración para presentar detalladamente las propiedades acústicas del mismo.

Como se había mencionado anteriormente el tiempo de reverberación es el tiempo, expresado en segundos, que tarda la energía sonora en decaer 60 dB después de que la fuente sonora ha cesado.

De acuerdo con la norma internacional ISO 3382:1997 el tiempo de reverberación puede medirse de diferentes formas, según el tipo de impulso que genere una perturbación del espacio.

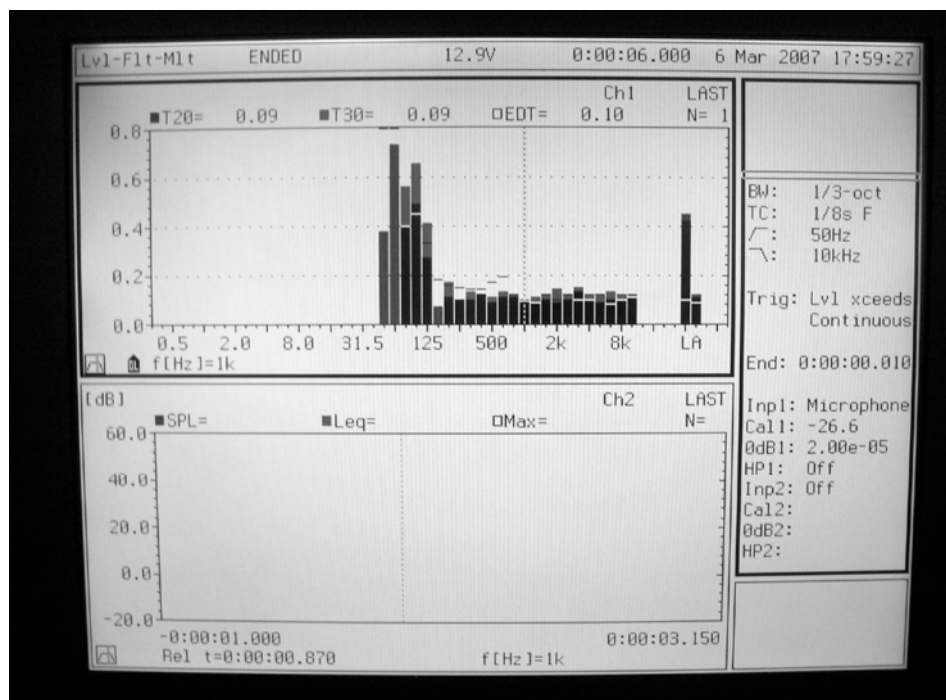


Fig. 3.14. Gráfica de la respuesta al impulso de la cámara sonoamortiguada, curva de decaimiento y resultados numéricos por frecuencia.

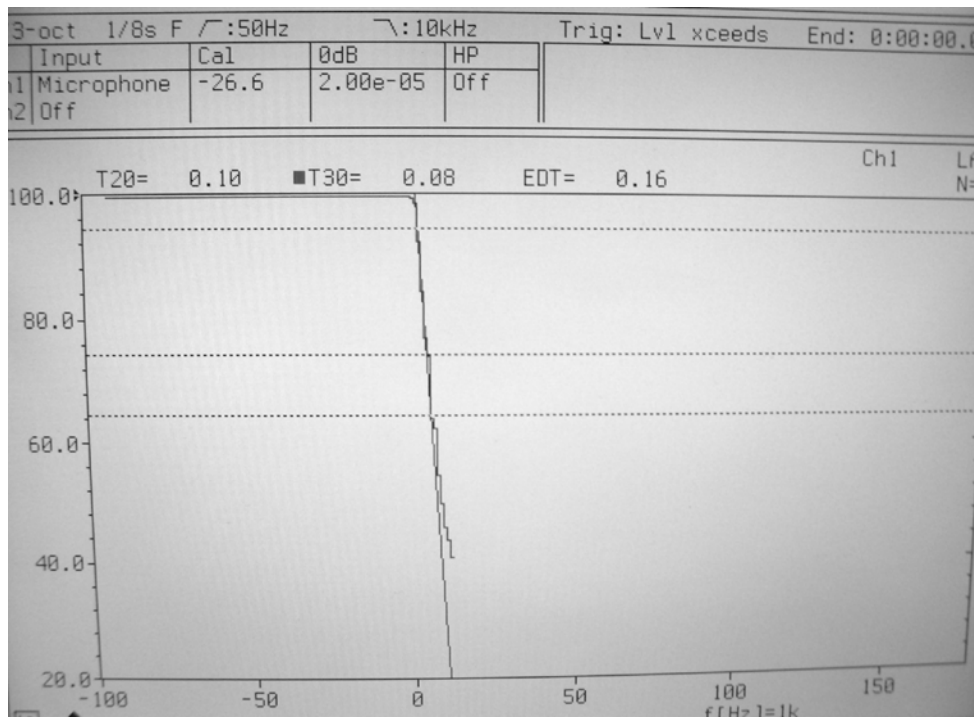


Fig. 3.15. Gráfica de la curva de decaimiento de la respuesta al impulso.

Lvl-Filt-Mit READY 12.9V 0:00:04.000 30 May 2007 15:17:42

1/3-oct 1/8s F /:50Hz \:8kHz Trig: Noise off End: 0:00:00.004

Input	Cal	0dB	HP
Ch1 Microphone	-26.6	2.00e-05	Off
Ch2 Off			

d1c2-3-p 070528

Frq[Hz]	T20	T30	Ch1	AUX
100	1.22	1.23		
125	2.07	1.75		
160	1.58	1.45		
200	?	?		
250	1.45	1.43		
315	1.44	1.43		
400	1.32	1.30		
500	1.17	1.23		
630	1.37	1.24		
800	1.18	1.20		
1k	1.15	1.19		
1.25k	0.95	1.00		
1.6k	1.07	1.01		
2k	1.05	0.97		
2.5k	1.02	0.95		
3.15k	0.93	0.90		
4k	0.85	0.79		
5k	0.98	0.90		
6.3k	0.68	0.72		
8k	0.32	0.46		

Figs. 3.16. Resultados numéricos por frecuencia correspondientes a la respuesta al impulso de la cámara sonoamortiguada..

La respuesta al impulso puede ser medida directamente usando una fuente sonora como puede ser un disparo de pistola, o excitando el recinto con ruido blanco<sup>10</sup>, rosa<sup>11</sup> o con cualquier otro medio cuyo espectro sea suficiente para cumplir con los requerimientos de respuesta en el descenso de dB. En la medición realizada dentro de la cámara sonoamortiguada, el micrófono de ½" se colocó sobre un tripie en una esquina de la cámara, mientras el disparo se realizó en la contra-esquina del micrófono con dirección al techo.

En las mediciones de la respuesta al impulso (fig. 3.14, 3.15 y 3.16) realizadas dentro de la cámara sonoamortiguada se obtuvieron resultados muy similares con los dos tipos de impulsos usados, un disparo de pistola y ruido rosa. Se obtuvo el promedio entre diez resultados, obteniéndose un tiempo de reverberación (a 500 Hz) de alrededor de 100 ms, lo que indica que es un ambiente absorbente, el cual es adecuado para las pruebas que habrán de realizarse dentro de ella.

De acuerdo con los resultados obtenidos con los dos tipos de impulsos puede garantizarse el método de medición usado, así como la propia cámara sonoamortiguada como un espacio controlado para hacer pruebas dentro de ella, ya que el resultado de RT obtenido sirve para afirmar que el fenómeno de la reflexión no influye de manera significativa en las pruebas que se realizarán en su interior.

---

<sup>10</sup> un ruido cuyo nivel es constante en todas las frecuencias, es decir, mantiene la misma intensidad en todo su espectro

<sup>11</sup> un ruido cuyo nivel sonoro está caracterizado por un descenso de 3 dB por octava. Es una señal conocida con el mismo nivel en todas las bandas, conocida como sonido plano y se utiliza para analizar el comportamiento de salas, altavoces, equipos de sonido etc. Normalmente se genera entre 20 Hz y 20 kHz.

### **3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA SONOAMORTIGUADA DEL LADAc DE LA UAM-A**

El objetivo de esta caracterización consistió en determinar las frecuencias y posiciones dentro de la cámara en las cuales se pueden obtener datos válidos, así como los puntos o zonas que no resultan adecuados para llevar a cabo mediciones, pues los resultados que se obtendrían de éstas no representarían el comportamiento real del sonido en condiciones de campo libre.

Los modos de vibración de un recinto muestran su comportamiento frecuencial, es decir, la respuesta de un espacio para cada frecuencia al ser excitado por medio de ruido rosa (cuya característica es que su nivel de energía disminuye cada tercio de octava) y de acuerdo con sus dimensiones y características físicas.

Las mediciones realizadas dentro de la cámara permiten la comprensión de lo que sucede dentro de este espacio controlado cuando se excita por medio de una señal de ruido. Idealmente se esperaría, al captar una señal sonora con el micrófono, observar a través del analizador una gráfica uniforme en cualquier punto de medición del interior de la cámara. Sin embargo, debido a las características físicas de esta cámara, no sucede así ni para todas las frecuencias de estudio ni para todos los puntos de la cámara.

El procedimiento de la caracterización de la cámara consistió en fraccionarla en varios puntos para graficar el comportamiento frecuencial de todo su interior. Dentro de esta medición realizada por L. Arias, G. Flores y R. Reyes (2007) se utilizó una fuente sonora hemidodecaédrica, la cual permite una dispersión de la señal uniforme hacia todo el espacio, y se posicionó al centro del espacio a nivel de piso. Para analizar el comportamiento de toda la cámara se dividió equitativamente (a cada 49 cm.) en sus tres planos (x, y, z), colocando en cada punto de referencia (300 puntos en total) el micrófono de ½" y tomando lecturas en cada uno de ellos.

Una vez colocado el micrófono en cada posición, se excitó acústicamente el recinto por medio del generador de ruido interno del analizador Nor-840 alrededor de 10 s, posteriormente éste comenzó a registrar la relación SPL contra frecuencia y al final mostró el espectro frecuencial de los datos obtenidos (fig. 3.17).

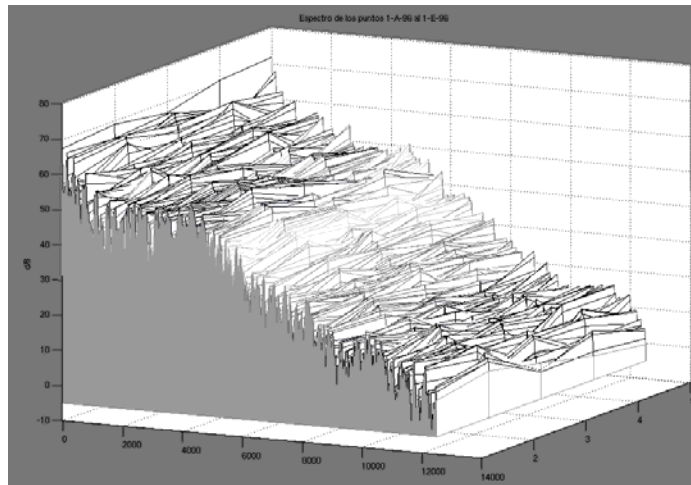


Fig.3.17 Espectro obtenido a la altura de 96cm tomados de la primera columna de medición, después de procesar datos en Matlab.

Posteriormente a través del software Matlab se aplicó la FFT<sup>12</sup> sobre los datos obtenidos de las mediciones realizadas en cada uno de los puntos del espacio. La razón de la aplicación de la FFT sobre los datos obtenidos responde a que la FFT proporciona la energía del sistema y además muestra la razón de cambio de dicha energía. En la figura 3.18 se puede observar la gráfica de la medición hecha con el analizador en la parte superior, y en la inferior se observa la FFT de la señal original.

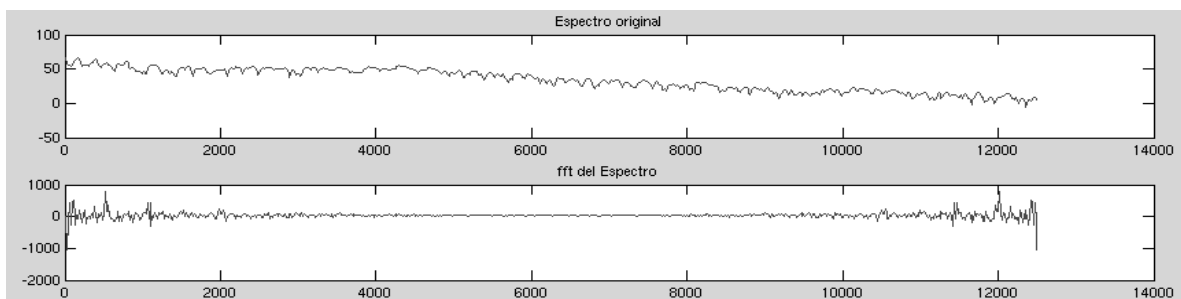


Fig. 3.18. Espectro y su FFT.

<sup>12</sup> Transformada rápida de Fourier, que es un algoritmo para calcular el espectro de un número  $n$  de frecuencias igualmente espaciadas de una longitud.

En esta figura es evidente que en la FFT para frecuencias menores a 1 kHz y mayores a 11 kHz comienzan cambios en los niveles de energía. También es posible observar que el ancho de banda comprendido por 1.5 kHz y 10.5 kHz se muestra prácticamente en un nivel basal, ya que no presenta cambios significativos en el nivel de energía, convirtiéndolo en un ancho de banda controlado para realizar mediciones y ajeno a presentar perturbaciones que pudieran deberse a las dimensiones de cámara sonoamortiguada.

A través del software Matlab, se localizaron las frecuencias donde se presenta la mayor variación energética. En la figura 3.19 se muestra el comportamiento o los niveles de presión sonora de la frecuencia de 60Hz a lo largo del plano horizontal de la cámara a una altura de 96cm, la cual presenta un cambio de energía no uniforme.

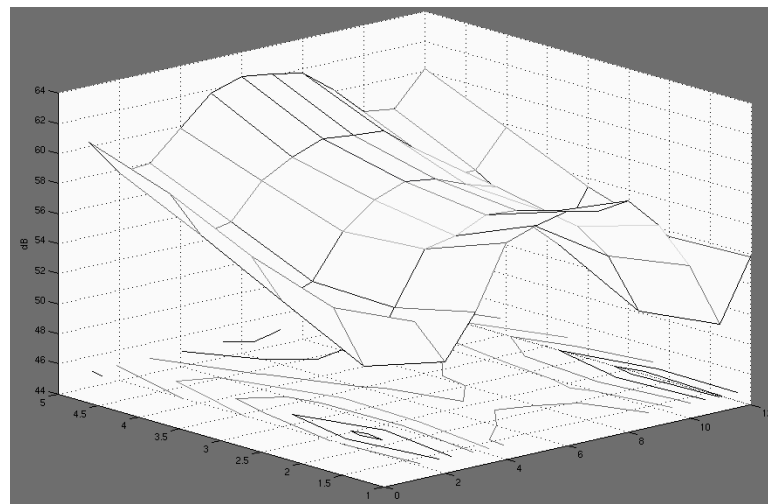


Fig.3.19. Comportamiento de la frecuencia de 60Hz a 96cm del nivel de piso.

Finalmente, después de determinar que la cámara presenta un tiempo de reverberación aproximado a 100 ms a 500 Hz, se afirma que el fenómeno de la reflexión no influirá de manera importante en las pruebas que se realicen; además el intervalo de frecuencias en las cuales la cámara sonoamortiguada trabaja sin perturbaciones debidas a sus dimensiones corresponde al intervalo de frecuencias de la audición humana, por lo que la cámara sonoamortiguada puede considerarse como un lugar de trabajo regulado y adecuado para el presente trabajo.

#### **4. Propuesta del modelo de experimentación para la simulación de las características acústicas de espacios arquitectónicos en modelos físicos a escala**

---

## **4. PROPUESTA DEL MODELO DE EXPERIMENTACIÓN PARA LA SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS EN MODELOS FÍSICOS A ESCALA**

Con el desarrollo de este modelo se pretende crear una herramienta adicional que apoye a estudiantes, arquitectos y diseñadores a entender y aplicar conceptos básicos de la acústica de recintos desde las primeras etapas del diseño, así como comprobar de forma práctica las decisiones de diseño que afectan directamente al comportamiento del sonido dentro de los recintos proyectados.

La creación de este modelo no pretende aplicarse como única herramienta de prueba en espacios complejos acústicamente, como teatros o salas de conciertos, en donde además se requiere la intervención de especialistas, sin embargo sí puede emplearse en la concepción y diseño de recintos cotidianos como aulas, salas de juntas, oficinas y demás espacios en donde el sonido ocupa, aunque a veces de manera inconsciente para sus usuarios, un papel fundamental en las actividades que ahí se desarrollan.

## 4.1 MÉTODO SELECCIONADO

Para el desarrollo de esta investigación el método aplicado fue de tipo experimental. En primer lugar se realizó una recopilación y análisis de textos e investigaciones similares a la aquí presentada, con el objeto de comparar diferentes características y objetivos de tanto de los modelos físicos como de los distintos procedimientos de prueba, para así proponer un modelo propio adecuado a las dimensiones y características particulares de la cámara sonoamortiguada del LADAc de la UAM-A. Posteriormente se realizaron las mediciones dentro del espacio existente seleccionado y se construyó su modelo físico a escala, efectuando posteriormente mediciones dentro de él que correspondieron a las realizadas en el espacio a escala natural. Finalmente se compararon resultados, se analizaron los valores obtenidos y se obtuvieron conclusiones determinantes para la conceptualización del modelo de experimentación.

El objetivo de la experimentación realizada consistió en comprobar que el mismo proceso de análisis y pruebas acústicas aplicadas dentro de recintos construidos se puede realizar dentro de modelos físicos a escala, obteniéndose resultados equiparables y logrando con ellos un método de simulación y predicción del comportamiento acústico de recintos.

## 4.2 MODELO DE EXPERIMENTACIÓN PROPUESTO

A continuación se muestra el diagrama de flujo del modelo de experimentación para la obtención y/o predicción del RT de un recinto de naturaleza reverberante utilizando para ello un modelo físico a escala (fig. 4.1).

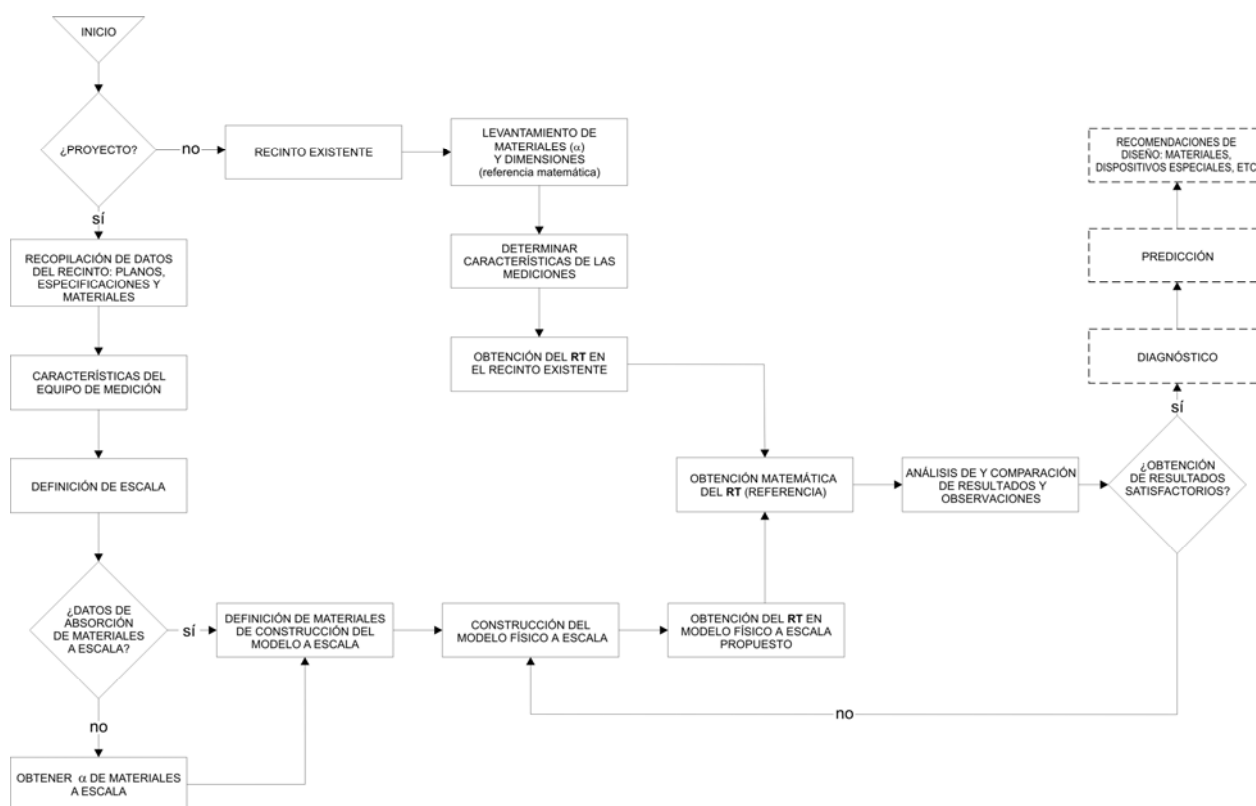


Fig. 4.1. Modelo de experimentación propuesto. Las líneas punteadas corresponden a etapas que no fueron realizadas en la presente investigación, por no ser parte de los objetivos de la misma, sin embargo, forman la secuencia lógica del modelo

El modelo aquí presentado es específico para el LADAc de la UAM-A y consta de las siguientes etapas:

La elección del recinto a estudiar acústicamente, que puede ser un recinto existente o un proyecto, para ello deberán hacerse análisis de la geometría y los materiales que lo conforman, incluyendo sus datos de coeficientes de absorción<sup>14</sup>.

La consideración de todas las características tanto del equipo de medición disponible como del espacio destinado a realizar las mediciones, ya que en parte, de ello dependerá la elección de la escala a la que deberá construirse el modelo físico.

La construcción del modelo físico a escala del recinto. Deben considerarse los coeficientes de absorción de los materiales a escala para que los resultados en las mediciones sean confiables.

La medición acústica de los espacios, tanto en el recinto existente como en su modelo físico a escala.

La comparación entre todos los datos obtenidos, análisis de los resultados y observaciones, es decir, determinar qué tan cercanos son los datos para poder predecir el comportamiento acústico del recinto estudiado. Adicionalmente, la obtención de valores mediante las ecuaciones matemáticas necesarias que permitirán poseer un valor adicional de referencia para comparación.

---

<sup>14</sup> Cuando una onda sonora se refleja sobre un elemento del espacio, una parte de la energía incidente ( $I$ ) es reflejada ( $I_r$ ) y la otra absorbida ( $I_a$ ). El coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) de un material es igual a la relación  $[I_a / I]$  y está dado en  $m^2$  del material considerado.

La realización de un diagnóstico acústico del recinto, dependiendo de los resultados obtenidos y sus requerimientos con respecto a las actividades que ahí deban desarrollarse. En caso de que el diagnóstico lo indique, la realización de correcciones en el modelo físico hasta obtener los resultados idóneos, para garantizar un comportamiento acústico similar al recinto a escala natural.

En la investigación realizada no se incluye la evaluación acústica del recinto estudiado, la Sala de Consejo de CyAD, por no formar parte de sus objetivos, sin embargo, con los resultados obtenidos mediante la experimentación pueden obtenerse conclusiones en cuanto a mejoras para el desempeño de las actividades acústicas de los ocupantes del recinto.

## **5. Aplicación del modelo**

---

## **5. APLICACIÓN DEL MODELO**

El modelo de experimentación presentado fue creado con el fin de obtener un método confiable para la predicción del comportamiento acústico de espacios arquitectónicos no complejos y servirá como una herramienta para la comprensión y el diseño de algunos parámetros que definen la calidad acústica de los espacios.

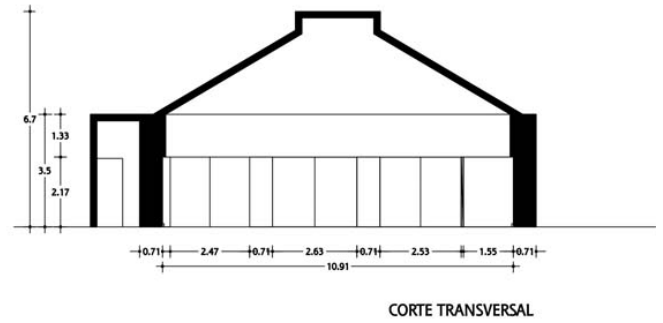
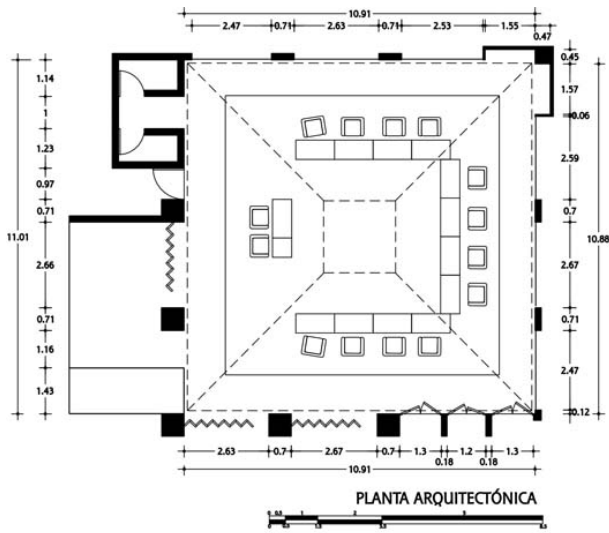
Para la realización de la presente investigación se eligió un recinto existente, se hicieron las mediciones de RT y se obtuvieron resultados. Posteriormente se construyó su modelo físico a escala y se realizaron mediciones con las mismas características, bajo el factor de escala elegido. Finalmente se realizaron ecuaciones matemáticas para tener otra referencia numérica para comparación. Se analizaron los resultados obtenidos y se obtuvieron conclusiones importantes sobre el uso de este modelo como una herramienta de predicción acústica específica para el LADAc de la UAM-A.

## 5.1 CASO DE ESTUDIO. ELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ESPACIO

El espacio elegido a simular acústicamente fue la sala de consejo de la División de Ciencias y Artes para el Diseño que se ubica en el último nivel del edificio H-P de la UAM-A (fig. 5.1 y 5.2). Se eligió este espacio por su forma y dimensiones, así como por la naturaleza reflejante de sus materiales, lo cual facilitó la investigación, en ausencia de información acerca de coeficientes de absorción de materiales para la construcción de modelos a escala.

El área de la sala, que abarca algunos espacios contiguos como sanitarios y cuarto de control, es de  $142.1 \text{ m}^2$  y  $588.3 \text{ m}^3$  de volumen. La altura máxima es de 6.5 m y la menor, de los muros perimetrales, de 3.5 m. La cubierta tiene forma de pirámide truncada, que dará características acústicas especiales al recinto. Dicha sala tiene una capacidad para 40 personas sesionando.

Los elementos verticales perimetrales son: columnas de concreto, revestimiento de madera para algunos armarios, muros de tablaroca y vidrio de 6 mm en los ventanales que rodean la sala. El área de piso de cerámica de la parte perimetral de la sala es de  $66 \text{ m}^2$  aproximadamente, y el área de alfombra en la parte central es de  $74 \text{ m}^2$ . El plafón tanto de la propia sala como de sus espacios contiguos es de panel de yeso. El mobiliario está constituido por mesas de madera y sillas tapizadas en piel sintética y tela. Por último se considerarán las persianas corridas, que están colocadas en los ventanales así como las puertas corredizas de plástico.



SALA DEL CONSEJO DIVISIONAL CyAD  
EDIFICIO H-P

Fig. 5.1. Planta y corte de la Sala de Consejo Divisional de CyAD del Edificio H-P



Fig. 5.2. Vistas del interior de la Sala de Consejo Divisional de CyAD del Edificio H-P

## **5.2 MODELO FÍSICO**

Muchos son los factores que determinan las características generales del modelo físico a escala aplicable al Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico de la UAM-A. Mientras que el tamaño del modelo terminado es importante para su introducción dentro de la cámara sonoamortiguada, la escala elegida estará también determinada por la capacidad del equipo de medición y análisis disponible, así como por las características de los materiales de construcción del modelo a escala y sus propiedades físicas a simular.

### **5.2.1 Factores determinantes de las características del modelo físico aplicable a la cámara sonoamortiguada**

La elección de la escala depende en gran medida de la instrumentación disponible. Una de las escalas más usadas en países que aplican el sistema métrico decimal es 1:10, sin embargo a esta escala las frecuencias en el modelo no coinciden con las frecuencias acústicas preferidas en la realidad. Por otro lado, la escala 1:8 usada en países que emplean el sistema inglés de medidas, permite la consistencia entre el intervalo de frecuencias entre el modelo y la realidad, de manera que 4000 Hz en el modelo corresponderá a 500 Hz a escala real (Lawrence, A., 1970).

La escala también va en función de la longitud de onda según las frecuencias usadas, pues es la que define la dimensión del modelo. Para las frecuencias centrales 250Hz, 500Hz, 1kHz y 2kHz con longitudes de onda de 1.37m hasta 0.17m el escalamiento se traduce en 2.5kHz, 5kHz, 10kHz y 20kHz y longitudes de onda ( $\lambda$ ) de entre 0.137 m y 0.017 m. Para escalas menores como en el caso de 1:20, las frecuencias escaladas están en el rango de 5kHz, 10kHz, 20kHz y 40kHz alejados del rango audible para entrar en el ultrasonido, con longitudes de onda entre 0.068 m y 0.009 m.

A través del tiempo diferentes investigadores y grupos consultores han utilizado diferentes escalas en sus modelos físicos. En la tabla 5.1 se muestra un análisis de las ventajas y desventajas de las escalas reportadas en investigaciones hechas por diversos autores.

Escala	Autor	Ventajas	Desventajas
1:8	Lawrence, A.	El rango de frecuencias usadas es consistente con las frecuencias en bandas de octavas, ej. 4000 hz en el modelo corresponderá a 500 Hz a escala real. Es mayor, y por lo tanto más fácil de modelar y controlar. Usada en países que usan el sistema inglés de unidades	Su tamaño incrementa el costo de construcción, poco manejable
1:10	Jordan, V.L. Lawrence, A. Boone, M. & Braat-Eggen E. Oguchi K. Nagata Acoustics Templeton, D.	Usada en países que usan sistema métrico decimal	Las frecuencias a escala no coinciden con las frecuencias acústicas preferidas, ej. 4000 Hz en el modelo corresponde a una frecuencia de 400 Hz, no es una frecuencia de banda de octava preferida.
1:20	Barron, M. Rettinger, M.	Ofrecen mediciones hasta la octava de 2000 Hz (real) con dimensiones manejables	Dificultad para reproducir índices de absorción a diferentes frecuencias a escala. Necesidad de secar el ambiente para minimizar la absorción del aire
1:25	Barron, M.	Ofrecen mediciones hasta la octava de 2000 Hz (real) con dimensiones manejables	
1:50	Rindel, J.H. Barron, M. Templeton, D.	Se reduce la escala para hacerla una técnica más eficiente, acortar el tiempo para pruebas en modelos Adecuada para mediciones objetivas hasta la octava de 1000 Hz (real)	Es difícil controlar el nivel de absorción de los materiales

Tabla 5.1. Relación de uso de diferentes escalas según diversos autores

Otro aspecto fundamental son los coeficientes de absorción de los materiales usados para construir el modelo a escala, los cuales deben corresponder a los de los materiales reales. El problema por lo general se soluciona bajo un criterio visual y táctil, dejando de lado las propiedades acústicas de los materiales, lo que influye en los resultados. Por lo anterior es muy importante realizar una investigación posterior que

genere este tipo de datos para los materiales a utilizar en la construcción de modelos a escala para la simulación acústica de espacios.

Existe otro factor determinante para la elección de escala y se relaciona con las características de la fuente sonora. Al tratarse de escalas reducidas en dimensiones se deben manejar altas frecuencias, es decir, longitudes de onda menores. Para reproducir frecuencias altas, usadas en estudios con modelos a escala, generalmente se usan *tweeters*, sin embargo esto generalmente se traduce en una respuesta sonora pobre.

En estudios actuales se intenta crear fuentes sonoras miniatura cuya respuesta sea omnidireccional, como la que ofrecen las bocinas dodecaédricas utilizadas en medición y análisis de espacios a escala natural (Rodríguez, 2007). K.Oguchi (2003) reportó el desarrollo de una fuente emisora de sonido de carácter omnidireccional para uso en modelos a escala, dicha fuente ha sido construida a partir de audífonos de respuesta entre 3 Hz y 1000 kHz. (Fig. 5.3).



Fig. 5.3. Fuente sonora miniatura para modelos a escala de patrón omnidireccional desarrollada por K. Oguchi, de Nagata Acoustics, de <http://www.nagata.co.jp/news/news0312-e.htm>.

A partir de estos razonamientos, por la experiencia documentada de algunos autores que han investigado el tema, disponibilidad de información acerca de las características de los materiales de construcción del modelo, características y limitaciones en el equipo de medición disponible, así como las propias características físicas de la cámara sonoamortiguada, se eligió para la construcción del modelo físico el factor de escala 1:10.

### 5.2.2 Escala y materiales

En la construcción del modelo físico a escala se ha considerado el factor de reducción 1:10, para evitar los problemas asociados con la absorción del aire en altas frecuencias, las limitaciones con el equipo de reproducción en altas frecuencias, así como la disponibilidad de información publicada acerca de los coeficientes de absorción de los materiales a escala, entre algunos otros. Además, las alteraciones y modificaciones en la forma y/o superficies dentro del modelo serán fáciles de hacer y el efecto en las propiedades del recinto podrá evaluarse de forma precisa.

En investigaciones similares, K. Oguchi (2005) de Nagata Acoustics, afirma que para simular los materiales de los muros, plafones y pisos son superficies reflejantes, utiliza madera gruesa pintada..

Asimismo, M. Boone y E. Braat-Eggen (1994) reportan mediciones realizadas para el Centro de Artes Escénicas en Eindhoven utilizando MDF para simular las superficies reflejantes en el modelo a escala. Afirman que las superficies que son consideradas más absorbentes son la zona del público, los pisos de alfombra y la tapicería de las butacas, las cuales son simuladas con cartones para empaquetar huevo.

Anteriormente se había mencionado el criterio visual y táctil para la selección de materiales de construcción del modelo físico, en ausencia de datos precisos de coeficientes de absorción de los materiales correspondientes a los usados en el modelo real. En el modelo físico propuesto para la cámara sonoamortiguada de la UAM-A el material considerado para los muros, piso y techo es macocel satinado de 6 mm y de 3 mm para los muebles, acrílico transparente de 3 mm para las ventanas. Para las persianas y las puertas plegadizas se usó estireno de 20 pts, y polipropileno, respectivamente, las sillas se modelaron con espuma fenólica. Para simular la superficie alfombrada se consideraron varios materiales, desde una tela sintética muy delgada (poco absorbente) hasta fieltro (muy absorbente).

Las pruebas hechas dentro del modelo consideraron el estado desocupado de la sala, pero consideraremos el número de personas presentes en la medición, por lo que la escala humana fue representada con espuma fenólica.

Por tratarse de un modelo de dimensiones considerables (1m x 1m x 0.7m aprox.), para su construcción se requirió la asesoría de personal calificado, así como el uso de herramientas y equipos especiales para trabajar la madera, como sierras caladoras y de mesa (figs. 5.4 a 5.9).

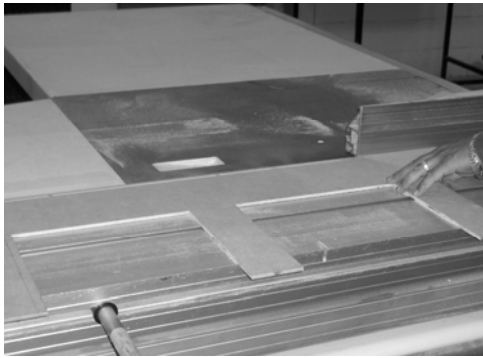


Fig. 5.4 y 5.5. Corte de las piezas de macocel que conformarán muros, piso y techo

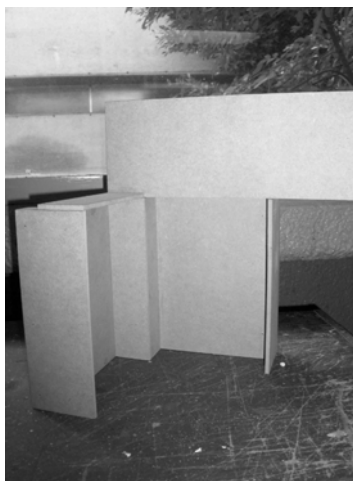


Fig. 5.6. Ensamble de piezas para formar muros

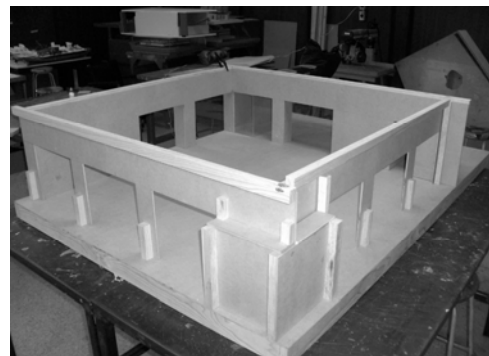


Fig. 5.7. Ensamble de elementos perimetrales



Fig. 5.8. *Modelo terminado*

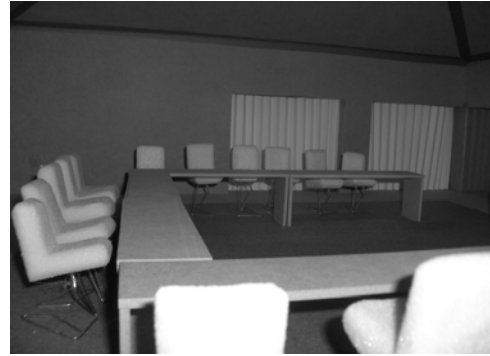


Fig. 5.9. *Interior del modelo*

### **5.3 PARÁMETROS ACÚSTICOS A VERIFICAR EN EL MODELO**

El parámetro más importante en la medición de la calidad acústica de un recinto es el tiempo de reverberación  $RT$ , ya que de él dependen los demás, aunque en investigaciones diversas, la percepción subjetiva indica diferencias (Barron, 2004).

En el Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico se pueden obtener valores en los parámetros que dependan directamente del tiempo de reverberación  $RT$ , como  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , EDT, índice de claridad, sonoridad, etc. No podrán considerarse los parámetros de Fracción Lateral de Energía (LEF) y el coeficiente de correlación interaural cruzado (IACC), ya que éstos dependen de la forma de arribo de la energía sonora a los oídos, por lo que deberá usarse un modelo humano, y para el fin de la presente investigación, esto no es posible.

Con las mediciones realizadas en el modelo físico a escala propuesto se obtuvieron los valores de  $T_{20}$  y  $T_{30}$  los cuales se compararon con los valores obtenidos de las pruebas hechas en el recinto construido a escala real para obtener conclusiones acerca de la construcción del modelo a escala, validar el método de mediciones y hacer recomendaciones en cuanto a las pruebas.

## 5.4 MEDICIONES Y EXPERIMENTACIÓN

Se establecieron dos posiciones de fuente sonora (A2 y D1), considerando las posibles localizaciones del emisor para diferentes usos del espacio (sala de juntas o conciertos musicales) y cuatro diferentes posiciones (B1, B2, B3 y C2) representativas de los receptores para ambos usos (Figs. 5.10 y 5.11). Se consideró el método de mediciones establecido por la norma internacional ISO 3382:1997 para validar los resultados.

Como ya se había mencionado, para cada posición se hicieron tres mediciones y promediaron los resultados, por lo que en total se realizaron 24 mediciones.

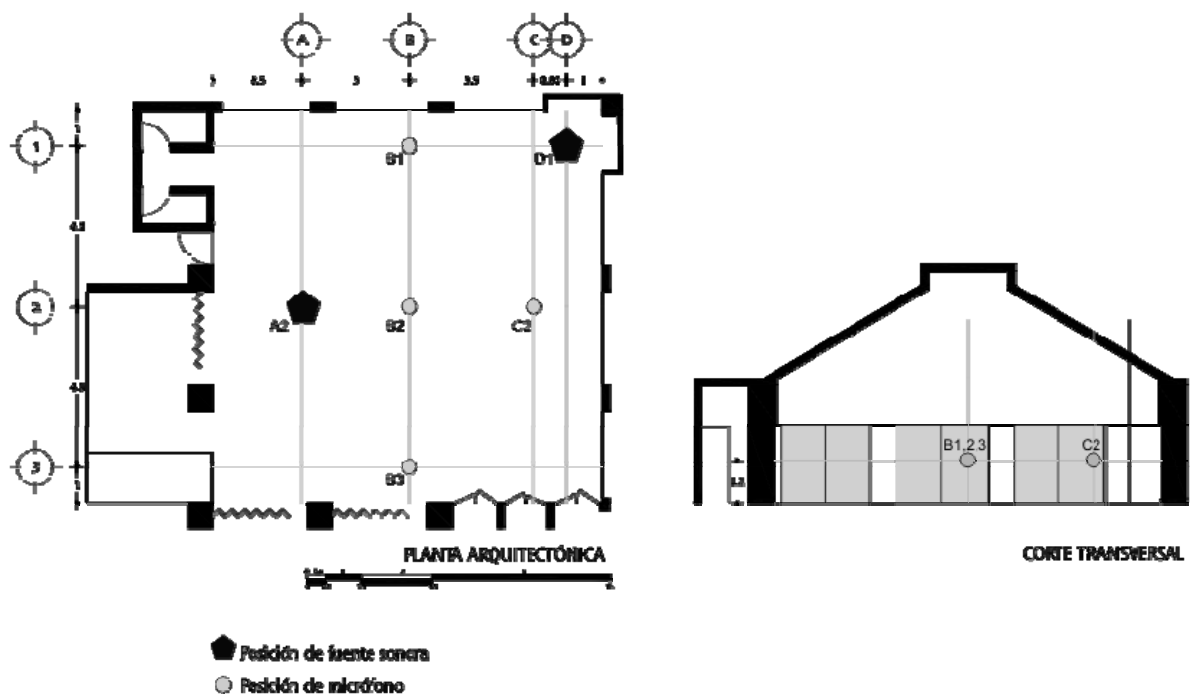


Fig. 5.10. Posiciones de la fuente sonora y el micrófono para las mediciones de RT dentro del caso de estudio

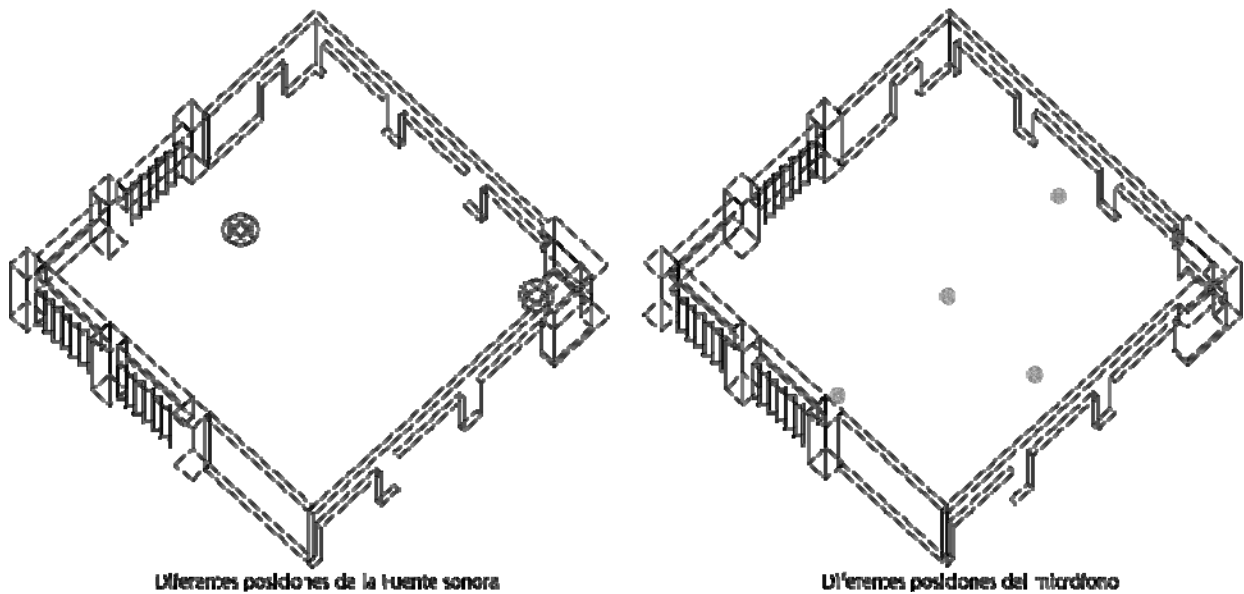


Fig. 5.11 Posiciones de la fuente sonora y el micrófono para las mediciones de RT dentro del caso de estudio

Como se mencionó anteriormente las posiciones de las fuentes emisoras corresponden a dos diferentes usos, una es representativa del uso fundamental del espacio como sala de consejo y juntas, en donde el orador principal estará casi al centro del espacio, y la otra corresponde a la esquina que forma un nicho desde donde puede colocarse un solista o un grupo musical.

Las posiciones de los receptores corresponden a los puntos representativos de los puntos en donde normalmente hay sillas tanto para los asistentes a las juntas de consejo como para los oyentes de los conciertos.

## 5.5 RESULTADOS OBTENIDOS Y OBSERVACIONES

Se hizo una sesión de mediciones en el espacio real, la Sala de Consejo de la División de Artes para el Diseño, del edificio H-P de la UAM-A (Fig. 5.12 a 5.14).

En esta sesión se midieron los parámetros  $T_{20}$  y  $T_{30}$  (Fig. 5.15). A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos, derivados de frecuencias que serán de interés para nosotros, 500 y 1000 Hz, debido a que los resultados del RT de los recintos se presentan normalmente en este intervalo de frecuencias (medias).



Figs. 5.12, 5.13. Y 5.14. Diferentes posiciones del equipo de medición dentro de la Sala de Consejo Divisional de CyAD

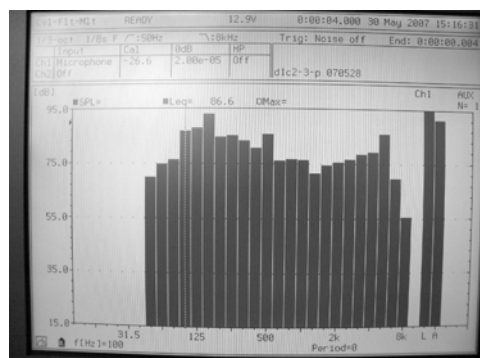


Fig. 5.15. Primera gráfica de la energía (dB) alcanzada mediante la excitación del recinto real por medio de ruido rosa

### 5.5.1 Mediciones en el espacio real

La respuesta al impulso generado dentro del recinto real es captada por el micrófono y transmitida al analizador en donde se hace visible para nuestro estudio y comparación (figs. 5.16 y 5.17).

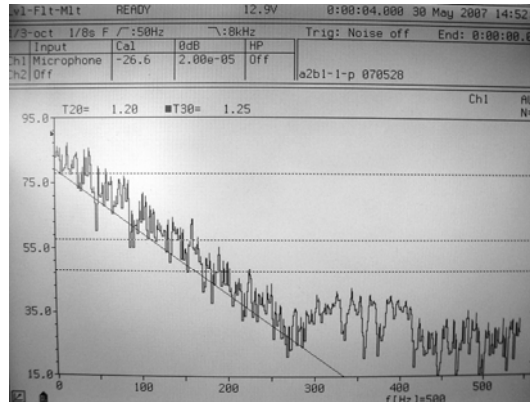


Fig. 5.16. Gráfica del TR del espacio real medido en los puntos: fuente A2 micrófono B1 para la frecuencia: 500 Hz

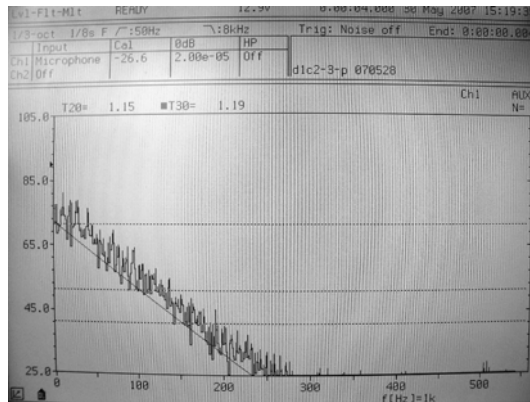


Fig.5.17. Gráfica del TR del espacio real medido en los puntos fuente D1, micrófono C2 para la frecuencia de 500 Hz

Después de realizar todas las mediciones programadas para los distintos puntos de fuente y receptores, se promedian los resultados (como sugiere la norma ISO 3382:1997) y se obtienen los resultados (tabla 5.2):

Fecha: 29-May-07

Posición de Fuente: A2  
Posición de micrófono: C2

Posición de Fuente: A2  
Posición de micrófono: B2

Posición de Fuente: A2  
Posición de micrófono: B1

Posición de Fuente: A2  
Posición de micrófono: B3

500 Hz		
	T20	T30
Med. 1	1.25	1.21
Med. 2	1.31	1.32
Med. 3	1.17	1.3
Promedio:	<b>1.24</b>	<b>1.28</b>

500 Hz		
	T20	T30
Med. 1	1.23	1.16
Med. 2	1.34	1.26
Med. 3	1.23	1.17
Promedio:	<b>1.27</b>	<b>1.20</b>

500 Hz		
	T20	T30
Med. 1	1.2	1.25
Med. 2	1.19	1.25
Med. 3	1.41	1.31
Promedio:	<b>1.27</b>	<b>1.27</b>

500 Hz		
	T20	T30
Med. 1	1.14	1.31
Med. 2	1.27	1.28
Med. 3	1.25	1.4
Promedio:	<b>1.22</b>	<b>1.33</b>

1 KHz		
	T20	T30
Med. 1	1.21	1.13
Med. 2	1.13	1.15
Med. 3	1.07	1.16
Promedio:	<b>1.14</b>	<b>1.15</b>

1 KHz		
	T20	T30
Med. 1	1.03	1.05
Med. 2	1.04	1.05
Med. 3	1.07	1.07
Promedio:	<b>1.05</b>	<b>1.06</b>

1 KHz		
	T20	T30
Med. 1	1.02	1.04
Med. 2	1.15	1.08
Med. 3	1.07	1.09
Promedio:	<b>1.08</b>	<b>1.07</b>

1 KHz		
	T20	T30
Med. 1	1.12	1.17
Med. 2	1.05	1.09
Med. 3	1.07	1.19
Promedio:	<b>1.08</b>	<b>1.15</b>

Posición de Fuente: D1  
Posición de micrófono: B3

Posición de Fuente: D1  
Posición de micrófono: B2

Posición de Fuente: D1  
Posición de micrófono: B1

Posición de Fuente: D1  
Posición de micrófono: C2

500 Hz		
	T20	T30
Med. 1	1.41	1.32
Med. 2	1.24	1.2
Med. 3	1.27	1.25
Promedio:	<b>1.31</b>	<b>1.26</b>

500 Hz		
	T20	T30
Med. 1	1.2	1.43
Med. 2	1.4	1.81
Med. 3	1.34	1.3
Promedio:	<b>1.31</b>	<b>1.51</b>

500 Hz		
	T20	T30
Med. 1	1.37	1.3
Med. 2	1.28	1.21
Med. 3	1.33	1.29
Promedio:	<b>1.33</b>	<b>1.27</b>

500 Hz		
	T20	T30
Med. 1	1.17	1.27
Med. 2	1.34	1.25
Med. 3	1.17	1.23
Promedio:	<b>1.23</b>	<b>1.25</b>

1 KHz		
	T20	T30
Med. 1	1.18	1.23
Med. 2	1.15	1.14
Med. 3	1.02	1.11
Promedio:	<b>1.12</b>	<b>1.16</b>

1 KHz		
	T20	T30
Med. 1	1.04	1.03
Med. 2	1.08	1.12
Med. 3	1.24	1.19
Promedio:	<b>1.12</b>	<b>1.11</b>

1 KHz		
	T20	T30
Med. 1	0.95	1.08
Med. 2	1.2	1.13
Med. 3	1.12	1.16
Promedio:	<b>1.09</b>	<b>1.12</b>

1 KHz		
	T20	T30
Med. 1	1.19	1.21
Med. 2	1.14	1.13
Med. 3	1.15	1.19
Promedio:	<b>1.16</b>	<b>1.18</b>

Tabla 5.2. Resultados del RT de las mediciones realizadas en el espacio real

Estos resultados indican que el tiempo de reverberación medido a 500 Hz (medios) es más largo que a 1000 Hz (sonidos agudos). Los valores de TR aumentan ligeramente con la posición de la fuente en D1, que por la geometría de los elementos que conforman el recinto, será más adecuado para un uso musical del espacio, en donde se requiere un TR más largo, mientras que la fuente en posición A2 será más adecuada para actividades en donde se requiera mayor inteligibilidad del habla, como reuniones, charlas y juntas, y por lo tanto un TR más corto.

### 5.5.2 Mediciones en el modelo físico a escala propuesto

Considerando las características especiales de los equipos de medición para el interior del modelo físico, se utilizó un micrófono de  $\frac{1}{4}$ " (fig. 5.18) así como una fuente sonora miniatura (fig. 5.19).



Fig. 5.18. *Micrófono de  $\frac{1}{4}$ "*



Fig. 5.19. *Fuente sonora miniatura*

Se hicieron varias corridas para los diferentes puntos de medición dentro de la maqueta con el fin de obtener el  $T_{20}$  y  $T_{30}$  que correspondieran al modelo real (figs. 5.20 y 5.21). Las diferentes pruebas incluyeron cambios en los materiales de la maqueta, como el barniz en todas las superficies de madera, para minimizar los poros que pudieran absorber el sonido a altas frecuencias. Asimismo, se hicieron cambios en la superficie alfombrada, desde una tela muy delgada (poco absorbente) hasta fieltro (muy absorbente), lo que modificó en gran medida los resultados finales en el RT. También se consideró el mobiliario como elemento fundamental en el grado de absorción del recinto en su totalidad.



Fig. 5.20 y 5.21. *Posición de Fuente y micrófono dentro de la maqueta*

A continuación se presentan los resultados en el RT obtenidos dentro del modelo físico a escala (tabla 5.3), en las mismas posiciones y siguiendo el mismo método de mediciones que en el espacio real.

Fecha: 04-Jul-07 Observaciones: Colocación de alfombra (felpo) y mobiliario

Posición de Fuente: A2 Posición de micrófono: C2	Posición de Fuente: A2 Posición de micrófono: B2	Posición de Fuente: A2 Posición de micrófono: B1	Posición de Fuente: A2 Posición de micrófono: B3																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">5 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.16</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.15</td><td>0.14</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.18</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.16</b></td><td><b>0.15</b></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">10 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.11</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.11</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.12</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.11</b></td><td><b>0.11</b></td></tr> </tbody> </table>	5 KHz				T20	T30	Med. 1	0.16	0.15	Med. 2	0.15	0.14	Med. 3	0.18	0.16	Promedio:	<b>0.16</b>	<b>0.15</b>	10 KHz				T20	T30	Med. 1	0.11	0.12	Med. 2	0.11	0.11	Med. 3	0.12	0.11	Promedio:	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">5 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.13</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.14</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.17</td><td>0.18</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.15</b></td><td><b>0.16</b></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">10 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.13</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.13</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.1</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.12</b></td><td><b>0.13</b></td></tr> </tbody> </table>	5 KHz				T20	T30	Med. 1	0.13	0.16	Med. 2	0.14	0.15	Med. 3	0.17	0.18	Promedio:	<b>0.15</b>	<b>0.16</b>	10 KHz				T20	T30	Med. 1	0.13	0.13	Med. 2	0.13	0.13	Med. 3	0.1	0.12	Promedio:	<b>0.12</b>	<b>0.13</b>	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">5 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.14</td><td>0.18</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.15</td><td>0.17</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.18</td><td>0.17</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.16</b></td><td><b>0.17</b></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">10 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.13</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.14</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.1</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.12</b></td><td><b>0.12</b></td></tr> </tbody> </table>	5 KHz				T20	T30	Med. 1	0.14	0.18	Med. 2	0.15	0.17	Med. 3	0.18	0.17	Promedio:	<b>0.16</b>	<b>0.17</b>	10 KHz				T20	T30	Med. 1	0.13	0.13	Med. 2	0.14	0.13	Med. 3	0.1	0.11	Promedio:	<b>0.12</b>	<b>0.12</b>	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">5 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.16</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.14</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.14</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.15</b></td><td><b>0.15</b></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">10 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.1</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.12</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.11</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.11</b></td><td><b>0.13</b></td></tr> </tbody> </table>	5 KHz				T20	T30	Med. 1	0.16	0.15	Med. 2	0.14	0.15	Med. 3	0.14	0.16	Promedio:	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	10 KHz				T20	T30	Med. 1	0.1	0.12	Med. 2	0.12	0.13	Med. 3	0.11	0.13	Promedio:	<b>0.11</b>	<b>0.13</b>
5 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.16	0.15																																																																																																																																																	
Med. 2	0.15	0.14																																																																																																																																																	
Med. 3	0.18	0.16																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.16</b>	<b>0.15</b>																																																																																																																																																	
10 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.11	0.12																																																																																																																																																	
Med. 2	0.11	0.11																																																																																																																																																	
Med. 3	0.12	0.11																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>																																																																																																																																																	
5 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.13	0.16																																																																																																																																																	
Med. 2	0.14	0.15																																																																																																																																																	
Med. 3	0.17	0.18																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.15</b>	<b>0.16</b>																																																																																																																																																	
10 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.13	0.13																																																																																																																																																	
Med. 2	0.13	0.13																																																																																																																																																	
Med. 3	0.1	0.12																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.12</b>	<b>0.13</b>																																																																																																																																																	
5 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.14	0.18																																																																																																																																																	
Med. 2	0.15	0.17																																																																																																																																																	
Med. 3	0.18	0.17																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.16</b>	<b>0.17</b>																																																																																																																																																	
10 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.13	0.13																																																																																																																																																	
Med. 2	0.14	0.13																																																																																																																																																	
Med. 3	0.1	0.11																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.12</b>	<b>0.12</b>																																																																																																																																																	
5 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.16	0.15																																																																																																																																																	
Med. 2	0.14	0.15																																																																																																																																																	
Med. 3	0.14	0.16																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>																																																																																																																																																	
10 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.1	0.12																																																																																																																																																	
Med. 2	0.12	0.13																																																																																																																																																	
Med. 3	0.11	0.13																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.11</b>	<b>0.13</b>																																																																																																																																																	
Posición de Fuente: D1 Posición de micrófono: B3	Posición de Fuente: D1 Posición de micrófono: B2	Posición de Fuente: D1 Posición de micrófono: B1	Posición de Fuente: D1 Posición de micrófono: C2																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">5 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.14</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.11</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.14</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.13</b></td><td><b>0.16</b></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">10 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.13</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.11</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.11</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.12</b></td><td><b>0.12</b></td></tr> </tbody> </table>	5 KHz				T20	T30	Med. 1	0.14	0.16	Med. 2	0.11	0.15	Med. 3	0.14	0.16	Promedio:	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>	10 KHz				T20	T30	Med. 1	0.13	0.12	Med. 2	0.11	0.13	Med. 3	0.11	0.12	Promedio:	<b>0.12</b>	<b>0.12</b>	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">5 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.14</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.13</td><td>0.14</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.17</td><td>0.17</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.15</b></td><td><b>0.16</b></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">10 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.11</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.11</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.12</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.11</b></td><td><b>0.12</b></td></tr> </tbody> </table>	5 KHz				T20	T30	Med. 1	0.14	0.16	Med. 2	0.13	0.14	Med. 3	0.17	0.17	Promedio:	<b>0.15</b>	<b>0.16</b>	10 KHz				T20	T30	Med. 1	0.11	0.12	Med. 2	0.11	0.12	Med. 3	0.12	0.12	Promedio:	<b>0.11</b>	<b>0.12</b>	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">5 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.14</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.16</td><td>0.18</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.15</td><td>0.18</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.15</b></td><td><b>0.17</b></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">10 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.13</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.11</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.11</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.12</b></td><td><b>0.11</b></td></tr> </tbody> </table>	5 KHz				T20	T30	Med. 1	0.14	0.16	Med. 2	0.16	0.18	Med. 3	0.15	0.18	Promedio:	<b>0.15</b>	<b>0.17</b>	10 KHz				T20	T30	Med. 1	0.13	0.12	Med. 2	0.11	0.11	Med. 3	0.11	0.11	Promedio:	<b>0.12</b>	<b>0.11</b>	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">5 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.13</td><td>0.17</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.14</td><td>0.14</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.13</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.13</b></td><td><b>0.16</b></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="3">10 KHz</th></tr> <tr><th></th><th>T20</th><th>T30</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Med. 1</td><td>0.13</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Med. 2</td><td>0.11</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Med. 3</td><td>0.1</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>Promedio:</td><td><b>0.11</b></td><td><b>0.12</b></td></tr> </tbody> </table>	5 KHz				T20	T30	Med. 1	0.13	0.17	Med. 2	0.14	0.14	Med. 3	0.13	0.16	Promedio:	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>	10 KHz				T20	T30	Med. 1	0.13	0.13	Med. 2	0.11	0.12	Med. 3	0.1	0.11	Promedio:	<b>0.11</b>	<b>0.12</b>
5 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.14	0.16																																																																																																																																																	
Med. 2	0.11	0.15																																																																																																																																																	
Med. 3	0.14	0.16																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>																																																																																																																																																	
10 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.13	0.12																																																																																																																																																	
Med. 2	0.11	0.13																																																																																																																																																	
Med. 3	0.11	0.12																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.12</b>	<b>0.12</b>																																																																																																																																																	
5 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.14	0.16																																																																																																																																																	
Med. 2	0.13	0.14																																																																																																																																																	
Med. 3	0.17	0.17																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.15</b>	<b>0.16</b>																																																																																																																																																	
10 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.11	0.12																																																																																																																																																	
Med. 2	0.11	0.12																																																																																																																																																	
Med. 3	0.12	0.12																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.11</b>	<b>0.12</b>																																																																																																																																																	
5 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.14	0.16																																																																																																																																																	
Med. 2	0.16	0.18																																																																																																																																																	
Med. 3	0.15	0.18																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.15</b>	<b>0.17</b>																																																																																																																																																	
10 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.13	0.12																																																																																																																																																	
Med. 2	0.11	0.11																																																																																																																																																	
Med. 3	0.11	0.11																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.12</b>	<b>0.11</b>																																																																																																																																																	
5 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.13	0.17																																																																																																																																																	
Med. 2	0.14	0.14																																																																																																																																																	
Med. 3	0.13	0.16																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>																																																																																																																																																	
10 KHz																																																																																																																																																			
	T20	T30																																																																																																																																																	
Med. 1	0.13	0.13																																																																																																																																																	
Med. 2	0.11	0.12																																																																																																																																																	
Med. 3	0.1	0.11																																																																																																																																																	
Promedio:	<b>0.11</b>	<b>0.12</b>																																																																																																																																																	

Tabla 5.3 Resultados del RT de las mediciones realizadas en el modelo físico a escala

Los valores obtenidos dentro del modelo a escala son más uniformes, esto se observa fácilmente en la frecuencia de 10 KHz, en donde los valores casi no se modificaron entre los diferentes puntos de medición.

De la misma forma que se hizo visible la respuesta al impulso dentro del recinto real, obtuvimos las diferentes respuestas dentro del modelo físico a escala, por medio del analizador, teniendo diferentes gráficas y curvas para cada uno de los puntos de medición (Figs. 5.22 y 5.23).

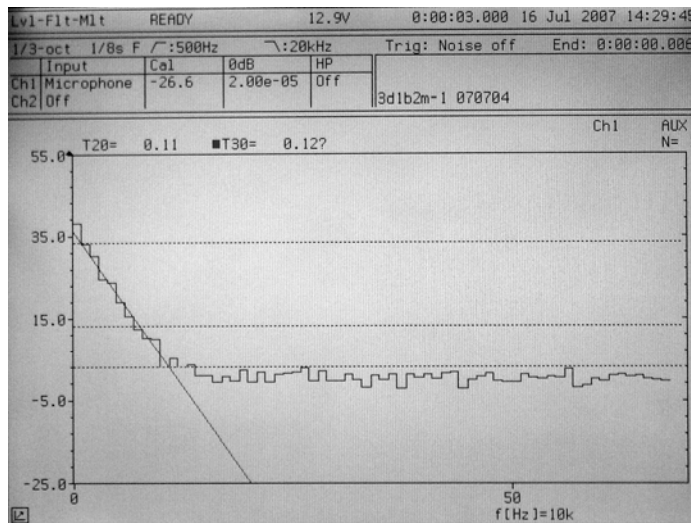


Fig. 5.22. Curva de decaimiento dentro del modelo a escala en el punto D1B2 a 10 kHz

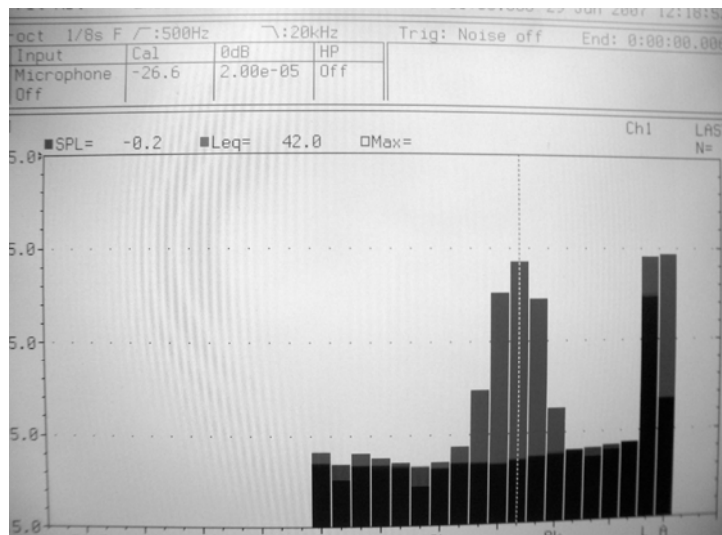


Fig. 5.23. Máximo nivel sonoro alcanzado en el punto D1B2 a 5 KHz

Los resultados obtenidos en las mediciones de RT tanto para el espacio real como para el modelo físico a escala corresponden (con diferencias mínimas) al considerar el tiempo de reverberación resultante a escala (Tablas 5.4 y 5.5), es decir, los valores son similares considerando el factor de escala 1:10. Si a la frecuencia de 500 Hz, el resultado es de 1.3 s, a una frecuencia de 5,000 Hz el resultado correspondiente sería 0.13 s. En la literatura consultada no se menciona, quizá se da como supuesto, sin

embargo, para fines del presente trabajo debe mencionarse, ya que la conversión debe considerarse cuando se trabaje con otro factor de escala.

	Espacio real	Modelo a escala
$f$	500 Hz	5 kHz
$T_{20}$	1.3	0.15
$T_{30}$	1.3	0.16

Tabla 5.4. Comparación de resultados de  $T_{20}$  y  $T_{30}$  para el recinto real y su modelo físico a escala a 500 Hz y 5 kHz respectivamente

	Espacio real	Modelo a escala
$f$	1 kHz	10 kHz
$T_{20}$	1.1	0.11
$T_{30}$	1.1	0.12

Tabla 5.5. Comparación de resultados de  $T_{20}$  y  $T_{30}$  para el recinto real y su modelo físico a escala a 1 kHz y 10 kHz respectivamente.

## 5.6. VERIFICACIÓN DEL MODELO DE EXPERIMENTACIÓN PROPUESTO

Se podrá valorar el método de modelo de experimentación y caracterización del confort acústico de cualquier espacio arquitectónico dentro del LADAc de la UAM-A a partir de la similitud entre los resultados obtenidos en el espacio real y los obtenidos en el modelo físico a escala, y se podrá afirmar que el mismo proceso y método de caracterización acústica de recintos a escala real permite conocer los parámetros del confort acústico aplicado a modelos físicos a escala, lo cual será útil en el diseño de nuevos espacios y dispositivos especiales.

Los resultados del tiempo de reverberación obtenidos en el recinto real correspondientes a la frecuencia de 500 Hz son:  $T_{20}= 1.3$  s y  $T_{30}= 1.3$  s, y para 1 kHz:  $T_{20}= 1.1$  s y  $T_{30}= 1.3$  s

Los resultados del tiempo de reverberación obtenidos en el modelo físico a escala correspondiente a la frecuencia de 5 kHz son:  $T_{20}= 0.15$  s y  $T_{30}= 0.16$  s, y para 10 kHz:  $T_{20}= 0.11$  s y  $T_{30}= 0.12$  s.

Paralelamente, se comprueba analíticamente el tiempo de reverberación obtenido en la maqueta con la *ecuación de la reverberación* de Sabine [3], que está dada por la siguiente expresión (Beranek, 1992):

$$TR = 0.161 \times (V/A) \quad [3]$$

donde:  $V$  = Volumen total del recinto, en  $m^3$   
 $A$  = Absorción total de las superficies, en  $m^2$

Cabe mencionar que las dimensiones usadas en la expresión anterior provienen del modelo físico a escala, y los coeficientes de absorción de los materiales son los de los materiales usados en su construcción (Egan, 1988 y Foreman, 1990):

$$\begin{aligned}
 V &= 0.59 \text{ m}^3, \\
 A &= 0.67 \text{ m}^2 \\
 TR &= 0.161 * (0.59 / 0.67), \quad TR = 0.161 (0.88) \\
 TR &= 0.14 \text{ seg.}
 \end{aligned}$$

En las mediciones realizadas también se obtuvieron los valores de RT para 1 kHz y 10 kHz. En la expresión (4) el tiempo de reverberación  $RT_{mid}$  considera estas frecuencias:

$$RT_{mid} = \frac{RT (500 \text{ Hz}) + RT (1 \text{ kHz})}{2} \quad [4]$$

donde:  $RT_{mid}$  = Tiempo de reverberación medio

Por lo que haremos la comparación entre el  $RT_{mid}$  del espacio real con el  $RT_{mid}$  de su modelo físico a escala:

$$RT_{mid} \text{ real} = \frac{1.3 + 1.13}{2}, \quad RT_{mid} \text{ real} = 1.2 \text{ s}$$

$$RT_{mid} \text{ mod.} = \frac{0.16 + 0.12}{2}, \quad RT_{mid} \text{ mod.} = 0.14 \text{ s}$$

En resumen, con métodos experimentales y matemáticos hemos obtenido resultados de RT (Tabla 5.6):

	Fórmula de la Reverberación de Sabine modelo a escala	TR medido en el modelo a escala	TR <sub>mid</sub> modelo a escala	TR medido en el recinto real	TR <sub>mid</sub> recinto real
s	0.14	0.16	0.14	1.3	1.2

Tabla 5.6. *Tabla comparativa entre los métodos experimentales y numéricos para la obtención de TR en el recinto real y su modelo físico a escala.*

Por lo tanto, para el resultado en el tiempo de reverberación existen cuatro valores que corresponden entre sí con una diferencia mínima, la cual se puede derivar de la ausencia de datos de absorción de los materiales utilizados y en la diferencia de patrones de las fuentes sonoras, aunque en el modelo a escala se posicionó la fuente miniatura de manera que el sonido no fuera arrojado hacia enfrente, sino hacia arriba, para emular el comportamiento de la fuente usada en el recinto real (fig. 5.24).



Fig. 5.24. Posición rotada de la fuente miniatura para las mediciones

El estudio y comparación de los patrones de directividad entre las fuentes sonoras utilizadas en la presente investigación puede ser consultada en el Apéndice II.

## 5.7 VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

En esta investigación consideramos necesario recurrir a la Estadística para poder validar la diferencia entre los resultados obtenidos tanto en el espacio real como en su modelo físico a escala, y considerar todos los resultados obtenidos de las mediciones y no solamente los resultados finales promediados, con el fin de tener un intervalo amplio de posibilidades, ya que una muestra demasiado pequeña podría poner en riesgo el valor de la investigación.

Para verificar que las inferencias obtenidas sean válidas estadísticamente, se utilizan procedimientos conocidos como *pruebas de hipótesis*. Una hipótesis estadística es una proposición o supuesto sobre los parámetros de una o más poblaciones y el objetivo de probar una hipótesis estadística es decidir si cierta afirmación se encuentra apoyada por la evidencia experimental que se obtiene a través de una muestra aleatoria (Canavos, 1999). El procedimiento para probar hipótesis se basa en la comparación entre dos ideas opuestas entre sí, que se denominan hipótesis nula ( $H_0$ ) e hipótesis alternativa ( $H_a$ ), y cuando se rechaza una, se acepta la otra (Álvarez, González, Herrera y Bernal, 2006).

El procedimiento para probar hipótesis consta de las siguientes fases: se establecen las hipótesis nula y alternativa, se identifican los instrumentos estadísticos de prueba a utilizar: ecuaciones, distribución Z, distribución t, distribución ji cuadrada (Canavos, 1999), se obtienen los resultados y se analizan, para finalmente rechazar o aceptar las hipótesis.

Para el caso de estudio se establece una diferencia máxima aceptable de 0.2 seg. entre sus resultados, ya que en las tablas de tiempos de reverberación óptimos para diferentes tipos de espacios se considera una diferencia admisible de  $\pm 0.2$  s (Rodríguez, M.F., 2001).

De tal forma siguiendo el procedimiento anteriormente mencionado se realiza la prueba de hipótesis sobre la igualdad de dos medias, el estadístico de prueba tiene una distribución  $t$  de Student (Canavos, 1999):

**Hipótesis:** *La diferencia máxima entre un método y otro será de 0.2 seg (entre 500 y 5000 Hz)*

$$H_0: \mu \geq 0.2$$

$$H_1: \mu < 0.2$$

*Se rechaza  $H_0$  si  $t_0 < t_{\alpha}$*

Datos:

T20			T30		
500 Hz	5000 Hz	Diferencia	500 Hz	5000 Hz	Diferencia
1.2	1.6	0.4	1.3	1.5	0.2
1.3	1.5	0.2	1.2	1.6	0.4
1.3	1.6	0.3	1.3	1.7	0.4
1.2	1.5	0.3	1.3	1.5	0.2
1.3	1.3	0	1.3	1.6	0.3
1.3	1.5	0.2	1.5	1.6	0.1
1.3	1.5	0.2	1.3	1.7	0.4
1.2	1.3	0.1	1.3	1.6	0.3

Media muestral: 0.25

Desviación Estándar Muestral: 0.12

$\mu$  : 0.20

Tamaño de la Muestra: 16

Nivel de confianza: 99%

Significancia: 0.01

$\alpha$  : 0.005

Se obtiene el valor de  $t_0$  con la expresión [5]:

$$t_0 = \frac{x - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad [5]$$

*donde:*

- $t_0$ : variable aleatoria  $t$  de Student
- $x$ : media muestral
- $\mu$ : valor desconocido
- $s$ : desviación estándar muestral
- $n$ : tamaño de la muestra

Por lo tanto, se obtiene:

$$t_0 = \frac{0.25 - 0.20}{0.12 / 4}$$

$$t_0 = 1.65$$

Calculando el valor  $t_\alpha$  en la tabla de valores cuantiles de la distribución  $t$  de Student (Canavos, 1999: 621) con 15 grados de libertad (por ser el tamaño de la muestra 16, se determinan los grados de libertad con la diferencia de  $n-1$ )

$$t_{(15,0.025)} = 2.131$$

Si  $1.65 < 2.131$ , entonces  $t_0 < t_\alpha$

**Por lo tanto, rechazamos  $H_0: \mu \geq 0.2$**

La diferencia máxima entre la medición del RT a escala natural y la medición en el modelo físico (un método y otro) será de 0.2 seg.

Entonces, **se afirma que los resultados son iguales con un nivel de confianza del 99%.**

Para verificar los valores en la *Tabla de valores cuantiles* de la distribución  $t$  de Student, ver el Apéndice III.

Con los resultados obtenidos por medio de esta prueba se concluye que hay evidencia suficiente para sostener que la diferencia máxima que se obtendrá entre los resultados del espacio real y su modelo físico a escala será de 0.2 s, por lo que se afirma que ambos métodos de experimentación son iguales con un nivel de confianza del 99%.

## 5.8 DISCUSIÓN

El proceso de diseño del experimento, desde la selección de la escala del modelo físico hasta los materiales con los que sería construido, tuvo como objetivo medir el parámetro del tiempo de reverberación (RT) dentro del modelo a escala, para compararlo con el obtenido dentro del espacio real y poder así garantizar los resultados en modelos a escala como un medio de simulación acústica confiable. La obtención de resultados satisfactorios en el modelo físico a escala comprendió varias etapas que corresponden a cambios en el material de las superficies absorbentes desde barnizar por completo el interior del modelo, para minimizar los poros del material, hasta la medición con diferentes grosores del material textil que simulaba la alfombra, elemento que representa el elemento más absorbente del espacio.

Se han presentado los resultados de  $T_{20}$  y  $T_{30}$  obtenidos en las mediciones y se observan diferencias que van desde 0.1 hasta 0.5 seg. Sin embargo, las diferencias más grandes se dan en las frecuencias de 500 Hz y 5000 Hz, las frecuencias medias, mientras que en las frecuencias de 1,000 y 10,000 Hz las diferencias se hacen mucho menores, es decir que a frecuencias más altas, las diferencias entre los coeficientes de absorción de los materiales usados en la construcción del modelo a escala y los materiales del recinto real son casi despreciables.

Con el estudio realizado con respecto al patrón de directividad de la fuente miniatura utilizada para las mediciones en el modelo físico a escala, se puede observar que mientras más alta es la frecuencia, la fuente se vuelve más direccional, lo que podría representar una de las razones en la diferencia entre los resultados obtenidos de las mediciones.

Otra diferencia importante en cuanto a las fuentes sonoras utilizadas para las mediciones se observa al comparar las gráficas del tiempo de reverberación, ya que los ángulos del decaimiento son diferentes aunque los resultados numéricos no lo sean tanto (Figs. 5.25 a 5.28).

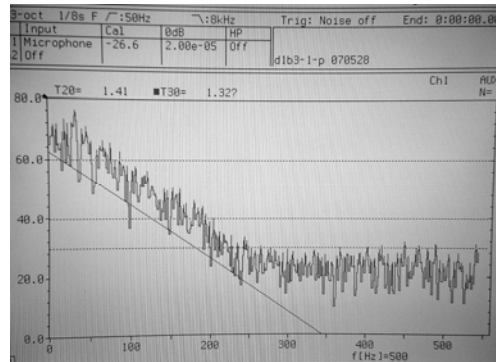


Fig. 5.25. Curva de decaimiento en la posición d1b3 a 500 Hz en el espacio real.  $T_{20}=1.4$  s  $T_{30}=1.3$  s

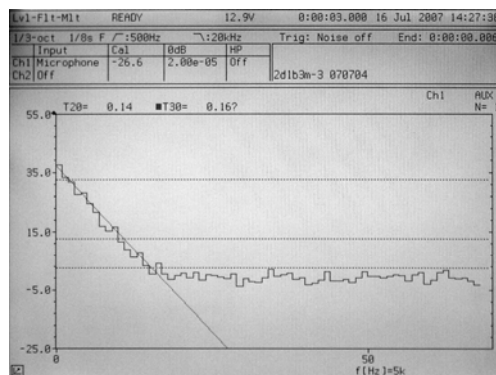


Fig. 5.26. Curva de decaimiento en la posición d1b3 a 5000 Hz en el modelo físico.  $T_{20}=0.14$  s  $T_{30}=0.16$  s

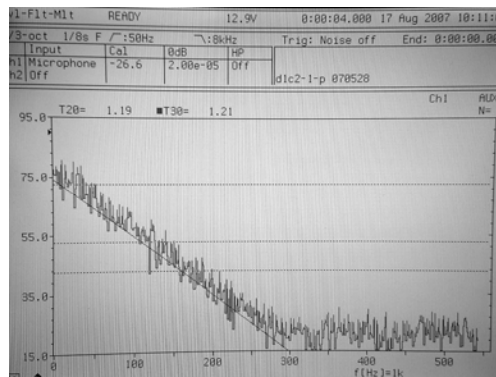


Fig. 5.27. Curva de decaimiento en la posición d1c2 a 1000 Hz en el espacio real.  $T_{20}= 1.2$  s  $T_{30}=1.2$  s

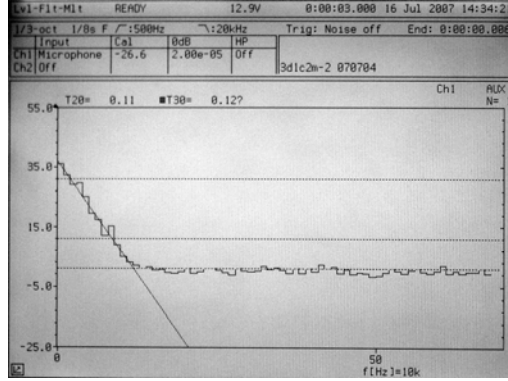


Fig. 5.28. Curva de decaimiento en la posición d1c2 a 10000 Hz en el modelo físico  $T_{20}=0.11$  s  $T_{30}=0.12$  s

Esta diferencia podría derivarse en la diferencia de sonido emitido por las fuentes, mientras que para la medición en el espacio real el altavoz hemidodecaédrico emite ruido rosa, el altavoz miniatura por ser mucho más delicado, sólo puede emitir ruido filtrado (fig. 5.29), el cual permite pasar solo un intervalo determinado de frecuencias (Wilson y Buffa, 2004).



Fig. 5.29 Filtrado de ruido, adaptado de Pérez C. y Batalla, M. (1993)

La intensidad también fue diferente, ya que en el espacio real el ruido emitido llegaba hasta 90 dB, y en el modelo físico a escala hasta 40 dB, apenas lo suficiente para poder rebasar los 30 dB requeridos para la caída de  $T_{30}$ , para no dañar los componentes del altavoz miniatura.

Sin embargo puede afirmarse que, pese a estas sutiles diferencias, los resultados alcanzados en las mediciones validan el proceso de experimentación, al corresponder entre sí con diferencias mínimas, que como anteriormente se explicó, resultan aceptables.

El objetivo de la experimentación acústica con modelos físicos a escala consistió en repetir el procedimiento de pruebas realizadas en espacios a escala natural para obtener resultados similares del *RT* al comparar los valores obtenidos. Después de algunos cambios en los materiales de construcción del modelo a escala propuesto, se lograron resultados con un alto grado de similitud, por lo que se puede concluir que para conocer algunos de los parámetros que determinan la calidad acústica de los recintos se puede experimentar con modelos físicos a escala, realizando los mismos procedimientos de análisis, mediciones y pruebas usados en espacios arquitectónicos a escala natural.

Las pruebas realizadas consistieron en medir los parámetros  $T_{20}$  y  $T_{30}$  que determinan el tiempo de reverberación *RT* dentro del modelo físico a escala propuesto y comparar los resultados con los obtenidos en las mediciones dentro del modelo a escala natural.

Después de analizar los resultados adquiridos de ambas mediciones y adicionarle los obtenidos de ecuaciones matemáticas no complejas logramos una serie de valores similares entre sí, por lo que, con respecto a la hipótesis original, se puede afirmar que efectivamente, considerando algunos factores determinantes de las características del modelo físico a escala, se pueden realizar mediciones acústicas dentro de un modelo a escala que correspondan a las realizadas en recintos reales construidos, haciendo de este proceso, un método de simulación y predicción acústica confiable.

A pesar de que podría pensarse que la predicción de parámetros acústicos por medio de modelos físicos a escala resultaría obsoleto en la actualidad, cuando la popularidad de los programas de simulación por computadora es cada vez más evidente, los modelos físicos a escala son útiles para obtener, con certeza y un grado de similitud muy alto, resultados en parámetros acústicos que los programas especializados no han podido igualar. La decisión más acertada es el uso de varios métodos de predicción acústica simultáneamente para tener un grado de certidumbre mayor.

El campo de trabajo e investigación en esta rama dentro nuestro país es amplio mientras que se considere al sonido como un elemento de diseño en espacios arquitectónicos, ya que en la actualidad no hay quien se dedique a este tipo de pruebas, mientras que en otros países, hay diversas empresas dedicadas al control y aislamiento acústicos que promueven el uso de modelos a escala en su trabajo e investigaciones, ejemplo de ello son las empresas Kirkegaard Associates en Chicago, IL., y Boulder, CO., S&V Solutions, en Sycamore, IL., Nagata Acoustics en Tokio, Japón y Los Ángeles, CA., BAST, en Alemania, entre muchos otros.

**Conclusión.**

---

# **CONCLUSIÓN.**

## **A. DESCRIPCIÓN DE LOS HECHOS**

Se han referido las distintas formas de simular acústicamente espacios arquitectónicos que son utilizadas en la actualidad, considerando que los modelos por computadora y los modelos físicos a escala son los que pueden llegar a apoyar de forma directa al diseño arquitectónico.

Los modelos físicos a escala ofrecen ventajas para la simulación de las características acústicas de los espacios sobre los modelos por computadora, ya que permiten reproducir el comportamiento de las ondas sonoras con mayor precisión, al generarse sonido real en el interior de los mismos.

Se han presentado algunas dificultades al utilizar los modelos físicos a escala, resaltando el hecho de la poca disponibilidad de datos de absorción sonora para los materiales que se pueden utilizar en el proceso de simulación. Otro aspecto es el relacionado con la fuente sonora a escala, la cual no alcanza a igualar los atributos de una fuente sonora real de patrón omnidireccional. Adicionalmente la instrumentación aplicable, que es útil y amable al arquitecto, no cuenta con la posibilidad de analizar espectros amplios que lleguen a abordar el ultrasonido, el cual es necesario para la simulación a escalas menores, ya que para ello se requiere instrumentación especializada.

## B. LO QUE SE OBTUVO

Se obtuvo un modelo de simulación acústica que sugiere un proceso de experimentación y análisis de resultados que sirve como auxiliar en el diseño de espacios no especializados en términos de acústica. Dicho modelo podrá ser usado por los involucrados en el diseño de espacios arquitectónicos desde la etapa de concepto y diseño preliminar para evaluar acústicamente los recintos, y los efectos que la selección de materiales, geometría y dimensiones pueden tener sobre el comportamiento del sonido dentro de ellos.

Así mismo, el modelo aquí presentado sirve como una herramienta didáctica para auxiliar en la enseñanza y aprendizaje de los conceptos fundamentales del diseño acústico de recintos, al involucrar al sentido de la vista en un fenómeno puramente auditivo.

El objetivo de la comparación de los resultados obtenidos en el espacio real y su modelo a escala consistió en determinar un método para conocer características acústicas de recintos sin la necesidad de construirlo en la realidad. Con el método de experimentación elegido se obtuvieron valores equiparables, por lo que se puede concluir que el modelo de experimentación propuesto es válido mientras se consideren correcciones mínimas en los valores de  $TR$  resultante.

La elección y el análisis del caso de estudio mostraron que cualquier espacio es susceptible de poseer calidad acústica y la importancia de conocer las características acústicas de cualquier tipo de recinto para garantizar el confort acústico de sus ocupantes en función de la actividad que ahí desarrollen.

## **C. LO QUE SE APORTA**

Con este proyecto de simulación se ha probado que la cámara sonoamortiguada del Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico de la Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Azcapotzalco es un ambiente controlado adecuado para la realización de pruebas acústicas con modelos físicos a escala.

Se propuso un modelo de experimentación a partir de modelos físicos a escala y se han logrado obtener resultados que asemejan con un grado de cercanía muy alto las mediciones entre un espacio real y su modelo físico, lo cual permite desarrollar una tendencia de simulación dirigida a generar datos para el apoyo de los arquitectos y diseñadores.

Se ha adaptado la metodología de mediciones a un lenguaje de diseño, común para todas las personas involucradas en los procesos de diseño y construcción de espacios de diversa índole, así como de dispositivos especiales.

En la literatura consultada existen términos que daban por supuestas condiciones de correcciones matemáticas que procuramos analizar para proponer un factor de ajuste para futuros experimentos.

## **D. PROSPECCIÓN DEL TRABAJO**

Así como el método de medición de algunos parámetros acústicos en modelos físicos a escala ha sido propuesto, es necesaria la información acerca de los coeficientes de absorción a escala para diferentes materiales de construcción y acabados, con el fin de obtener resultados más precisos para espacios con carácter de diversa índole, tanto reverberante como absorbente. Para tal fin se requiere un estudio especializado de materiales para la construcción de modelos físicos a escala que puedan representar a los usados en espacios reales. Esta información es necesaria para poder garantizar el comportamiento acústico de los espacios arquitectónicos que se encuentren en las primeras etapas de diseño mediante la experimentación con modelos físicos a escala.

En el futuro deben realizarse pruebas en una cantidad importante con modelos físicos a escala, lo que permitirá contar con una base de datos significativa para indagar y mejorar el modelo aquí propuesto así como el desarrollo de criterios fundamentales para el diseño integral de los espacios arquitectónicos.

Así mismo, es necesario que se revisen las relaciones matemáticas para corregir el factor de absorción del aire para modelos a diferentes escalas, pues mientras menor es el modelo (en cuanto a factor de escala), mayor será el nivel de absorción del aire.

Además, debe profundizarse en el estudio del funcionamiento del equipo de medición y análisis disponible, ya que es posible obtener algunos otros parámetros acústicos importantes para el desarrollo de criterios acústicos fundamentales para el diseño de espacios arquitectónicos así como elementos y dispositivos especiales.

## **Apéndices**

---

# I. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN CON EL ANALIZADOR NORSONIC NOR-840

La permanencia y disminución de la energía en un recinto una vez apagada la fuente sonora se conoce como *reverberación*, y el tiempo que la señal sonora requiere para reducirse 60 dB, o a la inaudibilidad se conoce como **tiempo de reverberación** (Recuero, 2001).

El tiempo de reverberación es el principal criterio para evaluar el comportamiento acústico de un recinto y aunque no es el único, otros parámetros acústicos que determinan la calidad acústica de los recintos dependen directamente de él (Kuttruff, 2000). En función del empleo que tenga un recinto, deberá ser el valor de su tiempo de reverberación, así como su variación en función de la frecuencia. Generalmente con fines prácticos los cálculos del tiempo de reverberación se hacen en octavas para frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, para las cuales la mayoría de los materiales de construcción documentan sus coeficientes de absorción.

Normalmente, la presencia del ruido de fondo es un factor que afecta la toma del decaimiento de 60 dB en una medición del Tiempo de Reverberación, por lo que convencionalmente se usan los decaimientos de  $T_{20}$  y  $T_{30}$  y luego se extrapolan los resultados a 60 dB (Norsonic, 1998).

Para la obtención del Tiempo de Reverberación con el Analizador Nor-840 (fig. x.1) de Norsonic, se deben establecer los siguientes parámetros:

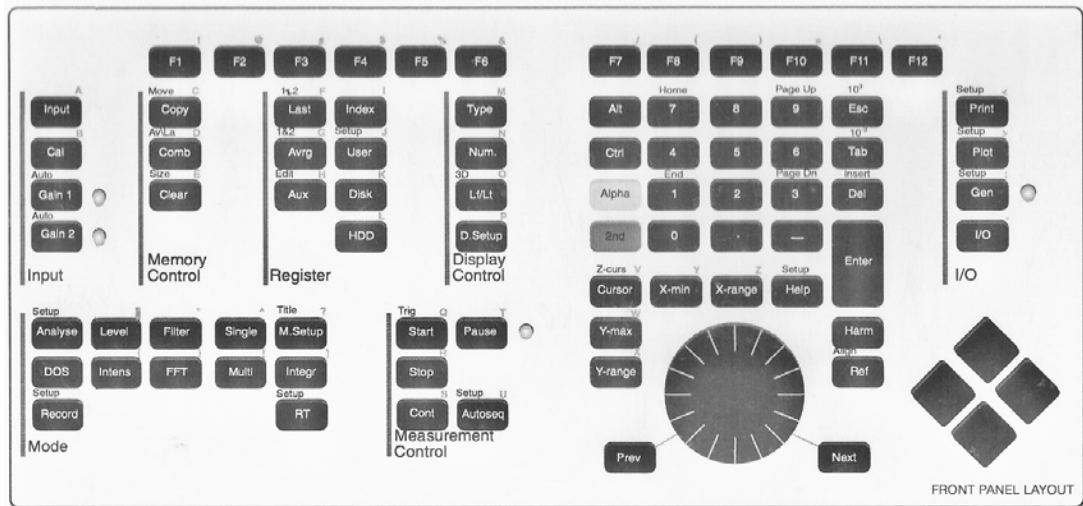


Fig. x.1 Teclado de funciones del Analizador Norsonic Nor 840.

1. Para hacer mediciones de Tiempo de Reverberación el modo debe ser *Multi*, referido al modo multi espectro.
2. Se puede visualizar la pantalla completa tecleando *Type* hasta que aparezca únicamente la pantalla del canal 1 de medición.
3. Teclear *2nd + Start* para establecer la condición de de medición de la respuesta del recinto. (Trigger condition) Para el caso de excitación por medio de ruido rosa, se selecciona *Noise Off*, para que mida a partir de que la fuente se apaga. En el caso de medir el RT por medio de un impulso (un disparo de pistola o un globo reventándose) se selecciona *Level above 30 dB* (Fig. x.2).

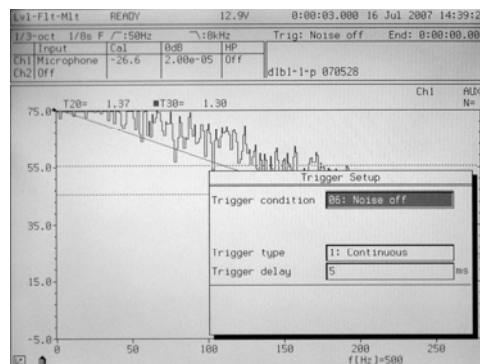


Fig. x.2 Ventana emergente de la condición de disparo de la prueba.

4. Teclar *2nd + Gen*, para establecer las condiciones del generador de ruido que puede ser blanco, rosa o ruido filtrado (fig. x.3 y x.4). El ancho de banda debe ser en 1/3 de octava.

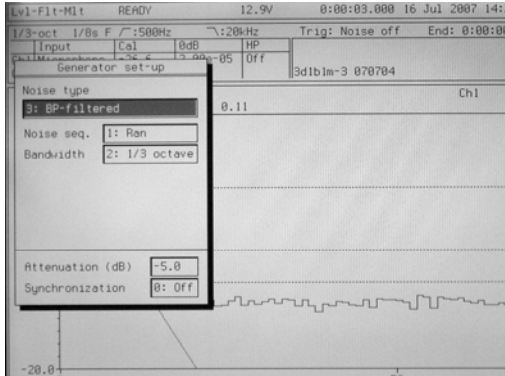


Fig. x.3 Tipo de ruido a generar: filtrado.

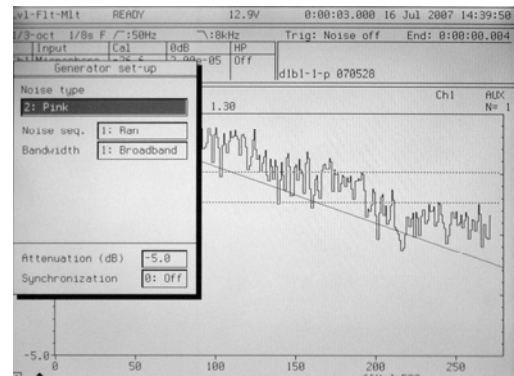


Fig. x.4 Tipo de ruido a generar: rosa.

5. Teclar *2nd + RT* para establecer condiciones como el tiempo de excitación y el tiempo esperado de TR que puede ser hasta 4, 8, 16 y 32 segundos (fig. x. 5), de acuerdo al modo de excitación seleccionado: *Noise* (ruido blanco o rosa) o *Impulse* (disparo) (fig. x.6). La distancia mínima al piso (noise floor) debe estar en 5 dB para minimizar la influencia del ruido de fondo.

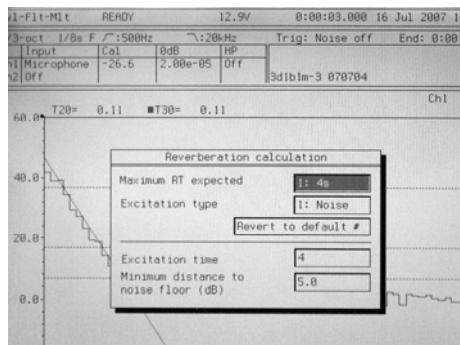


Fig. x.5 Tipo de excitación: ruido. RT esperado: de 1 a 4 seg.

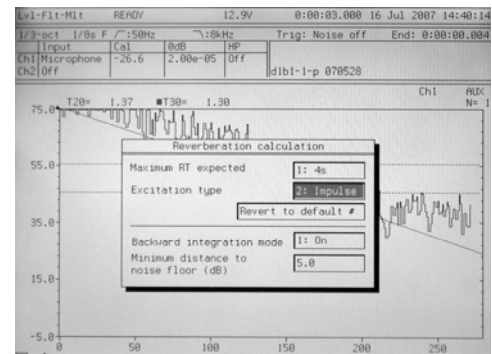


Fig. x.6 Tipo de excitación: impulso.

6. Teclar *Start* para empezar la medición, si se ha seleccionado el generador de ruido (ruido blanco o rosa) éste empezara a sonar. Si se ha seleccionado *Impulse*, se debe de hacer sonar el disparo. El analizador entonces empieza a medir y para cuando haya detectado el decaimiento en el nivel de presión sonora del recinto se detendrá. Una gráfica congelada será visible en la pantalla (fig. x.7 y x.8).

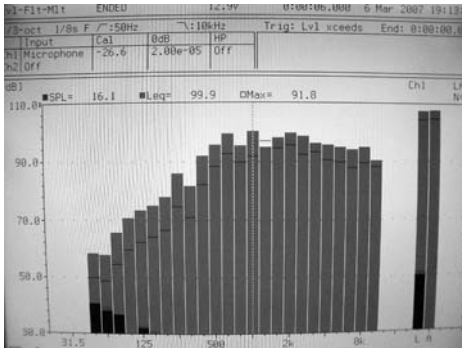


Fig. x.7 Máximo nivel alcanzado en espacio real.

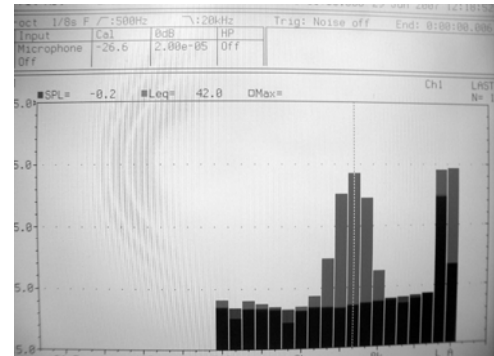


Fig. x.8 Máximo nivel alcanzado en el modelo a escala.

7. Teclar *RT* para que el analizador calcule el T20, T30, EDT y otros parámetros que se hayan establecido (fig. x.9).

Freq[Hz]	T20	T30
100	1.22	1.28
125	2.07	1.75
160	1.58	1.45
200	?	?
250	1.45	1.43
315	1.44	1.43
400	1.32	1.30
500	1.17	1.23
630	1.37	1.24
800	1.18	1.20
1k	1.15	1.19
1.25k	0.95	1.00
1.6k	1.07	1.01
2k	1.05	0.97
2.5k	1.02	0.95
3.15k	0.93	0.90
4k	0.85	0.79
5k	0.90	0.90
6.3k	0.68	0.72
8k	0.32	0.46

Fig. x.9 Listado de valores T20 y T30 para todas las frecuencias de medición.

8. Teclar *Lt/Lf* si quiere visualizarse la gráfica de decaimiento del nivel de presión sonora en la prueba (fig. x.10 y x.11).

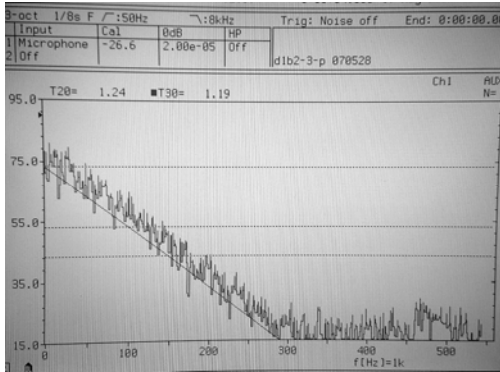


Fig. x.10 Curva de decaimiento en el espacio real

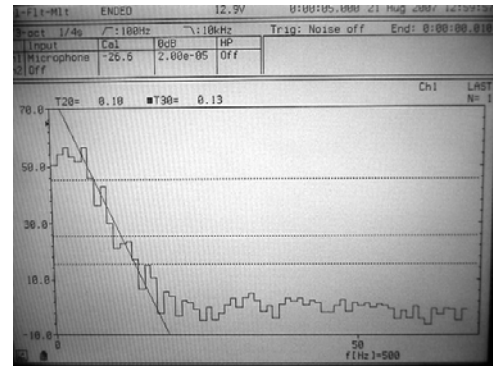


Fig. x.11 Curva de decaimiento en el modelo a escala.

9. Para guardar los resultados del RT de una medición teclear *Copy + HDD* para guardar en c: o en a: y seleccionar la unidad.
10. Para ver alguna medición guardada, teclear *HDD* y seleccionar la unidad que se desea abrir (fig. x.12).

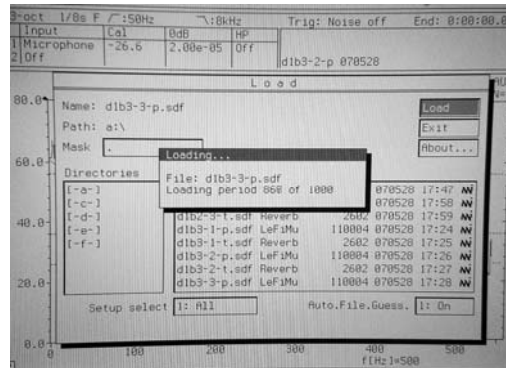


Fig. x.12 Abriendo un archivo guardado.

## II. CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA MINIATURA

Para conocer el patrón de direccionalidad del altavoz miniatura que fue usado para las pruebas dentro del modelo físico a escala se hizo el siguiente trabajo de caracterización.

Se trazó un diagrama polar con divisiones a cada  $10^\circ$  para conocer su respuesta en todas las direcciones.

Se colocó al centro del diagrama y el micrófono se fue recorriendo a cada  $10^\circ$  para recoger la señal que era enviada frontalmente, para ver hacia qué dirección emanaba el sonido (fig. xx.1 a xx.10).

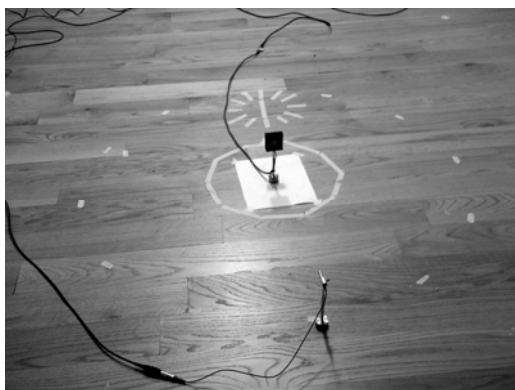


Fig. xx.1 *Micrófono a 0-360°*

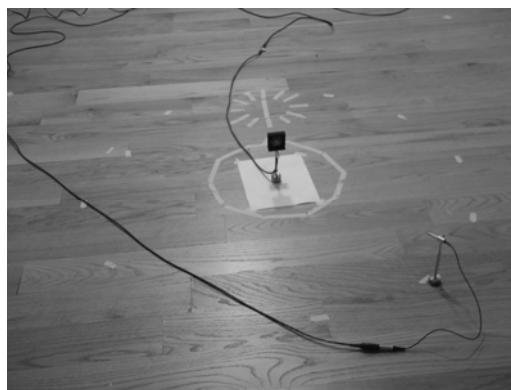


Fig. xx.2 *Micrófono a 30°*

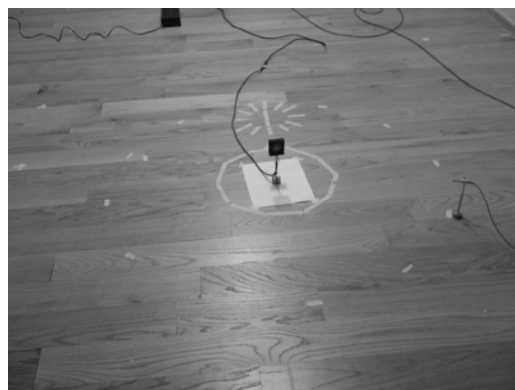


Fig. xx.3 *Micrófono a 60°*

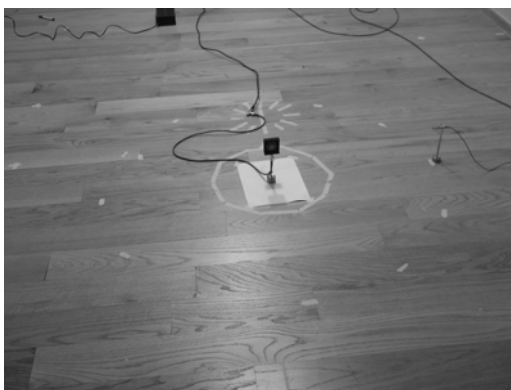


Fig. xx.4 *Micrófono a 90°*

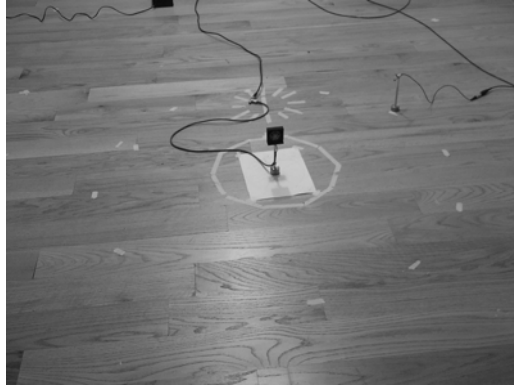


Fig. xx.5 *Micrófono a 120°.*

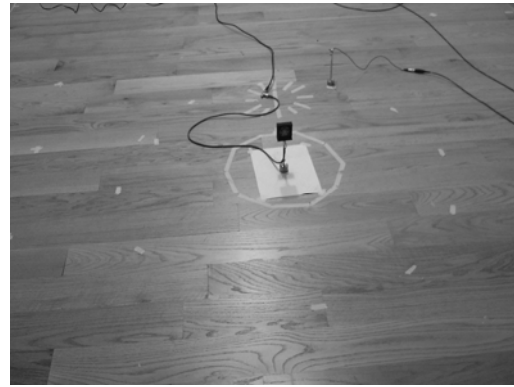


Fig. xx.6 *Micrófono a 150°.*

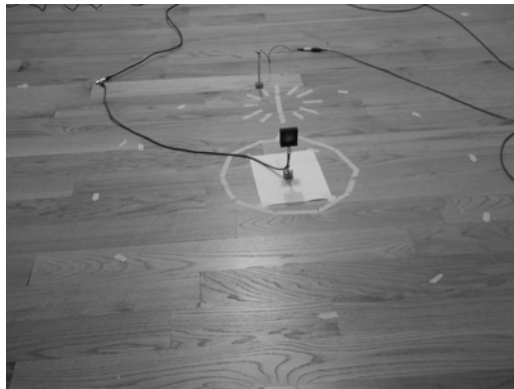


Fig. xx.7 *Micrófono a 180°.*

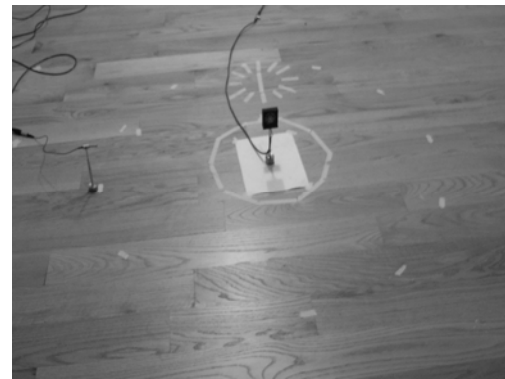


Fig. xx.8 *Micrófono a 270°.*

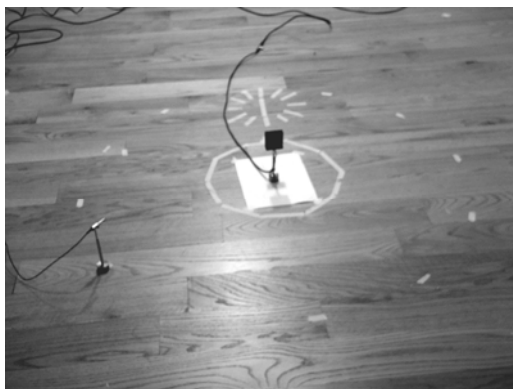


Fig. xx.9 *Micrófono a 300°.*

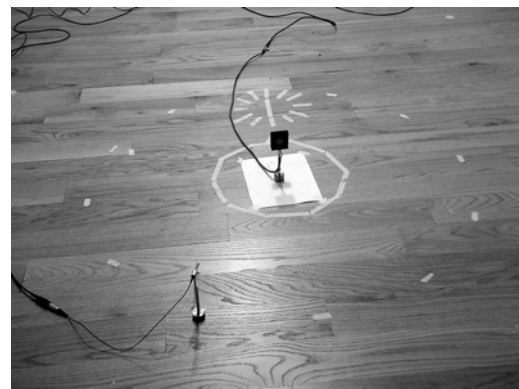


Fig. xx.10 *Micrófono a 330°.*

## RESPUESTA DE ALTAVOZ A ESCALA

FECHA DE PRUEBA: 130907

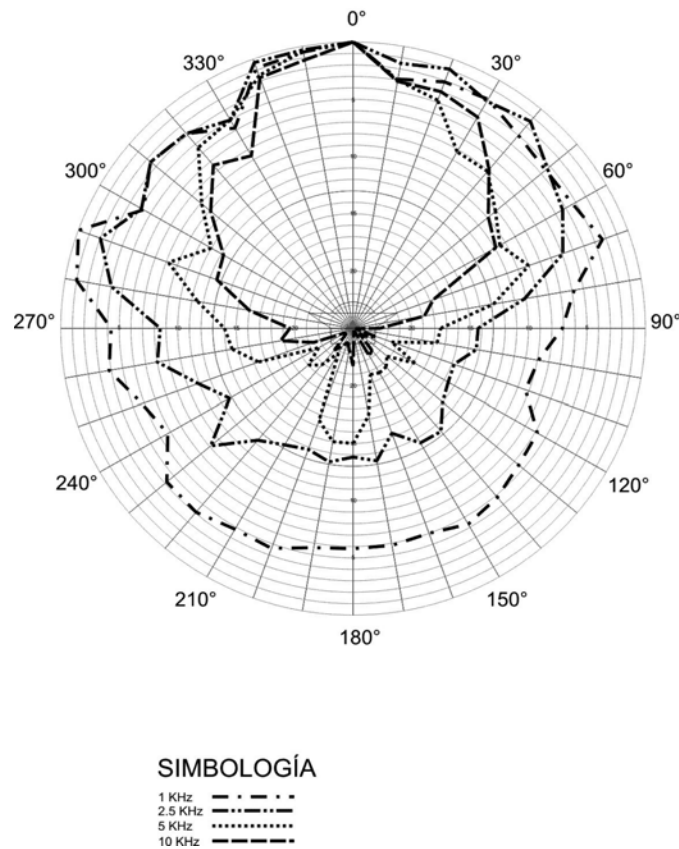


Fig. xx.11 Diagrama polar del altavoz miniatura usado en las pruebas dentro del modelo físico a escala propuesto.

En la Fig. xx.11 se puede apreciar la direccionalidad del altavoz. Entre más baja la frecuencia (1 KHz-2.5 KHz) tiende a ser más omnidireccional, y a medida que la frecuencia es más alta (5 KHz-10 KHz) tiende a ser frontal.

Para tratar de igualar la forma de emisión del sonido hacia el espacio con el altavoz miniatura en el modelo físico a escala, se colocó inclinado, de manera que el sonido se dirigiera hacia arriba, emulando a la fuente hemidodecaédrica utilizada en la medición del espacio real. Se comparan entonces los patrones de directividad de ambas fuentes (fig. xx.12) para observar su comportamiento ante diferentes frecuencias de trabajo. (Las frecuencias del altavoz hemidodecaédrico son diferentes a las usadas en la medición con el modelo físico a escala).

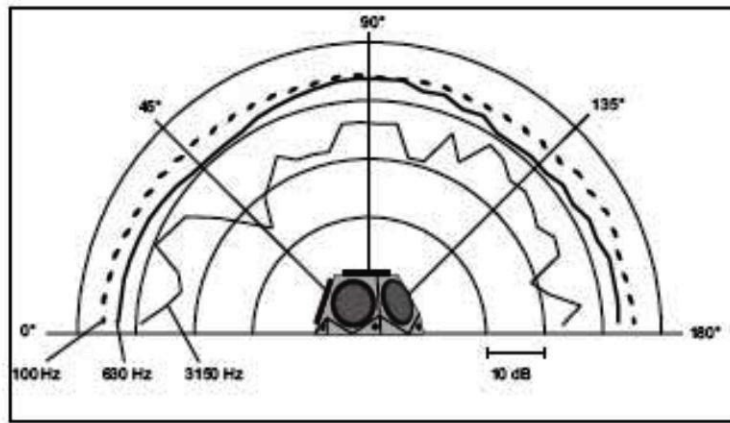
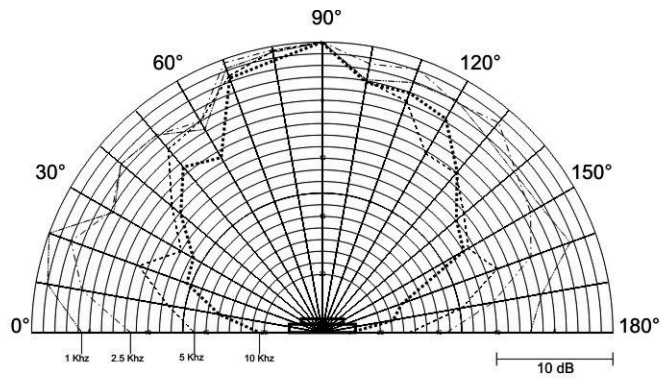
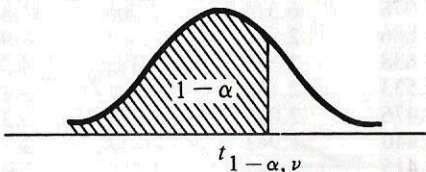


Fig. xx.12 Comparación de los patrones de directividad de los altavoces miniatura y hemidodecaédrico. Patrón de directividad de altavoz hemidodecaédrico Norsonic Nor-250 obtenido de: <http://www.norsonic.com/uploads/kundefiler/Downloads/pdnoiseexcited4rev1eng1207.pdf>

### III. TABLA DE VALORES CUANTILES DE LA DISTRIBUCIÓN $t$ DE STUDENT

TABLA F Valores de cuantiles de la distribución  $t$  de Student

$$P(T \leq t_{1-\alpha, \nu}) = \frac{\Gamma[(\nu+1)/2]}{\sqrt{\pi\nu}\Gamma(\nu/2)} \int_{-\infty}^{t_{1-\alpha, \nu}} [1 + (t^2/\nu)]^{-(\nu+1)/2} dt = 1 - \alpha$$



$\nu$	$t_{0.001}$	$t_{0.005}$	$t_{0.010}$	$t_{0.025}$	$t_{0.050}$	$t_{0.100}$	$t_{0.200}$
1	-318.309	-63.657	-31.821	-12.706	-6.314	-3.078	-1.376
2	-22.327	-9.925	-6.965	-4.303	-2.920	-1.886	-1.061
3	-10.215	-5.841	-4.541	-3.182	-2.353	-1.638	-0.978
4	-7.173	-4.604	-3.747	-2.776	-2.132	-1.533	-0.941
5	-5.893	-4.032	-3.365	-2.571	-2.015	-1.476	-0.920
6	-5.208	-3.707	-3.143	-2.447	-1.943	-1.440	-0.906
7	-4.785	-3.499	-2.998	-2.365	-1.895	-1.415	-0.896
8	-4.501	-3.355	-2.896	-2.306	-1.860	-1.397	-0.889
9	-4.297	-3.250	-2.821	-2.262	-1.833	-1.383	-0.883
10	-4.144	-3.169	-2.764	-2.228	-1.812	-1.372	-0.879
11	-4.025	-3.106	-2.718	-2.201	-1.796	-1.363	-0.876
12	-3.930	-3.055	-2.681	-2.179	-1.782	-1.356	-0.873
13	-3.852	-3.012	-2.650	-2.160	-1.771	-1.350	-0.870
14	-3.787	-2.977	-2.624	-2.145	-1.761	-1.345	-0.868
15	-3.733	-2.947	-2.602	-2.131	-1.753	-1.341	-0.866
16	-3.686	-2.921	-2.583	-2.120	-1.746	-1.337	-0.865
17	-3.646	-2.898	-2.567	-2.110	-1.740	-1.333	-0.863
18	-3.610	-2.878	-2.552	-2.101	-1.734	-1.330	-0.862
19	-3.579	-2.861	-2.539	-2.093	-1.729	-1.328	-0.861
20	-3.552	-2.845	-2.528	-2.086	-1.725	-1.325	-0.860
21	-3.527	-2.831	-2.518	-2.080	-1.721	-1.323	-0.859
22	-3.505	-2.819	-2.508	-2.074	-1.717	-1.321	-0.858
23	-3.485	-2.807	-2.500	-2.069	-1.714	-1.319	-0.858
24	-3.467	-2.797	-2.492	-2.064	-1.711	-1.318	-0.857
25	-3.450	-2.787	-2.485	-2.060	-1.708	-1.316	-0.856
26	-3.435	-2.779	-2.479	-2.056	-1.706	-1.315	-0.856
27	-3.421	-2.771	-2.473	-2.052	-1.703	-1.314	-0.855
28	-3.408	-2.763	-2.467	-2.048	-1.701	-1.313	-0.855
29	-3.396	-2.756	-2.462	-2.045	-1.699	-1.311	-0.854
30	-3.385	-2.750	-2.457	-2.042	-1.697	-1.310	-0.854
35	-3.340	-2.724	-2.438	-2.030	-1.690	-1.306	-0.852
40	-3.307	-2.704	-2.423	-2.021	-1.684	-1.303	-0.851
45	-3.281	-2.690	-2.412	-2.014	-1.679	-1.301	-0.850
50	-3.261	-2.678	-2.403	-2.009	-1.676	-1.299	-0.849
60	-3.232	-2.660	-2.390	-2.000	-1.671	-1.296	-0.848
70	-3.211	-2.648	-2.381	-1.994	-1.667	-1.294	-0.847
80	-3.195	-2.639	-2.374	-1.990	-1.664	-1.292	-0.846
90	-3.183	-2.632	-2.369	-1.987	-1.662	-1.291	-0.846
100	-3.174	-2.626	-2.364	-1.984	-1.660	-1.290	-0.845
200	-3.131	-2.601	-2.345	-1.972	-1.652	-1.286	-0.843
500	-3.107	-2.586	-2.334	-1.965	-1.648	-1.283	-0.842
1000	-3.098	-2.581	-2.330	-1.962	-1.646	-1.282	-0.842

**TABLA F (continuación) Valores de cuantiles de la distribución  $t$  de Student**

$\nu$	$t_{0.800}$	$t_{0.900}$	$t_{0.950}$	$t_{0.975}$	$t_{0.990}$	$t_{0.995}$	$t_{0.999}$
1	1.376	3.078	6.314	12.706	31.820	63.656	318.294
2	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327
3	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214
4	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	0.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	0.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	0.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	0.863	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	0.862	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	0.861	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.860	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	0.859	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	0.858	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	0.858	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	0.857	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.856	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
26	0.856	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	0.855	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	0.855	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	0.854	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.854	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
35	0.852	1.306	1.690	2.030	2.438	2.724	3.340
40	0.851	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
45	0.850	1.301	1.679	2.014	2.412	2.690	3.281
50	0.849	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261
60	0.848	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232
70	0.847	1.294	1.667	1.994	2.381	2.648	3.211
80	0.846	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195
90	0.846	1.291	1.662	1.987	2.368	2.632	3.183
100	0.845	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174
200	0.843	1.286	1.652	1.972	2.345	2.601	3.131
500	0.842	1.283	1.648	1.965	2.334	2.586	3.107
1000	0.842	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098

Fig. xxx.1 Tabla de valores cuantiles de la distribución  $t$  de Student (Canavos, 1999:621).

## **IV. LISTADO DE LABORATORIOS DE ACÚSTICA**

Laboratorio	Características	Tipos de Pruebas	Aplicación
Laboratorio de Acústica y Electroacústica del la Escuela de Ingeniería Electrónica de la F.C.E.I. y A. de la Universidad Nacional de Rosario (UNR) <sup>1</sup>			Docencia, estudios sobre ruido urbano, monitoreo acústico, investigación en foniatría y audiolgía
Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina <sup>2</sup>		Pruebas de propiedades acústicas de materiales aislantes y absorbentes del sonido, medición y clasificación de materiales. Acústica de recintos, ruido urbano, riesgos por exposición a altos niveles de ruido. Características de bocinas, micrófonos.	Acústica arquitectónica, urbanismo, impacto ambiental, higiene industrial, salud auditiva, materiales acústicos, elementos antivibratorios, industria autopartista, instrumental de medición.
Laboratorio de Acústica y Electroacústica del Departamento de Electrónica, de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Buenos Aires, Argentina <sup>3</sup>	Medidor de nivel de presión sonora, filtro portátil por octavas, generador de audio, generador de ruido blanco y rosa, preamplificador de micrófono, filtro portable por octavas y tercios de octava, registradores, distorsímetro, grabadores portables (UHER), sistema medidor de parámetros acústicos IVIE mod. IE17/30 con computadora incorporada	Mediciones de ruido e impacto ambiental. Trazado de mapas de ruido. Evaluación de ruido de tránsito y ponderación de ruidos molestos de acuerdo a normas. Proyecto y medición de sistemas electroacústicos.	Acústica mediambiental, urbanismo
Laboratorio de Acústica de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Puerto Rico <sup>4</sup>	Equipo de apoyo para los cursos de acústica arquitectónica y control de ruidos, además de un sistema de reproducción de sonidos y de grabación digital. Sonómetros, analizador FFT, analizador de tiempo real y osciloscopios.	Realización de mediciones acústicas diversas para el beneficio del proceso de enseñanza/aprendizaje en el área de Arquitectura.	Acústica arquitectónica, ambiental, urbanismo
Laboratorio de Acústica Ambiental del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile <sup>5</sup>		Localización y medición del ruido, estudio de los efectos del ruido sobre organismos vivos, lucha contra el ruido y seguridad en el trabajo.	Física Aplicada y Acústica Ambiental
Laboratorio de Acústica del Departamento de Ciencias, de la Sección de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú <sup>6</sup>		Análisis de ruido y vibraciones a través de programas avanzados de simulación acústica por computadora. Brinda consultoría para el diseño, construcción o medición de locales acústicos como auditorios, iglesias, empresas, entre otros.	Acústica arquitectónica, control del ruido y vibraciones

Laboratorio	Características	Tipos de Pruebas	Aplicación
Laboratorio de Acústica Aplicada y Vibraciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, de la Universidad Nacional Autónoma de México <sup>7</sup>	Cámara reverberante de 200 m <sup>3</sup> , cámara anecoica de 80 m <sup>3</sup> . Cámaras de transmisión de 70 y 65 m <sup>3</sup> . Equipo: micrófonos, acelerómetros, interferómetros láser y otros transductores. Excitadores de vibración y fuentes de sonido, analizadores espectrales de uno y dos canales, analizadores estadísticos de ruido y generadores de señales especializados. Equipo de cómputo y programas para el control de equipo de medición, procesamiento de datos y simulaciones numéricas.	Mediciones de presión sonora, intensidad acústica, aceleración, velocidad, etc. Estudios: instrumentación, medición y control del sonido y vibraciones; efectos físicos del sonido, transducción y ultrasonido; procesamiento digital de señales de audio y reproducción de sonido; acústica musical.	Acústica física, electroacústica, acústica musical
Laboratorio de Acústica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México <sup>8</sup>		Desarrollo e implementación de técnicas modernas para estudiar fenómenos acústicos, así como el desarrollo e implementación de métodos que utilicen la propagación de ondas acústicas para estudiar diversos medios. Sin embargo, también se desarrollan otros proyectos cuya liga directa con la acústica no es tan evidente. Por un lado, se hacen experimentos en fluidos puesto que hay un pequeño túnel de viento y un jet supersónico. Eventualmente estos estudios servirán para investigaciones más avanzadas en acústica.	Acústica física
Laboratorio de Acústica del Calpe Institute of Technology, de la Universidad de Málaga <sup>9</sup>		Pruebas y mediciones de aislamiento acústico de forjados, medianeras y fachadas, aislamiento acústico a ruido de impactos, verificaciones del cumplimiento de las exigencias del CTE, proyectos y certificaciones acústicas, niveles de emisión al exterior de edificaciones, niveles de inmisión en el interior y fachada de edificaciones, medidas de afección sonora, mapas de ruido de aglomeraciones y vías de comunicación, simulaciones.	Acústica arquitectónica y medioambiental
Laboratorio de Ensayos Metrológicos, Área de Acústica, compañía dedicada a la metrología en Barcelona, España <sup>10</sup>		Problemas relacionados al área de contaminación acústica, mediciones de acústica en la edificación y medidas de inspección acústica.	Acústica ambiental, urbanismo

Laboratorio	Características	Tipos de Pruebas	Aplicación
Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CTAG, Centro Tecnológico de Automoción de Galicia <sup>11</sup>	Excitador electrodinámico bidireccional, Sistema de adquisición y tratamiento de datos, Tubo de impedancias para ensayos de transmisión y absorción acústica, Excitador modal para análisis de modos propios de vibración, Martillo instrumentado, Sonda para medición de potencia acústica, Sonda para medición de intensidad sonora, Acelerómetros y micrófonos para acoplamiento al sistema, Software específico de análisis acústico y análisis modal para la realización de mapas acústicos, localización de fuentes de ruido y análisis en frecuencia del ruido.		Acústica ambiental, control de ruido, aplicaciones a la industria automotriz
Laboratorio de Acústica en la Edificación, Dintel Cuatro, del Grupo Hábitat Humano en la provincia de Alicante, España <sup>12</sup>		Pruebas como Ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo y al ruido de impactos.	Acústica en la edificación, ambiental
Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Universidad de Cádiz, en España <sup>13</sup>		Verificación y ensayos de ruidos y vibraciones en instalaciones industriales, estudios preoperacionales en instalaciones industriales relacionados con el impacto ambiental y contaminación acústica. Estudio de barreras acústicas, realización de mapas acústicos conforme a lo exigido por la nueva Directiva europea, estudios de ruidos en la industria conforme a lo exigido por la reglamentación de riesgos laborales, ensayos y determinación de grados de afección acústica, realizados in situ, conforme a los niveles de exigencia permitido por la actual legislación ISO 1996, Acústica ambiental, estudios de aislamientos a ruido aéreo, impacto y de fachada. Estudios de acústica arquitectónica, Estudios y ensayos de Vibraciones estructurales y dinámicas en el sector industrial, Aplicación de la normativa Estándar ISO, europea y autonómica en la realización de ensayos acústicos.	Acústica ambiental, urbanismo, ruido y vibraciones
Laboratorio de Acústica Arquitectónica y Laboratorio de Acústica y Electroacústica del Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones la Universidad Politécnica de Madrid <sup>14</sup>	Cámara Reverberante, cámara anecoica de sistemas electroacústicos	Pruebas relacionadas con el análisis y control de ruido acústico y vibraciones, acústica arquitectónica, ultrasonidos, acústica forense, modelado de señal musical, reconocimiento de voz e identificación de locutores, control activo de ruido, codificación de vídeo, vídeo forense	Acústica ambiental, arquitectónica, forense, electroacústica.

Laboratorio	Características	Tipos de Pruebas	Aplicación
Laboratorio de Acústica del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España <sup>15</sup>	Sistemas de monitorización y control de los principales sistemas acústicos como la ecosonda multihaz EM 300, ecosonda paramétrica TOPAS 018, ecosonda de pesca EK 600. Incluye, asimismo, los sistemas de control de la ecosonda hidrográfica EA500, la unidad de sincronización acústica y el control del sistema de compensación de movimiento del buque Seapath 200, mesade ordenador y demás mobiliario, tomas de corriente (limpia y normal), toma de 24 voltios, repetidor GPS y repetidor del ploter de navegación.		Acústica Marítima
El Laboratorio Acústico de Euronoisecontrol G.E.I.E <sup>16</sup>	Consta de un completo equipo de medida de ruido y vibraciones clase 1, una cámara de transmisiones para el estudio teórico y práctico de cualquier tipo de material, permiten proponer siempre soluciones probadas y optimizadas.	Se realizan pruebas para conocer de forma experimental las características acústicas de los productos así como el comportamiento en situación real de montajes e instalaciones.	Acústica ambiental
Acoustic Scale Model Facility TNO, Países Bajos <sup>17</sup>	Laboratorio de modelos a escala, cámaras acústicas, departamento de Acústica Estructural y Vibraciones	Pruebas, experimentación, cálculos matemáticos, diseño y prueba de maquinaria y equipo de baja emisión sonora, así como etiquetado y normalización de productos.	Acústica ambiental, ruido de tráfico terrestre y aéreo, ruido industrial.
Riverbank Acoustical Laboratories, Geneva, <sup>18</sup>	Seis cámaras reverberantes totalmente equipadas para pruebas de materiales, tienda de equipo especializado, museo y biblioteca especializada de acústica.	Pruebas de absorción y pérdida de transmisión; presión e intensidad sonoras y mediciones en dB; pruebas en materiales de construcción así como en aparatos eléctricos y electrónicos. Pruebas de vibraciones estructurales y de impacto, así como especificación de productos aislantes	Acústica arquitectónica, ambiental, urbanismo, electroacústica.
National Physical Laboratory of India <sup>19</sup>	Equipo especializado como micrófonos condensadores, acelerómetros, equipo de ultrasonido.	Pruebas de ruido ambiental, mediciones de vibraciones, ultrasonido	Acústica ambiental, bioacústica.
National Acoustic Laboratories, Australia <sup>20</sup>	Cámaras de intensidad de ruido, 4 cámaras anecoicas, 2 cámaras reverberantes, 1 cámara anti ruido	Pruebas de absorción sonora, presión y transmisión. Pruebas de absorción de materiales para construcción, análisis de vibraciones, clasificación de fuentes de ruido. Pruebas de aparatos médicos y protecciones para ruido. Pruebas de bioacústica, habilitación y rehabilitación, así como prevención de la pérdida del sentido del oído.	Acústica ambiental, arquitectónica, bioacústica, acústica fisiológica.

Laboratorio	Características	Tipos de Pruebas	Aplicación
Aero-Acoustic Propulsion Laboratory, at NASA Glenn Research Center <sup>21</sup>	Plataforma de pruebas acústicas, plataforma de pequeños reactores acústicos, Ventilador de control de ruido.	Mediciones acústicas de componentes de aeropropulsión	Acústica física, aeroacústica
Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, at Helsinki University of Technology <sup>22</sup>		Pruebas e investigación en psicoacústica, acústica fisiológica y fonética	Psicoacústica, acústica fisiológica, acústica fonética
Acoustics Laboratory, Kettering University, Michigan <sup>23</sup>		Investigación de acústica musical, modelos de problemas acústicos, acústica de recintos, estudio de vibraciones.	Acústica arquitectónica, acústica física
Applied Research Laboratory at Pennsylvania State University <sup>24</sup>	Equipo para medición, calibración y prueba de transductores, un tanque reverberante, acelerómetros resistentes al agua, agitador electromagnético, estimador de fuerza, hidrófonos, vibrómetro laser, túneles acuáticos, cámara anecoica de flujo.	Vibrometría de grandes estructuras, calibración de transductores de fuerza inestables,	Acústica física, acústica subacuática
Acoustic Laboratory at Building Research Institute, Japan <sup>25</sup>	Dos cámaras anecoicas, cuatro cámaras reverberantes, un área de preparación y calibración de instrumentos, sala de análisis acústico, herramienta y equipo especializado para hacer mediciones acústicas	Estudios y pruebas de aislamiento de materiales y elementos constructivos	Acústica arquitectónica y ambiental
Acoustic Information Science Laboratory, Akagi Laboratory, Japan <sup>26</sup>		Estudios de modelos y procesos del habla, articulación y reconocimiento de sonidos así como modelos de mecanismos de escucha.	Acústica fonética, fisiológica y psicoacústica
Environmental Acoustics Laboratory, The University of Tokyo, Japan <sup>27</sup>	Cámara anecoica y área de análisis acústico	Predicción cuantitativa de ambiente acústico para el diseño y control de ruido, acústica arquitectónica, materiales, etc.	Acústica arquitectónica, ruido y vibraciones,
Peutz Consulting Engineers, Acoustic Laboratory, Reino Unido <sup>28</sup>	Cámara reverberante, equipo para mediciones acústicas especializadas	Estudios de vibraciones acústicas, control de ruido y acústica ambiental, pruebas de emisión sonora, absorción y aislamiento acústico de materiales y elementos constructivos,	Acústica arquitectónica, ambiental.
Noise Unlimited Laboratories, EUA <sup>29</sup>	Tres cámaras reverberantes de 15, 64 y 300 pies cúbicos respectivamente tres tubos de ondas progresivas, generador de ruido, cámara semi anecoica	Estudios de vibraciones, control de ruido, acústica de alta intensidad (estructuras aeronáuticas)	Acústica arquitectónica, ambiental, aeroacústica

Laboratorio	Características	Tipos de Pruebas	Aplicación
Acoustic Callibration Laboratory, University of Salford, Reino Unido <sup>30</sup>	Cámara anecóica, dos cámaras semianecóicas, cámara de transmisión y cámara reverberante, área de prueba de silenciadores, área para escuchar,	Mediciones de absorción del sonido correspondientes a BS EN 20354:1993 ISO 384:1985, Mediciones de aislamiento acústico, BS EN ISO 140-3:1995, Mediciones de reducción de ruido transmitido por cubiertas de piso BS2750 Pt.8:1980 / ISO 140-8:1978, Mediciones en equipos, altavoces BS 6840 Pt 13:1987 / IEC 268-13: 1985	Acústica arquitectónica, musical, ambiental, investigación en procesamiento de señales, aeroacústica, laboratorio de calibración
Blachford Acoustics Laboratory, Illinois, North Carolina, Canada y afiliados en todo el mundo <sup>31</sup>	Cámara semianecóica con capacidad para camiones, camionetas, transportes de carga y otros grandes vehículos; dinamómetros de uso pesado; sistema tandem para carga de maquinaria; cámara reverberante; un área de análisis de ruido.	Pruebas y mediciones de ruido de maquinaria y materiales, desarrollo de productos para la industria automotriz	Control de ruido
Acoustic Research Laboratory, en National University of Singapore <sup>32</sup>	Vehículo de monitoreo submarino, sistema de adquisición de datos de alta frecuencia, sistema de adquisición de datos de ruido ambiental.	Investigación en comunicación submarina, sonares, geoacústica, ruido ambiental,	Acústica submarina, geoacústica, procesamiento de señales
Laboratorio de Acústica de la Universidad Técnica de Dinamarca, Orsted, DTU <sup>33</sup>	Área para análisis sonoro IEC 268-13, dos cámaras anecóicas, tres cámaras de transmisiones, cada una de 240 m3 aprox., una cámara reverberante de 240 m3 aprox., instalaciones para pruebas de audiometría, área de pruebas de sistemas protectores de ruidos ISO 4869-1, CEN 352-x	Pruebas en equipos como altavoces, pruebas de transmisión sonora de espacios adyacentes en horizontal o vertical, para materiales de elementos de partición, mediciones de audiolología y audiometría, estudios de propagación sonora en exteriores e interiores, estudios de vibraciones de estructuras complejas (barcos, motores, generadores, helicópteros, etc.)	Acústica ambiental, arquitectónica, audiometría,
Weastern Electro-Acoustic Laboratory, Santa Clarita, California, EUA <sup>34</sup>	Cámara Anecóica, tubo de impedancias.	Pruebas de TL, pérdida de transmisión, absorción de materiales, SPL, pruebas de Tubo de Impedancias, metrología	Acústica de edificaciones, ambiental, metrología y calibración.
Psycho-Acoustic Laboratory, Harvard University <sup>35</sup>			Psicoacústica, acústica fisiológica, acústica fonética
Acoustic Research Laboratories, Pty Ltd. (ARL) In Sydney, Australia <sup>36</sup>		Pruebas de ruido y vibraciones, venta y distribución de equipo	Acústica ambiental, metrología, distribución de equipo especializado, calibración de instrumentos
MWL, Suecia <sup>37</sup>	Cámara anecóica, cámara de reverberación de 243 m3, cámara de shock y vibraciones, cámara semianecóica,	Mediciones que van desde niveles de presión sonora, absorción sonora, análisis y caracterización de mufflers, materiales	Acústica ambiental, vibraciones

Laboratorio	Características	Tipos de Pruebas	Aplicación
Acoustics Laboratory, Department of Mechanical Engineering, KAIST, Corea <sup>38</sup>		Análisis de calidad sonora, control de ruido activo, modelado de interiores de vehículos, análisis de ruido, acústica de ductos	Acústica de vibraciones, acústica de ductos
UCLA Phonetics Lab, EUA <sup>39</sup>	4 Computerized Speech Lab (CSL), 2 modelo 4300 y 2 modelo 4300Bs., Multi-Speech (modelo 3700) en plataforma Windows para PCs	Acústica fonética, fisiológica y lingüística	Acústica fonética, fisiológica y lingüística
Centre for Structural and Architectural Engineering, Bath University, Reino Unido <sup>40</sup>	Instalaciones para pruebas en modelos a escala, un modelo de cámara de reverberación con la posibilidad de secar el aire, en un ambiente de nitrógeno	Desarrollo y pruebas en modelos a escala	Acústica arquitectónica

<sup>1</sup> <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/>

<sup>2</sup> <http://www.cic.gba.gov.ar/centros/cic/centros/lal/lab.htm>

<sup>3</sup> <http://www.fi.uba.ar/laboratorios/acustica/acustica.html>

<sup>4</sup> <http://archweb.uprrp.edu/apoyo.htm#6>

<sup>5</sup> <http://fisica.usach.cl/~rcubillo/pesse/acusticaambiental.htm>

<sup>6</sup> <http://www.pucp.edu.pe/investigacion/?grupos+36>

<sup>7</sup> <http://www.cinstrum.unam.mx/grupos/laboratorio.jsp?id=13&info=semblanza>

<sup>8</sup> <http://www.fciencias.unam.mx/areas/fisica/investigacion/facustica.html>

<sup>9</sup> <http://www.caltech.es/index.php/acustica>

<sup>10</sup> <http://www.lem-sl.com/index.php/content/en/page,7.html>

<sup>11</sup> [http://www.ctag.com/serv\\_ensayo\\_acustica.htm?setLang=es](http://www.ctag.com/serv_ensayo_acustica.htm?setLang=es)

<sup>12</sup> <http://www.grupohabitathumano.es/ARCHIVOS/Acustica.pdf>

<sup>13</sup> <http://www.raitec.es/CDA/Modulos/RT-Miembros/0,15105,CADIZ,00.html>

<sup>14</sup> <http://www.diac.upm.es/>

<sup>15</sup> [http://www.mapa.es/es/pesca/pags/vizconde\\_web/laboratorios.htm#inicio](http://www.mapa.es/es/pesca/pags/vizconde_web/laboratorios.htm#inicio)

<sup>16</sup> [http://www.euronoisecontrol.com/about\\_spa.htm](http://www.euronoisecontrol.com/about_spa.htm) y <http://www.euronoisecontrol.com/espana/acustica.htm>

<sup>17</sup> [http://www.tno.nl/industrie\\_en\\_techniek/technologie\\_in\\_gezondheid/buitenluchtakoestiek/acoustic\\_scale\\_model\\_faci/index.xml](http://www.tno.nl/industrie_en_techniek/technologie_in_gezondheid/buitenluchtakoestiek/acoustic_scale_model_faci/index.xml)

<sup>18</sup> <http://riverbank.alionscience.com/index.htm>

<sup>19</sup> <http://www.nplindia.org/index.php>

<sup>20</sup> <http://www.nal.gov.au/>

<sup>21</sup> <http://facilities.grc.nasa.gov/aapl/>

<sup>22</sup> <http://www.acoustics.hut.fi/>

<sup>23</sup> <http://www.kettering.edu/employers/research/labs/acoustic.jsp>

<sup>24</sup> [http://www.arl.psu.edu/facilities/acous\\_reverb\\_tank.html](http://www.arl.psu.edu/facilities/acous_reverb_tank.html)

<sup>25</sup> <http://www.kenken.go.jp/english/information/introduction/facilities/shosai/12.html>

<sup>26</sup> <http://gelgoog.jaist.ac.jp:8000/index-e.html>

<sup>27</sup> <http://www.env-acoust.k.u-tokyo.ac.jp/intro-e.html>

<sup>28</sup> [http://www.peutz.co.uk/index.php?sub1=facilities&sub2=acoustic\\_laboratory](http://www.peutz.co.uk/index.php?sub1=facilities&sub2=acoustic_laboratory)

<sup>29</sup> <http://www.nulabs.com/>

<sup>30</sup> <http://www.acoustics.salford.ac.uk/research/>

<sup>31</sup> <http://www.blachford.ca/products/6.html>

<sup>32</sup> <http://www.arl.nus.edu.sg/web/research>

<sup>33</sup> <http://www.oersted.dtu.dk/English/research/at/facilities.aspx>

<sup>34</sup> <http://www.weal.com/main.htm>

<sup>35</sup> <http://oasis.harvard.edu:10080/oasis/deliver/~hua08005>

<sup>36</sup> <http://www.acousticresearch.com.au>

<sup>37</sup> <http://www.ave.kth.se/facilities/mwl/intro.html>

<sup>38</sup> [http://aclab.kaist.ac.kr/bbs/zboard.php?id=new\\_eng](http://aclab.kaist.ac.kr/bbs/zboard.php?id=new_eng)

<sup>39</sup> <http://www.linguistics.ucla.edu/faciliti/facilities/acoustic/acoustic.html>

<sup>40</sup> <http://www.bath.ac.uk/csae/new/home.html>

## GLOSARIO

**Acústica Física-** La rama de la Acústica que analiza los fenómenos sonoros mediante modelos físicos y matemáticos.

**Acústica no lineal-** El estudio de la Acústica considerando la distorsión que sufren las ondas sonoras al viajar.

**Aeroacústica-** generación del sonido (o ruido) creado a través del movimiento turbulento de fluidos a través de fuerzas aerodinámicas.

**Arena romana-** Espacio en donde se llevaban a cabo luchas de gladiadores y espectáculos públicos.

**Arquitectura bioclimática-** Es aquella arquitectura que tiene en cuenta el clima y las condiciones del entorno para ayudar a conseguir el confort térmico interior. Juega exclusivamente con el diseño y los elementos arquitectónicos, sin utilizar sistemas mecánicos, que son considerados más bien como sistemas de apoyo.

**Arquitectura vernácula-** Es un testimonio de la cultura popular, conserva materiales y sistemas constructivos regionales de gran adecuación al medio. Dícese de aquel tipo de arquitectura que ha sido proyectada por los habitantes de una región o periodo histórico determinado mediante el conocimiento empírico, la experiencia de generaciones anteriores y la experimentación. Usualmente, este tipo de construcciones son edificadas con materiales disponibles en el entorno inmediato.

**Cámara sonoamortiguada-** Equipamiento aislado a ruidos externos auxiliar en diagnósticos auditivos, pruebas de sonidos y vibraciones.

**Campo libre-** Cuando el sonido radiado por la fuente omnidireccional no es obstaculizado por ningún objeto, la intensidad *acústica varía de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia*, como ocurre en un gran espacio abierto, libre de superficies reflejantes.

**Confort acústico-** un estado de bienestar físico y mental del ser humano en su percepción auditiva, en un momento dado y en un ambiente específico

**Distribución *t* de Student-** es una distribución de probabilidad cuyo objetivo es estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño (menor a 30). Desarrollada en 1908 por W. Gosset, quien publicó su trabajo bajo el pseudónimo de "*Student*".

**Espacio arquitectónico-** Delimitado por el volumen aunque no siempre coincide con la forma material que lo define, pudiendo variar mediante: su proporción (niveles interiores), dimensión visual (colores y texturas, y dirección (transparencias).

**Espuma fenólica-** copolímero de estireno de baja densidad

**Hemidodecaédrico-** un cuerpo con 6 caras pentagonales.

**Hidrodinámica de superfluidos-** parte de la Mecánica que estudia el movimiento de fluidos no compresibles. A temperaturas muy bajas algunos líquidos (He) se tornan superfluidos. Estos líquidos son capaces de trepar espontáneamente por las paredes de los vasos que los contienen, atravesar agujeros muy pequeños y exhibir una serie de efectos no clásicos.

**Interferometría de láser-** Se basa en el fenómeno de la interferencia que se puede producir cuando dos ondas luminosas de exactamente la misma frecuencia se superponen sobre una pantalla. Esta técnica de visualización puede ser utilizada para medidas de deformaciones de superficies, alineación de objetos en una línea recta exacta, calibración, y otros.

**Macocel-** aglomerado de madera

**Maqueta** o modelo físico - la reproducción física a escala en tres dimensiones. Su objetivo es reproducir el comportamiento de algunos aspectos de un sistema físico o mecánico más complejo.

**Omnidireccional-** Que se puede orientar o utilizar en cualquier dirección o sentido.

**Ruido blanco-** un ruido cuyo nivel es constante en todas las frecuencias, es decir, mantiene la misma intensidad en todo su espectro

**Ruido rosa-** ruido cuyo nivel sonoro está caracterizado por un descenso de 3 dB por octava. Es una señal conocida con el mismo nivel en todas las bandas, conocida como sonido plano y se utiliza para analizar el comportamiento de salas, altavoces, equipos de sonido etc. Normalmente se genera entre 20 Hz y 20 kHz.

**Sonofluorescencia-** método diagnóstico que muestra imágenes de tumores y tejidos.

**Sonoquímica-** Rama de la Química. Por medio de potentes ultrasonidos emitidos en el interior de líquidos se provocan centenares de "micro burbujas" que colapsan, sólo que en este caso se generan, por espacios de tiempo muy inferiores al segundo, temperaturas en los bordes de la burbuja que pueden superar varios miles de grados centígrados.

**Teatro de Epidauro-** Teatro griego localizado en Epidauro y construido en el siglo IV a.C. concebido por Policleto el Joven. Su gradería descansa sobre una colina natural, por lo que se consiguió isóptica y acústica adecuadas para su función.

**Templo en Abidos-** Localizado en el Alto Egipto, Abidos fue considerada la ciudad santa de Osiris y el lugar más importante en donde se han descubierto tumbas de los reyes más antiguos

**Transductor-** un dispositivo que convierte o transforma una señal de entrada de un tipo de energía en otra diferente (de salida).

**Tumba de Djoser-Kere-Somb-** Localizada en Tebas.

**Tweeter-** transductor electroacústico para la reproducción de altas frecuencias.

**Valores cuantiles-** En una distribución estadística, aquellos valores de la variable que ordenados de menor a mayor dividen a la distribución en partes, de tal manera que cada una de ellas contiene el mismo número de frecuencias.

## **Referencias**

---

# REFERENCIAS:

## Libros:

- Alton, E.F., 2001. *The Master Handbook of Acoustics*. USA: McGraw-Hill. pp. 564-569
- Álvarez, R., González M., Herrera, M., Bernal M. 2006. *Fundamentos de la Estadística Inferencial para Proyectos de Desarrollo en Diseño*. México: CyAD, UAM-A. pp.171-176
- Ando, Y. 1998. *Architectural Acoustics: blending sound sources, sound fields, and listeners*. New York: Springer-Verlag
- Apfel, R.E. 1998. *Deaf architects and blind acousticians? A guide to the principles of sound design*. EUA: Apple Enterprises Press. p.1-39
- Arau, H. 1999. *ABC de la Acústica Arquitectónica*. España: Grupo Editorial Ceac, S.A.
- Attali, J. 1995. *Ruidos, Ensayo sobre la economía política de la música*. México: Siglo Veintiuno Editores
- Beranek, L. 1949. *Acoustic Measurements*. New York: John Wiley and Sons
- Beranek, L. 1954. *Acoustics*. USA: McGraw-Hill. pp.1-8
- Beranek, L. 2004. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture*. USA: Springer
- Binggeli, C. 2003. *Building systems for interior designers*. USA: John Wiley & Sons. pp. 395-434
- Blesser, B., Salter, L. 2006. *Spaces speak, are you listening? Experiencing aural architecture*. USA: MIT Press
- Borwick, J. 2001. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. Inglaterra: Focal Press
- Burbano, A., Burbano, G., Gracia, M. 2003. *Física General*. Madrid: Editorial Tébar
- Canavos, G. 1999. *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos*. México: McGraw-Hill. pp. 303-310, 326-333, 621-622
- Carrión, I.A. 1995. *Diseño Acústico de espacios Arquitectónicos*. España: Alfaomega, UPC. pp.225-356
- Cowan, J. 2000. *Architectural Acoustics Design Guide*. EUA: McGraw-Hill. pp 3-22,53-55,65,66,74,87,91,98,106-158,249-263
- Cremer, L. 1978. *Principles and Applications of Room Acoustics*. Vol.1. London: Applied Science Publishers. pp.3-24,164-177
- Doelle, L. 1972. *Environmental Acoustics* USA: McGraw-Hill
- Egan, D. 1988. *Architectural Acoustics*. New Cork: McGraw-Hill
- Fernández, M., García, M., Orcajo, G., Cano, J., Solares, J. 1998. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. España: Marcombo
- Floudas, C. 1995. *Non linear and mixed-integrer optimization. Fundamentals and applications* EUA: Oxford University Press. p.184
- Foreman, J. 1990. *Sound Analysis and Sound control*. USA: van Nostrand Reinhold
- Furrer, W. 1964. *Room and Building Acoustics and Noise Abatement*. London: Butterworths and Company. pp. 50-58, 63, 71-97
- Giancoli, D., Campos, V. 2006. *Física. Principios con aplicaciones*. 6a. Ed. México: Pearson Educación
- Goldstein, B. 2005. *Sensación y Percepción*. México: Thomson Corporation. 6ª. Ed.
- Holman, T. 2000. *5.1 Sorround Sound: Up and running*. USA: Focal Press
- Howard, D. Angus, J. 2001. *Acoustics and Psychoacoustics*. 2nd. Ed. Inglaterra: Focal Press
- Josse, R.1975. *La Acústica en la Construcción*. Barcelona: Gustavo Gili. pp.13-67, 107-123
- Kinsler, L.1992. *Fundamentos de Acústica*. México: Limusa. pp.399-428
- Kuttruff, H. 2000. *Room Acoustics*. 4th Edition. London: Spon Press. p.213
- Lawrence, A. 1970. *Architectural Acoustics*. London: Elsevier Publishing Company Ltd.

- Llinares, G.J., Llopis, R.A., Sancho, V.J. 1991. *Acústica arquitectónica y urbanística*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia
- MacDonald, S., Rice, M. 2003. *Consuming Ancient Egypt*. EUA: UCL Press
- Maggiolo, D. 2003. *Psicoacústica, Apuntes de acústica musical*. Uruguay: Universidad de la República
- Marshall, H., Cavanaugh, W. 1998. *Una introducción a la acústica arquitectónica*, en Crocker, M. (ed.) *Handbook of acoustics*. USA: John Wiley & Sons
- Matilla, F. 2003. Instalaciones singulares en viviendas y edificios. España: Thomson-Paraninfo
- Mehta, M., Johnson, J., Rocafort, J. 1999. *Architectural Acoustics. Principles and Design*. New Jersey: Prentice Hall
- Moore, J. E. 1978. *Design for good acoustics and noise control*. London: Macmillan
- Northwood, T. 1977. *Architectural Acoustics*. New York: Halsted Press
- Pérez, C., Batalla, M. 1993. *Electrónica analógica integrada*. España: Universidad Politécnica de Valencia
- Pérez, M.J. 1969. *Compendio Práctico de Acústica*. Barcelona: Labor
- Pirn, R. 1999. *Acoustical Materials and Methods*, en Cavanaugh, W. y Wilkes, J. (Eds.) *Architectural Acoustics*. New York: John Wiley & Sons. pp.55-95
- Raichel, D. 2000. *The Science and applications of acoustics*. EUA: Springer-Verlag. pp. 9-11
- Recuero, M. 2001. *Acondicionamiento Acústico*. Madrid: Paraninfo. pp.165-196
- Rettinger, M. 1977. *Acoustic Design and Noise control*. Vol. 1. New York: Chemical Publishing Co. pp.191-207
- Rodríguez, F. 2000. *Confort acústico en Rodríguez V. (comp.) Introducción a la Arquitectura Bioclimática*. México: Limusa
- Rossing, T. 1989. *The Science of Sound*. 2nd. Ed. EUA: Addison-Wesley Publishing Co.
- Salcedo, F. 2007. Modelos ocultos de Markov: del reconocimiento de la voz a la música. España: Ed.Lulu.com
- Siebein, G. y Kinzey, B. 1998. *Recent innovations in acoustical research*, en Cavanaugh, W. y Wilkes, J. (Eds.) *Architectural Acoustics*. New York: John Wiley & Sons. pp.233-304
- Smith, B.J. 1996. *Acoustics and Noise Control*. England: Addison Wesley Longman Ltd.
- Templeton, D. 1993. *Acoustics in the Building Environment, Advice for the Design Team*. Oxford: Butterworth-Heinemann. pp. 4,49-55,64,68-82,104-106,111-115
- Thomson, E. 2002. *The Soundscape of modernity*. EUA: MIT Press. pp.13-58
- Tucker, I. 2002. *Fundamentos de economía*. 3a. Ed. México: Thomson Learning. pp. 7-9
- Weisse, K. 1956. *Acústica de los locales. Compendio para arquitectos e ingenieros*. Barcelona: Gustavo Gili. pp.1-3, 84-85
- Wilson, J., Buffa, A. 2004. *Física*. México: Pearson Educación
- Yerges, L. 1978. *Sound, Noise and Vibration Control*. New York: Van Nostrand Reinhold Env. Engineering Series. pp.1-9, 201-211

## Diccionarios y Enciclopedias:

- *Diccionario de la lengua española*. 2001. s.v. Sonido. 22a. Ed.
- *Encyclopedia Britannica*. 2007. s.v. Laboratorio. [online] [obtenida el 11/01/07] disponible en: <<http://www.britannica.com/ebc/article-9369557>>
- *New Webster's Dictionary and Thesaurus of the English Language*. 1992. s.v.Laboratory.

## Normas:

- International Organization for Standardization. 1997. ISO 3382:1997. *Acoustics- Measurement of the Reverberation Time of rooms in reference to other acoustic parameters*. Ginebra, Suiza.
- International Organization for Standardization. 1995. *Acoustics. General aspects of acoustics. Methods of noise measurement in general. Noise with respect to human beings*. Iso Standards Handbook. Vol. 1. ISO Second edition. Ginebra, Suiza.
- International Organization for Standardization. 1963. ISO/R 354:1963. *Measurement of Absorption coefficients in reverberation chambers*. Ginebra , Suiza

## Textos académicos e institucionales:

- American Association for the Advancement of Science. 1990. *Ciencia, conocimiento para todos*. EUA. [obtenida el 27/07/07] disponible en <<http://www.project2061.org/esp/publications/sfaa/online/sfaatoc.htm>>
- Arias, L., Flores, G., Reyes, R. 2007. *Sistema Artificial de Audición Binaural basado en el Sistema Auditivo Humano utilizable en el Acondicionamiento de Recintos Acústicos*. 6º reporte quincenal. México: Academia de Biónica. UPIITA, IPN
- Barti, R. 2003. *Calidad acústica en la construcción*. Asociación Catalana contra la contaminación acústica. Barcelona. [obtenida el 8/11/2006] disponible en <[http://www.sorolls.org/docs/CALIDAD\\_ACUSTICA\\_EN\\_CONSTRUCCION.pdf](http://www.sorolls.org/docs/CALIDAD_ACUSTICA_EN_CONSTRUCCION.pdf)>
- Berglund, B., Lindvall, T., Schwella, D. 1999. *Guías para el ruido urbano*. OPS/CEPIS, OMS.
- Bradley, J.S. 1985. *Sound in rooms*. National Research Council Canada. [obtenida el 25/09/2006] disponible en <[http://irc.nrc.gc.ca/pubs/bsi/85-2\\_e.html](http://irc.nrc.gc.ca/pubs/bsi/85-2_e.html)>
- Bradley, J.S. 2000. Laboratory Measurements of the Sound insulation of Building Facade Elements. *IRC Internal Report*. IRC IR-818. Canadá
- Burd, A.N., Sproson, W.N. 1974. *Acoustic Scaling: subjective appraisal and guides to acoustic quality*. Research Dept. Engineering Division. Inglaterra: BBC
- Concari, S. 2000. *El modelado y la resolución de problemas: ejes de la enseñanza de la Física para ingenieros*. Facultad de Ingeniería Química.Universidad Nacional del Litoral. Argentina. [obtenida el 12/01/2008] disponible en <<http://www.unrc.edu.ar/publicar/cde/05/Concari.htm>>
- Czajkowski, J; Discoli, C; Rosenfeld, E; Gentile, C; y Moreno, J.M. 1999. Hacia un modelo de confort integral. Auditorías ambientales en viviendas. *Avances en energías renovables y medio ambiente*. **Vol 3**. No. 2. pp.8-13 a 16.
- García, B., Garrido, F. 2003. La contaminación acústica en nuestras ciudades. *Colección Estudios Sociales de la Fundación "la Caixa"*. **vol.12**. Barcelona: Fundación "la Caixa".

- Grupo de Acústica. 2003. *Curso de acústica*. Universidad del País Vasco España. [obtenida el 02/11/2007] disponible en <<http://www.ehu.es/acustica/espanol/ruido/acaces/acaces.html>>
- Guarinos, J., 2001. Perspectiva histórica de la acústica. Argentina: Biblioteca virtual de la Universidad Nacional de Rosario. [obtenida el 25/07/2007] disponible en: <<http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/biblio/histacus.pdf>>
- Horta, O. 2001. Apuntes de clase. México: Academia de Biónica. UPIITA, IPN
- McMinn, T. 1996. Development of an evaluation tool for use at the design stage of auditoria with respect to unassisted speech reinforcement. M.S.Thesis. Australia: Curtin University of Technology
- National Research Council Institute for Research in Construction.1993. Acoustics Principles. Canada. [obtenida el 20/10/06] disponible en <[http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ie/cope/03-1-Acoustics\\_Principles\\_e.html](http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ie/cope/03-1-Acoustics_Principles_e.html)>
- National Research Council Canada. 1993. Acoustics Satisfaction. [obtenida el 25/09/2006] disponible en: <[http://irc.nrc.gc.ca/ie/cope/03-2-Acoustics\\_Satisf](http://irc.nrc.gc.ca/ie/cope/03-2-Acoustics_Satisf)>
- National Research Council Canada. 1993. Acoustics Design (COPE). [obtenida el 25/09/2006] disponible en <[http://irc.nrc.gc.ca/ie/cope/03-3-Acoustics\\_Design](http://irc.nrc.gc.ca/ie/cope/03-3-Acoustics_Design)>
- Rodríguez, F. 2001. Análisis y balance acústico de los espacios arquitectónicos. Tesis de Maestría en Diseño. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Shield, B., Cox, T. 2000. Concert Hall Acoustics: Art and Science. Testing, Testing... Inglaterra: University of Salford. [obtenida el 26/09/2006] disponible en <[http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics\\_info/concert\\_hall\\_acoustics/?content=testing](http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics_info/concert_hall_acoustics/?content=testing)>
- TNO. 2006. Acoustic scale model facility. Netherlands. [obtenida el 26/09/2006] disponible en <[http://www.tno.nl/industrie\\_en\\_techneik/technologie\\_in\\_gezondheid/buitenluchtakoestiek/acoustic\\_scale\\_model\\_faci](http://www.tno.nl/industrie_en_techneik/technologie_in_gezondheid/buitenluchtakoestiek/acoustic_scale_model_faci)>
- Universidad Nacional de Rosario, Comité científico interdisciplinario de ecología y ruido. 2000. ¿Qué es ruido? Argentina: Universidad Nacional de Rosario. [obtenida el 10/08/07] disponible en <<http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/comite/queesrui.htm>>
- Vargas, A., Duque, A. 2001. Codificador MP3 en Matlab. Tesis de Licenciatura. Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana
- Whitman, W. 2005. Acústica. Venezuela: Universidad Simón Bolívar. [obtenida el 14/05/2007] disponible en <<http://www.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/INTRODUCCION/Introduccion.html>>
- Rusell, D.A. 1996. Room Acoustics and Reverberation. E.U.A.: Kettering University- GMI Engineering and Management Institute
- Ziobroski, D., Powers, C. 2005. Acoustic Terms, Definitions and General Information. General Electric Company. [obtenida el 20/07/2008] disponible en <[www.gepower.com/prod\\_serv/products/tech\\_docs/en/downloads/ger4248.pdf](http://www.gepower.com/prod_serv/products/tech_docs/en/downloads/ger4248.pdf)>

## Artículos en Revistas:

- Ahnert W., Feistel, S., Schmitz, O. 2003. Modern tools in acoustic design of concert halls and theatres -use and limitations of computer simulation and auralisation. *Journal of the Russian Acoustical Society*. Moscow. pp. 863-874
- Allen, J.B., Berkeley, D. 1979. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *J.Acoust. Soc.Am* **65** (4), pp. 943-950
- Ambientum. 2003. Arquitectura bioclimática. *Ambientum*. [online]. [obtenida el 12/06/2007] disponible en <<http://www.um.es/gtiweb/adrico/medioambiente/Arquitectura%20bioclimatica.htm>>
- Andalucía Investiga. 2006. Reconstruir el sonido. *Física y Sociedad*. Madrid. [obtenido el 31/10/2007] disponible en: <[http://www.fisicaysociedad.es/view/default.asp?cat=215&id=3017&idtipo\\_recurso=3](http://www.fisicaysociedad.es/view/default.asp?cat=215&id=3017&idtipo_recurso=3)>

- Arenaz, A., Espinel, A. 2004. Protocolo de validación de cámaras de ensayo de aislamiento acústico normalizadas. *Revista de Acústica*. **Vol. 36**, pp.21-26
- Barron, M. 2005. Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. *Acoust. Science and Technology*, **26**, pp.162-169
- Barron, M., Lee, L-J. 1988. Energy relations in concert auditoriums. I. *J.Acoust.Soc.Am.* **84** (2), pp.618-628
- Biesel, V. 2003. A test system for free-field qualification of Anechoic Chambers. *Sound & Vibration*, pp. 22-26
- Borgerson, B. 2005. Acoustical Measurement and Predictive Modeling. *Sound and Video Contractor*. **23** no. 9, pp.36,38,40,42,44,46,48
- Bradley, J.S., Sato, H. 2003. On the importance of early reflections for speech in rooms. *J.Acoust.Soc.Am.* **113** (6), pp. 3233-3244
- Bradley, J.S., Reich, R.D., Norcross, S.G. 2000. On the combined effects of early-and late-arriving sound on spatial impression in concert halls. *J.Acoust.Soc. Am.* **108** (2), pp. 651-661
- Bradley, J.S., Soloudre, G.A. 1995. The influence of late arriving energy on spatial impression. *J. Acoust. Soc. Am.* **97** (4)
- Bradley, J.S., Soloudre, G.A. 1996. Listener envelopment: an essential part of good concert hall acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.* **99** (1)
- Bradley, J.S., Soloudre, G.A. 1995. Subjective evaluation of new room acoustic measures. *J.Acoust.Soc.Am.* **98** (1), pp. 294-301
- Boone, M., Braat-Eggen, E. 1994. Room Acoustic parameters in a physical scale model in the new Music Centre in Eindhoven: Measurement methods and results. *Applied Acoustics* **42**, pp.13-28
- Calle, S.M. 2006. Contaminación acústica y salud. *Waste magazine* [online] [obtenida el 30/08/2007] disponible en <<http://waste.ideal.es/acustica.htm>>
- Cervone, P., Chiang, W., Siebein, G., Doddington, W., and Schwab, W. 1990. The subjective and objective evaluation of three rooms for music listening. *JASA supplement* **1**, 88. San Diego: 120th JASA meeting
- Choisel, S., Wickelmaier, F. 2007. Evaluation of multichannel reproduced sound: scaling auditory attributes underlying listener preference. *J. Acoust. Soc. Am.* **121** (1), pp. 388-400
- Commins, D., Pompoli, R., Farina, A., Fausti, P., Prodi, N. 2002. Acoustics of teatro degli arcimboldi in milano. Design, computer and scale models, details, results. *Proceedings of the Institute of Acoustics*. **Vol. 24**
- Cooper, B. 2000. New Acoustical Testing Laboratory at NASA. *Sound and Vibration* **34** no. 12
- Copley, D. 2003. "A quiet success - Caterpillar's Noise control research lab. *Sound & Vibration* **37** no.2, pp.12-18
- Cunefare, K., Badertscher, J. 2006. On the qualification of anechoic chambers; Issues related to signals and bandwidth. *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, pp. 820-829
- Dance, M., Shield, M. 1999. Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces. Part I: performance spaces. *Applied Acoustics* **58**, pp. 1-18
- Elliot, L. 2004. Making Noise about sound. *Interiors and Sources*, pp. 64-65
- Horoshenkov K., Hothersall D. 1996. Porous Materials for scale model experiments in outdoor sound propagation. *Journal of Sound and Vibration* **194** (5), pp. 685-708
- Jordan, V.L. 1970. Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques. *J.Acoust.Soc.Am.* **47** (2), pp. 408-412
- Laforga, P. 2000. Conceptos físicos de las Ondas sonoras. *Física y Sociedad*. [obtenida el 09/11/2006] disponible en: <[http://www.cofis.es/pdf/fys/fys11\\_02.pdf](http://www.cofis.es/pdf/fys/fys11_02.pdf)>
- Lavilla, J. 2004. ¡Qué estruendo! [online]. [obtenida el 06/04/2007] disponible en: <[http://www.ruidos.org/Prensa/2004mar/040323\\_Correo.html](http://www.ruidos.org/Prensa/2004mar/040323_Correo.html)>
- Leishman, T., Rollins, S., Smith, H. 2006. An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound. *J.Acoust.Soc.Am.* **120** (3), pp.1411-1422

- Lihoreau, B., Gauvreau, B., Bérengier, M., Blanc-Benon, P., Calmet, I. 2006. Outdoor sound propagation modeling in realistic environments: Application of coupled parabolic and atmospheric models. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. **120** (1), pp. 110-119
- Luzzato, E. 1986. Some simple and effective methods for sound source identification with geometrical acoustic models. *Journal of Sound and Vibration.* **105** (3), pp. 473-490
- Madsen, J. 2006. Acoustics: Absorb, Block and Cover. *Buildings* **100** (7), pp. 57-60
- Mooney, J. 1999. Lilliputian Acoustics (Acoustic Models). *Walls and Ceilings Magazine*
- Newman, M. 2005. Urban Living Room. *Entertainment Design Magazine* **39** (7), pp. 20-23
- Okubo, H. Otani, M., Ikezawa, R., Komiyama, S. 2000. A study on measuring the directional parameters in room acoustics. *SMPTE Journal* **109** (4), pp. 309-312
- Oguchi, K. 2003. Our new audio speakers for acoustical scale model test. *Nagata Acoustic News.* **03** (192)
- Palmese, C. y Carles, J. 2005. Acústica y arquitectura. El marco acústico y su evolución. *Scherzo* (193) [online]. [obtenida el 14/05/2007] disponible en: <<http://www.revistasculturales.com/articulos/60/scherzo/258/...stica-y-arquitectura-el-marco-acustico-y-su-evolucion.html>>
- Potter, W., Everbach, C. 1992. Acoustic scale modeling of auditoria. *J. Acoust. Soc. Am.* pp. 2367-2368
- Rindel, J. 2002. Modelling in auditorium acoustics. From ripple tank and scale models to computer simulations. *Revista de Acústica* (30), pp. 31-35
- Rodríguez, F. 2000. Modelos de simulación en Casarrubias, D. (ed.) *Tecnología y Diseño en las edificaciones*. Vol. 3. México: Universidad Autónoma Metropolitana. pp. 127-146
- Rodríguez, F. 2002. Consideraciones generales con respecto al carácter, la calidad y la percepción acústica del espacio en la arquitectura. En: Rodríguez, V. (comp.) *Estudios de Arquitectura Bioclimática. Anuario*, vol. IV, México: UAM-A, Limusa. pp.193-203
- Rodríguez, F. 2003. Elementos para el carácter acústico del espacio arquitectónico. En: Rodríguez V. (comp.) *Estudios de Arquitectura Bioclimática. Anuario*. vol. V. México: UAM-A, Limusa. pp. 204-220
- Rodríguez, F., González, L. 2007. El uso de modelos de simulación para la predicción de parámetros acústicos en los espacios arquitectónicos. *Estudios de Arquitectura Bioclimática. Anuario*. Vol. IX. México: UAM-A, Limusa.
- Sakurai, M. Aizawa, S., Suzumura Y., Ando, Y. 2000. A diagnostic system measuring orthogonal factors of sound fields in a scale model of auditorium. *Journal of Sound and Vibration.* **232**, pp. 231-237
- Satoh, F., Shimada, Y., Hidaka, Y., Tachibana, H. 1996. Comparison between de 1/10-scale model experiment and the full-scale measurements in a concert hall. *J. Acoust. Soc. Am.*
- Schroeder, L.E. 2002. Estimating vehicle interior noise using room models and sound power. *Sound and Vibration* **36**(7), pp. 26-29
- Segura, J., Sanchis, R., Amarshi, J., Navarro, E., Regalado, M., Navasquillo J. y García, A. 2001. Condiciones acústicas de la cámara anecoica electromagnética de la Universitat de València. *Revista de Acústica*, **32**, pp.19-23
- Sterner, J. 2005. Can you hear me now? *American School & University* **77** (9), pp. 18-20
- Stolik, D. 2005. El aporte de los físicos al desarrollo de la música. *Revista cubana de física*, Vol. **22** (2), pp.164-172
- Tomlinson H. 1997. Monitoring sound in the one-person environment. *SMPTE Journal* **106**, pp. 673-678
- Ushiyama, A., Yasuda Y., Sakamoto S., Tachibana H. 2005. Reverberation characteristics in a room with unevenly-distributed absorbers: scale modelling study. *Acoust. Science and Technology*, vol. **26**.(4).
- Veen, J. 2005. Standarized test procedures for small reverberation rooms. *Sound & Vibration*, pp. 18-20

- Vijayanand, M., Marijn, W. 2003. Acoustical Characteristics of Textile materials. *Textile Research Journal*, pp. 827-837
- Vinokur, R. 2005. Haunted Buildings and Other Acoustical Challenges. *Sound and Vibration* **39** (12), pp. 5-6
- Waldecker, M. 2005. High Class. *American School and University* **78** (2), pp. 30-33
- Warnock, A.C.C. 1985. Introduction to Building Acoustics. Canadian Building Digest. 236. [online]. [obtenido el 11/09/06] disponible en <[http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd236\\_e.html](http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd236_e.html)>
- Warnock, A.C.C. 2001. Specifying Acoustical Criteria for Buildings. *Construction Technology*. **50**

## Manuales:

- Norsonic (1998) Quick Referente Guide NOR-840 Real Time Analyser, Ed. 1, Rev.101.98, Norway

## Páginas electrónicas:

- *Cámara reverberante*. 2007. [online]. [obtenido el 18/03/2007] disponible en: <[http://www.ruhr-uni-bochum.de/ika/ika/institut/institut\\_engl.htm](http://www.ruhr-uni-bochum.de/ika/ika/institut/institut_engl.htm)>
- *Cámara semianecóica*. 2007. [online]. [obtenido el 18/03/2007] disponible en: <<http://www.cdc.gov/niosh/mining/aboutus/labdetails36.htm>>
- *Cámara anecóica*. 2007. [online]. [obtenido el 18/03/2007] disponible en: <<http://www.nmij.jp/acs-ulsn/acoustics/anechoic-e.html>>
- Catálogo de productos. 2007. [online]. [obtenido el 15/12/2007] disponible en: <<http://www.steren.com.mx>>
- Especificaciones de productos. 2007. [online]. [obtenido el 15/12/2007] disponible en: <[http://www.norsonic.cz/web\\_pages/nor-840\\_page.html](http://www.norsonic.cz/web_pages/nor-840_page.html)> y <<http://www.norsonic.com/index.php?sideID=2279&ledd1=931>>
- Especificaciones de productos. 2007. [online]. [obtenido el 15/12/2007] disponible en: <<http://www.gras.dk/00012/00013/00028/00037/>>
- Especificaciones de productos. 2007. [online]. [obtenido el 22/03/2006] disponible en: <<http://www.metecnomexico.com>>
- Fotografías de las tumbas de Nakht y Djeser-Kere-Somb. 2008. [online]. [obtenido el 01/02/2008] disponible en: <<http://www.anitasifleto.com/2006/02/21/la-musica-en-el-antiguo-oriente-medio-segunda-parte/>>
- Fotografía del Teatro de Epidauro. 2007. [online]. [obtenido el 21/05/2007] disponible en: <<http://www.artehistoria.jcyl.es/histes/obras/7930.htm>>
- Fotografía de arena romana en Verona. 2007. [online]. [obtenido el 21/05/2007] disponible en: <<http://www.verona-turismo.it/web/verona/img/arena.jpg>>
- Fotografía de Wallace Clement Sabine. 2007. [online]. [obtenida el 21/05/2007] disponible en: <<http://www.kuleuven.ac.be/bwf/onderwijs/zaal/wcsabine.htm>>
- Modelo acústico por computadora. 2007. [online]. [obtenido el 30/05/2007] disponible en: <<http://www.arup.com/acoustics/skill.cfm?pageid=4681>>
- Laboratorio Kirkegaard & Associates. 2006. [online]. [obtenido el 26/09/2006] disponible en: <<http://www.kirkegaard.com/>>
- Laboratorio S&V Solutions. 2006. [online]. [obtenido el 26/09/2006] disponible en: <<http://www.svsolutions.com/index2.htm>>

- Laboratorio Nagata Acoustics. 2007. [online]. [obtenido el 24/02/2007] disponible en: <[http://www.nagata.co.jp/e\\_news/news0702-e.html](http://www.nagata.co.jp/e_news/news0702-e.html), <http://www.nagata.co.jp/news/news0312-e.htm>>
- Laboratorio BAST. 2006. [online]. [obtenido el 26/09/2006] disponible en: <[http://www.bast.de/nn\\_82230/EN/e-Aufgaben/e-abteilung-v/e-referat-v3/e-schalllabor/e-schalllabor.html](http://www.bast.de/nn_82230/EN/e-Aufgaben/e-abteilung-v/e-referat-v3/e-schalllabor/e-schalllabor.html)>

## Memorias de congresos:

- Alfaro D.G. 2003. Acoustic barriers: performance and experimental measurements. En: *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica*. España
- Barron, M. 2000. The current state of acoustic design of concert halls and Opera Houses. *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica*. España
- Beckers, B., Serra, R. 2005. Hacia una Acústica para la Arquitectura. *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica*. España
- Conway, C. y Corcoran, D. 2002. An evolutionary Approach to acoustic modeling. *Forum Acusticum*. Sevilla. [online]. [obtenida el 15/09/2006] disponible en <<http://www.sea-acustica.es/Sevilla02/mat01025.pdf>>
- del Ama, F., Hernández, A. 2004. Percepción espacial de una sala de conciertos mediante su acústica arquitectónica: modelos matemáticos para su simulación. *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica. Guimaraes*, Portugal. [online]. [obtenida el 15/09/2006] disponible en: <<http://www.sea-acustica.es/Guimaraes04/ID104.pdf>>
- Esteban, A., Cortés, A., De Rozas, M., Tellado, M., De Lorenzo, A. 2001. Análisis de la situación actual y futura sobre el confort acústico en los edificios", *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica. La Rioja*, España. [online]. [obtenida el 14/09/2006] disponible en: <<http://www.sea-acustica.es/publicaciones/4350sr206.pdf>>
- Esteban, A., Fuente, M., Arribillaga, O., López-Linares, D. 2005. Modelo de predicción de transmisión de ruido en edificios UNE-EN12354: precisión, limitaciones e investigaciones en el ámbito de las viviendas en España. *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica. Terrassa*, España. [online]. [obtenida el 14/09/2006] disponible en: <<http://www.sea-acustica.es/Terrassa05/AED019.pdf>>
- Giménez, A., Marín, A., Sanchis, A., Romero, J., Cerdá, S., Jorge, M. 2001. Estudio de la evolución de parámetros acústicos que miden la calidad de salas de conciertos. *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica. Logroño*, España. [online]. [obtenida el 09/11/2006] disponible en: <<http://www.sea-acustica.es/publicaciones/4355fw038.pdf>>
- Oguchi, K. 2007. Miniature loudspeaker for acoustical scale model test. *International Symposium on Room Acoustics. Seville, Spain*.
- Pedrero, A., Díaz, C., López, D. 2000. Un nuevo método de medida de la energía lateral en recintos. *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica*. España.
- Proy, R.R. y Herranz, P.K. 2003. ¿por qué no evaluar también la calidad acústica subjetiva de las viviendas? *TecniAcústica. Congreso Nacional de Acústica*. España
- Smith, A., Bermúdez, J., Striefel, S. 2002. Visualizando la naturaleza no-visual de la arquitectura. University of UTAH. *Proceedings of the 6th Iberoamerican Congress of Digital Graphics*. [obtenida el 14/05/07] disponible en: <<http://www.cumincades.scix.net/data/works/att/ae8d.content.pdf>>

## **CURRÍCULUM VITAE DE LA AUTORA:**

Arquitecta egresada de la Universidad Autónoma Metropolitana con la distinción de la Medalla al Mérito Universitario en el 2003.

Desde el 2004 se ha desempeñado como arquitecta para empresas como K-B/Tel Telecomunicaciones, S.A. de C. V. y Heliocol de México, empresa dedicada a la importación e instalación de equipos solares para el calentamiento de agua a través de energía solar.

Ha trabajado como asistente en diseño y realización de escenografía y utilería teatral y de espectáculos para la empresa Broadway México.

En el 2005 ingresa a la Especialización en Diseño, línea de Arquitectura Bioclimática, de la Universidad Autónoma Metropolitana, egresando en 2006 y obteniendo la Medalla al Mérito Universitario.

En el 2006 ingresa al programa de Maestría en Diseño, línea de Arquitectura Bioclimática, de la Universidad Autónoma Metropolitana.

En el 2008 alterna su actividad profesional con la docencia en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco en la división de CyAD, impartiendo materias de Tronco Común y Arquitectura.