



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio numérico de régimen de baja
frecuencia en medición de absorción en
cámara reverberante, aplicado al
problema de ruido urbano en viviendas**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Julio Octavio Rangel Flores

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Roberto Velasco Segura



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A Dios, por estar presente en cada una de las personas y sucesos que me trajeron hasta donde estoy. A mi mamá, por confiar en mí, comprenderme y apoyarme en mis ocurrencias, y por alentarme siempre a llegar más lejos (en todos los sentidos). A mi hermana, por su apoyo y por siempre ayudarme a encontrar el mejor camino. Ustedes fueron motivación y emoción por el conocimiento y por llegar al final de esta etapa, no hay palabras que expresen lo agradecido que les estoy y lo importantes que son para mí.

A mis primos: Alfonso, Gaby, Alfredo, y mis tíos y tías: Julieta, Maru, Martín y Fernando. Gracias por siempre estar presentes, por la paciencia, la calidez, y por manifestarme su invaluable apoyo durante toda la carrera, fue fundamental para lograr concluir. Realmente me siento en deuda con ustedes. Los quiero a todos.

A mi primo Andrés: gracias por siempre estar, por todas las alegrías, la compañía, el apoyo, por escucharme y motivarme, y por tantas aventuras en tan poco tiempo. “Otra cerveza por favor, que vengo celebrando”.

A mis tíos Norma y Andrés: gracias por tener siempre una mano tendida hacia mí en lo bueno y lo malo, por toda su confianza, por procurarme y acogerme como un hijo, y por siempre compartirme su pasión por aprender y explorar. A mi abuelita Norma, por su importante apoyo durante toda mi formación.

A la familia Vega: gracias por las enseñanzas, las experiencias, la compañía, la confianza y el aliento para seguir creciendo, tratándome siempre como parte de la familia. Ha sido muy importante su apoyo durante mi vida.

A mis amigos, por soportarme tantas ausencias y aún así siempre tener su amistad para mí: Enrique, Carlos, Tania Reyes, Valeria, Magali, Abel, Karla Cervantes, Gerardo, Mario, Viridiana. A mis amigos que tuve la fortuna de conocer en el paso por la facultad: Brayan, Fernanda del Río, Fernanda Garza, Mariana Rojas, Roberto, Chucho, Ricardo Silva.

A la Universidad, con quien tengo el compromiso de llevar su nombre en alto, por todas las experiencias y el aprendizaje que me ha ofrecido des-

de 2008. A la Facultad de Ingeniería, por todos los recursos que puso a mi disposición y por la formación que de ella recibí.

Al ICAT, por permitirme aprender, trabajar y experimentar en sus instalaciones. Primordialmente, a quienes conforman el Laboratorio de Acústica y Vibraciones: Felipe, Arturo, Antonio Pérez, Antonio Bautista, Ricardo, Jesús, Salvador, Erick, Omar; gracias por sus enseñanzas y su experiencia, la oportunidad que tuve de pasar dos años aprendiendo de ustedes ha sido invaluable.

A Roberto, mi director de tesis: gracias por el tiempo y la disposición que destinaste a mi trabajo y a mi formación, por las herramientas de trabajo, las técnicas, y por las charlas ajenas al tema que siempre eran agradables. Ah, y por la beca de café.

Agradezco especialmente a Andrés Pérez, Adolfo Esquivel, Jorge Torreblanca, y Jesús Pérez, por las facilidades y el apoyo para hacer uso de las instalaciones y recursos del CENAM, parte importante para el desarrollo del trabajo realizado.

Esta tesis marca el final de toda una etapa de formación que va más allá de solo una carrera, donde el apoyo de mucha gente fue fundamental para seguir adelante y buscar llegar más lejos. Todas las personas aquí mencionadas, y las que por olvido o por abreviación omití, fueron parte importante de este crecimiento, y les estoy completamente agradecido.

Índice general

Índice de figuras	6
Índice de tablas	8
Introducción	9
1. Conceptos de acústica arquitectónica y cuartos pequeños	11
1.1. Fundamentos de acústica	11
1.1.1. Ecuación de Helmholtz	11
1.1.2. El decibel	13
1.1.3. Índices acústicos	13
1.1.4. Coeficiente de absorción α_s	15
1.1.5. Impedancia acústica	17
1.1.6. Descripción modal	18
1.1.7. Campo difuso	19
1.2. Análisis de señales	20
1.2.1. Señales discretas	20
1.2.2. Transformada de Fourier	21
1.2.3. La función delta de Dirac	22
1.2.4. Respuesta en frecuencia y respuesta al impulso	23
2. El ruido urbano como contaminante	25
2.1. Ruido urbano, un problema de salud pública	25
2.2. Ruido urbano en viviendas	27
2.3. Problema del ruido de baja frecuencia en la acústica arquitectónica	28
3. Herramientas seleccionadas para el análisis acústico	30

3.1. Método de Elemento Finito	31
3.2. Ventajas esperadas del método numérico contra el método experimental	31
3.3. Geometría	33
3.4. Simulación	34
3.4.1. Actran	34
3.4.2. FEniCS Project	36
3.5. Postprocesamiento	38
3.5.1. Manejo de los resultados de simulación	38
3.5.2. Calculadora de tiempos de decaimiento	40
4. Análisis computacional de modelos geométricos propuestos	41
4.1. Análisis preliminares	42
4.2. Análisis principal	46
5. Resultados	49
5.1. Respuesta en frecuencia	49
5.2. Respuesta al impulso	52
5.3. Coeficientes de absorción	58
5.4. Campo acústico	60
6. Conclusiones	63
Bibliografía	67

Índice de figuras

1.1.	Curva de decaimiento de energía (<i>EDC</i>). La recta de ajuste lineal (amarillo) se traza con base en el segmento azul, que representa el T_{15} . Cerca de los 40 [s], la curva incrementa su pendiente hasta tender a $-\infty$	15
1.2.	Curva de decaimiento de energía con dos pendientes. Entre mayor sea la pendiente, menor será el tiempo de decaimiento de la componente correspondiente.	16
1.3.	Gráfica de una función delta.	23
3.1.	Modelo de la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones. El rectángulo en el suelo representa una muestra de material absorbente.	32
3.2.	Interfaz gráfica de Actran.	34
3.3.	PLTViewer, visor de resultados de respuesta en frecuencia.	35
3.4.	<i>Output map</i>	36
3.5.	<i>Field map</i>	36
3.6.	FEniCS Project.	37
3.7.	Docker.	37
3.8.	Respuesta en frecuencia experimental.	38
3.9.	Respuesta al impulso resultante.	39
4.1.	Cuarto con elemento curvo en una de las paredes	43
4.2.	Comparativa de respuesta en frecuencia del cuarto vacío, contra el cuarto con una pared curva.	43
4.3.	Ubicación de la fuente sonora (punto amarillo) y el micrófono (punto rojo).	44
4.4.	Comparativa de respuesta en frecuencia.	44

4.5.	Respuesta al impulso obtenida a partir de los resultados de Actran, $\Delta f = 1$ [Hz].	47
4.6.	Vista de la malla al interior del cuarto, para uso en FEniCS.	48
5.1.	Respuesta en frecuencia de cada grupo de datos utilizado.	50
5.2.	Respuesta en frecuencia de los cuatro grupos de datos, para frecuencias menores que 100 [Hz].	51
5.3.	Respuesta al impulso obtenida a partir de los resultados de Actran: (a) cámara sin absorción en la muestra (b) cámara con absorción en la muestra.	52
5.4.	Resultados experimentales, sin filtrar.	53
5.5.	Índices acústicos para dos bandas de octava, a partir de los resultados experimentales.	54
5.6.	Resultados obtenidos a partir de FEniCS, sin filtrar.	55
5.7.	Resultados obtenidos a partir de Actran, con $y = 1$ [mS], sin filtrar.	55
5.8.	Índices acústicos para dos bandas de octava, a partir de los resultados de FEniCS.	56
5.9.	Índices acústicos para dos bandas de octava, a partir de los resultados de Actran.	57
5.10.	Señal de Actran con $y = 1$ [mS], interpolada en frecuencia, con $\Delta f = 0.025$ [Hz]: (a) respuesta al impulso (b) <i>EDC</i>	58
5.11.	Campo acústico a 23.56 [Hz].	61
5.12.	Campo acústico a 52.08 [Hz].	61
5.13.	Campo acústico a 321.9 [Hz].	62

Índice de tablas

4.1.	Tiempos de ejecución, de acuerdo con la resolución en frecuencia.	46
5.1.	Parámetros utilizados en cada simulación.	49
5.2.	Tiempos de reverberación por bandas de octava.	53
5.3.	Coefficientes de absorción por bandas de octava, calculados a partir de las simulaciones.	59

Introducción

El ruido urbano es un contaminante que, desde hace varias décadas, se ha convertido en un problema de salud pública de las ciudades, debido al incremento en la densidad de población y a una regulación insuficiente por parte de las autoridades en cuanto a niveles permisibles. Un lugar importante que es afectado por él es la vivienda, que se considera un sitio donde las personas pueden descansar y realizar algunas actividades de esparcimiento, pero que en las zonas urbanas se ve afectado en este aspecto.

Por los riesgos y las molestias que supone, el ruido ambiental es objeto de estudio por parte de diferentes disciplinas, y como esfuerzo para combatirlo se han creado algunas normas que establecen parámetros tanto para medirlo como para controlarlo. No obstante, las herramientas con que se cuenta para mitigarlo en muchos casos tienen la limitante de ser válidas para estudios a partir de 125 [Hz] (dejando fuera lo que en este trabajo será referido como “régimen de baja frecuencia”); y para medirlo, en recintos cerrados presenta un campo acústico característico para el cual los procedimientos actuales no son aplicables. Son éstas las frecuencias de nuestro interés en este proyecto.

En este trabajo, se presentan los resultados de utilizar el método de elemento finito en el caso particular de la medición de absorción en cámara reverberante, para régimen de baja frecuencia, y su aplicación en el problema del ruido urbano al interior de la vivienda. El uso de software, orientado a este tipo de aplicaciones, ha sido explorado por algunos autores en las últimas décadas [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]; no obstante, al buscar literatura relacionada con el caso que nos ocupa, ninguno de los recursos encontrados estaba orientado a la acústica de cuartos. Es por ello que el estudio y resultados que se describen más adelante son aún de tipo exploratorio, dado que no se encontraron procedimientos específicos que hayan sido validados en una

normatividad establecida; a la vez, la información en este trabajo se presenta como un esfuerzo para contribuir a las herramientas con que se cuenta en la acústica arquitectónica, para el estudio de campo difuso y campo modal.

Dicho lo anterior, presentamos a continuación una breve descripción del contenido del trabajo:

En el primer capítulo se describen los conceptos teóricos que fundamentan nuestro trabajo y relacionan a la acústica arquitectónica con el análisis de señales. Se incluye una descripción resumida del procedimiento para calcular el coeficiente de absorción, con base en un estándar internacional.

En el capítulo dos, describimos al ruido urbano como contaminante, desde sus causas hasta sus consecuencias en la salud, y cómo afecta su presencia en las viviendas; también se describe de qué manera las componentes de baja frecuencia del ruido (en general) representan un problema para algunas mediciones en recintos cerrados.

El método de elemento finito se expone en el capítulo tres, bloque en que también se presentan los programas utilizados en las diferentes etapas que componen el proyecto, desde el diseño de los modelos, hasta los recursos con que se obtuvieron los índices acústicos y las respuestas al impulso filtradas por bandas.

El cuarto capítulo describe de manera conceptual el diseño de las simulaciones, y en el quinto se presentan los resultados obtenidos de éstas y su postprocesamiento; con base en lo anterior, en el capítulo seis se presentan las conclusiones.

Para facilitar la reproducibilidad y la posible continuación de este trabajo, los códigos de Matlab y FEniCS utilizados en el proceso se encuentran disponibles en Github, a través de las siguientes direcciones:

- Script para ejecutar la simulación numérica del cuarto:
<https://github.com/juliorf/fenics-room-analysis>
- Postprocesamiento de los resultados del análisis, para convertirlos de respuesta en frecuencia a respuesta al impulso:
<https://github.com/juliorf/freq-to-impulse-response>

Capítulo 1

Conceptos de acústica arquitectónica y cuartos pequeños

En esta sección se presentan de manera general, las bases teóricas de los conceptos más importantes utilizados a lo largo del presente trabajo. Está orientada a relacionar lo que concierne a la acústica arquitectónica (como el tiempo de reverberación o el coeficiente de absorción), con algunos conceptos correspondientes con el procesamiento de señales.

1.1. Fundamentos de acústica

1.1.1. Ecuación de Helmholtz

La ecuación para una onda viajera en una dimensión se define, de acuerdo con Barron [8], como:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

donde p es la presión acústica, t es el tiempo y c , la rapidez de propagación del sonido en el medio. Una solución para (1.1) puede escribirse como el producto de una función de amplitud A dependiente de la posición, y una

función armónica [8]:

$$p(x, t) = A(x)e^{-i\omega t} \quad (1.2)$$

Si sustituimos la ecuación (1.2) en la ecuación (1.1) e igualamos a cero, tenemos:

$$\frac{\partial^2 A(x)e^{-i\omega t}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A(x)e^{-i\omega t}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.3)$$

Después de hacer simplificaciones algebraicas, obtenemos como resultado:

$$e^{-i\omega t} \left(\frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2} + k^2 A(x) \right) = 0 \quad (1.4)$$

donde $k = \frac{\omega}{c}$. Dado que la función exponencial en general es diferente de cero, la ecuación (1.4) se cumple únicamente si:

$$\frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2} + k^2 A(x) = 0 \quad (1.5)$$

En tres dimensiones, la ecuación anterior se describe como una suma de derivadas parciales incluyendo a los ejes y y z :

$$\frac{\partial^2 A(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A(x, y, z)}{\partial z^2} + k^2 A(x, y, z) = 0 \quad (1.6)$$

Este resultado es mejor conocido como *ecuación de Helmholtz* [9]. Se le considera una versión de la ecuación de onda para estado estacionario, porque aunque la amplitud en un punto es constante, ésta es dependiente de la posición.

Por su parte, el número de onda k representa el número de veces que se repite la perturbación en la unidad de distancia y por un factor 2π , es decir, es la frecuencia espacial. Para un medio de propagación con pérdidas, a este parámetro se le puede asociar como parte imaginaria una constante de atenuación m que obligará a la onda a decrecer de forma exponencial [10]:

$$k = \frac{\omega}{c} - j\frac{m}{2} = \alpha - j\beta \quad (1.7)$$

1.1.2. El decibel

Las ondas sonoras son perturbaciones mecánicas que producen breves variaciones de presión en el medio de propagación, y solo después de entrar al oído y pasar el proceso de transducción a señales electroquímicas es que se convierten en sonido [11]. Al tratarse de ondas de presión, su unidad es el pascal [Pa], equivalente a $\left[\frac{N}{m^2}\right]$.

El oído humano puede percibir sonidos con amplitud de presión desde $20 \mu Pa$ hasta $20 Pa$; esto es un rango dinámico muy grande pero también marca una amplia distancia entre límites superior e inferior, donde el primero es 1 millón de veces más grande que el segundo. Por esto, y porque la percepción de la presión por parte del oído humano está relacionada con una escala logarítmica [11], es más común y sencillo medir el sonido en una escala de este tipo. De manera estándar, esta cuantificación se realiza mediante decibeles de nivel de presión sonora (*SPL*, *Sound Pressure Level*) [11]:

$$SPL[dB] = 20 \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (1.8)$$

donde:

p = presión acústica, en [Pa]
 p_{ref} = presión de referencia, $20 [\mu Pa]$

Por otra parte, en relación con la frecuencia del sonido, para un oído sano es posible escuchar sonidos desde $20 [Hz]$ hasta $20 [kHz]$ (en los primeros años de vida, después se va reduciendo el intervalo).

1.1.3. Índices acústicos

En el estudio de acústica de cuartos existen dos indicadores muy importantes para conocer el comportamiento del recinto, dado que aportan información fundamental acerca de éste, y se les conoce como *Tiempo de reverberación* y *Curva de decaimiento de energía*.

Tiempo de reverberación

En la última parte del siglo XIX e inicios del siglo XX, Wallace Clement Sabine estudió el campo de la acústica arquitectónica y realizó valiosas aportaciones en esta rama, entre ellas está el concepto de *tiempo de reverberación*. Éste se refiere al periodo que le tomará a un sonido en un punto dentro de un recinto, para atenuarse 60 [dB] a partir de que generó un estado estacionario; al calcularlo mediante la siguiente ecuación, se le denomina *tiempo de reverberación de Sabine* T_{Sab} [9]. Cabe mencionar que el valor de 0.161 está expresado en $\left[\frac{s}{m}\right]$:

$$T_{Sab} = \frac{0.161 V}{A} \quad (1.9)$$

donde

V = volumen del cuarto [m^3]

A = absorción sonora total, en Sabine métrico [m^2]

En la práctica, difícilmente se alcanzará a medir una atenuación de 60 [dB] debido a condiciones de ruido de diferente tipo, por lo que el decaimiento se considerará aceptable si su *curva de decaimiento de energía* (la cual se define a continuación) tiene una pérdida de al menos 30 [dB], con una o varias pendientes constantes, antes de tender a $-\infty$ (fig. 1.1). Por lo tanto, una aproximación más adecuada [12] para el tiempo de reverberación es: el tiempo que le *tomaría* a un sonido en un punto dentro de un recinto, en atenuarse 60 [dB] siguiendo la recta de ajuste resultante de aplicar regresión lineal, sobre la región de la curva de decaimiento que mejor se aproxime a una recta; en el caso de la figura 1.1, este segmento recorre 15 [dB] (de -5 [dB] a -20 [dB]). A esta medición se le denota T_{15} ; si se usan 20 [dB] o 30 [dB] para el ajuste lineal, se denota T_{20} o T_{30} [12].

Curva de decaimiento de energía

El método de la *curva de decaimiento de energía* o *EDC* (del inglés *energy decay curve*), mencionado previamente, fue desarrollado por Manfred R. Schroeder a mediados del siglo XX como una nueva manera de calcular el tiempo de decaimiento. Se describe matemáticamente como la integral

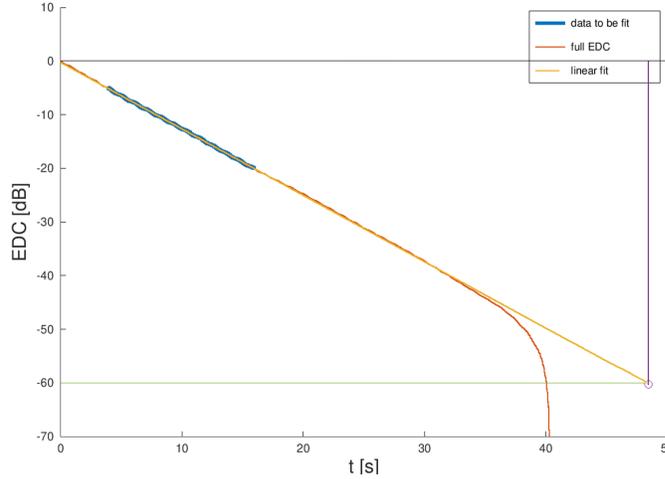


Figura 1.1: Curva de decaimiento de energía (EDC). La recta de ajuste lineal (amarillo) se traza con base en el segmento azul, que representa el T_{15} . Cerca de los 40 [s], la curva incrementa su pendiente hasta tender a $-\infty$.

definida de la respuesta al impulso elevada al cuadrado [13]:

$$EDC(t) = \int_t^\infty h^2(\tau) d\tau \quad (1.10)$$

La figura 1.2 muestra una curva de decaimiento típica, donde se presentan diferentes pendientes de acuerdo con la rapidez con la que se atenúan las diferentes componentes de la banda de frecuencia [12].

1.1.4. Coeficiente de absorción α_s

Se define como el cociente del área equivalente de absorción A_T de una muestra, entre su área total S (ecuación (1.11)) [14]. El resultado normalmente es un valor entre cero y uno, donde el primero representa a un material que no absorbe nada, y el segundo, a un material totalmente absorbente. Sabine definió como convención que este último es como una ventana abierta, sin efectos de difracción, con un área de 1 m^2 , donde una vez que el sonido sale ya no vuelve a entrar [11]; ésta cantidad se conoce también como 1 *Sabine métrico*.

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (1.11)$$

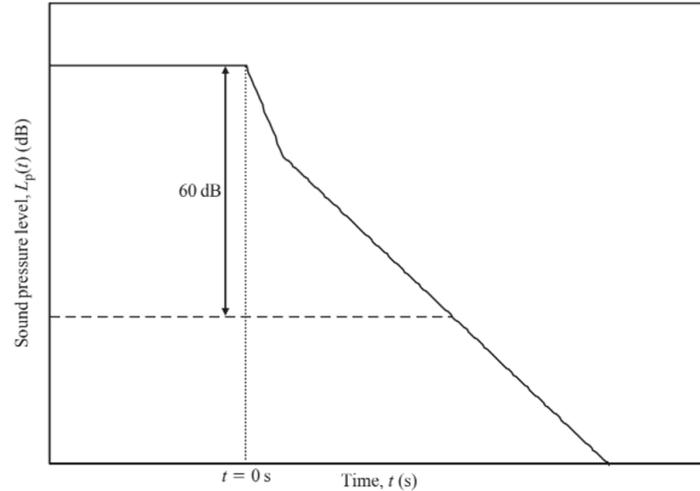


Figura 1.2: Curva de decaimiento de energía con dos pendientes. Entre mayor sea la pendiente, menor será el tiempo de decaimiento de la componente correspondiente.

El procedimiento que plantea la norma ISO 354 [14] para calcular el coeficiente de absorción de una muestra, a grandes rasgos, es el siguiente:

1. Se realizan múltiples mediciones de tiempos de reverberación (en nuestro caso T_{15}), con diferentes posiciones de micrófonos y de fuente sonora, y el producto del número de posiciones de uno y otro debe ser igual o mayor que 12; esto se aplicará para el cuarto vacío, y para el cuarto con la muestra absorbente,
2. Se calcula la media aritmética de los resultados, por bandas,
3. Con base en los tiempos de reverberación promedio por banda, se calcula el área equivalente de absorción para el cuarto vacío (A_1), y para el cuarto con muestra (A_2), con base en la ecuación (1.12)

$$A_{1,2} = \frac{0.161 V}{T_{1,2}} - 4Vm_{1,2} \quad (1.12)$$

donde:

- V = volumen [m^3]
- c = rapidez del sonido en el aire [$\frac{m}{s}$]
- T_1 = tiempo de reverberación del cuarto vacío [s]
- T_2 = tiempo de reverberación del cuarto con muestra [s]
- $m_{1,2}$ = factor de compensación por pérdidas en el aire

4. Mediante una resta, se obtiene el valor de A_T (ecuación (1.13))

$$A_T = A_2 - A_1 \quad (1.13)$$

5. Se resuelve la ecuación (1.11) sustituyendo los valores correspondientes.

1.1.5. Impedancia acústica

La *impedancia acústica* de un material indica su oposición natural al paso de presión acústica. La cantidad de sonido que puede disipar una superficie está relacionada con dicha característica, la cual se define como [15]:

$$Z = \frac{p}{u} \quad (1.14)$$

donde:

- p = amplitud de presión
- u = rapidez de partícula

En un cuarto, el coeficiente de absorción α de los materiales presentes depende también de la *impedancia acústica específica* de cada uno de ellos, la cual es la relación entre la impedancia de un material y la impedancia del aire [15]:

$$z = \frac{Z}{\rho_0 c} \quad (1.15)$$

donde:

- Z = impedancia del material
- ρ_0 = densidad del aire
- c = rapidez del sonido en el aire

El recíproco de de la impedancia acústica específica se conoce como *admitancia acústica específica*, y se denota con la letra y (ecuación (1.16)):

$$y = \frac{1}{z} \quad (1.16)$$

1.1.6. Descripción modal

Los modos son soluciones de la ecuación de Helmholtz en los casos donde no hay forzamiento. En términos comunes, son las ondas estacionarias de un cuarto; se distinguen por tener puntos definidos de máxima amplitud y por manifestarse en un sistema cuando se encuentra en estado estacionario.

Cabe mencionar que los diferentes materiales al interior del cuarto también repercuten en su respuesta en frecuencia (concepto a definir más adelante), lo que se manifiesta como pequeños corrimientos en los modos, o también como la disminución en la amplitud de un intervalo de dicho espectro.

Un ejemplo típico de este tipo de análisis, consiste en considerar un cuarto rectangular sin obstáculos internos, cuyas posibles frecuencias de resonancia acústica o *modos* f_N se pueden calcular mediante la siguiente ecuación [16]:

$$f_N = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{N_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{N_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{N_z}{L_z}\right)^2} \quad (1.17)$$

donde:

- c = rapidez del sonido en el aire $\left[\frac{m}{s}\right]$
- $N_{x,y,z}$ = número de modo, pertenece a los números naturales
- $L_{x,y,z}$ = dimensiones del cuarto $[m]$

Para el cuarto en cuestión, los modos se pueden clasificar en tres categorías, las cuales se consideran para geometrías generales [17]:

- Axiales: donde las ondas viajan en la dirección de un solo eje, como su nombre lo indica

- Tangenciales: en este caso las ondas trazarán una trayectoria entre dos ejes, describiendo el plano del tercero
- Oblicuos: se generan cuando la onda estacionaria viaja entre los tres ejes.

Si excitamos el cuarto con una fuente sonora, tendremos que las ondas viajarán y se reflejarán en el espacio y, luego de un lapso, alcanzarán el estado estacionario. Las amplitudes de los modos presentes en el campo acústico resultante, serán característicos de la ubicación espacial de la fuente. Adicionalmente, si se mide con un micrófono, las amplitudes registradas dependerán de la ubicación del mismo. Por lo tanto, para cada posición de ambos, la respuesta al impulso del cuarto será diferente; dicho concepto se definirá más adelante.

1.1.7. Campo difuso

El campo sonoro en el estado estacionario, se esperaría que para algunas aplicaciones fuera tal, que, al colocar un micrófono en diferentes puntos y direcciones dentro del cuarto, la amplitud en todo el espectro de frecuencia siempre fuera la misma o tuviera variaciones dentro de un rango permitido; esto es, un *campo difuso*. Tal condición es deseable por ejemplo, para poder realizar mediciones repetibles en cualquier lugar del recinto. Cabe mencionar que algunos estándares indican la tolerancia permisible en el nivel medido por banda de octava, la cual determina si un campo acústico es difuso o no. Sin embargo, en la realidad esto solo sucede de manera aproximada, dependiendo de la frecuencia. En el caso de la acústica de cuartos pequeños y especialmente para las frecuencias abajo de 100 [Hz], el campo acústico típicamente no es difuso y tiene muy marcada la presencia de modos, tomando así el nombre de *campo modal*; esto dificulta algunos procesos de medición y representa un problema que hace décadas ha sido objeto de estudio y que abordaremos en el capítulo 2.

Existe una zona de transición que separa al campo modal del campo difuso, cuya frecuencia límite ha sido llamada *frecuencia de Schroeder* [18],

y que se aproxima mediante la siguiente ecuación:

$$f = 2000 \sqrt{\frac{T_{Sab}}{V}} \quad (1.18)$$

donde:

$$\begin{aligned} T_{Sab} &= \text{tiempo de reverberación de Sabine [s]} \\ V &= \text{volumen del cuarto [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

1.2. Análisis de señales

1.2.1. Señales discretas

Son secuencias de elementos llamados *muestras* que definen los puntos específicos de una función dentro de un *periodo de muestreo* T_s , el cual se refiere a la duración temporal de la señal, bajo un espaciamiento normalmente uniforme de tamaño Δt (ecuación (1.19)); de acuerdo con esta separación se define a la *frecuencia de muestreo* f_s , que indica el número de muestras en cada segundo (ecuación (1.20)). Cada muestra se representa con la letra n , mientras que el tamaño del bloque de muestras que conforman a la señal se denota como N [19].

$$T_s = N \Delta t \quad (1.19)$$

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad (1.20)$$

La *resolución en tiempo* de la señal, como también se conoce a Δt , se define como el recíproco de f_s (ecuación (1.21)) y, manipulando algebraicamente las ecuaciones anteriores, tenemos que la *resolución en frecuencia* del bloque se obtiene del recíproco de T_s (ecuación (1.22)):

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (1.21)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} \quad (1.22)$$

Si observamos las ecuaciones (1.19) y (1.22), podemos deducir que una señal será más prolongada conforme: a) mayor sea su número de muestras, y b) la resolución en frecuencia tenga un valor más pequeño.

1.2.2. Transformada de Fourier

Es una operación para obtener la representación en el dominio de la frecuencia, a partir de una señal que está en el dominio del tiempo, y tiene una operación inversa. Según la dirección en que se aplique, tiene dos formas:

Transformada directa

Se refiere al paso de una función en tiempo $x(t)$ a una en frecuencia $X(\omega)$. El resultado es el espectro de frecuencia de la señal con su respectiva amplitud, en general compleja. Matemáticamente se define con la siguiente función [20]:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1.23)$$

Cabe mencionar que el resultado de la transformada es simétrico: las frecuencias en el lado positivo están presentes también en el negativo, pero conjugadas. Ambos lados son importantes para realizar la transformada inversa.

Transformada inversa

Es la operación inversa a la transformada directa; al aplicarla, se obtiene una señal en el tiempo compuesta de cada una de sus componentes espectrales. Está definida como:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (1.24)$$

En el caso de señales discretas, se utiliza la Transformada Discreta de

Fourier, la cual sustituye a la integral definida por la suma de las componentes de la señal. A diferencia de la transformada continua, la suma solo abarca el número de elementos de la señal. La ecuación (1.25) define la transformada directa, y la ecuación (1.26), la inversa [20]:

$$F[k] = \sum_{n=1}^N f[n] e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (1.25)$$

$$f[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F[k] e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (1.26)$$

Visto de otro modo, la composición de la señal en frecuencia es un conjunto de funciones exponenciales complejas cuya amplitud depende de la amplitud de las componentes en cada instante. La señal en tiempo, por su parte, se puede entender como la suma de cada una de éstas funciones [20].

1.2.3. La función delta de Dirac

Una de las alternativas para probar el funcionamiento de un sistema es el uso de la *función delta de Dirac* $\delta(t)$, que está definida por dos propiedades:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{si } t \neq 0 \end{cases} \quad y \quad \int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.27)$$

Lo que hace de ésta una función tan útil cuando se trata de sistemas físicos, en los cuales se introduce como señal de entrada, es que, en el dominio de la frecuencia tiene una amplitud uniforme para todo el espectro mientras que, en el dominio del tiempo, supone una prueba destructiva al introducir una señal de amplitud muy grande en un tiempo muy corto (figura 1.3), dado que todas sus componentes alcanzan su amplitud máxima en el mismo instante. En la práctica, es imposible hacer que la señal dure tan poco como se plantea y tampoco que sea uniforme en todas sus (finitas) componentes espectrales, sin embargo la aproximación es suficientemente buena para conocer el comportamiento de un sistema físico.

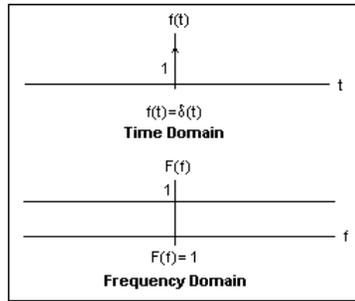


Figura 1.3: Gráfica de una función delta.

1.2.4. Respuesta en frecuencia y respuesta al impulso

De acuerdo con De Silva [21], la función de transferencia en frecuencia, mejor conocida como simplemente, **respuesta en frecuencia**, está definida como el cociente, en el dominio de Fourier, de la señal de salida entre la señal de entrada:

$$G(\omega) = \frac{Y(\omega)}{U(\omega)} \quad (1.28)$$

Dicha función es única y caracteriza al sistema en el dominio de la frecuencia para cualquier entrada, siempre que éste sea lineal; dicho de otra manera, describe las componentes espectrales de las que estará conformada la salida del sistema.

En el dominio del tiempo existe también una función de transferencia que caracteriza completamente al sistema, y es el resultado de utilizar la delta de Dirac $\delta(t)$ como entrada: la **respuesta al impulso** $h(t)$. Como se menciona al final de la sección 1.1.6, la respuesta del cuarto (sistema) dependerá de la posición de la fuente y del punto de medición; la salida del sistema $x(t)$ para cualquier entrada $p(t)$ será el resultado de la convolución entre ésta y $h(t)$ [22]:

$$x(t) = h(t) * p(t) \quad (1.29)$$

La respuesta en frecuencia y la respuesta al impulso se relacionan matemáticamente a través de la transformada de Fourier. A continuación, se presenta el procedimiento para llegar desde la función en tiempo a la función en frecuencia.

Partimos de la ecuación (1.29) en su forma integral:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)p(t - \tau) d\tau \quad (1.30)$$

Procedemos a sustituir (1.30) en (1.23) para aplicar la transformada directa de Fourier:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)p(t - \tau) d\tau \right) e^{-j\omega t} dt \quad (1.31)$$

Reescribiendo:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)p(t - \tau)e^{-j\omega t} dt d\tau \quad (1.32)$$

Aplicamos un cambio de variable para poder expresar a $p(t - \tau)$ en términos únicamente del tiempo:

$$\beta = t - \tau \quad (1.33)$$

$$d\beta = dt \quad (1.34)$$

Sustituyendo (1.33) y (1.34) en la ecuación (1.32) tenemos:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)p(\beta)e^{-j\omega(\beta+\tau)} d\beta d\tau \quad (1.35)$$

La integral doble puede reescribirse como dos integrales separadas, una para cada variable de integración:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} p(\beta)e^{-j\omega\beta} d\beta \quad (1.36)$$

Por lo tanto, de acuerdo con la definición de transformada de Fourier en la ecuación (1.23):

$$X(\omega) = H(\omega)P(\omega) \quad (1.37)$$

La ecuación (1.37) es prueba de que la respuesta en frecuencia de un sistema es el resultado de aplicar la transformada de Fourier a su respuesta al impulso, y se puede observar que ésta ecuación es análoga a la ecuación (1.29).

Capítulo 2

El ruido urbano como contaminante

2.1. Ruido urbano, un problema de salud pública

El incremento en la densidad de población de las ciudades es más notable en aquellas que cuentan con zonas industriales dentro o a su alrededor, cuya alta oferta de empleo ocupa a un porcentaje de trabajadores de la población local y promueve la migración (temporal o permanente) de capital humano de sitios más apartados como pueblos, municipios e incluso otras regiones de un país. Este grupo de personas, tan importante para la economía, co-habita con otros miles y hasta millones de habitantes que también han encontrado en las ciudades un lugar para ejercer un oficio o profesión en diversas áreas como la educación, entretenimiento, salud, construcción, etcétera.

Las actividades humanas que se desarrollan de manera cotidiana en la mancha urbana se caracterizan por generar, de manera directa o indirecta, una gran cantidad de *contaminantes* (agentes que pueden producir reacciones desagradables y perjudiciales para las personas y seres vivos en el medio [23]) entre los cuales se encuentra el *ruido urbano*, el cual actualmente está subestimado.

2.1. Ruido urbano, un problema de salud pública

De acuerdo con Orozco Medina, *“los niveles de ruido en las ciudades dan cuenta de la situación crítica de tráfico vehicular, concentración de actividades, deficiencias viales y de planificación urbana, falta de regulación, inspección y vigilancia, patrones culturales y sociales de convivencia y recreación, entre muchas otras condiciones [...]”*. Esto significa que el ruido como factor contaminante es creado completamente por la acción humana a través de la vida diaria, y para definirlo se le ha dado el nombre de *ruido urbano*.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), a través de las Guías para el Ruido Urbano (*Guidelines for Community Noise*) [24], define como principales fuentes de emisión, y las que más aportan a este problema, a la circulación de transporte, la construcción, el ruido vecinal y las obras públicas.

Desde un punto de vista personal, el ruido ambiental es un agente subestimado en nuestra sociedad debido a que como problema de salud pública, todavía no se reconoce con la gravedad que amerita. Sin embargo, uno de los aspectos que lo hace dañino, es precisamente su cualidad de pasar inadvertido; García Beristain [23] lo describe de la siguiente manera:

Una característica fundamental del ruido como contaminante [...] es que sólo se constituye como tal mientras está siendo emitido, o sea que, una vez que termina su emisión, no deja huella en el ambiente [...]. Sin embargo, los efectos más perniciosos que el ruido es capaz de producir durante su emisión no desaparecen al igual que éste [...].

El problema continúa creciendo por la falta de una legislación integral para limitar el nivel de las emisiones, y por la escasez de vigilancia por parte de las autoridades para castigar el incumplimiento de los estándares existentes. México cuenta con Normas Oficiales Mexicanas (NOM) cuyo cumplimiento es de carácter obligatorio [25], orientadas a establecer los límites máximos permisibles de emisión de ruido para, por ejemplo, vehículos motorizados nuevos en planta o en circulación; otras están diseñadas para moderar el nivel de contaminación percibido en zonas habitacionales o alrededor de establecimientos mercantiles según el horario de operación, y algunas también para limitar la exposición a ruido en centros de trabajo.

Por otro lado, la constante exposición a este contaminante (al igual que otros) tiene repercusiones directas en la salud de las personas, principalmente psicológicas y fisiológicas. En su publicación *Burdens of disease from environmental noise* (“El peso de las enfermedades por ruido ambiental”) [26], la Organización Mundial de la Salud señala como principales consecuencias los siguientes padecimientos:

- Enfermedades cardiovasculares
- Problemas cognitivos
- Trastornos de sueño
- *Tinnitus*
- Irritabilidad

Es evidente que de los problemas enlistados, al menos el tercero se relaciona directamente con la calidad acústica de la vivienda (de acuerdo con lo mencionado previamente) y aunque el quinto también posee ese carácter, tiene mayor relación con aspectos psicológicos de cada persona. Hay que considerar que además del ruido que proviene de fuentes al exterior del hogar, también al interior hay personas o máquinas que lo generan y contribuyen al nivel total.

2.2. Ruido urbano en viviendas

En teoría, el hogar es el lugar adecuado para buscar reposo de los periodos de estrés que se viven en el día a día. Se esperaría que fuera un sitio con un nivel de ruido urbano muy bajo, de manera que no interfiera con las actividades de descanso, ocio y esparcimiento de quienes lo habitan. Sin embargo, diferentes factores se han ido encargando de que vaya perdiendo su cualidad de tranquilidad.

Aunque los derechos humanos establecen el derecho a una vivienda digna y adecuada, es un tema complicado en los sitios con alta densidad de población. En la construcción de vivienda, especialmente aquella orientada a ser

de bajo costo o a zonas populares, se ha seguido durante las últimas décadas una tendencia a construir en vertical en la que se ha prestado mínima atención en el diseño hacia un aislamiento acústico adecuado, para reducir la transmisión de ruido tanto entre pisos como entre cuartos vecinos. La legislación mexicana es insuficiente en este rubro; la norma más cercana a este propósito es la NOM-081-SEMARNAT-1994 [27] en su versión más reciente, que está orientada a la regulación de los niveles máximos de ruido para fuentes fijas en horarios diurno y nocturno, de acuerdo con las zonas de emisión (residencial, industrial, escuelas y eventos de entretenimiento).

2.3. Problema del ruido de baja frecuencia en la acústica arquitectónica

Durante varias décadas las bajas frecuencias han sido un tema importante de estudio en ésta rama de la acústica, principalmente por la complejidad de su comportamiento. Existen diferentes recursos para estudiar y tratar el ruido cuyas componentes están arriba de la banda de 125 [Hz] dada su cualidad de formar campo difuso en cuartos pequeños; no obstante, debajo de 100 [Hz] dejan de ser aplicables porque el campo que forman es un campo modal.

El problema que este régimen supone tiene dos componentes: la primera es que las ondas tendrán una longitud muy grande, lo que les permitirá rodear obstáculos con mayor facilidad, dificultando su atenuación; la segunda es que, al no tener herramientas para estudiarlo en cuartos pequeños, el poder controlar su presencia en estos recintos se vuelve muy complicado.

Las normas orientadas a las mediciones acústicas en relación con el problema descrito, particularmente la ISO 354 [14], indican las características de colocación que deben cumplir las configuraciones de micrófonos respecto a la(s) fuente(s) de ruido y otros objetos en el entorno, así como el procesamiento de datos, y consideran al campo medido como campo difuso de acuerdo con las bandas de octava a partir de 125 [Hz] hasta 4 u 8 [kHz], que es el intervalo para el que están diseñados tales estándares.

Sin embargo, dicha normatividad no considera las bandas por debajo de

este bloque, dado que en tal régimen no se garantiza la repetibilidad de las mediciones y, por lo tanto, ningún resultado se puede considerar representativo del sistema.

Desde el punto de vista de la vivienda, cada vez están más presentes los electrodomésticos y dispositivos que emiten frecuencias menores a 100 [Hz], lo cual se suma al ruido producido por otras fuentes en el hogar más aquel que proviene del exterior. Siendo el ruido urbano un problema tan serio y una amenaza para la salud, resalta la necesidad de encontrar opciones que contribuyan a mitigar la componente de baja frecuencia de este contaminante; por ello, en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del ICAT, estudiamos la medición de absorción en este régimen.

Capítulo 3

Herramientas seleccionadas para el análisis acústico

En este capítulo se presentan las herramientas que utilizamos en el desarrollo de nuestro trabajo, donde primero se ofrece una breve explicación acerca del Método de Elemento Finito y una comparación de su uso, contra la aplicación del método experimental.

Posteriormente, los recursos de software utilizados se agrupan en tres rubros según su aplicación: *geometría*, que es la etapa de diseño geométrico y de malla del cuarto, para su aplicación en la etapa de *simulación*, la cual describe de qué manera utilizamos a Actran y FEniCS, los dos programas de análisis por elemento finito de que se hizo uso en el proyecto. *Postprocesamiento*, la tercera etapa, presenta las herramientas que implementamos para transformar las respuestas en frecuencia obtenidas de las simulaciones, a respuestas al impulso de las cuales se obtengan índices acústicos tales como tiempo de reverberación y curva de decaimiento de energía (*EDC*).

3.1. Método de Elemento Finito

Las ecuaciones diferenciales son utilizadas como herramienta para describir sistemas dinámicos en general: campos eléctricos, esfuerzos en materiales, fenómenos térmicos, comportamiento de fluidos, etcétera. Cuando se trata de casos donde no es trivial tener una solución analítica, se requiere del uso de métodos que permitan encontrar soluciones aproximadas. Entre ellos se encuentran los métodos numéricos, y de manera particular, el método que hemos usado en este estudio: el *método del elemento finito* (FEM, del inglés *finite element method*).

La base del FEM es la partición de un dominio en un número finito de elementos más pequeños, en cada uno de ellos la ecuación diferencial sigue siendo válida pero ahora se puede aproximar su solución con un polinomio de orden bajo. De acuerdo con Whiteley [28], existen dos características que hacen de este método, una herramienta muy versátil: la primera, que si buscamos una solución más exacta podemos dividir los elementos en regiones aún más pequeñas, o incrementar el orden de la aproximación polinomial; y segunda, que puede manejar dominios de formas arbitrarias representadas mediante *mallas* (un conjunto de puntos y líneas interconectados que representan al modelo particionado).

3.2. Ventajas esperadas del método numérico contra el método experimental

Para cumplir con una norma como la que fundamenta el presente trabajo (ISO 354 [14]) se hace uso de un cuarto adecuado, la cantidad necesaria de material absorbente (figura 3.1) y un sistema de adquisición de datos que permita hacer uso de varios micrófonos simultáneamente, de manera que se pueda obtener una cantidad suficiente de información para conocer el campo acústico en los puntos de medición. Sin embargo, con ésta técnica no es posible conocer el campo sonoro en el recinto, y es limitado el número de micrófonos que se pueden utilizar para obtener las diferentes respuestas al impulso del cuarto.

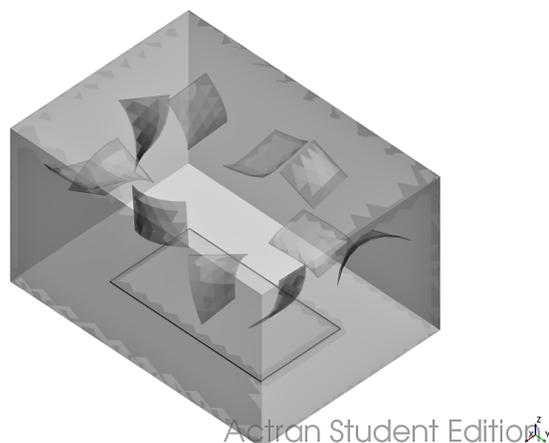


Figura 3.1: Modelo de la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones. El rectángulo en el suelo representa una muestra de material absorbente.

Ante tal problema, la simulación por computadora es una herramienta que no se ve afectada por éstas limitaciones de la experimentación y por ello se le considera un recurso valioso para el estudio de algunos fenómenos de la acústica arquitectónica.

Uno de los principales beneficios que observamos en el uso de simulación es que, contrario al método experimental, se puede colocar un número ilimitado de micrófonos virtuales que no requieren de hardware para funcionar y que además trabajan todos de manera simultánea, de manera que con un sólo análisis se pueden obtener los resultados para todas las configuraciones que buscamos.

No obstante, el tiempo que consume el proceso es mayor conforme: a) la malla tenga más elementos (ya sea por dimensiones del cuarto modelado, o por una malla refinada de acuerdo a la frecuencia máxima de análisis), b) el intervalo de frecuencia sea más grande y, c) el tamaño de los pasos sea menor; en todos los casos, hay que sumar el proceso de diseño del cuarto, caracterización de la simulación, y post-procesamiento de resultados. En consecuencia, ésta opción no siempre será una herramienta que pueda competir con una medición experimental, además de que, preferiblemente, su uso se debe acotar a frecuencias menores de 500 [Hz] [7].

El uso de simulaciones permite realizar acciones que en la realidad son mucho más complicadas, como cambiar las propiedades del material absorbente de prueba, agregar o quitar micrófonos, e incluso modificar las dimensiones y características del recinto. En la práctica estos cambios podrían significar pérdidas de tiempo o de recursos económicos, pero en el caso del método numérico éstas se minimizan o incluso desaparecen.

Por otro lado, el uso de FEM ofrece la opción de visualizar el campo acústico completo sobre el modelo gráfico. Ésta es una herramienta clave para conocer mejor el comportamiento del sistema y aventaja al método experimental porque no es necesario colocar micrófonos para obtener una descripción del campo acústico en el modelo, ya que se conforma por la solución de la ecuación de Helmholtz para cada elemento de la malla. Los resultados al respecto se encuentran en la sección 5.4.

3.3. Geometría

La absorción en las paredes es un parámetro que repercute en la respuesta al impulso de un cuarto, no obstante, su geometría interna es la principal característica que la define.

El recinto, sus difusores y la pieza de material absorbente fueron diseñados en FreeCAD, un software de código abierto para diseño asistido por computadora; la malla se generó en el mismo, cuidando que el tamaño de los elementos fuera el adecuado para el funcionamiento correcto del FEM sobre todo el intervalo de frecuencia. Es decir, cuidamos que el tamaño de la mayoría de los elementos fuera la cuarta parte (o menos) de la longitud de onda de la frecuencia máxima de análisis de acuerdo con la documentación de Actran [29], una de las dos plataformas para elemento finito de las que se hablará más adelante.

3.4. Simulación

3.4.1. Actran

Fabricado por MSC Software, Actran es una plataforma comercial para simular el comportamiento acústico de sistemas físicos a través del método de elemento finito. Cuenta con herramientas para diseñar y manipular cuerpos sencillos en una, dos y tres dimensiones espaciales, análisis de campo libre, generación de mallas tridimensionales, importación de mallas en algunos otros formatos; por otro lado, permite caracterizar los modelos con materiales de diferente naturaleza: fluidos, sólidos rígidos, placas, sólidos porosos, membranas, etcétera. Para excitar al sistema cuenta con fuentes de ruido y otras condiciones de frontera, y para obtener información en puntos específicos del modelo se puede colocar un número ilimitado de micrófonos. Todo ello se puede manejar desde la interfaz de usuario (figura 3.2).

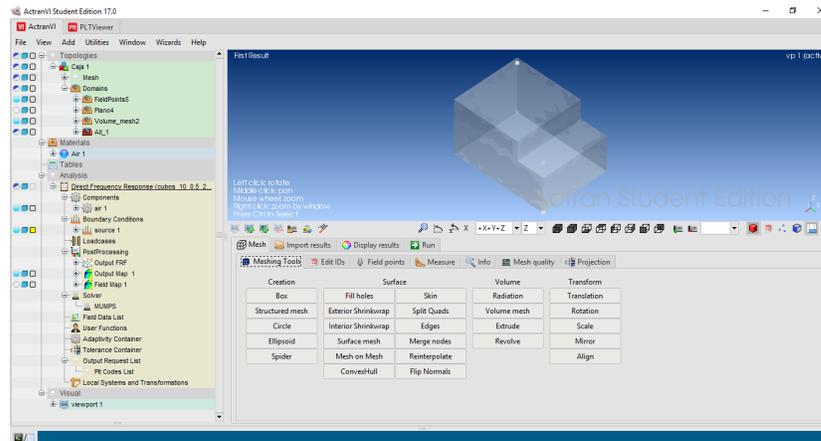


Figura 3.2: Interfaz gráfica de Actran.

Utilizamos la licencia de estudiante durante la mayor parte de la etapa de diseño del experimento, que ofrece una versión del programa con restricciones en sus funciones. Algunas de ellas son la limitación en el número de elementos del modelo, y una disminución en las condiciones de frontera disponibles.

Actran almacena los resultados de simulación en un archivo de texto,

donde incluye la amplitud de la presión para cada paso de frecuencia del análisis. Las gráficas de respuesta en frecuencia del sistema se pueden apreciar en PLTViewer, el visor de resultados integrado (figura 3.3).

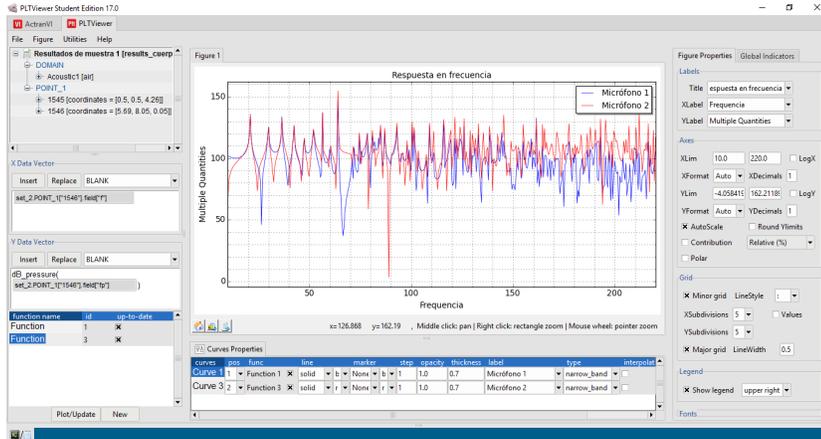


Figura 3.3: PLTViewer, visor de resultados de respuesta en frecuencia.

Las curvas pueden presentarse como la parte real o la parte imaginaria de la amplitud, o como decibeles (referidos a $20 \mu Pa$), entre otras, y es posible guardarlas como imagen o como un archivo de texto que contenga exclusivamente la información numérica de la gráfica.

Actran puede almacenar información específica en regiones asignadas, para visualizar el campo acústico sobre planos 2D. De esta manera se complementan los recursos para comprender el funcionamiento del sistema.

La representación visual muestra los resultados del sistema en estado estacionario para cada frecuencia, y puede hacerlo de dos maneras:

- *Output maps*: muestran el campo acústico en las fronteras de la componente del sistema a la que se asigne (figura 3.4),
- *Field maps*: a diferencia de los anteriores, representan el campo acústico sobre uno o varios planos previamente definidos y que no se pueden cambiar de lugar una vez obtenidos los resultados (figura 3.5).

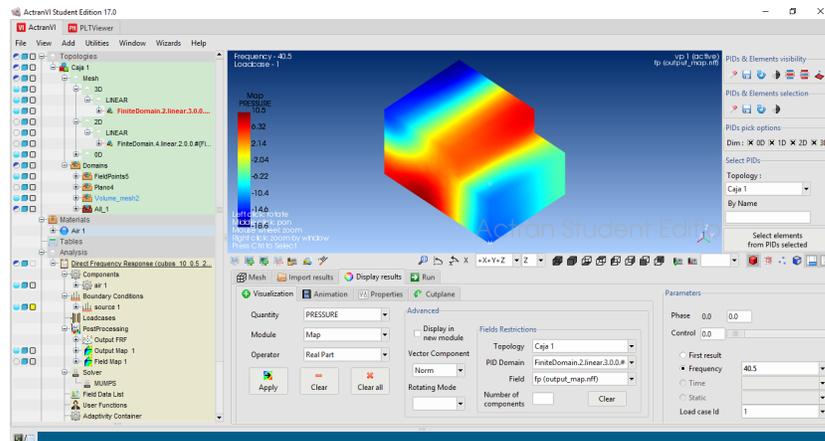


Figura 3.4: Output map.

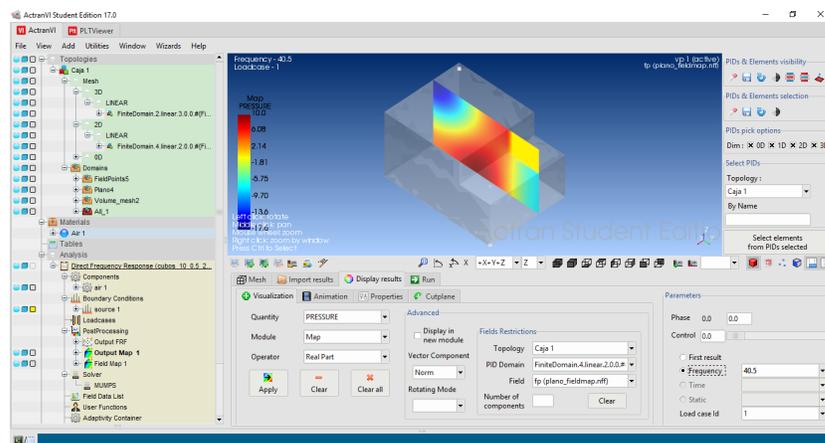


Figura 3.5: Field map.

3.4.2. FEniCS Project

En la actualidad casi cualquier software tiene su alternativa en código abierto, y los programas para elemento finito no son la excepción. Como alternativa de Actran se puede utilizar FEniCS, una plataforma FLOSS¹ para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales parciales; como no cuenta

¹del inglés *Free/Libre and Open Source Software*, software cuyo código fuente está disponible para que los usuarios puedan colaborar en su desarrollo.

3.5. Postprocesamiento

3.5.1. Manejo de los resultados de simulación

Utilizamos el lenguaje y las funciones de Matlab y Octave para diseñar una herramienta de postprocesamiento basada en las relaciones presentadas en la sección 1.2.4, que nos permita comparar los resultados de las simulaciones con los de referencia. Ésta herramienta está dividida en dos partes, la primera toma un archivo de audio de referencia, obtenido de mediciones experimentales, para acotar su contenido al intervalo de frecuencia que analizaremos; aplica la Transformada Discreta de Fourier sobre el grupo de datos, a través de un algoritmo estándar de FFT (*Fast Fourier Transform*, Transformada rápida de Fourier), y guarda el resultado (presión compleja como función de la frecuencia) en un archivo de texto con el mismo formato que utiliza Actran al guardar la información de una gráfica. El objetivo es que la siguiente sección pueda procesar cualquier archivo de entrada sin diferenciación.

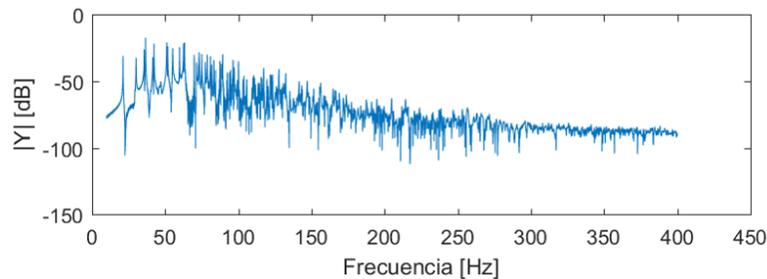


Figura 3.8: Respuesta en frecuencia experimental.

La segunda parte se enfoca en procesar el archivo que recibe, que está en el dominio de la frecuencia (figura 3.8), para convertirlo correctamente al dominio del tiempo, es decir, obtener su respuesta al impulso. Con el archivo de entrada, realiza 4 pasos fundamentales:

1. *Padding*: completa los valores de frecuencia desde cero hasta el primer elemento del vector y , desde el último elemento de éste, hasta la mitad

de la frecuencia de muestreo f_s de la señal, conservando la resolución en frecuencia del vector para que el algoritmo de FFT [30] funcione correctamente. Se utiliza este valor porque con el paso 2, se completará la f_s

2. *Reflejar*: duplica en sentido inverso el complejo conjugado del espectro, utilizando como pivote el último elemento y omitiendo el del inicio, y conjuga solo ésta sección
3. Normalización: se realiza de acuerdo con el algoritmo de FFT implementado por Matlab [31]
4. Transformada inversa de Fourier (figura 3.9)

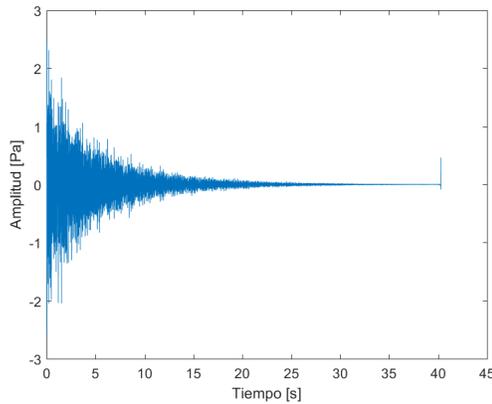


Figura 3.9: Respuesta al impulso resultante.

Para tener una respuesta al impulso correcta, ninguno de estos pasos se debe omitir. Sin embargo, hay un paso opcional que se puede realizar entre el 1 y el 2, el cual lo consideramos como una alternativa ante el caso de tener resultados con una baja resolución de frecuencia, problema que se presentó en este trabajo (con los resultados de Actran) y que se aborda al inicio de la sección 4. Este paso es la *interpolación en frecuencia*.

Tales resultados fueron interpolados de tal suerte, que la nueva separación entre muestras fuera aproximadamente la misma que en los datos experimentales. Se hicieron pruebas con cinco opciones para el método, todas agregando m puntos entre muestras:

- Ceros: agrega los puntos intermedios con amplitud nula,
- Repetición: repite m veces una muestra, antes de llegar a la siguiente,
- Interpolación lineal: aproxima los nuevos puntos mediante rectas,
- Interpolación no lineal
- Remuestreo: aplica filtros e interpolación no lineal para cambiar el número de muestras de la señal

En resultados no informados aquí, observamos que la interpolación lineal era la opción que ofrecía mayor fidelidad entre la respuesta en frecuencia original y la resultante de interpolar, por lo tanto fue el método que aplicamos y se comenta al final de la sección 5.2.

De manera opcional, cualquier grupo de datos procesado conforme a esta sección se puede almacenar como un archivo de audio; hicimos uso de este recurso, y en la siguiente sección se comenta cómo se utilizaron tales archivos.

3.5.2. Calculadora de tiempos de decaimiento

Utilizamos como base las herramientas de código desarrolladas por Garrido Hernández [16] para el cálculo de índices acústicos por bandas de octava en recintos, a partir de su respuesta al impulso. Como parte de este trabajo tales rutinas fueron extendidas para proporcionar información más específica, como las gráficas de respuesta al impulso y curva de decaimiento de energía, por bandas de octava (ver sección 5.2).

Los archivos de audio generados fueron procesados mediante tales funciones, para obtener resultados de tiempo de reverberación y curva de decaimiento desde la banda de 31.5 [Hz] hasta la de 250 [Hz]. Estos datos son importantes porque nos permitirán conocer sobre qué banda de frecuencia tiene mayor atenuación la muestra utilizada.

Capítulo 4

Análisis computacional de modelos geométricos propuestos

En este trabajo representamos mediante una malla tridimensional, la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT-UNAM), de 216.66 m^3 , con paneles difusores en su interior y una muestra de material absorbente en el suelo. Sobre este modelo aplicamos el método de elemento finito para conocer el comportamiento acústico del cuarto al ser excitado con frecuencias desde los 10 [Hz] hasta los 400 [Hz] , utilizando la posición de uno de los micrófonos con los que se obtuvieron los datos experimentales disponibles. Cabe mencionar que aunque actualmente se utiliza FEM de manera cotidiana en el diseño mecánico y otras áreas, su incursión en la acústica arquitectónica y especialmente en la acústica de cuartos es muy reciente: apenas en la última década ha recibido más atención.

Es importante mencionar que con el procedimiento utilizado para las simulaciones con Actran, específicamente debido a la baja resolución de frecuencia Δf , los resultados obtenidos en tal dominio mostraron una insuficiencia de muestras que se traducen en pérdida de información de las frecuencias más altas que fueron analizadas, lo que después del postprocesamiento (sección 3.5), y conforme a lo descrito en la sección 1.2.1, derivó en una respuesta al impulso de muy breve duración, cuya amplitud no disminuye lo suficiente para hacer una buena medición de tiempo de reverberación. La figura 4.2

presenta este bajo número de muestras para dos simulaciones distintas. Se verá en el capítulo de Resultados que este problema va a repercutir en todos los procedimientos que requieran, como punto de partida, de las señales generadas a partir de Actran.

4.1. Análisis preliminares

Con la intención de explorar los alcances del método numérico y corroborar resultados esperados para los primeros acercamientos, creamos algunas representaciones basadas en la cámara reverberante con modificaciones geométricas, incluida una del cuarto completamente vacío (como punto de comparación); en todos los casos, las paredes eran completamente reflejantes. Colocamos una fuente sonora en una posición arbitraria a una altura similar a la utilizada experimentalmente, y un micrófono en la esquina inferior más cercana a la fuente, con una separación de las paredes y del suelo de 5 [cm].

La velocidad del sonido fue $340 \left[\frac{m}{s}\right]$ y la densidad del aire, de $1.225 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$. En frecuencia, utilizamos un valor de Δf de 0.5 [Hz] para un intervalo de 10 a 143 [Hz], donde el segundo valor es el máximo válido para el modelo de referencia de acuerdo con el tamaño de los elementos de su malla tridimensional. Es pertinente señalar que en todas las simulaciones descritas se descartó la absorción en el aire.

Uno de los modelos que utilizamos para las pruebas se muestra en la figura 4.1, donde la fuente está indicada con un punto amarillo y el micrófono, con un punto rojo.

Al realizar el análisis sobre el modelo del cuarto modificado y sobre la cámara vacía (referencia), con los parámetros ya mencionados, obtuvimos la gráfica en la figura 4.2 que corresponde con la respuesta en frecuencia de cada uno (las muestras están marcadas con puntos). Se puede observar que arriba de 70 [Hz] los modos comienzan a estar más cerca entre sí, y la variación de amplitud se reduce; no obstante, no se puede confirmar que en esta región se encuentre la frecuencia de Schroeder, dado que al calcularla mediante la ecuación (1.18), utilizando un tiempo de reverberación de 48.46 [s], el resultado es 122 [Hz].

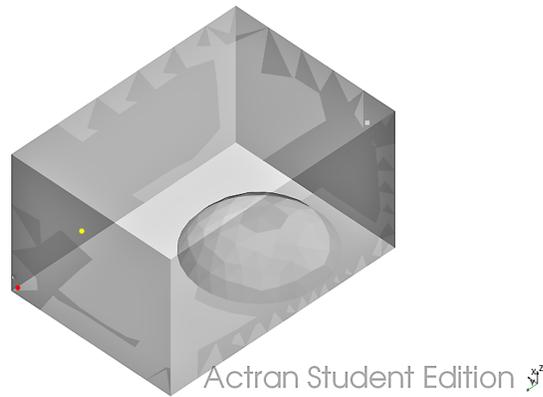


Figura 4.1: Cuarto con elemento curvo en una de las paredes

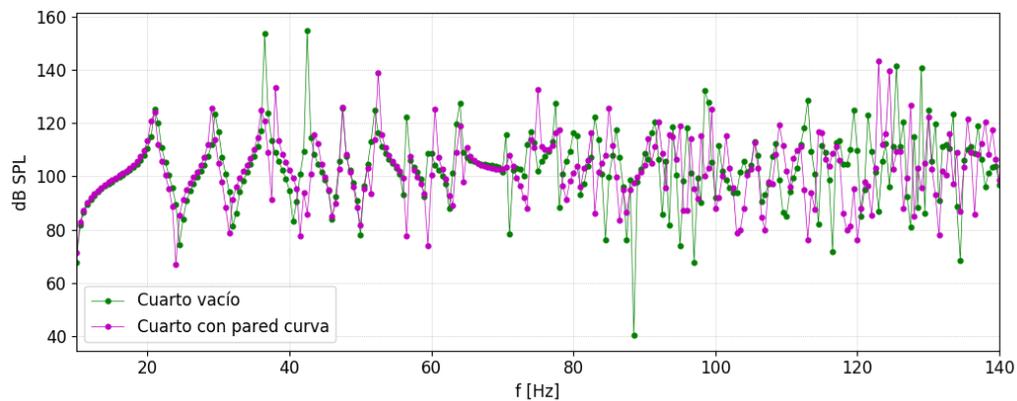


Figura 4.2: Comparativa de respuesta en frecuencia del cuarto vacío, contra el cuarto con una pared curva.

También se puede apreciar que la respuesta en frecuencia del modelo de prueba cambia significativamente respecto al de referencia: el modo que originalmente estaba en 36 [Hz] se dividió en dos modos (entre 36 y 38 [Hz]); el modo entre 42 y 43 [Hz] se atenuó unos 20 [dB] además de desplazarse 1 [Hz], aproximadamente; los primeros dos modos, alrededor de 21 y 29 [Hz], presentan un pequeño desplazamiento en frecuencia, al igual que otros modos presentes antes de 70 [Hz]. Luego de experimentar con estas simulaciones y observar cualitativamente los comportamientos esperados, que han sido descritos, desarrollamos el modelo principal de estudio: la representación de

la cámara reverberante con sus paneles difusores y una muestra absorbente en el suelo, donde los paneles son aproximados en tamaño, forma y ubicación a los reales y no se consideró la presencia de la puerta del cuarto. La muestra absorbente la representamos como un prisma rectangular de 5 [cm] de espesor (figura 4.3), y realizamos el análisis para los valores de absorción en la tabla 5.1.

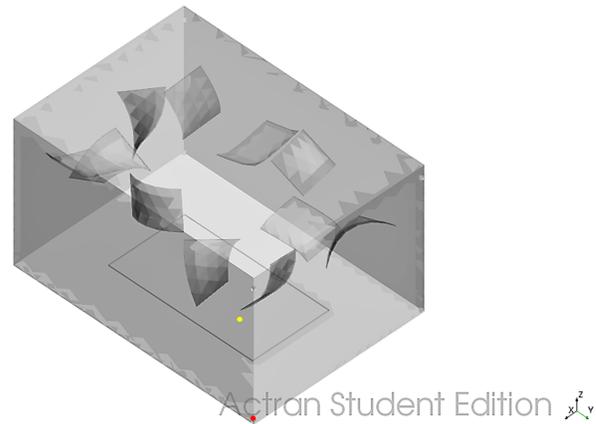


Figura 4.3: Ubicación de la fuente sonora (punto amarillo) y el micrófono (punto rojo).

Los resultados de este caso se muestran en la figura 4.4. De manera notable se observan los corrimientos en frecuencia de los modos entre 35 y 85 [Hz], que si bien su amplitud no tuvo grandes cambios dado que los paneles son muy delgados, fue el número de éstos lo que modificó el campo.

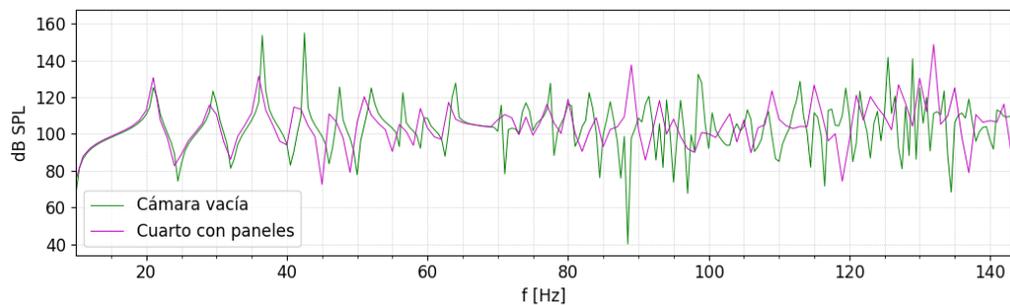


Figura 4.4: Comparativa de respuesta en frecuencia.

Cuando en la cámara reverberante real se realiza una medición de absorción como la que buscamos, se cuenta con los paneles difusores, la muestra absorbente (con sus propiedades físicas y su geometría) y características similares del medio; el micrófono y la fuente se colocan en posiciones definidas bajo criterios establecidos. En los modelos presentados en este trabajo, la fuente está en las coordenadas cartesianas (4.714,6.594,1.75) [m] y el micrófono, en (5.69,8.05,0.05) [m] (figura 4.3); el micrófono se colocó en la misma posición en que se generaron los resultados experimentales.

De la misma manera, luego de establecer una Δf de 1 [Hz] y de caracterizar el modelo para la simulación utilizando los mismos parámetros que en las pruebas anteriores (excepto por la cota superior del intervalo de análisis), definimos una condición de frontera de atenuación en la muestra absorbente y colocamos un micrófono que tendrá la misma posición para todas las simulaciones que se realicen.

En este punto es muy importante señalar que los resultados experimentales fueron obtenidos sin utilizar muestra absorbente, y evidentemente están influenciados por los efectos de disipación del aire y de las paredes.

Durante la etapa de pruebas, el tamaño de los elementos en la malla de los modelos era adecuado para su análisis hasta 143 [Hz]; sin embargo, para poder analizar el modelo principal hasta los 400 [Hz] utilizamos una malla con elementos más pequeños. Esto es una limitante para ejecutar la simulación con la licencia de estudiante de Actran, dado que establece un número máximo de elementos en el modelo; para resolverlo, utilizamos la licencia completa del software.

Esta parte del proyecto fue desarrollada durante una visita de cinco días al Centro Nacional de Metrología (CENAM) en la ciudad de Querétaro, Qro., bajo el apoyo de los doctores Jesús Pérez y Andrés Pérez, el maestro Adolfo Esquivel, y el ingeniero Jorge Torreblanca, dentro del proyecto titulado “Investigación y evaluación del efecto de la contaminación por ruido en viviendas de México”, CONACYT 213883. Nuestro propósito fue hacer uso de la licencia comercial de Actran con la que cuenta la División de Vibraciones y Acústica; en la versión completa del programa ejecuté las simulaciones utilizando una malla tridimensional con elementos de tamaño adecuado para cubrir todo nuestro intervalo de análisis (10 a 400 [Hz]).

Simulación	Plataforma	Δf [Hz]	Tiempo de procesamiento
1	Actran	1	1.5 horas
2	FEniCS	0.0248	11 días

Tabla 4.1: Tiempos de ejecución, de acuerdo con la resolución en frecuencia.

4.2. Análisis principal

Ejecutamos las simulaciones presentadas en la tabla 5.1, cuyos resultados son analizados en el capítulo 5. La simulación 1 se realizó con una Δf grande, mientras que la simulación 2 utiliza parámetros equivalentes a los de la señal experimental de referencia. Como se mencionará a continuación, el tiempo de procesamiento es un punto a considerar para elegir el valor de Δf .

En la tabla 4.1 se observa que el tiempo de procesamiento es proporcional a la cantidad de frecuencias calculadas, es decir, para f_{max} fijo es inversamente proporcional a Δf ; en ambos casos se considera que las mallas tienen un número equivalente de elementos. En el caso de Actran, se utilizó una resolución de 1 [Hz] debido a que el tiempo para utilizar la licencia comercial era limitado y, de acuerdo con nuestras estimaciones, tan solo utilizar una resolución 10 veces mayor habría extendido el análisis a 33 [h]; dado que se harían pruebas con diferentes valores de admitancia, no siempre era posible dejar el equipo trabajando fuera de horas hábiles, y desconocíamos la importancia de tener una resolución más alta, se optó por incrementar el tamaño de los pasos.

Por el contrario, una simulación tan prolongada, en el servidor del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del ICAT, es posible e incluso se puede realizar de manera más minuciosa. En el análisis que ejecutamos allí, utilizamos una Δf de 0.0248 [Hz], aproximadamente la misma de los datos experimentales, y como se muestra en la tabla 4.1 el proceso se completó en once días.

Debido al uso de un valor alto de Δf que se comentó previamente, la señal resultante del análisis en Actran dura solamente un segundo y su gráfica se encuentra trunca (figura 4.5). Aplicamos interpolación lineal con el objetivo de complementar la señal en frecuencia, para que su respuesta al impulso,

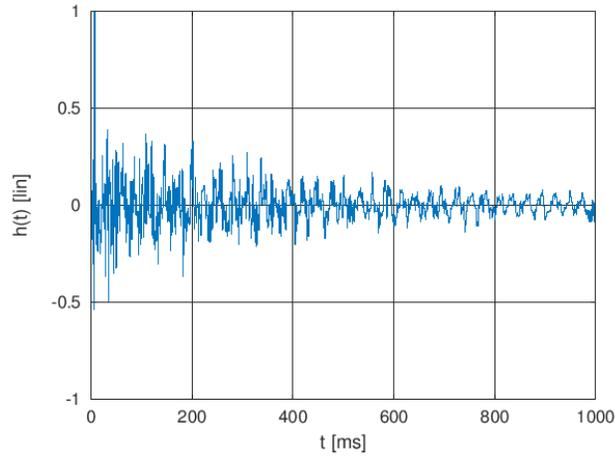


Figura 4.5: Respuesta al impulso obtenida a partir de los resultados de Actran, $\Delta f = 1$ [Hz].

en tiempo, alcance una amplitud suficientemente baja y la medición de su tiempo de decaimiento no se vea limitado por el truncamiento. Este método implica incrementar la duración de la señal, por lo que agregamos un número adecuado de elementos para que la señal resultante alcanzara los 40 [s], de acuerdo con la sección 3.5.1, que es la duración de la señal experimental. En la sección 5.2 se comenta acerca de qué tan útil fue este método.

La condición de absorción en Actran se definió mediante el parámetro de admitancia; por otra parte, en FEniCS el código disponible actualmente no permite establecer absorción en la frontera, por lo tanto se usó un valor complejo del número de onda k (ecuación (1.7)), en una región cercana al material absorbente en la cual, además, se refinó la malla (figura 4.6).

Los resultados del análisis descrito se encuentran en el capítulo 5.

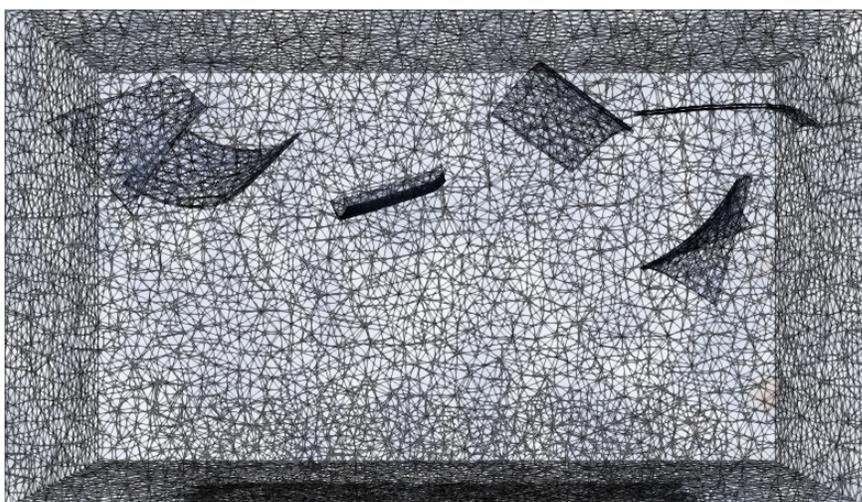


Figura 4.6: Vista de la malla al interior del cuarto, para uso en FEniCS.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones y del postprocesamiento descrito en la sección 3.5. Se clasificaron en cuatro rubros: Respuesta en frecuencia, Respuesta al impulso, Coeficientes de absorción, y Campo acústico.

Tales resultados están basados en las simulaciones de la tabla 5.1, la cual indica la Δf con la que se procesó cada una, así como la condición de absorción para cada caso.

5.1. Respuesta en frecuencia

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 4 acerca de los diferentes valores de absorción utilizados, la figura 5.1 presenta la respuesta en frecuencia del

Simulación	Δf [Hz]	Software	Condición de absorción
1	1	Actran	Admitancia: $Y = 1$ [mS]
2	1	Actran	Admitancia: $Y = 0$ [S]
3	0.0248	FEniCS	k compleja: $\text{Im}\{k\} = 4$

Tabla 5.1: Parámetros utilizados en cada simulación.

cuarto para cada uno de los grupos de datos utilizados, los cuales corresponden con la tabla 5.1 más los datos experimentales.

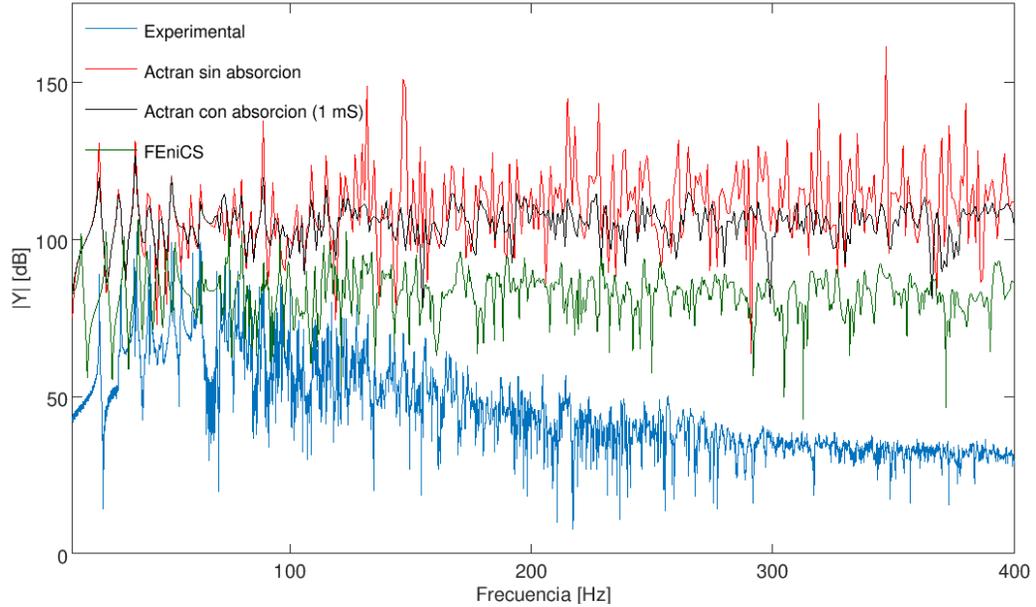


Figura 5.1: Respuesta en frecuencia de cada grupo de datos utilizado.

En dicha figura se observa que las curvas de Actran tienen un comportamiento muy diferente a partir de 100 [Hz], pues se hace evidente la presencia de la absorción, dado que los modos con mayor amplitud en la primera figura ya no aparecen en la segunda. Por otro lado, en la curva correspondiente a los datos experimentales se aprecia que el rango dinámico es de alrededor de 90 [dB], mientras que para los datos de las simulaciones es mucho menor (alrededor de 45 [dB] para Actran y 60 [dB] para FEniCS), y que además, para los casos numéricos, la magnitud presenta un *offset* que “sujeta” el rango dinámico del espectro: éste ocurre porque en las simulaciones utilizamos la misma absorción para todas las frecuencias, lo cual resulta en la misma atenuación para todo el espectro. Este comportamiento no ocurre en el caso experimental, donde la absorción es diferente para diferentes frecuencias, como se observa en la curva de los resultados experimentales, gracias a las características físicas del material además del efecto de absorción del aire, el cual no se puede descartar para este caso: la magnitud, a partir de 75 [Hz]

aproximadamente, disminuye conforme la frecuencia se incrementa, lo que significa tan solo el aire, sin considerar la presencia de una muestra absorbente, se comporta como un filtro pasabajas.

Cabe mencionar que debajo de 100 [Hz], hay modos que son comunes en los cuatro grupos de datos y otros que no (figura 5.2). Los que están en los datos experimentales pero no en los de simulación, pueden ser consecuencia de los efectos de la muestra absorbente y de la omisión de la absorción por el aire y las paredes; los que son diferentes entre simulaciones, además de tener una resolución diferente en la que se pudo perder información (para el caso de Actran), muy probablemente sean consecuencia de colocar los micrófonos virtuales en elementos cuyo tamaño ofrece un resultado más específico en ese punto.

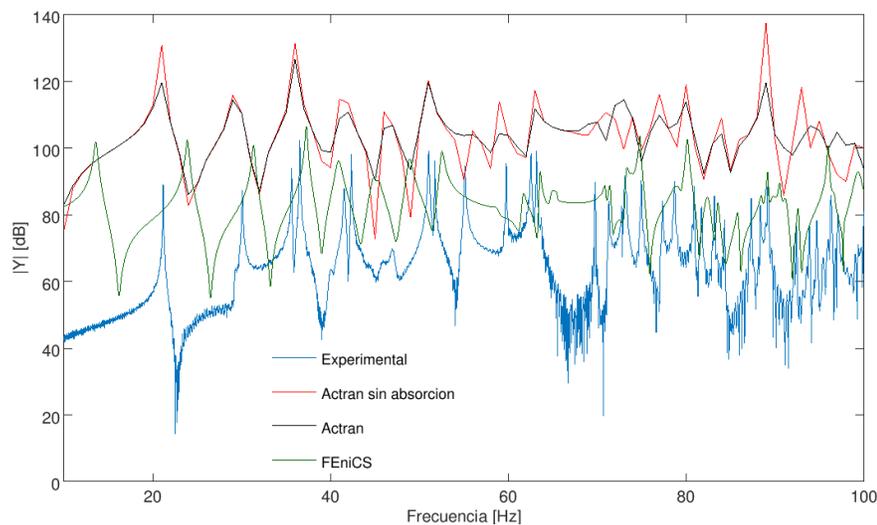


Figura 5.2: Respuesta en frecuencia de los cuatro grupos de datos, para frecuencias menores que 100 [Hz].

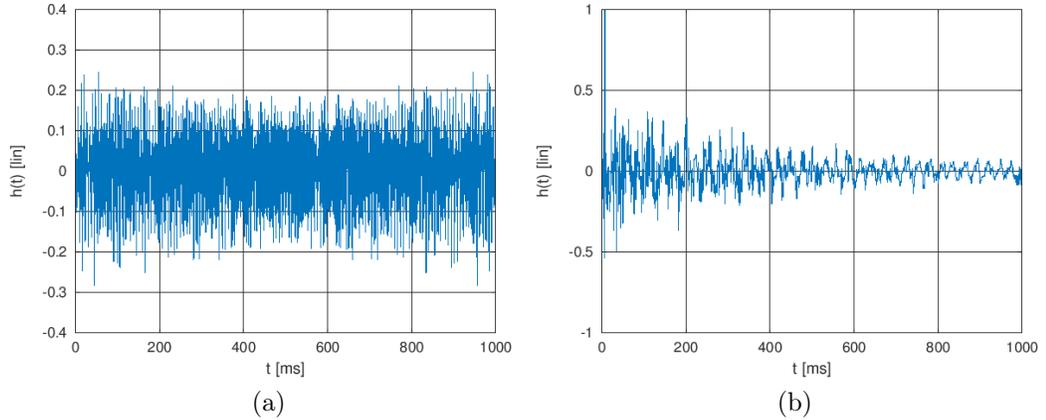


Figura 5.3: Respuesta al impulso obtenida a partir de los resultados de Actran: (a) cámara sin absorción en la muestra (b) cámara con absorción en la muestra.

5.2. Respuesta al impulso

En la figura 5.3 se aprecia que la condición de absorción sí modifica la respuesta al impulso del cuarto; dado que no consideramos la absorción del aire y no contamos con algún otro elemento para disipar energía, de acuerdo con la sección 1.1.1, la gráfica en 5.3a representa un estado de reverberación infinita.

Al procesar los datos experimentales conforme se indica en la sección 3.5.1, filtrando por bandas de octava, obtuvimos resultados de los cuales se muestra un ejemplo en la figura 5.4. En 5.4b se observa que la señal tiene una duración de 40 [s] y que su pendiente disminuye después del segundo 25; en 5.4a, por su parte, se muestra la señal cortada a los 35 [s]. El intervalo de diferencia fue eliminado de la respuesta al impulso por tratarse de un error despreciable, que posiblemente esté asociado con el fenómeno de Gibbs [20], y que se puede apreciar en la figura 3.9, en $35 \leq t \leq 40$ [s].

Como se explicó en la sección 5.1, el comportamiento de la señal experimental va ligado a una mayor absorción fuera del régimen de baja frecuencia dado que en este caso sí está presente la influencia del aire y de las paredes:

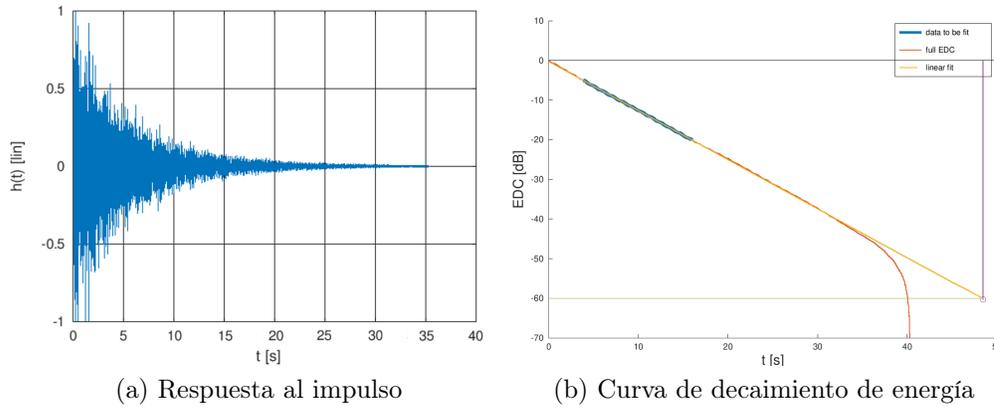


Figura 5.4: Resultados experimentales, sin filtrar.

en la figura 5.5 se observa que la aportación de la primera banda de octava a la señal es mucho mayor en amplitud y duración que la de la última banda, donde la absorción es más evidente.

La respuesta al impulso de los resultados de FEniCS se presenta en la figura 5.6a. Con apoyo de la figura 5.6b, se observa que la señal decae mucho más rápido que en los datos experimentales. Del mismo modo, en la figura 5.7 se observan las gráficas correspondientes para el caso de Actran, donde destaca la brevedad de la señal, la cual deja incompleta la información que se puede obtener acerca de tiempo de decaimiento pero que, sin embargo, sí representa de manera general los efectos de absorción en la muestra.

La tabla 5.2 muestra los resultados de tiempo de reverberación por bandas de octava, para las simulaciones. A modo de ejemplo, se presentan la respuesta al impulso y la curva de decaimiento de energía de dos bandas de cada grupo de datos, en las figuras 5.8 (FEniCS) y 5.9 (Actran).

Banda [Hz] Grupo	31.5	63	125	250
Actran	2.53	2.84	2.78	2.36
FeniCS	9.19	8.9	9.8	3.72
Experimental	48.46	41.08	29.4	30.73

Tabla 5.2: Tiempos de reverberación por bandas de octava.

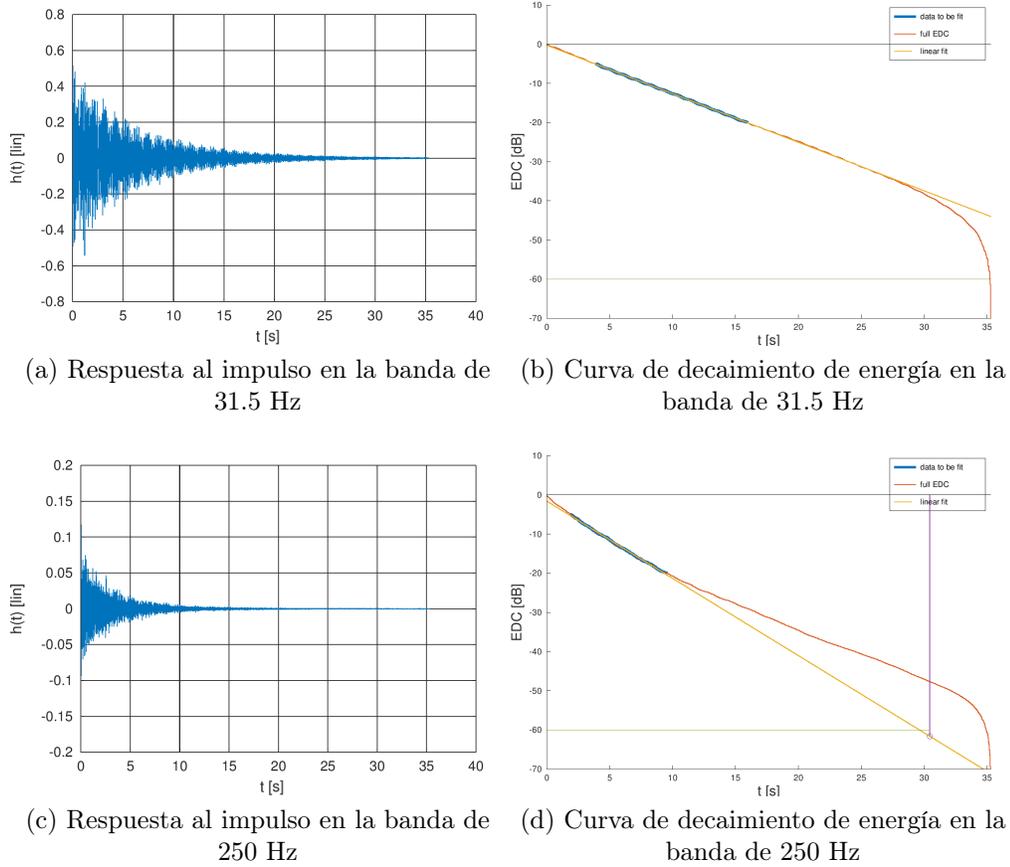


Figura 5.5: Índices acústicos para dos bandas de octava, a partir de los resultados experimentales.

Es importante señalar que para los resultados de FEniCS, se alcanza a apreciar de manera muy limitada que la curva de decaimiento presenta cambios en su pendiente, de acuerdo con lo mencionado al final de la sección 1.1.3. Para conocer si esto es consecuencia de la interacción del campo con la muestra, se requeriría realizar diferentes simulaciones colocando más regiones con condiciones de absorción, con el objetivo de verificar que dicho efecto se haga más fácil de visualizar.

En los datos generados a partir de Actran, no es posible comparar el decaimiento de su respuesta al impulso con el de los resultados experimentales, dada la brevedad de la señal obtenida; por el contrario, en los datos generados

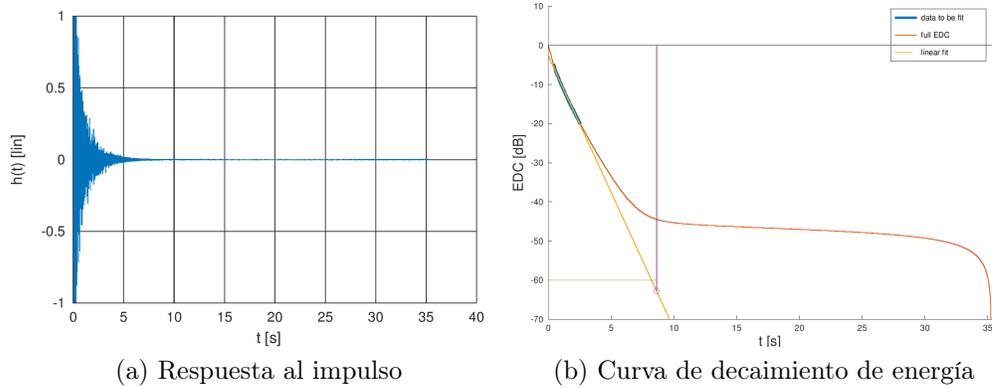


Figura 5.6: Resultados obtenidos a partir de FEniCS, sin filtrar.

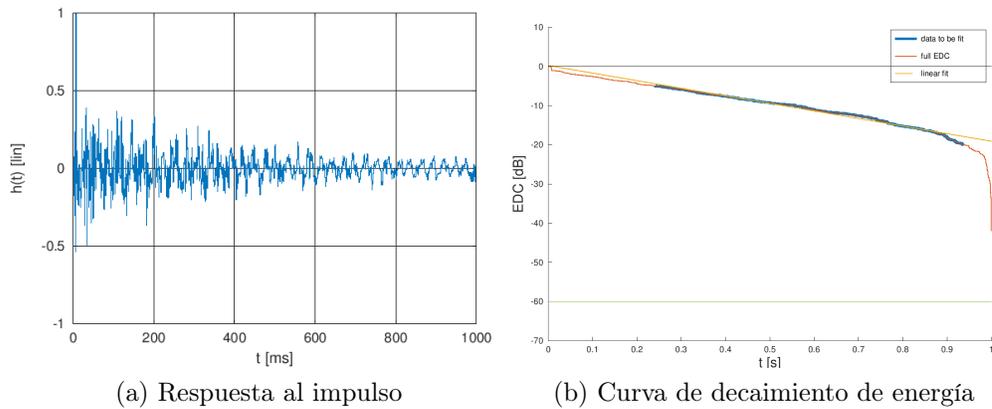


Figura 5.7: Resultados obtenidos a partir de Actran, con $y = 1 [mS]$, sin filtrar.

mediante FEniCS se hace evidente que el decaimiento de la señal ocurre con una pendiente mucho mayor que en el caso experimental. La curva de la figura 5.6b refleja esto y muestra también que la señal se atenúa, con pendiente prácticamente constante, hasta poco menos de -40 [dB], un nivel aceptable para considerar válida la medición, de acuerdo con lo que se comenta al final de la sección 1.1.3. La señal de Actran, por el contrario, muestra una curva de decaimiento (figura 5.7b) que de manera lineal desciende un poco más abajo de -20 [dB], lo que la hace insuficiente para calcular tiempos de reverberación.

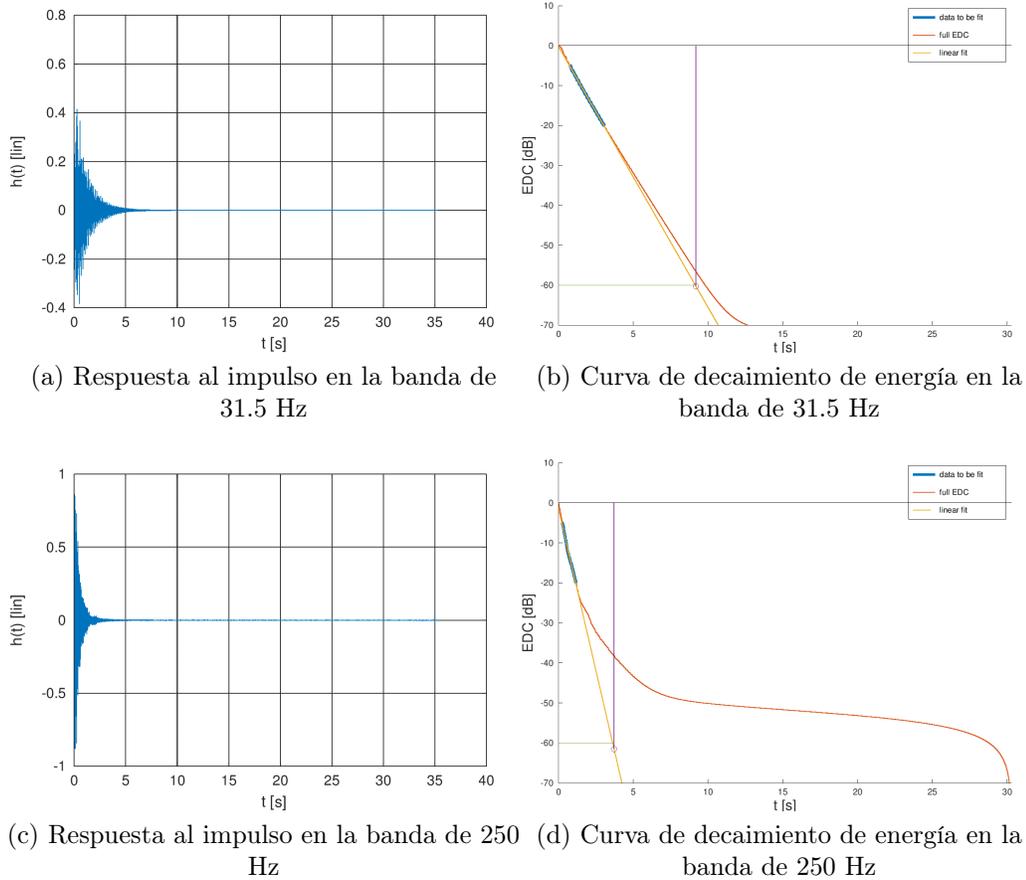
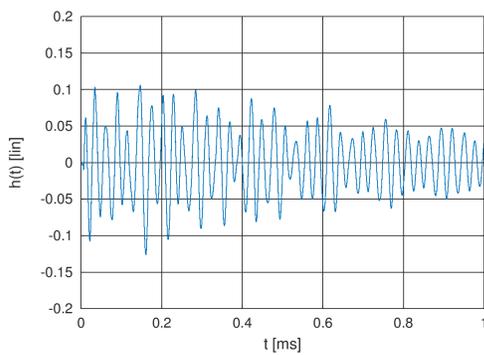


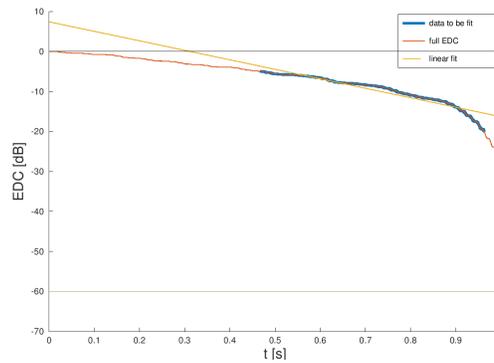
Figura 5.8: Índices acústicos para dos bandas de octava, a partir de los resultados de FEniCS.

En la comparación anterior se hace clara la importancia de contar con una Δf pequeña, pues la información que se puede obtener a partir de la respuesta al impulso correspondiente a los resultados de FEniCS es vasta y comparable con los datos experimentales, contrario a la respuesta al impulso obtenida a partir de Actran.

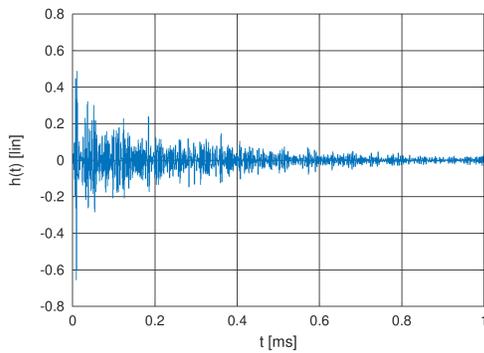
Como se menciona en la sección 3.5.1, ante el problema de la Δf grande en los resultados de Actran, aplicamos interpolación lineal en el dominio de la frecuencia. Dado que la resolución de los resultados experimentales es 0.0248 [Hz] y la de los resultados de Actran es 1 [Hz], interpolamos estos



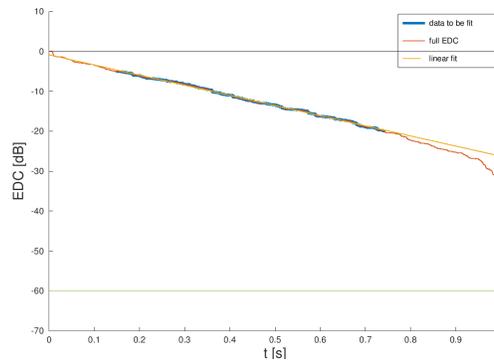
(a) Respuesta al impulso en la banda de 31.5 Hz



(b) Curva de decaimiento de energía en la banda de 31.5 Hz



(c) Respuesta al impulso en la banda de 250 Hz



(d) Curva de decaimiento de energía en la banda de 250 Hz

Figura 5.9: Índices acústicos para dos bandas de octava, a partir de los resultados de Actran.

últimos con 40 nuevos elementos entre muestras, de manera que la nueva resolución sea cercana a la original.

El resultado se presenta en la figura 5.10: si bien se cumple el objetivo de completar el decaimiento de la señal y aproximarla a cero, la curva en 5.10b presenta una pendiente mucho más pronunciada que la original (figura 5.7b), lo que significa que la nueva señal tiene un tiempo de reverberación menor que la original, y esto no es lo que se busca. Por ello, bajo el procedimiento de interpolación que utilizamos, no es posible mejorar la calidad de la señal.

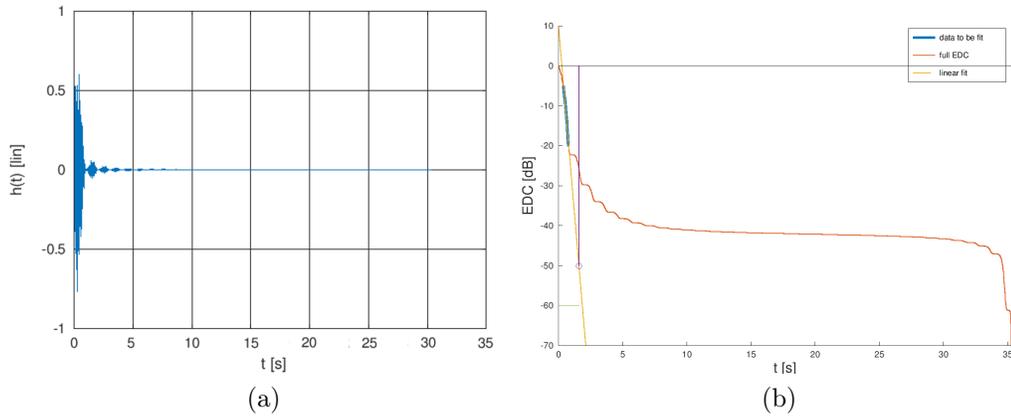


Figura 5.10: Señal de Actran con $y = 1 [mS]$, interpolada en frecuencia, con $\Delta f = 0.025 [Hz]$: (a) respuesta al impulso (b) EDC.

5.3. Coeficientes de absorción

De acuerdo con los tiempos de reverberación obtenidos a partir de las simulaciones, y con base en el procedimiento de la norma ISO 354 [14], se calcularon los coeficientes de absorción presentados en la tabla 5.3.

Es de gran importancia señalar que, si bien la norma requiere de los tiempos de reverberación de la cámara vacía, en nuestro caso no fueron calculados mediante simulación, porque como se ha mencionado en la discusión referente a la figura 5.3, hubiera sido necesario tomar en cuenta absorción en el aire y

en las paredes “reflejantes”, de acuerdo con la explicación al inicio de la sección 5.2; por lo tanto, utilizamos los valores de los resultados experimentales, que sí cumplen con dicho requisito. No fue posible prever tal omisión en un momento oportuno, por lo que se propone esta alternativa para completar el proceso de obtención del coeficiente de absorción para cada banda, asociado a los parámetros de las simulaciones.

El promedio de los valores para Actran, en la tabla 5.3 es prácticamente 1, esto está contemplado en la norma, y supone que la muestra disipa una cantidad equivalente de energía a lo que haría una muestra de tamaño mayor; como se comentó antes, la duración de esta señal fue de apenas 1 [s] y tuvo un decaimiento mínimo, por lo que los resultados obtenidos no pueden considerarse satisfactorios. Por el contrario, los coeficientes de absorción para FEniCS se aproximan más a lo esperado, pues se encuentran en el rango de cero a uno, y los valores para las últimas dos bandas son aceptables en relación con los mostrados en [11, tabla 11.1] (las bandas menores a 125 [Hz] no se consideran en las tablas de materiales).

En nuestros resultados, el valor del coeficiente de absorción está visiblemente relacionado con la resolución en frecuencia de cada análisis: como se observó en la sección 5.2, una menor resolución deriva en una señal más breve, como es el caso de Actran, donde para algunas bandas la recta de ajuste no cuenta con un intervalo lineal adecuado para su trazo y por lo tanto, aproxima el T_{15} a un valor erróneo (figura 5.9b). FEniCS representa el caso contrario, donde existen las condiciones adecuadas para trazar una recta de ajuste sobre la curva de decaimiento de todas las bandas (figura 5.8b y 5.8d), de acuerdo con la sección 1.1.3.

Banda [Hz]	31.5	63	125	250
Grupo				
Actran	1.05	0.92	0.91	1.1
FEniCS	0.25	0.25	0.19	0.66

Tabla 5.3: Coeficientes de absorción por bandas de octava, calculados a partir de las simulaciones.

5.4. Campo acústico

A través de Paraview, en los resultados de la simulación realizada con FEniCS observamos que en campo modal, hay una interacción con la muestra absorbente favorecida para algunas frecuencias de resonancia. Por el contrario, para la sección del espectro donde se espera encontrar el campo difuso, los resultados muestran un campo diferente.

En la figura 5.11 se aprecia que en la porción de la muestra que se encuentra dentro del modo, se presenta la absorción como una deformación en la geometría de éste, aunque la superficie de interacción de la muestra con esta región es limitada. Éste es un buen ejemplo de los problemas que ocasiona un campo modal en la medición de bajas frecuencias, donde no siempre coincide la muestra absorbente con los modos.

Para régimen de bajas frecuencias, el modo axial de 23.56 [Hz] muestra interacción con la muestra absorbente. La figura 5.11 ofrece dos perspectivas de éste, donde 5.11a es una vista completa del cuarto mientras que en 5.11b tenemos un plano paralelo al suelo, ubicado unos centímetros arriba de la muestra absorbente.

Por otro lado, en la figura 5.12 se aprecia el modo oblicuo de 52.08 [Hz]. Se observa un campo donde los lóbulos son de menor tamaño que aquellos del modo axial mencionado, además de encontrarse más separados entre sí, dejando a las regiones de mayor presión fuera del alcance de la muestra absorbente. En consecuencia, ofrecerá menor atenuación para esta componente espectral.

En lo que a campo difuso se refiere, los resultados de nuestro análisis se aproximan a lo descrito en la sección 1.1.7; es decir, la figura 5.13 muestra dos perspectivas del campo para 321.9 [Hz], una frecuencia cercana al límite superior del análisis, donde se observa que las diferencias de amplitud no son tan marcadas como en el campo modal y al mismo tiempo, que se mantienen dentro de un intervalo en un porcentaje representativo de las regiones mostradas en las figuras (aunque las diferencias son suficientemente grandes para no garantizar la repetitividad de las mediciones). Se puede considerar que esta frecuencia ya está dentro del campo difuso, puesto que la separación entre modos es apenas de centímetros, y la diferencia de amplitud de presión

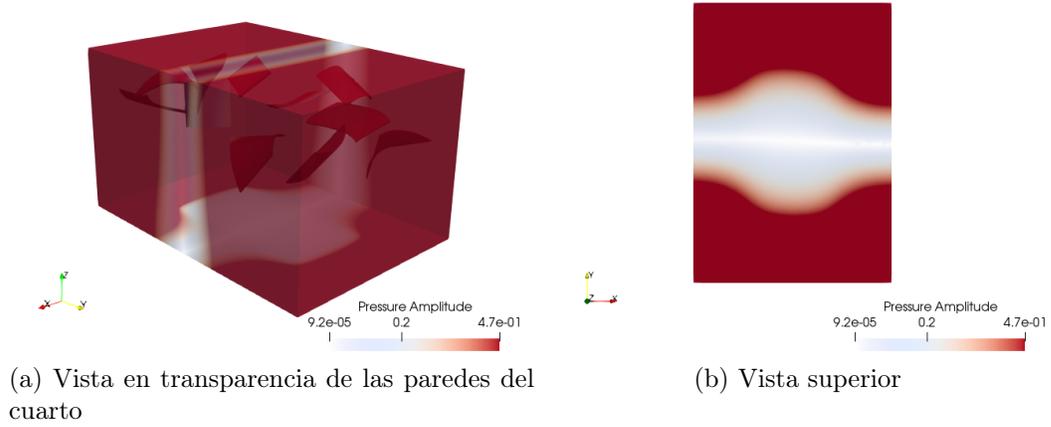


Figura 5.11: Campo acústico a 23.56 [Hz].

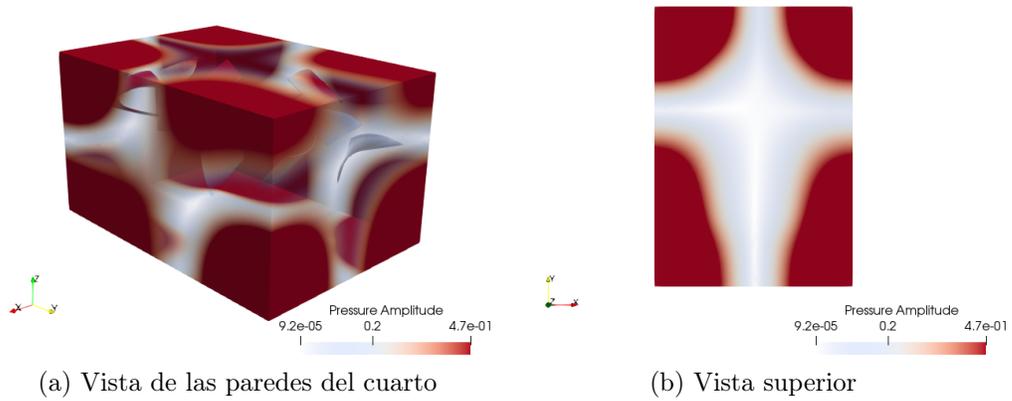
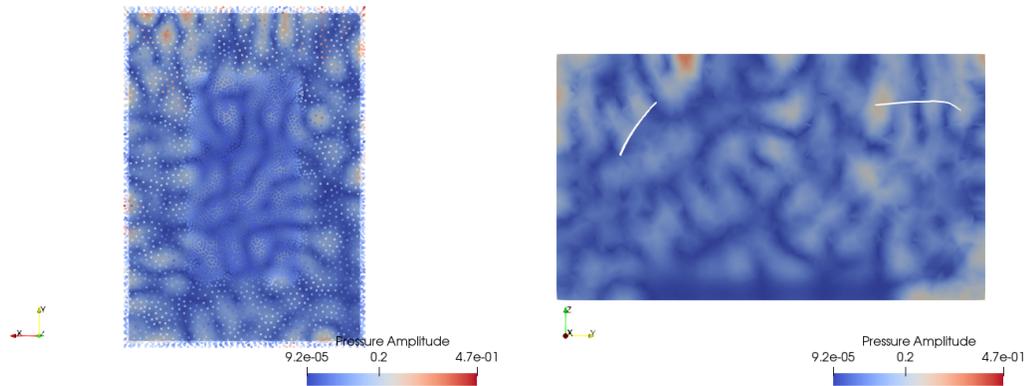


Figura 5.12: Campo acústico a 52.08 [Hz].

entre las áreas con mayor y con menor amplitud, es mucho menor que aquella del campo modal.



(a) Vista inferior del cuarto. El bloque de puntos representa el suelo, y al centro define el área donde está la muestra absorbente.

(b) Vista lateral de la mitad del cuarto

Figura 5.13: Campo acústico a 321.9 [Hz].

En la figura 5.13b se observa que hay absorción por parte de la muestra, lo que destaca, en la esquina inferior derecha, con la frontera entre un modo y la muestra.

Capítulo 6

Conclusiones

Se implementó efectivamente un sistema computacional para simular los resultados de una medición de absorción acústica, por debajo de 400 [Hz], correspondiente a los procedimientos y las instalaciones de la cámara reverberante del LAV-ICAT-UNAM, con base en la norma ISO 354. La parte central de este sistema es la generación de soluciones numéricas, para la ecuación de Helmholtz, mediante plataformas de elemento finito, una de ellas comercial y otra de código abierto. Sin embargo, incluye utilerías de preprocesamiento, con fines de:

- generación de modelos geométricos y mallas, así como la caracterización de las simulaciones,
- adecuación de resultados experimentales para su comparación con los resultados del análisis numérico

Asimismo, en él están implementadas utilerías de postprocesamiento para:

- interpolación de resultados numéricos en dominio de frecuencia,
- adecuación de resultados numéricos para el paso al dominio del tiempo,
- paso del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo,

-
- cálculo de curvas de decaimiento de energía,
 - cálculo de tiempos de decaimiento por bandas de octava,
 - cálculo de coeficientes de absorción por bandas de octava

Algunas de las utilerías mencionadas, están basadas en código existente, entre ellas: FreeCAD, Gmsh, código presentado en la tesis de Vanessa Garrido [16], y diferentes librerías de MATLAB (todas ellas disponibles en GNU/Octave).

Durante el proceso de implementación del sistema, se identificaron diversas dificultades específicas del proceso numérico, dado que en su contra parte experimental no se manifiestan de la misma manera. Algunas de éstas son:

- Asignar a la simulación, un valor adecuadamente bajo de resolución en frecuencia Δf , es muy importante para que, al pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, se tenga una señal suficientemente larga y con la información completa, que a su vez permita hacer un análisis de tiempos de decaimiento y cálculo de coeficientes de absorción. Este parámetro forzosamente se debe definir para realizar el análisis en computadora, dado que se trabaja directamente en el dominio de la frecuencia; es decir, comúnmente no es un aspecto que se vigile al hacer una medición experimental, porque ésta se realiza directamente en el dominio del tiempo,
- En el caso de que la resolución en frecuencia Δf de los resultados de una simulación, no permita obtener una respuesta al impulso cuyo análisis de tiempos de decaimiento ofrezca resultados satisfactorios, lo más conveniente es repetir la simulación utilizando un valor menor de Δf , dado que aplicar interpolación lineal sobre la respuesta en frecuencia no ofrece mejores resultados,
- Además de la simulación presentada, de el caso donde la absorción está presente en la muestra, es conveniente tener una simulación para el caso en el que la absorción es nula, que contemple las pérdidas correspondientes a propagación en el aire y absorción en las paredes “reflejantes” de la cámara. En el caso experimental, tales pérdidas ocurren naturalmente, por lo que no es necesario definir tales parámetros, mientras que en el caso numérico, es necesario imponerlas manualmente,

- Los resultados numéricos requieren un acondicionamiento (descrito en la sección 3.5.1), para ser procesados del modo que se hace con los resultados experimentales en un procedimiento de medición de coeficientes de absorción,
- Para los resultados numéricos, el paso al dominio de la frecuencia requiere, además de la información de amplitud, la información de fase. Es decir, sólo es posible hacerlo cuando el método numérico para la solución de la ecuación de Helmholtz (1.6), trabaja en dominio complejo. No es así para el caso experimental, donde los datos adquiridos son números reales,
- Para realizar un análisis como el presentado en este trabajo, resulta indispensable que el software sea capaz de procesar una condición de frontera absorbente y una de perturbación. No obstante, se sugiere la implementación de condiciones de frontera que permitan describir de una manera más cercana a la realidad, los objetos utilizados en el modelo, tomando en cuenta características físicas como porosidad, cavidades, objetos internos, diferentes materiales en una superficie, entre otros.

Con el sistema implementado, se obtuvieron efectivamente *respuestas en frecuencia* y *respuestas al impulso*, piezas fundamentales para el cálculo de parámetros de interés, como *tiempos de decaimiento*, y *coeficientes de absorción* α_s ; se obtuvieron también *curvas de decaimiento de energía*, las cuales ofrecen información complementaria para los parámetros calculados en el dominio del tiempo. Todo lo anterior, fue obtenido para dos casos simulados; de manera paralela, se obtuvieron visualizaciones de campo acústico, que muestran la interacción de la muestra absorbente con el campo, en circunstancias más, o menos, favorables para el proceso de medición.

Las visualizaciones generadas, de acuerdo con lo revisado a lo largo de este trabajo, ofrecen datos importantes acerca del modelo que nos resultan útiles porque, al tratarse de una aproximación al campo sonoro real, difícilmente realizable con el método experimental, abren la puerta a la exploración y experimentación numérica, en un sentido de aportación en favor de nuevas técnicas para medición en el régimen de baja frecuencia. Entre la información que aporta este recurso se encuentra:

-
- Ubicación de los modos,
 - Efectos de la geometría del recinto sobre el campo acústico,
 - En el caso de medición de absorción, la interacción entre el campo acústico y la muestra.

Los resultados observados respecto a respuesta al impulso, refuerzan las particularidades mencionadas previamente, acerca de la caracterización de la simulación con enfoque a un material real, dada la repercusión que tiene ésta en la función de transferencia del modelo.

El trabajo presentado se puede considerar completo hasta este punto, dado que fue posible comparar el comportamiento real del cuarto, contra su comportamiento teórico. Aunque se calcularon coeficientes de absorción α_s de acuerdo con un estándar, para las características de absorción del modelo, no existen registros experimentales con los cuales discutir los resultados presentados, por lo que esta tesis resulta insuficiente para tal aspecto.

Respecto al problema de ruido urbano en vivienda, su uso como un acercamiento a la respuesta en frecuencia del lugar para aprovechar de la mejor manera sus características acústicas de acuerdo con las fuentes internas de ruido, sería una aplicación potencial del método numérico utilizado; ésto, debido a las ventajas que ofrecen para este rubro, las visualizaciones de campo.

El uso de software libre superó en casi todos los aspectos al software comercial, excepto en la implementación de la condición de frontera. Entre las ventajas del primero, que en el caso del segundo fueron problemáticos, podemos mencionar: ejecución de varios análisis a la vez, licencia sin caducidad, mayor libertad en la visualización de resultados, sin restricción de tamaño del modelo. Algunos rubros en que la versión comercial supera a la versión libre, son: facilidad de uso mediante interfaz gráfica, simplicidad en la instalación, opciones mejor enfocadas para definir absorción y otras condiciones de frontera en el modelo. Es importante aclarar que ambas versiones están diseñadas en el mismo lenguaje, Python.

Bibliografía

- [1] Takeshi Okuzono, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, and Noriko Okamoto. A finite-element method using dispersion reduced spline elements for room acoustics simulation. *Applied Acoustics*, 79:1–8, 2014.
- [2] Yiu Wai Lam. Issues for computer modelling of room acoustics in non-concert hall settings. *Acoustical science and technology*, 26(2):145–155, 2005.
- [3] T Shuku and K Ishihara. The analysis of the acoustic field in irregularly shaped rooms by the finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, 29(1):67–IN1, 1973.
- [4] A Craggs. A finite element model for acoustically lined small rooms. *Journal of sound and vibration*, 108(2):327–337, 1986.
- [5] Christos I Papadopoulos. Redistribution of the low frequency acoustic modes of a room: a finite element-based optimisation method. *Applied Acoustics*, 62(11):1267–1285, 2001.
- [6] Sophie PS Maluski and Barry M Gibbs. Application of a finite-element model to low-frequency sound insulation in dwellings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(4):1741–1751, 2000.
- [7] Ubaldo Ayr, Francesco Martellotta, and Gianluca Rospi. A method for the low frequency qualification of reverberation test rooms using a validated finite element model. *Applied Acoustics*, 116:33–42, 2017.
- [8] Randall F Barron. *Industrial noise control and acoustics*. Marcel Dekker New York, NY, USA:, 2003.

-
- [9] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, and James V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley and Sons, 4th edition, 1999.
- [10] H Kuttruff. *Room acoustics 4th ed.* Taylor & Francis, London, 2000.
- [11] F Dunn, WM Hartmann, DM Campbell, and Neville H Fletcher. *Springer handbook of acoustics*. Springer, 2015.
- [12] Carl Hopkins. *Sound insulation*. Routledge, 2012.
- [13] Julius O. Smith. Energy decay curve. https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Energy_Decay_Curve.html, 2010. Accessed: 2018-10-01.
- [14] ISO. Acoustics – measurement of sound absorption in a reverberation room. Standard ISO 354:2003(E), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- [15] Mendel Kleiner and Jiri Tichy. *Acoustics of small rooms*. CRC Press, 2014.
- [16] Vanessa Garrido Hernández. Medición y cálculo de los índices acústicos en recintos. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería - UNAM, 2000.
- [17] Don Davis, Eugene Patronis, and Pat Brown. *Sound System Engineering 4e*. Focal press, 2013.
- [18] Manfred R Schroeder. Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, 35(5):299–306, 1987.
- [19] Peter Schaldenbrand. Digital Signal Processing: Sampling Rates, Bandwidth, Spectral Lines, and more.... <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Digital-Signal-Processing-Sampling-Rates-Bandwidth-Spectral/ta-p/402991>, 2017. [Online; accessed 29-January-2019].
- [20] Frédéric Cohen Tenoudji. *Analog and Digital Signal Analysis*. Springer, 2016.
- [21] Clarence W De Silva. *Modeling and control of engineering systems*. Crc Press, 2009.

- [22] Yonina C. Eldar. *Fourier analysis*, page 67–93. Cambridge University Press, 2015.
- [23] Alice E. Orozco Medina, Martha G. y González. *Ruido en ciudades latinoamericanas: Bases orientadas a su gestión*. Orgánica Editores - Universidad de Guadalajara, 1 edition, 2012.
- [24] Birgitta Berglund, Thomas Lindvall, and Dietrich H Schwela. *Guidelines for community noise*, 1995.
- [25] Diario Oficial de la Federación. *Ley federal sobre metrología y normalización*, 1992. Reforma publicada DOF 20-05-1997.
- [26] World Health Organization et al. *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. In *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization, 2011.
- [27] Comisión Nacional de Mejora Regulatoria. *Norma oficial mexicana nom-081-semarnat-1994, límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas y su método de emisión*, 1994.
- [28] Jonathan Whiteley. *Finite element methods: a practical guide*. Springer, 2017.
- [29] Free Field Technologies SA. *Actran 17.1 User's Guide*. MSC Software Company, 1 edition, 2016.
- [30] Randolph B Randall and BA Tech. *Frequency analysis*. Brüel & Kjær, 1987.
- [31] `fft` - fast fourier transform. <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html?lang=en>.