

2021

Estudio Acústico y Modelación de  
Adecuación de Recinto de uso Académico  
utilizando el Método del Elemento Finito.

Carlos Andrés Wilson Bárcenas



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Estudio Acústico y Modelación de Adecuación de  
Recinto de uso Académico utilizando el Método del  
Elemento Finito.

Tesis

Que como parte de los requisitos para  
obtener el Grado de

Maestría en Ciencias (Estructuras)

Presenta

Carlos Andrés Wilson Bárcenas

Dirigido por:

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Querétaro, Qro. a Noviembre, 2021



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Estudio Acústico y Modelación de Adecuación de Recinto de  
uso Académico utilizando el Método del Elemento Finito.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:  
Carlos Andrés Wilson Bárcenas

Dirigido por:  
Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Secretario

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Vocal

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Suplente

M. en C. Luis Francisco Pérez Moreno  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Junio de 2021  
México

## Dedicatoria.

*Dedicado a todos los que estuvieron involucrados en este trabajo, tanto de manera directa como indirecta.*

*Una mención especial a Alexandra A. E., gracias.*

*IN MEMORIAM.*

*A las víctimas mortales de la epidemia del 2020.*

*C. B. R. (Diciembre 8, 1966 – Febrero 8, 2021)*

*Ma. D. R. C. (Marzo 24, 1934 – Febrero 9, 2021)*

## Agradecimientos.

El autor agradece el apoyo y financiamiento por parte del CONACYT, por medio de la beca entregada a lo largo del periodo de realización de esta investigación. Así como a la Universidad Autónoma de Querétaro.

De igual manera, se agradece la atención, apoyo e interés por parte del sínodo encargado de este trabajo. Así como a una parte importante del equipo docente, directivo y administrativo del Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## Índice de Contenido.

<b>Dedicatoria.....</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>ii</b>
<b>Índice de Contenido.....</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de Tablas.....</b>	<b>viii</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.2.1. Problemática en Ambiente Laboral.....	1
1.2.2. Problemática en Ambiente Académico.....	2
1.2.3. Afectaciones a la Salud y en la Vida Diaria.....	3
<b>2. Antecedentes.....</b>	<b>6</b>
2.1. Reseña Histórica.....	6
2.1.1. Acústica en la Antigüedad.....	6
2.1.2. Acústica Prehispánica.....	8
2.1.3. Acústica como eje del Confort.....	9
2.2. Acústica.....	11
2.3. Densidad y Presión.....	13
2.4. Potencia e Intensidad.....	14
2.5. Ley del Inverso del Cuadrado.....	15
2.6. Decibeles.....	18
2.6.1. Umbral del Dolor.....	18
2.7. Teorema de Fourier.....	19
2.8. Reverberación.....	21
2.9. Acústica Arquitectónica.....	21
2.10. Antecedentes de Investigación Reciente.....	23
2.11. Sala Nezahualcóyotl.....	27
2.12. Normas y Especificaciones.....	28
2.12.1. Normativa en cuanto a Tiempos de Reverberación.....	29
2.12.2. Ecuación de Tiempos de Reverberación.....	31
2.13. Conclusiones de la Revisión de Literatura.....	32
<b>3. Fenomenología Física. Modelo Discreto.....</b>	<b>37</b>
3.1. Fenomenología.....	37
3.2. Elemento Finito usado.....	42
3.2.1. Información de Entrada.....	43

<b>4. Hipótesis y Objetivos.....</b>	<b>45</b>
4.1. Hipótesis.....	45
4.2. Objetivo General.....	45
4.3. Objetivos Específicos.....	45
<b>5. Metodología.....</b>	<b>47</b>
5.1. Selección del recinto a analizar.....	48
5.2. Creación del Modelo en la interfase Mechanical APDL, del Software de Ingeniería ANSYS.....	49
5.3. Adecuación acústica del recinto.....	50
5.4. Escenarios de experimentación.....	50
5.5. Coeficientes de Absorción.....	52
5.6. Información de Salida.....	52
5.7. Matriz Experimental de los casos a revisar mediante el modelo computacional.....	54
<b>6. Modelo Computacional paramétrico en APDL.....</b>	<b>57</b>
6.1. Macro de Información.....	57
6.2. Macro de Elementos.....	59
6.3. Macro de Geometría.....	62
6.4. Macro de Mallado.....	64
6.5. Macro de Restricciones.....	68
6.6. Macro de Solución.....	70
<b>7. Resultados.....</b>	<b>73</b>
7.1. Especificación de Recinto a analizar.....	73
7.1.1. Elementos arquitectónicos auxiliares.....	75
7.2. Ondas obtenidas.....	76
7.2.1. Resultados preliminares.....	76
7.3. Refinamiento de Estudios.....	80
7.4. Resultados.....	81
7.5. Procesamiento de datos.....	83
7.6. Modelo en COMSOL.....	88
<b>8. Conclusiones.....</b>	<b>92</b>
<b>9. Referencias.....</b>	<b>94</b>
<b>10. Bibliografía de Imágenes.....</b>	<b>98</b>
<b>11. Anexo A: Funcionamiento de Comsol.....</b>	<b>99</b>
11.1. Parámetros.....	100
11.2. Definiciones.....	101
11.2.1. Integración.....	101
11.2.2. Tiempo de Reverberación.....	101
11.3. Geometría.....	102
11.4. Acústica de Rayos.....	103

---

11.4.1. Propiedades de las paredes.....	105
11.4.2. Ajustes de Rayos.....	105
11.5. Malla.....	106
11.6. Estudio.....	106
11.6.1. Barrido Paramétrico.....	106
11.6.2. Trazado de Rayos.....	106

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## Índice de Figuras.

Fig. 1-1 Percepción de los problemas ambientales más importantes en el ámbito local andaluz (OSMAN, s.f.)	5
Fig. 2-1 Percepción óptima del oído humano. (INIFED, 2011)	12
Fig. 2-2 Émbolo perturba al medio con una excitación sinusoidal. (Beléndez, 1992)	13
Fig. 2-3 Funciones de cambio de densidad y presión. (Beléndez, 1992)	14
Fig. 2-4 Ley del Inverso al Cuadrado (Creación Propia).	16
Fig. 2-5 Cámara Anecoica (Hery, 2012).	17
Fig. 2-6 Curvas Isofónicas. (INIFED, 2011)	19
Fig. 2-7 Ejemplo de Onda Compleja. La parte que se repite tiene un periodo "T". El inverso de éste es la frecuencia fundamental de la onda "fo" (Creación Propia).	21
Fig. 2-8 Variación del Coeficiente de Absorción. (Recuero,2000)	23
Fig. 2-9 Tiempos de Reverberación en función de la Frecuencia.	25
Fig. 2-10 Nivel de Inmisión de Ruido por cada tipo de Ventanal en función de la Frecuencia. (Díaz-Chyla et al., 2018)	26
Fig. 2-11 Panel utilizado en el trabajo de Montoya. (2014)	27
Fig. 2-12 Sala Nezahualcóyotl (Bautista, 2016).	28
Fig. 2-13 Tiempos de Reverberación recomendados para distintos usos en función del volumen del recinto. (INIFED, 2011)	30
Fig. 2-14 Tiempo de Reverberación recomendado para distintos usos de recinto. (INIFED, 2011)	30
Fig. 2-15 Ecuación de Tiempos de Reverberación a. (INIFED, 2011)	31
Fig. 2-16 Ecuación de Tiempos de Reverberación b. (INIFED, 2011)	31
Fig. 3-1 Opciones de elemento FLUID30 (Manual de Usuario ANSYS).	43
Fig. 5-1 Diagrama de Flujo de Metodología a seguir.	47
Fig. 5-2 Estructura tipo U1C Tipología de Concreto. Catálogo del INIFED (2011)	48
Fig. 5-3 Estructura tipo 2P Tipología de Acero. Catálogo del INIFED (2011)	49
Fig. 5-4 Ubicaciones hipotéticas.	51
Fig. 5-5 Mapa Conceptual de Investigación. (Creación Propia)	55
Fig. 6-1 Código de ventana de datos de entrada.	58
Fig. 6-2 Código para ajuste de unidades.	58
Fig. 6-3 Ventana de Dimensiones generales de la estructura.	59
Fig. 6-4 Ventana de Dimensiones de Trabes y Columnas.	60
Fig. 6-5 Tipos de Elementos.	60
Fig. 6-6 Propiedades de los Materiales.	61
Fig. 6-7 Perfiles de elementos tipo Vigas.	61
Fig. 6-8 Reales.	62
Fig. 6-9 Líneas/Elementos usados en el Modelo.	62
Fig. 6-10 Áreas generadas.	63
Fig. 6-11 Volúmenes generados.	64
Fig. 6-12 Especificaciones.	64
Fig. 6-13 Keypoints de Orientación.	65
Fig. 6-14 Ejemplo de selección y especificación de atributos (Líneas).	65
Fig. 6-15 Ejemplo de selección y especificación de atributos (Áreas).	65
Fig. 6-16 Ejemplo de selección y especificación de atributos (Volúmenes).	66
Fig. 6-17 Mallado de Elementos.	66
Fig. 6-18 Elementos correspondientes a Líneas.	67
Fig. 6-19 Elementos correspondientes a Áreas.	67

<i>Fig. 6-20 Elementos de Volumen Interno.</i>	68
<i>Fig. 6-21 Elementos correspondientes a Volúmenes.</i>	68
<i>Fig. 6-22 Definición de I.F.E. y Restricción.</i>	69
<i>Fig. 6-23 Ventana de Ingreso datos de Excitación Armónica.</i>	70
<i>Fig. 6-24 Aplicación de Carga Armónica.</i>	70
<i>Fig. 6-25 Campo de Presiones en Modelo Discreto.</i>	71
<i>Fig. 6-26 Isosuperficies del Campo de Presiones en el Modelo Discretizado.</i>	71
<i>Fig. 6-27 Campo de Presiones, corte horizontal a altura de 1.00 m.</i>	72
<i>Fig. 7-1 Planta de aula tipo U1C. (INIFED, 2012)</i>	74
<i>Fig. 7-2 Corte Transversal de aula tipo U1C. (INIFED, 2012)</i>	75
<i>Fig. 7-3 Nivel de Presión Sonora en los puntos receptores.</i>	79
<i>Fig. 7-4 Nivel de Presión Sonora de las diferentes propuestas analizadas.</i>	83
<i>Fig. 7-5 Distribución de Presiones Vista en planta.</i>	84
<i>Fig. 7-6 Distribución de Presiones Corte Longitudinal.</i>	84
<i>Fig. 7-7 Isosuperficies con diferentes condiciones.</i>	85
<i>Fig. 7-8 Modelo geométrico del aula analizada.</i>	89
<i>Fig. 7-9 Trayectoria de Rayos.</i>	90
<i>Fig. 7-10 Reflectograma de la fuente Receptora.</i>	91
<i>Fig. 7-11 Estimación del Tiempo de Reverberación.</i>	91
<i>Fig. 11-1 Ventana "Constructor de Modelo".</i>	99

## Índice de Tablas.

<i>Tabla 1-1 Ejemplos de situaciones cotidianas relacionándolas con su respectivo nivel de sonido. (Cañón, 2015, Rediseño propio).</i>	4
<i>Tabla 2-1 Volumen recomendable por espectador dependiendo del uso del recinto. (INIFED, 2011)</i>	29
<i>Tabla 2-2 Ecuación de Tiempos de Reverberación. (INIFED, 2011)</i>	31
<i>Tabla 5-1 Coeficientes de absorción (<math>\alpha</math>) para diferentes materiales y frecuencias utilizadas en el modelo. Extraídos del libro de Recuero (2020).</i>	53
<i>Tabla 5-2 Parámetros y Rangos utilizados en los análisis.</i>	54
<i>Tabla 5-3 Interrelación de parámetros.</i>	55
<i>Tabla 5-4 Matriz Experimental.</i>	56
<i>Tabla 7-1 Fuente receptora 1.</i>	77
<i>Tabla 7-2 Fuente receptora 2</i>	78
<i>Tabla 7-3 Fuente receptora 3</i>	78
<i>Tabla 7-4 Matriz experimental.</i>	80
<i>Tabla 7-5 Nivel de Presión Sonora Escenario A, Escenario B, Escenario C.</i>	82
<i>Tabla 11-1 Parámetros, modelo COMSOL.</i>	100

## Resumen

En este trabajo se aborda el análisis del comportamiento de las ondas acústicas que actúan en un aula docente determinada. Se discuten, en primer lugar, las propiedades acústicas que distintos recintos requieren, prestando especial atención a aquellos de uso académico. Como se expresa, el comportamiento adecuado dependerá del uso que se prevea tener en el recinto en cuestión. Se indica que es común encontrar deficiencias en la arquitectura acústica en diversidad de recintos, y los perjuicios que esto puede provocar no solo a la salud del individuo, sino también al desarrollo cognitivo y desempeño escolar, esto último como consecuencia de una baja en el entendimiento. Siguiendo el norte del proceso de investigación actual de la acústica arquitectónica, el problema se aborda mediante la aplicación de métodos analíticos, en específico usando el método del elemento finito. Esto implica, que se revisan los conceptos matemáticos primordiales para el entendimiento de este tema, tales como conceptos de física acústica, mecánica del medio continuo y elementos finitos. La utilización de herramientas computacionales ayudó a comprender y entender el comportamiento y distribución de las ondas acústicas en un recinto, lo que puede dar un panorama para sus posibles adecuaciones. Se sugiere continuar con la investigación en este campo, profundizando en los factores que puedan presentarse por diversas circunstancias, tales como turbulencia o correcciones debidas a volúmenes de recinto de gran tamaño, acompañadas en medida de lo posible con mediciones y experimentación en campo.

Palabras clave: Elemento Finito, Acústica Arquitectónica, Aula Docente, Adecuación, Método Analítico.

## Abstract

In this document is reviewed the analysis of acoustic waves behavior that act in a given teaching classroom. First, the acoustic properties that different enclosures require are discussed, paying special attention to those for academic use. As stated, the appropriate behavior will depend on the specific enclosure use. It is common to find deficiencies in acoustic architecture in a varieties of rooms, and it is indicated the harm that this can cause, not only to people's health, but also to cognitive development and school performance, this one because of a low understanding. Following the north of the current research process of architectural acoustics, the problem is solved through application of analytical methods, specifically using the finite element method. This implies that the fundamental mathematical concepts are reviewed for the understanding of this subject, such as concepts of acoustic physics, mechanics of the continuous medium and finite elements. The use of computational tools helped to understand the behavior and distribution of acoustic waves in an enclosure, which can provide an overview for possible adjustments. It is suggested continuing with research in this field, delving into the factors that may arise due to various circumstances, such as turbulence or corrections due to large enclosure volumes, accompanied as far as possible with measurements and field experimentation.

Keywords: Finite Element, Architectural Acoustics, Teaching Classroom, Adequacy, Analytical Method.

## 1. Introducción

### 1.1. Planteamiento del Problema.

El objetivo de este trabajo consiste en modificar ciertas propiedades de los recintos, tales como los coeficientes de absorción de las superficies de frontera que lo conforman. Por ejemplo, un aula destinada al uso académico, con el fin de tener la certeza de que las propiedades acústicas dentro del salón cumplan con las normas establecidas. En México, dichos parámetros se encuentran indicados en las especificaciones del Instituto Nacional de Infraestructura Física para la Educación (INIFED).

Si bien, es verdad que se cuenta actualmente con estudios, técnicas y herramientas para lograr adecuaciones acústicas, en su gran mayoría, se trata de pruebas empíricas. Y no se cuenta propiamente con un estudio formal más específico en esta área.

Se propone que, la mejora se realice mediante la implementación de un análisis energético, utilizando como herramienta computacional el software ANSYS, Mechanical APDL, la modelación del aula para que, con la utilización de modelos de Mecánica del Medio Continuo, Mecánica de fluidos y Elemento Finito, se obtenga una parametrización y solución más acertada para este tipo de problemas. Así mismo, se obtendrán recomendaciones para el mejoramiento y adecuación de aulas docentes en cuanto a la intromisión de ruido y su reverberación dentro del recinto.

### 1.2. Justificación.

#### 1.2.1. Problemática en Ambiente Laboral.

Estudiar las ondas acústicas y su comportamiento es sumamente importante. Por un lado, el ruido excesivo, por sí solo, puede generar afectaciones a la salud. Pueden darse casos en que los trabajadores se encuentren expuestos a altos niveles de ruido, esto puede generar

problemas de hipoacusia, teniendo en algunos casos una disminución en la capacidad auditiva de hasta 25 dB. Este problema se traduce en una deficiencia tanto en la productividad como en las interacciones sociales, tanto laborales como familiares. La deficiencia auditiva representa un riesgo, el trabajador pierde la capacidad de diferenciar ciertas frecuencias, y puede darse el caso de no percibir de manera oportuna señales acústicas de alerta o alarma. (May, 2000)

Es importante que la transmisión de ondas acústicas esté controlada. Del Rey et al (2017) incluso comentan el caso de España, en donde el aislamiento acústico es un requisito de las construcciones, las exigencias en cuanto a protección frente al ruido han aumentado. Esto ha creado la necesidad de buscar nuevos materiales que cumplan con los códigos de construcción, en cuanto a acústica se requiere.

#### 1.2.2. Problemática en Ambiente Académico.

Por otro lado, las condiciones acústicas en un espacio educativo son esencialmente importantes para el proceso de aprendizaje, donde escuchar con claridad puede hacer la diferencia entre el entendimiento y la incompreensión (INIFED, 2011). En el ambiente académico, el ruido aparte de impedir el aprendizaje de los alumnos, afecta a los profesores, los cuáles deben elevar su nivel de voz para que éste se superior al del ruido. En consecuencia, aumentan las lesiones por sobreesfuerzos vocales y las bajas por enfermedad, como se menciona en los trabajos de Díaz-Chyla et al. (2018) y Turín (2017).

No solamente se pueden tener afectaciones a raíz de la intensidad de las ondas sonoras, la manera en la que estas se propagan en el espacio puede influir negativamente al entendimiento del usuario. La reverberación es el sonido reflejado por los muros de un recinto. Como lo menciona Boschi (2008) en su estudio, el tiempo de reverberación afecta al confort acústico. Si se tienen muros altamente reflectantes, la comprensión acústica disminuye, ya que los sonidos que se van emitiendo se confunden con los anteriores, los cuales son reflejados y no se han extinto. Si se tienen muros muy absorbentes, los sonidos

“mueren” inmediatamente después de ser emitidos, causando una sensación de sofocación acústica.

En cuanto a reverberación, existen parámetros establecidos para que un recinto cuente con un confort acústico aceptable. Estos parámetros dependerán del uso que tendrá el recinto. Álvarez-Morales et al. (2017) mostraron que, en un recinto con alto tiempo de reverberación, se tiene un confort aceptable con música o cantos corales. Sin embargo, la reverberación se consideró excesiva en el entendimiento de transmisión de palabras.

La comprensión de una palabra está estrechamente relacionada con el entendimiento de las consonantes de ésta, situación que se ve afectada con un valor alto de tiempo de reverberación. La construcción de aulas normalmente no considera criterios acústicos, utilizándose materiales con bajos coeficientes de absorción sonora. Dando como resultado un tiempo de reverberación que **triplica los límites establecidos**, tal como sugieren Cravero et al. (2013), Ferreyra et al. (2013) y Turín (2017), parámetros que serán revisados posteriormente en este trabajo.

### 1.2.3. Afectaciones a la Salud y en la Vida Diaria.

El ruido está presente en nuestro día a día. El llamado ruido urbano puede originarse por el tráfico, sistemas de ventilación y artefactos domésticos, entre otros. En la Unión Europea 80 millones de personas están expuestos diariamente a niveles de ruido superiores a 65 decibeles y otros 170 millones lo están a niveles entre 55-65 dB. La contaminación acústica sigue en crecimiento y junto con ésta las afectaciones a la sociedad, llegando a tener repercusiones socioculturales, estéticas y económicas. (Amable, 2017)

No es de extrañarse que, consecuentemente, se le considere al ruido como contaminante invisible. Este no solamente afecta fisiológicamente al organismo, causando trastornos cardiovasculares, que se traducen en un aumento en el riesgo de padecer hipertensión arterial, angina de pecho o un infarto agudo de miocardio, debido a la activación

de hormonas nerviosas, que provoca el aumento en la tensión arterial. Además, puede aumentar el nivel de estrés y causar irritabilidad. Por lo que es de suma importancia que se cree conciencia sobre los efectos del ruido en nuestra salud. (AEMPPI, 2018)

Los problemas que conlleva la pérdida de audición logra que una persona de 40 años escuche como una de 60. Incluso en bajos niveles, la generación de ruido puede causar problemas de sueño al individuo, generando insomnio (AEMPPI, 2018) y una mala calidad del sueño (OMS, 1995). E incluso, se puede llegar a presentar problemas respiratorio y diabéticos. (Lozano P., 2018)

Tabla 1-1 Ejemplos de situaciones cotidianas relacionándolas con su respectivo nivel de sonido. (Cañón, 2015, Rediseño propio).

Niveles de Intensidad del Sonido	
140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto
100 dB	Perforadora eléctrica
90 dB	Tráfico
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50/60 dB	Aglomeración de Gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	Umbral de audición

Una señal sonora con un nivel de 120 dB marca el denominado “umbral del dolor”. Niveles de ruido superiores a este producen daños graves, tales como la rotura del tímpano (OSMAN, s.f.). En la Tabla 1-1 se muestran ejemplos de señales correspondientes a diferentes intensidad acústicas, mencionando desde los más bajos niveles hasta llegar al umbral del dolor.

En los últimos años son numerosas las sentencias que reconocen al ruido como un factor de riesgo sanitario. Por ejemplo, en su artículo, Lozano P. (2018) muestra el caso de un habitante del centro de Valencia con problemas de ruido. Tras veinte años de trámites el Tribunal Europeo de Derechos Humanos falló unánimemente a su favor por violar su derecho a la vida privada y familiar, lo cual derivó en una indemnización de más de 13,000 euros.

La junta de Andalucía realizó una encuesta en diversas localidades. El problema más detectado por la población fue el ruido. Con 29.1% de los encuestados como se muestra en la Fig. 1-1. “En cuanto a problemas medio ambientales, ¿Podría Ud. decir los dos más importantes, que, en su opinión, tiene hoy su localidad?” (Junta de Andalucía, 2009)

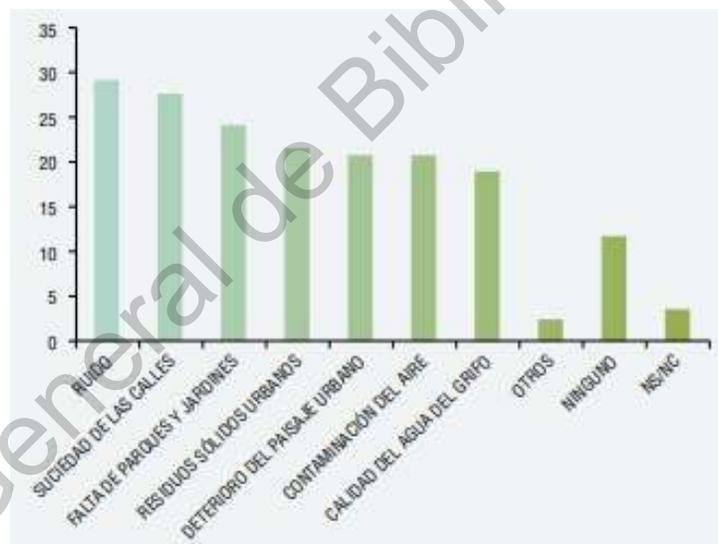


Fig. 1-1 Percepción de los problemas ambientales más importantes en el ámbito local andaluz (OSMAN, s.f.)

La contaminación acústica supone la segunda causa de enfermedad por motivo medioambiental después de la calidad del aire, mientras que para la primera se toman medidas con las limitaciones del tráfico, para la segunda no. En su artículo, Lozano (2018), también menciona que en España cerca de nueve millones de personas soportan niveles de ruidos superiores a 65 dB, lo que incrementa en un 6.6% la mortalidad por causas cardiovasculares en mayores de 65 años.

## 2. Antecedentes.

### 2.1. Reseña Histórica.

Para la revisión de los antecedentes históricos se revisan los trabajos de Ureña (2017) y Garza (2008). Ambos, trabajos que mencionan la trayectoria de las adecuaciones acústicas y de los cuales se realizó una síntesis.

#### 2.1.1. Acústica en la Antigüedad.

Los primeros esbozos del conocimiento acústico se remontan al Egipto del siglo XIII A.C., donde la relación del hombre con la música queda evidenciada en las pinturas encontradas en la Tumba de Najt, en la Necrópolis de Tebas.

Los primeros vestigios que sugieren control de las condiciones acústicas en recintos se hallan en el Antiguo Testamento. Se especifican las dimensiones de cortinas de pelo de cabra que se encuentran en cierto recinto, la longitud horizontal de las cortinas es mayor que el perímetro del recinto, por lo que al colgarlas formarían numerosos pliegues.

Ya en el siglo III A.C. se comenzaron a establecer los fundamentos geométricos de la Acústica. Arquímedes sentó las bases de la “Ley del Inverso del Cuadrado” para la intensidad Acústica. Y un siglo después, Herón indicó que el ángulo de incidencia al chocar el sonido contra un sólido es igual al ángulo de reflexión.

En la Antigua Grecia se implementaban los principios acústicos en la arquitectura. El Teatro Griego, recinto de suma relevancia para la sociedad, era ubicado estratégicamente para obtener los mejores resultados tanto en visibilidad como en audición; las gradas se proponían en distribución semicircular en planta y con pendiente creciente, asemejando una esfera.

Heredando las aportaciones griegas, los Romanos construyeron gigantescos recintos basados en las características del Teatro Griego, derivando en lo que conocemos como anfiteatro, el acoplamiento de dos teatros.

El poeta Lucrecio describió con claridad los conceptos de reverberación, transmisión y difracción del sonido y su importancia en la fidelidad y el entendimiento del sonido. Por otro lado, el arquitecto Vitruvio describió la influencia de la forma del recinto en la claridad de la audición, así como la utilización de técnicas acústicas en el campo militar, conocimientos que sirvieron como fundamentos de esta disciplina en el Renacimiento.

En el Medioevo existió una estrecha relación entre la Arquitectura y las composiciones de Cantos Gregorianos. Durante este periodo, la Civilización Islámica recuperó y mantuvo vivos los avances del periodo grecorromano.

El renacentista Leonardo da Vinci relacionó la propagación de ondas en el agua con las ondas acústicas. Estableció que, las ondas del sonido viajan por el aire, cruzándose unas con otras sin mezclarse, y preservando su centro respectivamente como origen de cada sonido.

Las primeras deducciones teóricas y acertadas de la velocidad del sonido fueron propuestas por el físico Isaac Newton, no obstante, fue el astrónomo César-Francois Cassini de Thury quien, en 1738, precisó esta cantidad en 332 m/s. Posteriormente, el médico Giovanni Ludovico Bianconi detectó que la velocidad del sonido se veía afectada por la temperatura del ambiente, aspecto que pudo ser esclarecido por el físico Laplace mediante correcciones relacionadas con la elasticidad de los fluidos.

### 2.1.2. Acústica Prehispánica.

Las culturas precolombinas no eran ajenas a la necesidad del manejo adecuado de las condiciones acústicas en su entorno. Para estas culturas, un espacio con acústica idónea era fundamental para los distintos ritos y actos sociales que realizaban, en consecuencia, aprendieron y desarrollaron herramientas que les auxiliaron en la manipulación de los factores que influyen en el comportamiento del sonido.

Los mayas, por ejemplo, construían las diferentes habitaciones de sus estructuras con distintos materiales y dimensiones, mostrando un claro ejemplo del conocimiento que poseían sobre el comportamiento del sonido. Se cree que las distintas adecuaciones tenían el objetivo de transmitir mensajes y música a una mayor distancia, logrando así, involucrar a un mayor público en las actividades que se realizaban dentro de los templos.

En la zona de Palenque se han encontrado que los diversos recintos, tanto interiores como al aire libre, poseen una calidad auditiva variada.

De igual manera, se infiere que pudo haber existido un espacio en la base de los templos idónea para la realización de presentaciones de distintas ídoles. Existen diversos puntos en las plazas principales donde se ubicaban estratégicamente a los músicos para que el sonido se transmitiera a toda la zona, logrando un mayor impacto en los espectadores de los distintos ritos.

En Chichén Itzá se presentan diversos fenómenos acústicos. Se cuenta que, ya en época actual, cuando se hacían reuniones en el área de Juego de Pelota se colocaban a los invitados en un extremo de la cancha y en el otro extremo un fonógrafo, los invitados eran sorprendidos con la fidelidad con la que escuchaban el aparato en el extremo contrario. También resalta la claridad con la que se pueden percibir las conversaciones acontecidas en la zona superior de la pirámide de El Castillo estando situado en la base de ésta.

Por otro lado, en Tulum se tiene constancia de que los arqueólogos, que se encontraran laborando en determinado sitio, podían hacerse escuchar por los demás trabajadores sin esfuerzos ni levantar la voz, incluso en considerables distancias.

Ahí mismo se encuentra una estructura que consta de un anillo de piedra sobre el cual descansa un cilindro del mismo material. Cuando las fuertes corrientes de aire, producidas por huracanes o tormentas, recorren este recinto se genera un silbido que entra en resonancia con el anillo, logrando así, que el silbido se escuche a una gran distancia. Esta estructura, se cree, sería la primera alarma acústica capaz de advertir a la población de fenómenos meteorológicos.

### 2.1.3. Acústica como eje del Confort.

Ya previamente se han mencionado los acercamientos que la acústica ha tenido al confort arquitectónico en recintos, llevados de la mano por exponentes como Vitruvio. Sin embargo, fueron los tratados y estudios posteriores los que sentaron las bases de la acústica arquitectónica.

El arquitecto Leon Battista Alberti en 1485 dejó estipulada en su tratado la necesidad de considerar todas las percepciones sensoriales, incluyendo el confort acústico.

Alberti centró su atención en el problema de la intromisión de ruido a las habitaciones, problemática que afectaba el sueño de los residentes. Se propuso un cambio a la distribución acostumbrada; separar la pared de la recámara del muro de la fachada por medio de un corredor, así este espacio vacío “absorbería” cualquier sonido.

Posterior a esto existió un gran rezago en el avance arquitectónico en cuanto a acústica se refiere. No fue hasta el siglo XIX cuando después de numerosas y poco afortunadas restauraciones al Capitolio en los EEUU, el presidente de dicha nación encomendó al físico

Joseph Henry la labor de realizar los estudios para proporcionar un ambiente adecuado para las instalaciones.

Henry investigó los límites de percepción del eco, los problemas de la posición relativa de la fuente y el receptor del sonido, pero su planteamiento más relevante fue **el tratamiento energético de los fenómenos acústicos de Reverberación y Absorción**, conceptos ligados íntimamente entre sí. Aunado a esto, fue el primero en claramente hacer la distinción entre eco y reverberación.

De la investigación de Henry se lee: “La reverberación es producida por la reflexión múltiple del sonido en las paredes de la habitación, y es mucho más frecuente la causa de la confusión en el entendimiento que el de un simple eco. [...] La persistencia de un sonido simple, y la tendencia a la confusión en el entendimiento debe depender de varias condiciones: del tamaño de la habitación; de la fuerza del sonido o la intensidad del impulso; de la posición de las superficies reflectoras; y de la naturaleza del material de dichas superficies.”

Tiempo después, en 1895, el rector de la Universidad de Harvard, con el objetivo de mejorar la acústica de la sala de conferencias del Fogg Art Museum, se contactó con el físico Wallace Clement Sabine.

Sabine, como parte de su estudio, convirtió la Sala de Temperatura Constante de la institución en un laboratorio especializado para la investigación del comportamiento del sonido en espacios cerrados, dando como resultado un gran avance en la Acústica Arquitectónica.

Dentro de las conclusiones del trabajo de Sabine se resaltan dos aspectos. Se establece que, se presentan gran cantidad de factores que contribuyen al resultado del comportamiento del sonido, por tanto, para encontrar la solución a problemas de índole acústica se deben de

considerar **parámetros cuantitativos y no cualitativos**. También señala la importancia de realizar estos estudios y diseños desde el proceso previo a la construcción, y no una vez construido el recinto.

Los trabajos de Sabine dieron como resultado innovaciones en la rama de la acústica. Fue el primero en estudiar el aislamiento a transmisión a ruido aéreo y de impacto. Trabajó con fabricantes de materiales de construcción en el desarrollo de elementos acústicos y fabricación de placas, aditamentos que ocuparon gran parte del mercado del acondicionamiento acústico a principios del siglo XX.

El vertiginoso crecimiento de la industria de la construcción trajo como resultado un interés formal a sus ramas adyacentes, entre ellas la acústica. Como consecuencia de la necesidad de brindar un marco serio de discusión científica que reuniera las actividades desarrolladas en torno a ésta, en 1929 un grupo de científicos liderados por el físico Wallace Waterfall fundaron la Sociedad Americana de Acústica.

## 2.2. Acústica.

Para las secciones subsecuentes, las cuales tratan temas teóricos tanto en la rama de la acústica cómo de dispersión de onda, se toman extractos de los libros de Beléndez (1992) y Hartman (2013). Esto con excepción de aquellas partes donde se indique otra cosa.

La acústica es la ciencia que se ocupa de los métodos de generación, recepción y propagación del sonido.

Cuando una onda sonora se propaga a través de un gas, un líquido o un sólido y alcanza nuestro oído, produce vibraciones en la membrana auditiva. Estas vibraciones producen una reacción del nervio auditivo. A este proceso se le conoce como audición.

Las ondas sonoras están dentro de la categoría de las ondas elásticas en las cuales la perturbación se propaga con una velocidad que depende de las propiedades elásticas del medio material donde tienen lugar dicha propagación. El sonido no puede propagarse en el vacío.

El punto del medio en el cual se produjo la vibración inicial, que al propagarse dio lugar al movimiento ondulatorio, recibe el nombre de foco.

El oído humano sólo puede percibir ciertas frecuencias de ondas sonoras, estas están comprendidas entre 16 y 20,000 Hz. Las frecuencias que se presentan fuera de este rango se conocen como infrasonicas si son menores a 16 Hz. Y Ultrasonicas si son superior a los 20,000 Hz.

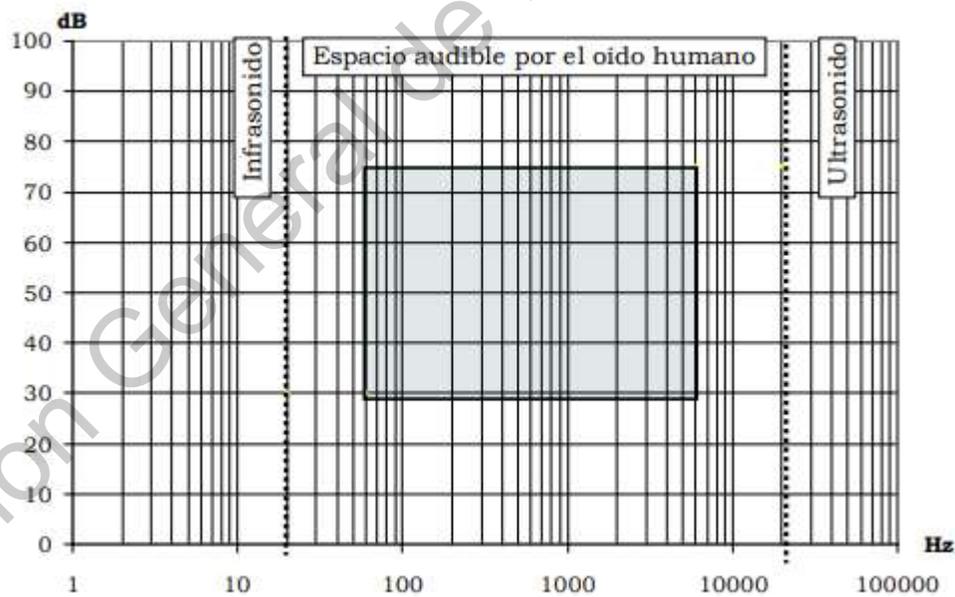


Fig. 2-1 Percepción óptima del oído humano. (INIFED, 2011)

Dentro del rango mencionado, se encuentra una zona de percepción óptima, de 600 a 6000 Hz. Dichas frecuencias trabajaran en conjunto con un rango de nivel del sonido de 30 a 75 dB. Zona representada en la Fig. 2-1. (INIFED, 2011).

### 2.3. Densidad y Presión.

Suponiendo un radio de propagación, el efecto en el medio causado por las ondas acústicas será similar al de un pistón excitando a un medio elástico en una dirección (Fig. 2-2).

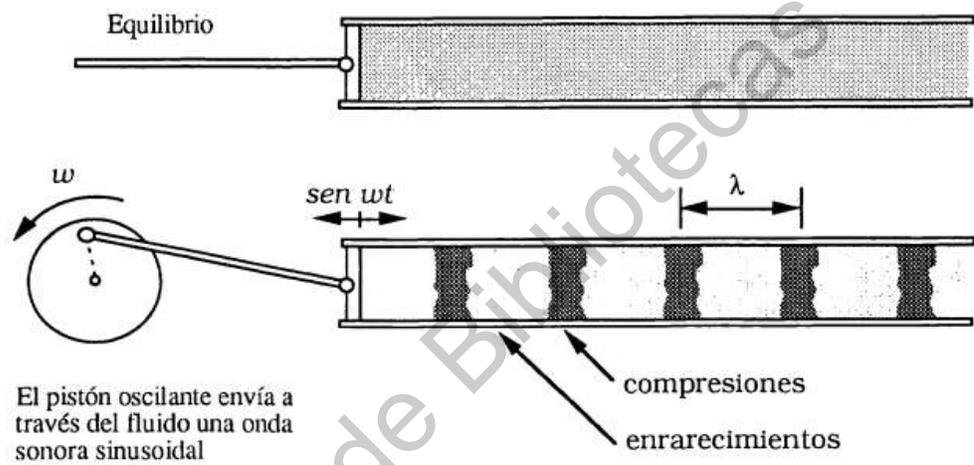


Fig. 2-2 Émbolo perturba al medio con una excitación sinusoidal. (Beléndez, 1992)

Cuando el pistón se encuentra en reposo el fluido tiene densidad y presión constante. Cuando el pistón se mueva hacia la derecha, la capa del fluido más próxima a él también se moverá en esa dirección. Esta capa de fluido ejercerá una fuerza sobre el elemento de fluido vecino, formándose una región móvil de **compresión**, región que continuará viajando hacia el interior del tubo.

Durante el movimiento de regreso del pistón, se forma una región de **enrarecimiento** o **dilatación** del fluido, que se moverá también hacia el interior del tubo, quedando situada entre la anterior compresión y una nueva que se forma cuando el pistón se desplaza de nuevo hacia la derecha.

Sucesivamente, los impulsos se irán transmitiendo a lo largo del tubo, sin embargo, las partículas del fluido no se transportan durante esta propagación, sino que vibran en torno a sus posiciones de equilibrio.

Por tanto, las ondas sonoras en fluidos son una sucesión de compresiones y dilataciones, de modo que al paso de la onda sonora la presión existente en el medio experimenta fluctuaciones que, en el caso más sencillo, son vibraciones armónicas.

Las compresiones corresponden a una acumulación de partículas del medio y por tanto a máximos de presión y densidad, mientras que los enrarecimientos corresponden a mínimos de presión y densidad (Fig. 2-3).

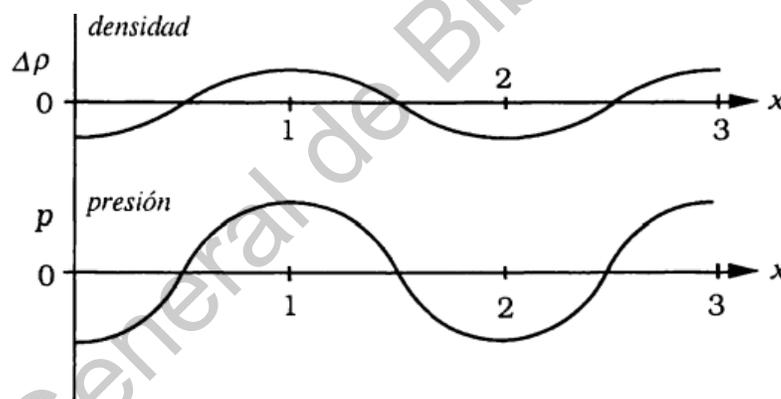


Fig. 2-3 Funciones de cambio de densidad y presión. (Beléndez, 1992)

## 2.4. Potencia e Intensidad.

Las ondas sonoras tienen **presión, potencia, intensidad y energía**.

Puede llegar a ser difícil el entendimiento del uso de la *presión* para describir el flujo del sonido, ya que la curva de presiones tiene tanto parte positiva como negativa, y

normalmente estas partes se encuentran en porciones iguales, dando como resultado un valor promedio de cero.

Esto último contrasta con el hecho de que la **Potencia Acústica** estrictamente tiene un valor **positivo**. La Potencia Acústica tiene relación con la **Amplitud de la Presión** el cual sí es una cantidad positiva. A la Amplitud la denotaremos con **A**.

Cuando una onda de sonido viaja desde la fuente, ésta *esparce* potencia en el espacio. Si cierta cantidad de potencia se esparce en un área grande, el sonido se considera *débil*, si la misma cantidad lo hace en un área chica, se considera *fuerte*. Los conceptos de *débil* y *fuerte* se ven reflejados en la **Intensidad**. Las dimensiones físicas de la Intensidad serán *potencia por unidad de área*.

$$I = \frac{P}{\text{area}} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

Donde:

I = Intensidad en Watts por metro cuadrado.

P = Potencia en Watts o Vatios.

Existe una relación entre la Amplitud y la Intensidad: La Intensidad es proporcional al cuadrado de la Amplitud de la Presión.

$$I \propto A^2 \quad (2)$$

## 2.5. Ley del Inverso del Cuadrado.

La ley expresa que la Intensidad es proporcional al Inverso del Cuadrado de la Distancia a la que nos encontremos de la Fuente.

$$I \propto \frac{1}{d^2} \quad (3)$$

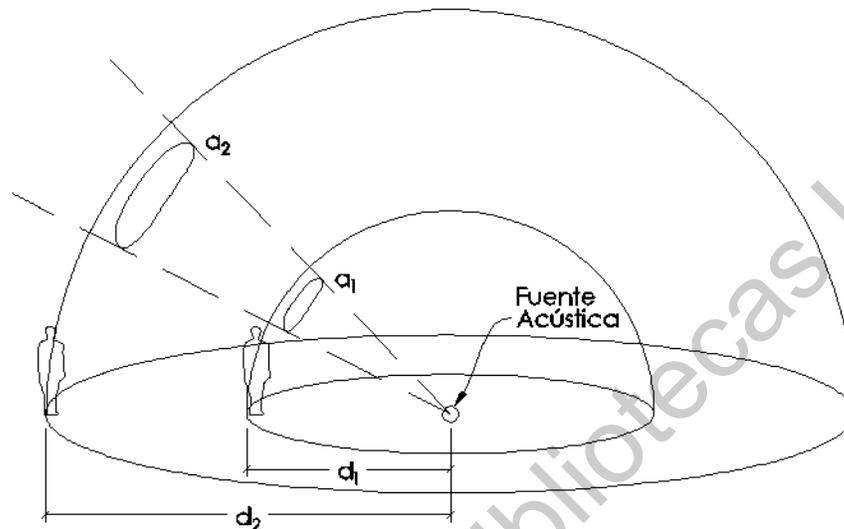


Fig. 2-4 Ley del Inverso al Cuadrado (Creación Propia).

La Fig. 2-4 muestra que a partir de la Fuente Acústica se irradia la potencia acústica en forma cónica. Si se está a una distancia  $d_2$  el doble de  $d_1$  la potencia pasara a través de un área ( $a_2$ ) cuatro veces más grande que  $a_1$ , dando como resultado una intensidad un cuarto menor en la distancia  $d_2$  que en  $d_1$ . Cuanto más lejos nos encontremos la potencia atravesará un área mayor dando una Intensidad menor.

La Ley del Inverso del Cuadrado no depende de la forma de radiación. Una fuente acústica irradia ondas acústicas de manera equitativa en todas las direcciones, es decir, es **isotrópico**. El área de la esfera se calcula con  $S = 4\pi d^2$ . Por tanto, la intensidad de la onda de sonido a una distancia  $d$  de la fuente es  $I = P/4\pi d^2$ .

La Ley del Inverso del Cuadrado se basa en un modelo **idealizado** en el que únicamente se involucran una fuente acústica, un receptor y aire entre ellos.

En un caso real existirían elementos, como muros, que reflejarían o dirigirían las ondas sonoras, y no se podría aplicar el modelo idealizado. La Ley del Inverso del Cuadrado no describiría la intensidad con respecto a la distancia de la fuente.

El modelo se puede aplicar a habitaciones en donde los muros y objetos absorban completamente el sonido sin reflejarlo. Estas habitaciones reciben el nombre de **anecoicas**.

Las cámaras anecoicas tienen sus muros revestidos de cuñas de espuma de aproximadamente un metro.

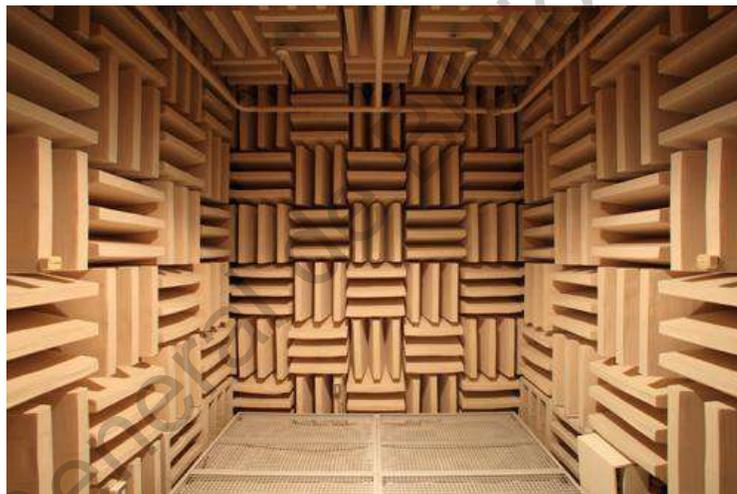


Fig. 2-5 Cámara Anecoica (Hery, 2012).

La Ley del Inverso Cuadrado podrá aplicarse en habitaciones pequeñas siempre y cuando la distancia entre el receptor y la fuente sea pequeña compara con la distancia de los muros del recinto. En este caso la reflexión de las ondas con los muros será pequeña comparada con el sonido que viaja de la fuente al receptor.

La Ley del Inverso Cuadrado también se puede aplicar en un campo abierto donde no se encuentren muros en la proximidad, y especialmente si el suelo se encuentra cubierto por algún material capaz de absorber el sonido, tal como la nieve fresca.

La Ley se aplica en recintos donde el objetivo es conocer cada reflexión acústica entre una superficie a otra. En contexto, este caso resalta ya que se analiza al sonido en una escala de tiempo microscópica.

En esta situación no se analiza la propagación del sonido de la fuente al receptor. Sino que se considera la propagación de la fuente a cada una de las reflexiones, hasta llegar finalmente al receptor.

## 2.6. Decibeles.

El **Decibel (dB)** es la unidad adimensional de medición del **Nivel del Sonido (L)**. Se trata de una medición **relativa** que compara la intensidad de un sonido analizando (**I**) con la intensidad del **Umbral de Audición (I<sub>o</sub>)**.

La Intensidad del Umbral de Audición es la intensidad correspondiente al sonido más débil que puede ser percibido por el oído humano. Por convención, el estándar internacional de dicha intensidad es  $I_o = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ .

Un Decibel es una décima parte de un **Bel (B)**. La relación entre intensidades que expresa el Bel se considera en escala logarítmica base 10. Por tanto, el Nivel del Sonido en decibeles (dB) se calcula como muestra la ecuación ( 4 ).

$$L = 10 \log(I/I_o) [dB] \quad (4)$$

### 2.6.1. Umbral del Dolor.

Una señal con un nivel mayor a 120 dB se encuentra dentro de la zona conocida como “Umbral de Dolor”. Dicha zona recibe este nombre debido a los efectos negativos que genera en el oído humano.

Las fronteras de la zona auditiva con el Umbral de Audición y el Umbral del Dolor no son constantes, varían dependiendo de la frecuencia. A las curvas resultantes de dicha variación se les conocen como **Curvas Isofónicas**. (Fig. 2-6)(INIFED, 2011)

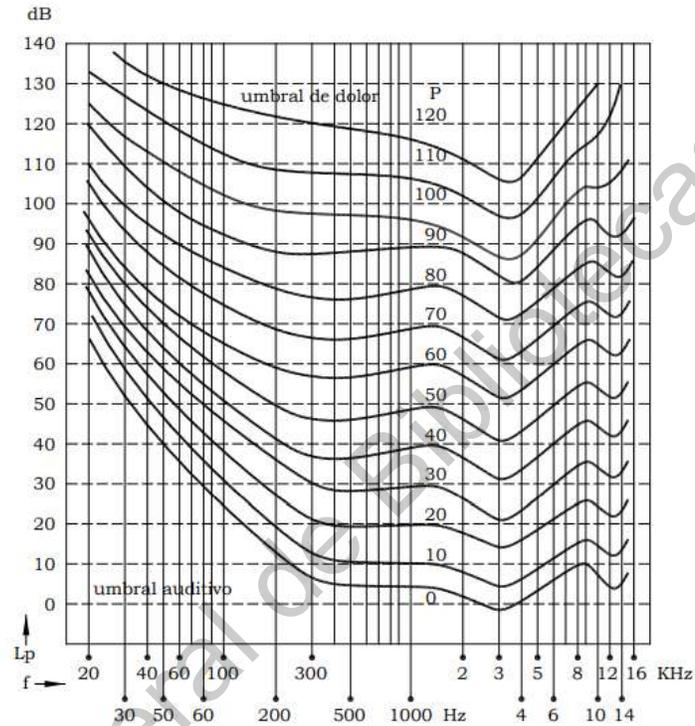


Fig. 2-6 Curvas Isofónicas. (INIFED, 2011)

## 2.7. Teorema de Fourier.

La **Síntesis de Fourier** es la sumatoria de movimientos armónicos simples con distintas frecuencias y amplitudes que dan como resultado una vibración compleja.

El **Análisis de Fourier** es el proceso opuesto a la síntesis. Partiendo de una onda compleja se obtendrán las distintas ondas sinusoidales que la conforman.

El **Teorema de Fourier** establece que **cualquier forma de onda** es una suma de un **único** conjunto de ondas sinusoidales. Es decir, que hay un sólo conjunto posible de frecuencias, amplitudes y fases de ondas sinusoidales que pueden resultar de un análisis.

Una onda compleja puede ser construida partiendo del **Espectro de Amplitud** y el **Espectro de Fase**. Los espectros son función de la frecuencia, mientras que la onda es función del tiempo.

Una onda sinusoidal sencilla tiene el siguiente comportamiento. (Hartmann, 2013)

$$Señal = A \sin(2\pi\omega t + \alpha) \quad (5)$$

Donde:

A = Amplitud de onda.

$\omega$  = Frecuencia de onda.

t = Tiempo, variable independiente.

a = Fase de onda.

Una onda sinusoidal compleja tiene el siguiente comportamiento. (Hartmann, 2013)

$$Señal = \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi\omega_i t + \alpha_i) \quad (6)$$

Donde:

n = Número de ondas sinusoidales simples que conforman la onda compleja.

A = Amplitud de cada onda simple.

$\omega$  = Frecuencia de cada onda simple.

t = Tiempo, variable independiente.

a = Fase de cada onda simple.

La **Ley de Ohm Fasorial** establece que, a pesar de que un cambio de fase, en alguna de las señales sinusoidales simples que conforman una señal compleja, pueda cambiar la forma gráfica de esta señal, su sonido percibido por el oído humano no se verá afectado.

Una onda compleja contiene en su forma gráfica un número indeterminado de repeticiones idénticas. A esta propiedad se le conoce como **Periodicidad**. La **Frecuencia fundamental** es el inverso del periodo del intervalo repetido.

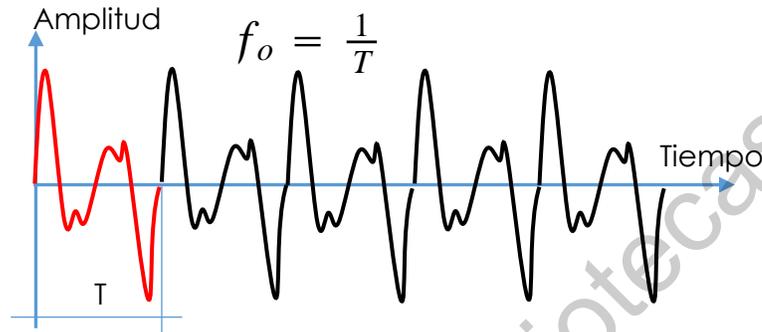


Fig. 2-7 Ejemplo de Onda Compleja. La parte que se repite tiene un periodo "T". El inverso de éste es la frecuencia fundamental de la onda "f<sub>o</sub>" (Creación Propia).

## 2.8. Reverberación.

En orden de mayor a menor influencia, los principales factores del Tiempo de Reverberación son el **Volumen del Recinto**, la **Absorción de los Materiales**, el **Manejo de las Reflexiones**. (INIFED, 2011)

El Tiempo de Reverberación es proporcional al volumen del recinto. Y para un volumen definido, la reverberación es inversamente proporcional a la superficie de absorción. (INIFED, 2011)

## 2.9. Acústica Arquitectónica.

En esta sección se revisarán técnicamente los aspectos arquitectónicos en cuanto a adecuación acústica se refiere. La información aquí mostrada estará basada en el libro de Recuero (2000), salvo donde se indique lo contrario.

Como se ha mencionado, una solución a problemas de índole acústica en recintos es la colocación de paneles. Se ha notado que aquellas señales con frecuencias bajas son difícilmente absorbidas por estos instrumentos. En este aspecto, el aire existente entre la cara del material y la superficie rígida es importante. Un espesor de 10 cm, como mínimo, funciona efectivamente en estas situaciones.

Acústicamente hablando los materiales tendrán tres tipos de coeficientes, la suma de estos coeficientes **nunca es mayor a la unidad**. (INIFED, 2011)

**Coefficiente de Reflexión:** Relación entre energía acústica reflejada y energía acústica incidente. (INIFED, 2011)

**Coefficiente de Transmisión:** Relación entre energía acústica transmitida y energía acústica incidente. (INIFED, 2011)

**Coefficiente de Absorción:** Relación entre energía acústica absorbida y energía acústica incidente. (INIFED, 2011)

En cuanto al coeficiente de absorción, este no es constante por cada material, sino que va variando dependiendo las frecuencias a las que esté sometido el material. Por tanto, es común que los materiales especializados tengan curvas de coeficientes de absorción como ejemplifica la Fig. 2-8, donde se muestra información de paneles de fieltro, se alcanza a apreciar que estos materiales tienen un comportamiento eficiente para frecuencias altas. Las gráficas están numeradas de acuerdo al espesor del panel, siendo 1) 5cm, 2) 2.5cm y 3) 1.6 cm.

Si se opta por trabajar con materiales porosos para absorción acústica es importante recordar que el espesor debe ser elegido cuidadosamente, esta propiedad afectará directamente al coeficiente de absorción del panel o material estudiado. Si el material es

demasiado delgado no podrá trabajar adecuadamente con las señales de baja frecuencias. Por otro lado, un material demasiado grueso podría representar un costo elevado.

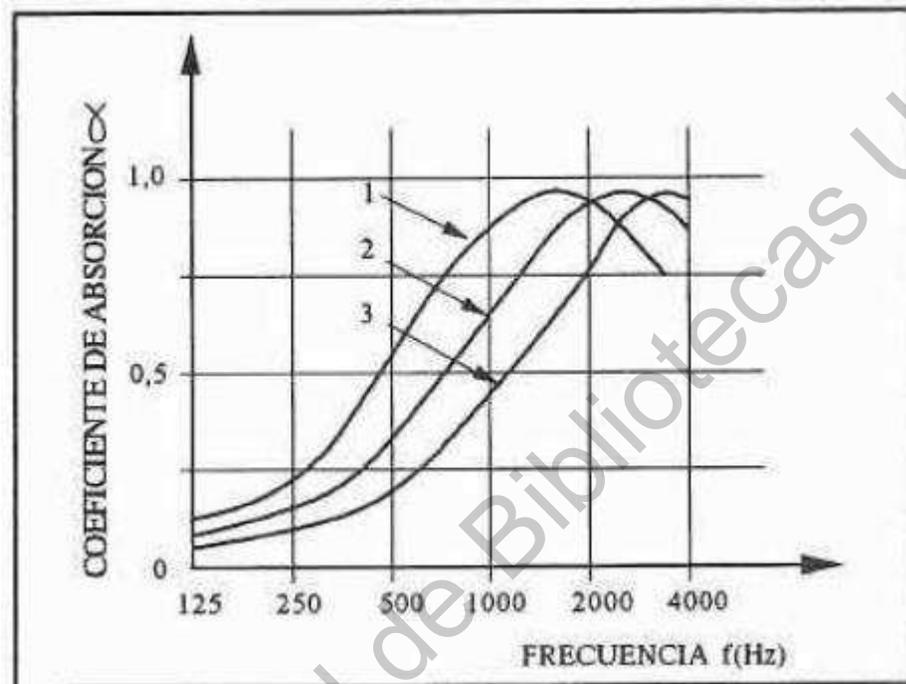


Fig. 2-8 Variación del Coeficiente de Absorción. (Recuero, 2000)

## 2.10. Antecedentes de Investigación Reciente.

Pérez-Egea et al. (2019) encontró que la mayoría de problemas de entendimiento en aulas docentes estaban relacionados con tiempos de reverberación. Se propuso como solución a los problemas acústicos, la implementación de paneles móviles para reducir el volumen del recinto, reduciendo así el tiempo de reverberación.

Postma y Katz (2015) en su estudio midieron los tiempos de reverberación de la Catedral de Notre-Dame. Los resultados fueron comparados con un estudio previo, realizado 30 años antes, y se demostró que los tiempos de reverberación habían disminuido. Al realizarse el modelo del recinto se concluyó que, fue el hecho de colocar alfombras en ciertas zonas lo que redujo el tiempo de reverberación.

Superficies que tengan capacidad de entrar en vibración evitan la reflexión de ondas, si bien, no absorben la energía de onda, ésta será disipada. Por otro lado, la utilización de materiales menos rígidos proporciona una mayor absorción acústica. (Pérez-Egea et al. 2019)

Cravero et al. (2013), en su investigación, solucionó el problema de altos tiempos de reverberación mediante la implementación de paneles fonoabsorbentes en ciertas zonas del recinto. Los paneles fueron colocados en techo a modo de plafón y se componían de una placa rígida de fibra de vidrio de 20 mm de espesor con revestimiento de PVC.

La Realidad Virtual brinda facilidad a los investigadores, debido a que se pueden obtener resultados de percepción a partir de situaciones simuladas. (Álvarez-Morales et al. 2017)

La auralización es la simulación del comportamiento del sonido en un determinado recinto. Considera entre varios factores la reverberación. Se ha demostrado que la auralización es un método confiable, ya que, los sujetos de prueba no alcanzan a distinguir entre una señal anecoica en una simulación y una grabación realizada en campo. (Álvarez-Morales et al. 2017).

Cravero et al. (2013), realizó un modelo computacional para conocer el comportamiento acústico de un recinto utilizando distintos tipos de plafones. La Fig. 2-9 muestra el tiempo (en segundos) que una señal tarda en tener una disminución de su nivel de 30 dB. La colocación del plafón propuesto favorece a la obtención de tiempos de reverberación deseados.

Para un mayor entendimiento, junto con el bajo tiempo de reverberación, debe existir un nivel de inmisión bajo. (Díaz-Chyla et al., 2018). El aislamiento acústico es una propiedad que expresa la reducción de ruido entre dos recintos, separados por un elemento; o entre un recinto interno y el exterior. (Godoy, 2014).

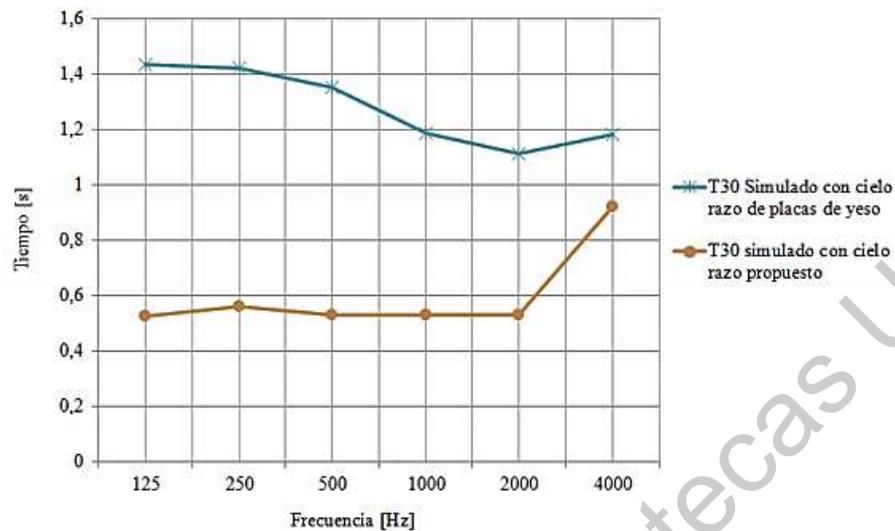


Fig. 2-9 Tiempos de Reverberación en función de la Frecuencia.

Díaz-Chyla et al. (2018) estudiaron los efectos que tienen diversas soluciones que fueron aplicadas a distintos salones en un centro educativo con problemas de inmisión debidas a distintos contaminantes acústicos.

En un principio las aulas tenían únicamente ventanas deslizables de vidrio sencillo con un espesor entre 4 y 6 mm. A algunas aulas se les colocó ventanales aislantes especializados conformados por dos capas de vidrio de 5 mm. y una cámara de 10mm. de espesor de aire inmóvil y seco. Al resto se optó por una solución más económica y práctica, se adicionó al ventanal ya existente un segundo mecanismo de ventana deslizable de vidrio sencillo con espesor similar al existente quedando un espacio de 15 a 20cm. entre ambas ventanas. (Díaz-Chyla et al., 2018)

Se obtuvieron menores datos de intrusión de ruido a las aulas en los casos en los que se tenía el doble ventanal de vidrio sencillo, incluso mejores resultados que por los ventanales aislantes especializados. (Díaz-Chyla et al., 2018)

En la Fig. 2-10 se muestran los resultados del experimento, en algunos casos se aprecia que, si bien el ventanal especializado muestra una mejoría de 6dB. en comparación

con ventanas sencillas, el hecho de colocar doble ventanal tiene una eficiencia mayor de 16dB. en el nivel de inmisión.

Godoy Lara (2014), optó por agregar poliestireno triturado a la mezcla del mortero. Al hacerlo demostró que, si bien existe una deficiencia en la resistencia a la compresión, esta es compensada por un elemento más liviano y con capacidades aislantes.

Se comprobó experimentalmente que el panel de mortero con poliestireno tuvo una capacidad de absorción acústica; la cual se traduce en una reducción de 67 dB a 34 dB en el mejor de los casos. (Godoy, 2014).

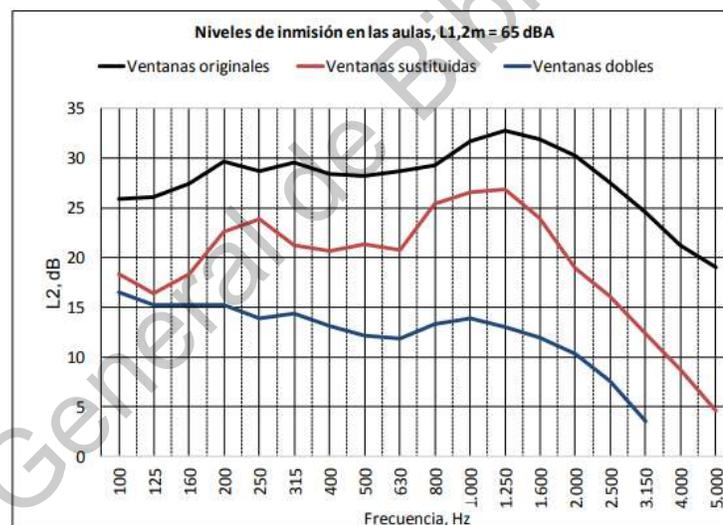


Fig. 2-10 Nivel de Inmisión de Ruido por cada tipo de Ventanal en función de la Frecuencia. (Díaz-Chyla et al., 2018)

El espesor de los muros es un factor importante para la disminución en la inmisión de ruido. En pruebas, muros con espesores de 18 cm tienen un mejor desempeño comparados con aquellos de 14 cm que llegaban a permitir inmisiones que, incluso, superaban las recomendaciones. (Montoya, 2014)



Fig. 2-11 Panel utilizado en el trabajo de Montoya. (2014)

Montoya (2014) en su investigación propuso la implementación de un panel de material reciclado, el cual generó una reducción de ruido de hasta el 9%. Sin embargo, al comparar todas las variables, el espesor del muro era el factor decisivo, incluso sobre el uso del panel propuesto.

Cobrerros Rodríguez (2015) presentó un nuevo sistema constructivo de paneles basado en la implementación de tierra estabilizada y paja de cereal. En su investigación resalta la metodología, ya que se utilizaron procesos completamente analíticos para conocer el comportamiento del panel; se aplicaron expresiones matemáticas, autorizadas por la Norma Española de Protección Frente al Ruido, para calcular la reducción en inmisiones.

En cuanto a reducción de inmisión acústica, el mejor desempeño lo tendrán aquellos paneles con mayor densidad y mayor masa, ambas propiedades utilizados en distintos métodos analíticos. (Cobrerros, 2015)

## 2.11. Sala Nezahualcóyotl.

La Sala Nezahualcóyotl, ubicada en Coyoacán, Ciudad de México, es la sede de la Orquesta Filarmónica de la Universidad Nacional Autónoma de México. La Sala resalta por

su diseño acústico, llegando a ser considerada la más importante de Hispanoamérica. (Álvarez, 2011).

En la Sala Nezahualcóyotl la orquesta se sitúa en el centro de la sala de audiciones y no junto a una pared o detrás de un telón como en los teatros clásicos; esto tiene la ventaja de que las ondas sonoras llegan directamente a los oídos de los espectadores colocados alrededor del escenario. (Artiagas, 2016).

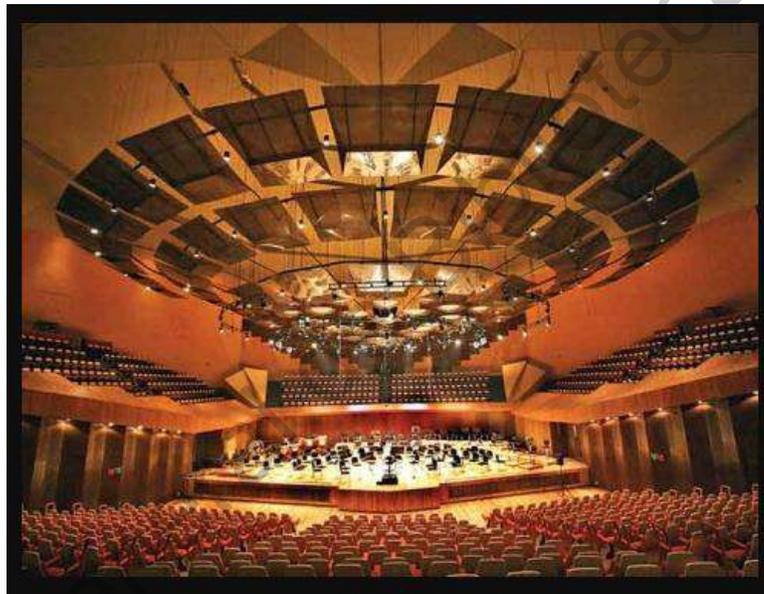


Fig. 2-12 Sala Nezahualcóyotl (Bautista, 2016).

El sonido reflejado, que complementa al que se recibe directamente, es dirigido por la forma de las paredes y por el plafón acústico, que lo lanza hacia la zona del público sin que se produzca eco. El diseño permite que las ondas se propaguen con un mínimo de pérdida de vibraciones por transmisión directa hacia los materiales de construcción. (Artiagas, 2016).

## 2.12. Normas y Especificaciones.

En México, el Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa se encarga de la publicación y revisión de las normas relacionadas con la acústica en recintos académicos.

Estas Normas establecen las bases y los requerimientos generales mínimos en el diseño de los espacios, para que éstas ofrezcan una acústica adecuada con procedimientos de aislamiento y absorción del fenómeno sonoro. (N. y E. para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones, 2011)

### 2.12.1. Normativa en cuanto a Tiempos de Reverberación.

Cuando se requieran tener valores de Tiempo de Reverberación (TR) específicos, se debe demostrar mediante cálculos que el recinto cuenta con dichos valores. Se debe tener la cantidad de sonido reverberante específico dependiendo del uso del recinto para cada frecuencia estudiada. (INIFED, 2011)

Como ya se mencionó el volumen del recinto es el factor más influyente en el cálculo de TR. La Tabla 2-1 muestra el volumen recomendado por espectador según el uso que se le dará al recinto.

Tabla 2-1 Volumen recomendable por espectador dependiendo del uso del recinto. (INIFED, 2011)

Tipo	m <sup>3</sup> por espectador		
	mínimo	óptimo	máximo
Salas de conferencia (aulas)	2.3	3.1	4.0
Cines	2.8	3.5	5.1
Opera	4.5	5.7	7.4
Auditorios de uso general	5.1	7.1	8.5
Salas de concierto	6.2	7.8	10.8

El tiempo de reverberación (TR<sub>60</sub>), para espacios educativos con volumen menor que 283 m<sup>3</sup>, deberá ser menor o igual a 0.6 segundos. Para un volumen mayor a 283 m<sup>3</sup> y menor a 566 m<sup>3</sup>, no deberá excederse de 0.7 segundos. En caso de aulas con volumen mayor a 566

m<sup>3</sup>, y sin llegar a ser considerada auditorio, entonces el tiempo de reverberación será máximo de 0.9 ó 1 segundo. (INIFED, 2011)

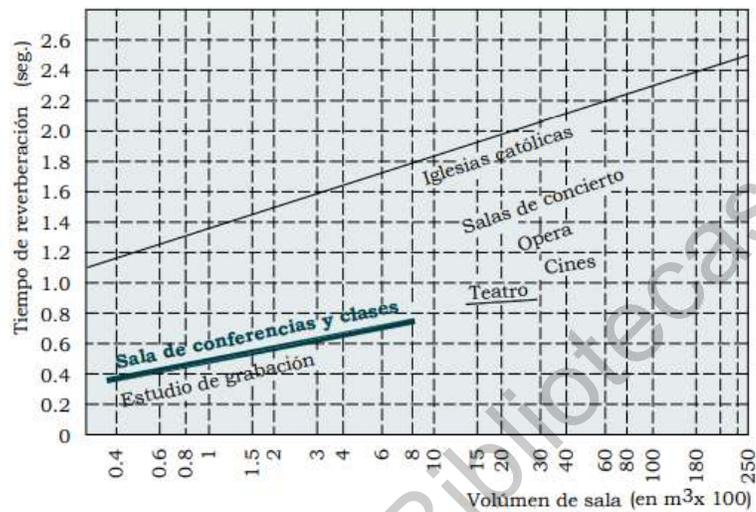


Fig. 2-13 Tiempos de Reverberación recomendados para distintos usos en función del volumen del recinto. (INIFED, 2011)

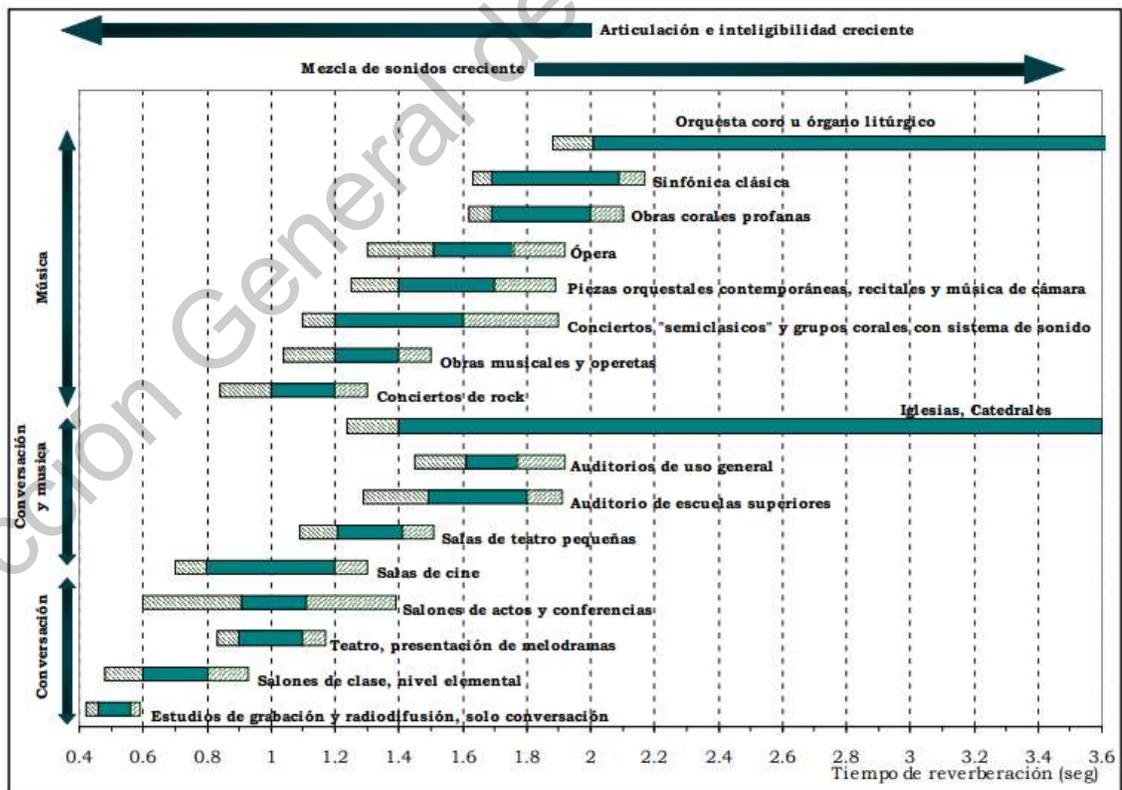


Fig. 2-14 Tiempo de Reverberación recomendado para distintos usos de recinto. (INIFED, 2011)

## 2.12.2. Ecuación de Tiempos de Reverberación.

Tabla 2-2 Ecuación de Tiempos de Reverberación. (INIFED, 2011)

VOLUMEN m <sup>3</sup>	FRECUENCIA DE HERTZ					
	125	250	500	1000	2000	4000
Más de 283 m <sup>3</sup> y hasta 566 m <sup>3</sup>	1.4	1.08	0.9	0.7	0.68	0.8
Hasta de 283 m <sup>3</sup>	1.28	0.98	0.78	0.6	0.58	0.68

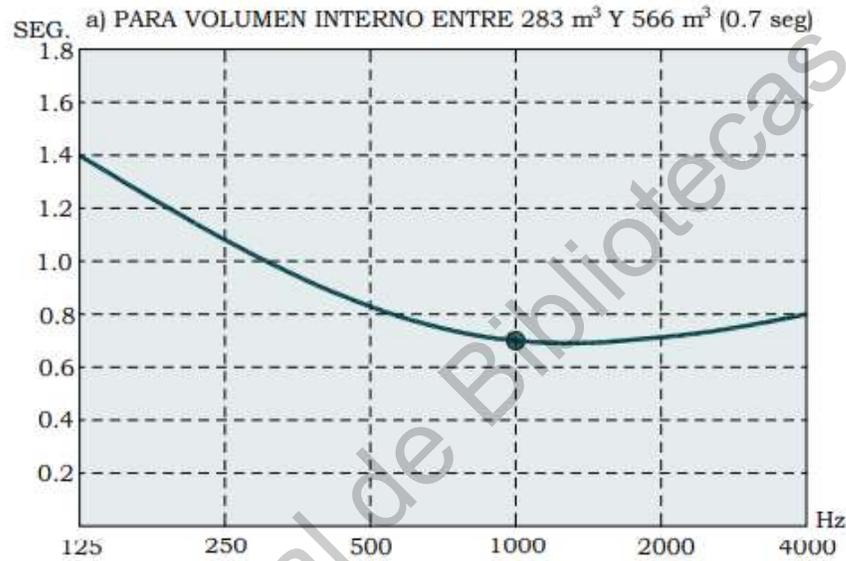


Fig. 2-15 Ecuación de Tiempos de Reverberación a. (INIFED, 2011)

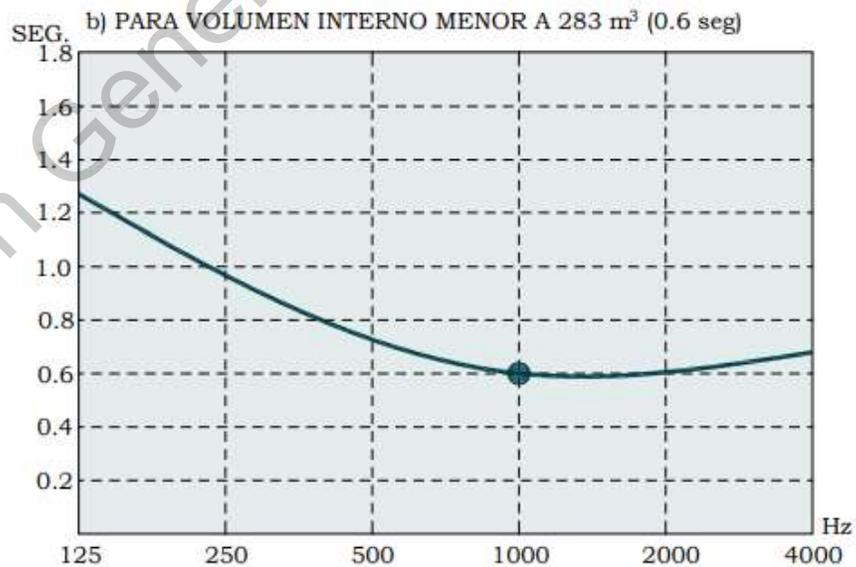


Fig. 2-16 Ecuación de Tiempos de Reverberación b. (INIFED, 2011)

La Tabla 2-2, Fig. 2-15 y Fig. 2-16 establecen la ecualización sugerida de tiempos de reverberación para recintos educativos. La frecuencia de 1000 Hz se iguala al valor requerido. Hacia las frecuencias altas se mantendrá un valor ligeramente mayor. Hacia las frecuencias bajas el incremento será más drástico, al ser el oído humano menos sensible a éstas, se debe dar mayor “brillo”. (INIFED, 2011)

### 2.13. Conclusiones de la Revisión de Literatura.

A lo largo del camino que la acústica ha recorrido, se han innovado los procesos. Poco a poco, las pruebas virtuales y modelaciones matemáticas han ganado terreno en esta área, disciplina que se había estado caracterizando por un trasfondo teórico principalmente empírico.

Postma y Katz (2016) en repetidas ocasiones hacen hincapié en las deficiencias metodológicas de los pocos estudios previos realizados en su recinto de estudio, los cuales son reducidos, teniéndose poca información de la acústica, y con metodología y resultados presentados de forma muy simple. Por lo que expresan la necesidad de formalizar los estudios y análisis en el área.

Con ese objetivo en mente, la investigación (Postma y Katz, 2016) tuvo un enfoque y un procedimiento particular de suma importancia. Tomaron una grabación de una prueba existente, que arrojaba información del carácter acústico del recinto. Basado en esto, recrearon la prueba con las condiciones actuales y pudieron obtener, de manera empírica, información relevante de los cambios en el comportamiento. Sin embargo, esto no bastaba, era necesario encontrar y sustentar la razón de este cambio. Es por eso, que se optó por realizar una modelación digital del recinto, y esta, al ser calibrada con la información de los experimentos, pudo arrojar datos sobre los factores que influían en los cambios mostrados.

En el proceso de formalización de la investigación acústica, ha sido necesario considerar un mayor número de factores y variables que trabajan en conjunto. El trabajo de Postma y Katz (2016) evidenció esta necesidad. Al tratarse de un recinto con un volumen mucho mayor a lo que normalmente se maneja, algunas estimaciones comenzaron a variar al compararlas con los datos obtenidos de forma empírica. Esto resultó en el uso de correcciones de datos, procedimientos que consideraban factores tales como la turbulencia del aire y, en mayor medida, la temperatura. Esto basado en el principio de que las variaciones en las propiedades acústicas del recinto son nulas.

El innovar en el conocimiento, las adecuaciones y diseños relacionados con la acústica, ha demostrado ser de suma importancia, debido a las múltiples y negativas consecuencias, previamente discutidas, que un ambiente acústico en condiciones desfavorables provoca. De igual manera, es importante conocer las herramientas que se pueden implementar para adecuaciones existentes y sus ventajas.

Se debe tener claro el objetivo y el uso que el recinto tendrá. Tomando como ejemplo el trabajo de Díaz-Chyla et al. (2018), un recinto destinado a la docencia debe cumplir con parámetros en cuanto a tiempos de reverberación se refiere, y tener bajos niveles de inmisión de ruido tanto del exterior como de otros recintos dentro de la misma estructura (Pérez-Egea et al., 2019). En los casos en los que se tengan condiciones desfavorables, será necesario intervenir el recinto por medio de una adecuación, la cual puede trabajar en conjunto con sistemas electrónicos, con el fin de potenciar la claridad del mensaje. (Pérez-Egea et al., 2019)

Enfocándose en la intromisión de ruido, se optó por probar experimentalmente el desempeño de dos propuestas. Los resultados fueron contundentes. La implementación de una ventana de vidrio sencillo, adicional a la existente, dio como resultado un aislamiento acústico mejor que el proporcionado por ventanales especializados. Este caso de estudio, en particular, es sumamente interesante, la estructura donde se encontraban los recintos a

analizar estaba sometida a señales constantes de ruido excesivo, esto derivado de la cercanía con un aeropuerto y vías vehiculares fuertemente transitadas. En los escenarios más intensos, en el exterior se tenían señales extremadamente fuertes de hasta 75 dB, las cuales se alcanzaron a disminuir a 35 dB con la implementación mencionada. (Díaz-Chyla et al., 2018)

Como se mencionó, al tener como enfoque el entendimiento de la audiencia, el comprender cómo es que se transmiten, reflejan y absorben las ondas acústicas es de suma importancia. Es menester tener un correcto comportamiento, sobretodo, de los reflejos de onda y los tiempos de reverberación que de estos resulten. Sin embargo, generalmente las aulas y pequeños auditorios destinados a la comunicación oral son construidos sin considerar criterios acústicos. (Cravero et al., 2013)

Desafortunadamente, es recurrente encontrar recintos constituidos por materiales con baja absorción acústica. Sin embargo, es posible aplicar adecuaciones para disminuir los altos tiempos de reverberación consecuentes. El utilizar recubrimientos en grandes áreas del recinto, como plafones en el techo, tiene resultados favorables. (Cravero et al., 2013)

Pérez-Egea et al. (2019) ofrecen información relevante sobre el control del rebote de las ondas acústicas. Es favorable la colocación de materiales con alta rugosidad en el revestimiento de las superficies, estos se caracterizan por tener un coeficiente de absorción elevado. Los materiales absorbentes son porosos, generalmente están formados por sustancias fibrosas o granulares, pueden estar constituidos por fibra de vidrio, fibra mineral, espuma a base de resina y espuma de poliuretano.

Como complemento a los materiales previamente mencionados, es posible la implementación de resonadores. Estos son instrumentos mecánicos con una gran capacidad de absorción de frecuencias bajas, lo que favorece la disminución de tiempos de reverberación, y pueden ser encontrados en gran variedad de modelos para los diferentes requerimientos del recinto. (Pérez-Egea et al., 2019)

Como se ha analizado, es común tener escenarios desfavorables en cuanto a necesidades acústicas. Sin embargo, las adecuaciones de recintos, en su mayoría, implican una modificación menor, ya que no se modifican factores geométricos generales que podrían significar una fuerte inversión, tal como modificaciones de elementos estructurales, claros de marcos, alturas de niveles, etc. Más bien, se modifican aquellas propiedades físicas y geométricas de elementos arquitectónicos, tales como ventanas, plafones y recubrimientos. Como se verá a continuación, incluso es posible plantear estas modificaciones sin la necesidad de implementarlas físicamente, evitando así costos y tiempos de implementación extras. Obteniendo finalmente un resultado favorable.

Considerando nuevas edificaciones o remodelaciones de antiguos espacios, y teniendo como fin; la certeza de que el comportamiento acústico del recinto será el requerido para el uso de este, es necesario y de suma importancia que estos trabajos cumplan con requisitos mínimos, enfocados en el tiempo de reverberación y aislamiento acústico, tanto con el exterior como con la inmisión de ruido entre recintos de un mismo centro. Es menester que los requisitos sean considerados a lo largo de todo el proyecto; desde la etapa de diseño, hasta la entrega de la obra, y mientras se encuentre en servicio, siempre bajo la supervisión de asesores con conocimiento en el tema. Una vez construido el complejo, las condiciones exigidas, consideradas en el proyecto, deberán ser corroboradas mediante experimentación “in situ” del comportamiento acústico del recinto, para poder considerar la obra aceptada. (Pérez-Egea et al., 2019)

Pérez-Egea et al. (2019) brindan en su trabajo una serie de recomendaciones de adecuaciones acústicas para aulas con problemas de entendimiento. El reducir el volumen del aula, por medio de paneles móviles, cuando ésta no se encuentre en uso total, beneficia directamente a tener tiempos de reverberación óptimos. La utilización de elementos capaces de entrar en vibración, tales como ventanas, puertas, paredes ligeras y materiales de rigidez baja, disipan la energía sonora al exterior. Igualmente, se destacan los perjuicios derivados del ruido interno existente en el recinto. El ruido es provocado por los diversos aparatos

electrónicos y de ventilación instalados. Es importante revisar el mobiliario, y tener en cuenta que los sonidos producidos por estos no superen los límites reglamentarios.

Cravero et al. (2013) resaltan la ventaja principal de realizar estudios por medio de modelos computacionales. Hoy en día es común que los diversos softwares especializados sean utilizados en el diseño y acondicionamiento de recintos. Es posible aplicar diversos criterios de diseño, modificar las propiedades de los materiales constitutivos y evaluar los resultados de comportamiento acústico. Todo, sin la necesidad de realizar modificaciones físicas al aula en cuestión.

Sin embargo, trabajar con modelos computacionales, utilizados en la simulación de campos sonoros en el interior de recintos, no siempre puede dar información certera. Estos análisis dan como resultado un elevado número de parámetros, los cuales pueden llegar a ser en ocasiones difíciles de evaluar y sobretodo controlar. Estas problemáticas se presentan recurrentemente en proyectos de adecuación o rehabilitación de espacios dedicados a la docencia. (Pérez-Egea et al., 2019)

Como se mencionó, el uso de programas computacionales, para el estudio del comportamiento acústico, suele ser complicado, debido a la complejidad de los resultados. Sin embargo, existen opciones que llegan a ser ventajosas. Tales como la implementación de simulaciones acústicas. Es posible la aplicación de procesos de auralización para conocer, de forma certera y asemejando la acústica del entorno físico, las diferentes percepciones y sensaciones producidas por el sonido dentro de un recinto, esto mediante el uso de la realidad virtual. La simulación debe ser calibrada con mediciones “in situ” de parámetros acústicos y características absorbentes de los materiales. Es importante recordar que este es un proceso sensorial y cualitativo, considera de forma somera los datos cuantitativos del comportamiento mecánico y físico de las ondas transmitidas en el medio. (Álvarez-Morales et al., 2017)

### 3. Fenomenología Física. Modelo Discreto.

#### 3.1. Fenomenología.

Para la realización del modelo será necesario tener en cuenta fundamentos de Mecánica de Fluidos, en este caso se ahondará en lo expresado en el libro de Gurtin (1981). De manera adicional también se toma información del libro de Hartmann (2013), utilizado para enfocar y aterrizar todo el conocimiento teórico. Toda esta información se encuentra aplicada a los distintos procesos de funcionamiento del software a utilizar, es por eso que también se revisa el Manual de Usuario del software Mechanical APDL ANSYS 14.0.

Básicamente se trata de un modelo matemático que tendrá dos componentes a grandes rasgos, aquellos que sirvan como confinamiento del recinto (estructurales) y el medio en el que se transmitirán las ondas acústicas (fluido).

Se está tratando un problema de interacción fluido-estructura de tipo acústico, para esto se consideran la ecuación ( 7 ) de Navier-Stokes, relacionada con la ecuación de Momentum, y la ecuación ( 8 ) de Equilibrio Dinámico.

$$\rho v' + (\text{grad } v)\rho v = \mu \Delta v - \text{grad } \pi + b \quad (7)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del medio

$v$  = Vector Velocidad

$\mu$  = Viscosidad del fluido

$\pi$  = Presión hidrostática

$b$  = Vector de Fuerzas de Cuerpo

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (8)$$

Donde:

M = Matriz de Masas

C = Matriz de Amortiguamiento

K = Matriz de Rigideces

u = Vector de desplazamiento (y derivadas respecto al tiempo)

F = Vector de Fuerzas

A partir de estas ecuaciones se obtiene la ecuación ( 9 ) de Onda Acústica. Para esto es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

El Fluido es compresible (la densidad cambia debido a las variaciones de presión)

El fluido no es viscoso. (No hay disipación viscosa)

No hay flujo medio en el fluido.

La densidad media y la presión son uniformes a lo largo del fluido.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \Delta P = 0 \quad (9)$$

Donde:

P = Presión acústica

c = velocidad del sonido dada por la ecuación ( 10 ).

$$c = \sqrt{k/\rho_o} \quad (10)$$

Donde:

k = Módulo de compresibilidad del fluido.

$\rho_o$  = Densidad media del fluido.

Tomando en cuenta las consideraciones establecidas, se observa que las ecuaciones de *Momentum del fluido* se traducen en una relación entre el gradiente de la presión normal, y la aceleración normal de la estructura en la interfaz S. Es importante recalcar que en los problemas de interacción fluido-estructura a la superficie S, se le llamará *Interfaz*.

Se procede a realizar la discretización de la ecuación ( 9 ), multiplicándola por un *cambio de presión virtual* e integrándola en el volumen del dominio. Del cálculo de esta discretización y tomando en cuenta la ecuación ( 11 ) se obtiene la ecuación ( 12 ).

$$\{n\} \cdot \{\nabla P\} = -\rho_o \{n\} \cdot \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2} \quad (11)$$

Donde:

n = Vector Unitario Normal a la Interface S.

$$\int_V \frac{\delta P}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV + \int_V (\text{div } \delta P)(\nabla P) dV = - \int_S \rho_o \delta P \{n\}^T \left( \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2} \right) dS \quad (12)$$

Donde:

$\delta P$  = Cambio de Presión Virtual.

Aplicando las Funciones de Forma para la aproximación del Elemento Finito tanto para la variación espacial de la presión, como de los desplazamientos. Y usando la Matriz de Desplazamiento-Deformación  $[B]$ , se obtiene la ecuación ( 13 ).

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{1}{c^2} \{\delta P_e\}^T \{N\} \{N\}^T \{\ddot{P}_e\} dV + \int_V \{\delta P_e\}^T [B]^T [B] \{P_e\} dV \\ & + \int_S \rho_o \{\delta P_e\}^T \{N\} \{n\}^T \{N'\}^T \{\ddot{u}_e\} dS = \{0\} \end{aligned} \quad (13)$$

Se factoriza el *Cambio de Presión Virtual*. La ecuación resultante se acomoda de tal manera que se obtiene la Matriz ( 14 ) de Masas del Fluido, la Matriz ( 15 ) de Rigidez del Fluido y la Matriz ( 16 ) de Masas Acopladas. Por tanto, la ecuación ( 13 ) puede escribirse como la ecuación ( 17 ) de Onda Discretizada.

$$[M_e^P] = \frac{1}{c^2} \int_V \frac{1}{c^2} \{N\} \{N\}^T dV \quad (14)$$

$$[K_e^P] = \int_V [B]^T [B] dV \quad (15)$$

$$\rho_o [R_e] = \rho_o \int_S \{N\} \{n\}^T \{N'\}^T dS \quad (16)$$

$$[M_e^P]\{\ddot{P}_e\} + [K_e^P]\{P_e\} + \rho_o[R_e]^T\{\ddot{u}_e\} \quad (17)$$

A la ecuación ( 9 ) de Onda Acústica se le agrega el término relacionado con la disipación de energía debida al amortiguamiento presente en la frontera, al realizar la discretización se obtiene la ecuación ( 18 ).

Para esto es importante recordar el término de *Impedancia Acústica* ( $Z$ ), que es la resistencia que opone un medio a la propagación de ondas sonoras sobre este. Se define como **la razón entre la presión acústica (P) y la velocidad de las partículas (v)** de un medio. El inverso de la impedancia es la *Admitancia Acústica* ( $Y$ ).

$$\int_V \delta P \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV - \int_V \delta P \Delta P dV + \int_S \delta P \rho_o Y \frac{\partial P}{\partial t} dS = 0 \quad (18)$$

Donde:

$Y$  = Admitancia acústica en la frontera ( $Y = 1/Z$ ).

A este nuevo término se denotará con  $D$ , y será el Término de Disipación. Se aplica la aproximación del elemento finito para la Presión. El término de Disipación se añade a la ecuación ( 17 ). Tras un acomodo se obtiene la Matriz de Amortiguamiento del Fluido ( 19 ) y la ecuación ( 20 ) de Onda Discretizada considerando la pérdida de energía en la superficie de la frontera absorbente.

$$[C_e^P] = \rho_o Y \int_S \{N\} \{N\}^T dS \quad (19)$$

$$[M_e^P]\{\ddot{P}_e\} + [C_e^P]\{\dot{P}_e\} + [K_e^P]\{P_e\} + \rho_o[R_e]^T\{\ddot{u}_e\} = \{0\} \quad (20)$$

Para describir completamente el problema interacción fluido-estructura, es necesario considerar al Vector de Carga debido a la Presión del Fluido sobre la interfaz  $S$ , definido en la ecuación ( 21 ). Teniendo como resultado, la ecuación ( 22 ) Dinámica.

$$\{F_e^{pr}\} = \int_S \{N'\} P \{n\} dS \quad (21)$$

$$[M_e] \{\ddot{u}_e\} + [C_e] \{\dot{u}_e\} + [K_e] \{u_e\} = \{F_e\} + \{F_e^{pr}\} \quad (22)$$

Se aplica la aproximación para elementos finitos de la función de Presión. Comparando el resultado con la ecuación ( 16 ), el vector se simplifica, obteniendo la ecuación ( 23 ). Resultando en la Ecuación ( 24 ) Dinámica Elemental de la Estructura.

$$\{F_e^{pr}\} = [R_e] \{P_e\} \quad (23)$$

$$[M_e] \{\ddot{u}_e\} + [C_e] \{\dot{u}_e\} + [K_e] \{u_e\} - [R_e] \{P_e\} = \{F_e\} \quad (24)$$

Las ecuaciones ( 24 ) y ( 20 ) describen el comportamiento completo del problema discretizado de elementos finitos de interacción fluido-estructura, las cuales se ensamblan dando como resultado la ecuación ( 25 ).

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_e] & [0] \\ [M^{fs}] & [M_e^P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_e\} \\ \{\ddot{P}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_e] & [0] \\ [0] & [C_e^P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{P}_e\} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [K_e] & [K^{fs}] \\ [0] & [K_e^P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_e\} \\ \{P_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_e\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

Donde:

$$\begin{aligned} [M^{fs}] &= \rho_o [R_e]^T \\ [K^{fs}] &= -[R_e] \end{aligned}$$

Se habrá obtenido la ecuación de interacción de problemas fluido-estructura. Donde las matrices con superíndice  $p$  y la matriz  $[R_e]$  son generadas por el elemento de fluido acústico, y el resto por los elementos estructurales.

Estos serán los componentes que regirán el comportamiento de las Ondas Acústicas a través de nuestro modelo.

### 3.2. Modelo de Elemento Finito.

En esta sección se describe el tipo de elemento finito usado en la modelación. La información desplegada a continuación está basada en el manual de usuario del software ANSYS Mechanical APDL.

En este caso de estudio se optó por usar el Elemento denominado FLUID30, éste es utilizado en la modelación de medios fluidos y en la interface de problemas de interacción fluido-estructura. Más específicamente es utilizado para la propagación de ondas sonoras, aunque también puede utilizarse para estudios dinámicos de estructuras sumergidas.

Se hace uso de la ecuación gobernante para acústica, también llamada ecuación de onda 3-D, la cual es discretizada tomando en cuenta el acoplamiento de la presión acústica y dinámica de la estructura en la interface.

El elemento FLUID30, en su forma más compleja, puede tener hasta 8 nodos con 4 grados de libertad cada uno; traslación en las tres direcciones y presión. Es importante recordar que la traslación únicamente es aplicable a aquellos nodos que se encuentren en la interface fluido-estructura. Este elemento tiene la capacidad de incluir el amortiguamiento debido a la absorción sonora provocada por el material de la interface, así como el amortiguamiento dentro del mismo fluido en sí. La Fig. 3-1 muestra la geometría, localización de nodos y el sistema coordenado del elemento.

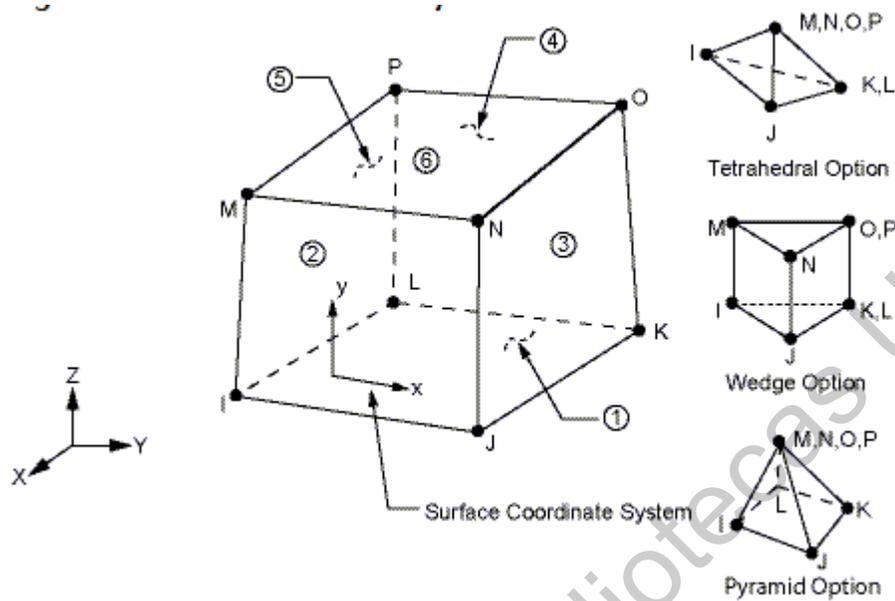


Fig. 3-1 Opciones de elemento FLUID30 (Manual de Usuario ANSYS).

### 3.2.1. Información de Entrada.

El elemento está definido por 8 nodos como máximo, sin embargo, debido a la complejidad geométrica del caso de estudio se optó por utilizar la forma tetraédrica, por lo que serán, en este caso particular, 4 los nodos que definan al elemento.

De igual manera se requieren propiedades del medio que se esté tratando, es decir, propiedades del aire en este caso, tales como presión de referencia, velocidad del sonido (previamente discutida), densidad del fluido y el efecto de la disipación debido a la viscosidad.

También, es necesario que se indique la interface fluido-estructura como cargas sobre estas superficies, esto acoplará la dinámica de la estructura con la presión del fluido en la interface. Es importante recalcar que esta señalización deberá ser aplicada en los elementos correspondientes al fluido.

Es necesario declarar las superficies de impedancia, este valor es usado para poder considerar el amortiguamiento que se puede presentar en las fronteras de la estructura en las que se consideren absorción sonora.

Será importante indicar si el elemento en cuestión se encuentra en contacto o no con la interface de la estructura. La opción KEYOPT (2) =1 indica la ausencia de estructura en la interface, por tanto, la ausencia del acoplamiento del fluido y la estructura, lo cual produce matrices simétricas del elemento. Por otro lado, KEYOPT (2) =0 especifica un acoplamiento, por tanto, un problema de matrices asimétricas.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## 4. Hipótesis y Objetivos.

### 4.1. Hipótesis.

La fidelidad del sonido dentro de un aula docente puede mejorarse modificando su comportamiento acústico, adecuando propiedades topológicas de los materiales que lo constituyen, lo que repercute en la absorción, difracción y aislamiento. Esto se corrobora mediante el modelado del fenómeno acústico introduciendo conformaciones diversas de paneles y plafones.

### 4.2. Objetivo General.

Generar el modelo físico discreto de determinada aula de estudio, analizar el comportamiento de las ondas acústicas, considerando su transmisión, reflexión y absorción a través del recinto. Esto con el fin de evaluar aquellas características presentes en un comportamiento acústico favorable.

### 4.3. Objetivos Específicos.

- ✚ Contar con la información de un recinto específico, en cuanto a sus propiedades arquitectónicas, estructurales y geométricas se refiere.
- ✚ Entender y analizar el comportamiento de las ondas acústicas a lo largo del recinto en escenarios definidas, mediante la escritura de un código para la modelación computacional de interacción fluido-estructura.
- ✚ Conocer el estado acústico actual del recinto, al comparar los resultados del análisis de la modelación con información extraída de la normativa referente.

- ✚ Proponer y modelar, en caso de ser necesario, adecuaciones en el recinto, por medio de la manipulación de propiedades acústicas, como la absorción, de las superficies en la estructura del modelo.
- ✚ Verificar que la adecuación propicie un ambiente acústico adecuado al comparar datos del análisis computacional del recinto sin y con las mejoras propuestas, y corroborando que se tienen un mejor comportamiento tomando en cuenta la reglamentación en cuanto acústica se refiere del INIFED.
- ✚ Realizar conclusiones enfocadas a recomendaciones para el modelado y diseño de recintos académicos en cuanto a acústica se refiere.

Dirección General de Bibliotecas UNO

## 5. Metodología.

En esta sección se revisarán los pasos que se siguieron para la obtención de distribución de presiones y comportamiento de ondas derivado del análisis acústico. Así como sus respectivas configuraciones analizadas.

El proceso constó de un planteamiento de modelo, con adecuaciones a proponer, el estudio de las ondas acústicas, la revisión con la Normativa y la conclusión de sugerencias y recomendaciones para el diseño acústico de aulas, tal como indica la Fig. 5-1.

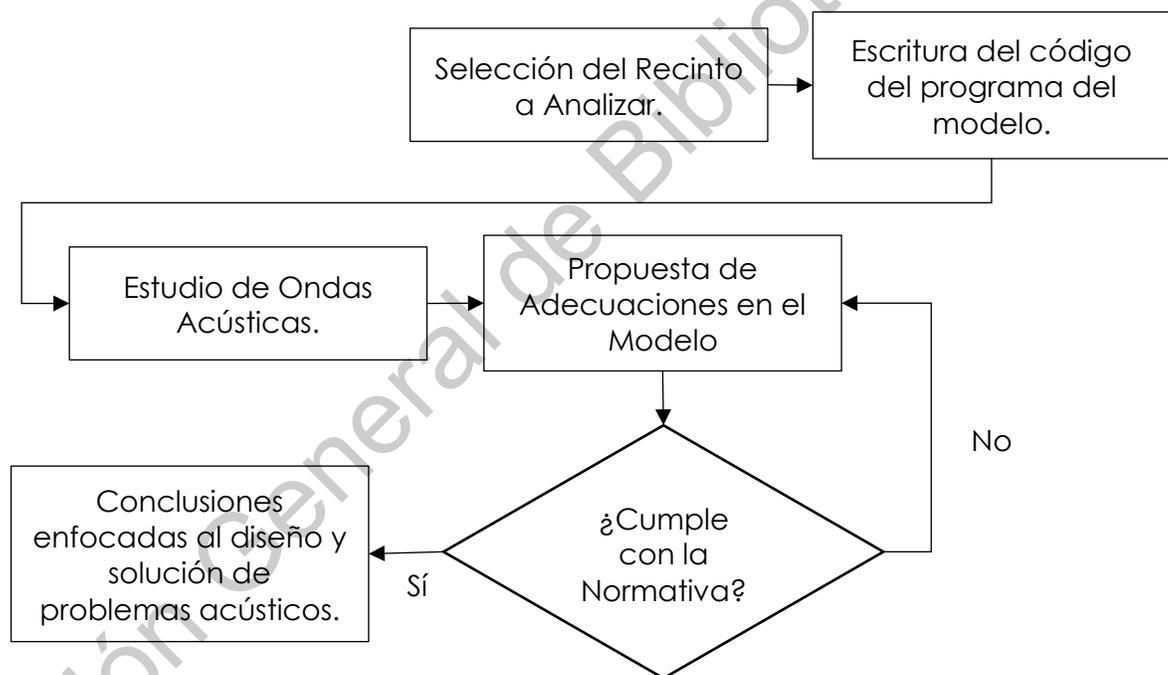


Fig. 5-1 Diagrama de Flujo de Metodología a seguir.

## 5.1. Selección del recinto a analizar.

Se tomó como recinto a analizar un aula estandarizada, extraída del catálogo del INIFED. Modelo del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE). El cuál era el organismo, sectorizado a la Secretaría de Educación Pública, encargado del mejoramiento y calidad de la infraestructura física educativa pública, tal como indica el IIFEQ. (S.F.)



Fig. 5-2 Estructura tipo UIC Tipología de Concreto. Catálogo del INIFED (2011)

Dentro de las opciones a elegir en el mencionado catalogo se encuentran estructuras variadas, como las estructuras de tipología en acero (Fig. 5-3) y tipología en concreto (estructura seleccionada). Así como distintas dimensiones en perfiles, pendientes y niveles. No sólo se optó por trabajar con el recinto seleccionado por practicidad, sino también por ser de los más comunes debido a su sencillez. Es importante tomar en cuenta que para el tipo de análisis que se está planteando sólo se toman en cuenta las dimensiones de cada aula, sin considerar si ésta se encuentra en un primer nivel o no, o con aulas adyacentes.



Fig. 5-3 Estructura tipo 2P Tipología de Acero. Catálogo del INIFED (2011)

## 5.2. Creación del Modelo en la interfase Mechanical APDL, del Software de Ingeniería ANSYS.

Se diseñó un modelo utilizando el software de cálculo ANSYS. Dicho modelo es una representación del aula a analizar, la cual tiene las propiedades físicas obtenidas del recinto en la sección anterior.

Se simuló una emisión acústica, para poder obtener datos del comportamiento de las presiones a través del recinto, para poder determinar las principales zonas donde se tenga un mayor reflejo de ondas acústicas.

Como se comentó en secciones pasadas, el modelo tiene en cuenta fundamentos teóricos previamente discutidos tanto de Mecánica de Medios como de teoría Acústica. Y su aplicación y discretización por medio de Elementos Finitos.

La señal acústica partirá de un punto en cuestión, dependiendo del escenario en el que considere. La amplitud será calculada para el Nivel de Presión Sonora correspondiente. Se tomaron datos en distintos puntos receptores en el fondo del aula a la altura donde se encontrarían los oídos de los usuarios. Se revisarán los casos planteados para obtener los Niveles de Presión en estos puntos y analizar los efectos con las diferentes soluciones propuestas.

El comportamiento de la fenomenología fue estudiado en la sección de Fenomenología Física. Modelo Discreto. Mientras que el diseño y programación del modelo se discute en la sección Modelo Computacional paramétrico en APDL.

### 5.3. Adecuación acústica del recinto.

Se modificaron las propiedades del recinto, aplicando las herramientas existentes en cuanto a mejoramiento de fidelidad acústica se refiere.

Esto se realizó mediante la modificación de las propiedades de aquellos elementos que interactúen con el fluido. Con el objetivo que puedan absorber o incluso redireccionar las Ondas Acústicas que los afecten.

Dentro de las opciones con las que se estará trabajando en primera instancia se estará suponiendo placas de dos materiales colocadas en el muro posterior a modo de panel, y en el techo a modo de plafón. Los materiales en cuestión se considerarán como paneles prefabricados de fibra de vidrio y paneles de fieltro. Las dimensiones serán un parámetro más libre, debido a la gran variedad que se ofrece en el mercado, éstas son indicadas en las correspondientes matrices experimentales de los cálculos a realizar en el modelo.

### 5.4. Escenarios de experimentación.

Tomando en consideración las gráficas de la normativa (Fig. 2-15 & Fig. 2-16). Se seleccionaron las frecuencias a trabajar que se encuentren dentro del rango de 125 Hz y 4000 Hz. Por tanto, las frecuencias en las que se realizaron las simulaciones serán: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz.

Otro aspecto fundamental es la posición del foco, punto del espacio de donde emanan las ondas acústicas de excitación armónica.

Primeramente, se propone la altura del foco, es decir, la distancia en dirección del eje y. Para esto es necesario conocer la altura del mexicano promedio. La Cámara Nacional de la Industria del Vestido, con validación del INEGI, concluyó que la altura en hombres mexicanos es de 1.64 metros y de mujeres es de 1.58 metros (“¿Cuánto pesa y mide el mexicano promedio?”, 2012). Suponiendo un promedio se considera como altura de sujeto de **1.61 metros**.

En cuanto a las disposiciones en planta, es decir en la dirección x y z, se consideraron los siguientes escenarios posibles, considerando la ubicación del docente hipotético, tal y como se muestra en la Fig. 5-4. Por tanto, se tomará como distancia en dirección x como 1.00 metro. Mientras que para el Escenario A, Escenario B, Escenario C se utilizaron las distancias. 1.75, 4.00 y 6.25 metros, respectivamente.

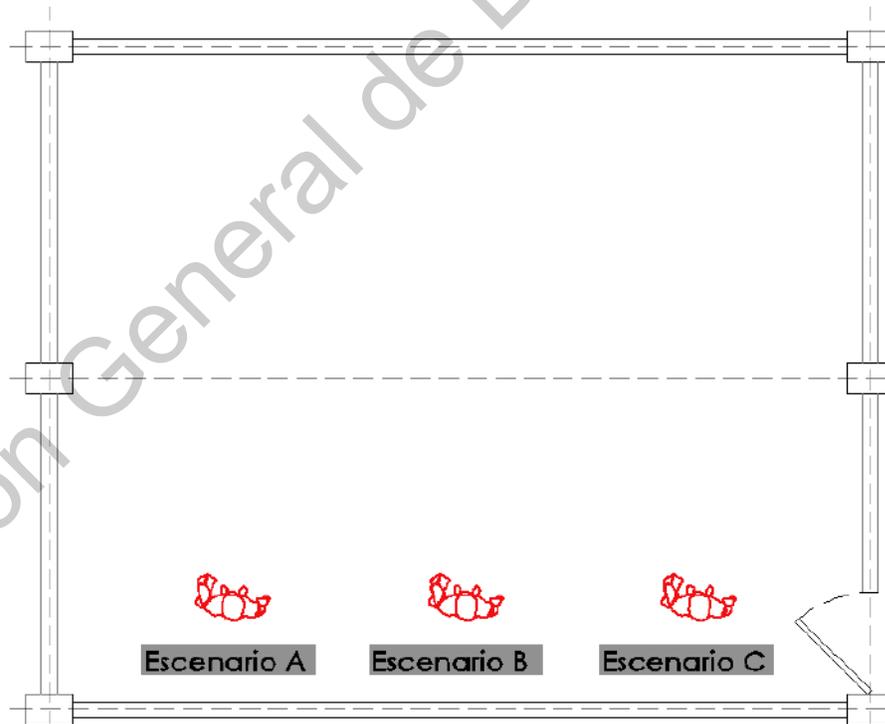


Fig. 5-4 Ubicaciones hipotéticas.

## 5.5. Coeficientes de Absorción.

Como se ha comentado, es necesario conocer los distintos coeficientes de absorción de los materiales que componen el aula. Estos coeficientes varían dependiendo la frecuencia de estudio. Los datos mostrados son obtenidos del anexo del libro Acústica Arquitectónica de Recuero (2000). Como se observa en las Tablas siguiente las frecuencias indicadas son las que en este trabajo se han propuesto.

Primeramente, fue necesario indicar los coeficientes relacionados con los elementos arquitectónicos del aula sin considerar las propuestas de mejoramiento. Esta información quedó establecida en la sección donde se describe el aula a analizar.

Se supuso vidrio para las ventanas. Se indica que el lecho inferior tiene una capa de pintura vinílica, por lo que se usará el material de concreto pintado. Para las paredes se utilizan los coeficientes de ladrillo pintado. En el piso se establece que se usa loseta cerámica, en el análisis se utilizan los coeficientes de mármol por su similitud. La superficie de la puerta se indica como lámina con pintura epóxica, sin embargo, al no tenerse información de dicho material se optó por utilizar los coeficientes de un material poco absorbente como el vidrio.

Quedando la información de los coeficientes de absorción como se muestra en la Tabla 5-1.

## 5.6. Información de Salida.

De las ecuaciones establecidas que regirán el comportamiento del modelo se alcanza a observar que se obtienen las funciones de Presión ( $P$ ) y desplazamientos ( $u$ ). Con esto es posible obtener información acerca del comportamiento de las ondas acústicas, mediante la obtención de datos como el Gradiente de Presiones ( $\nabla P$ ) y el Vector Velocidad ( $v$ ).

Tabla 5-1 Coeficientes de absorción ( $\alpha$ ) para diferentes materiales y frecuencias utilizadas en el modelo. Extraídos del libro de Recuero (2020).

Denominación del Material	Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1,000	2,000	4,000
Concreto Normal	0.010	0.012	0.020	0.020	0.023	0.035
Concreto Pintado	0.010	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020
Ladrillo Pintado	0.012	0.014	0.017	0.020	0.023	0.025
Loseta	0.010	0.010	0.010	0.020	0.020	0.010
Vidrio de Ventanas	0.035	0.040	0.027	0.030	0.020	0.020
Panel de Fibra de Vidrio	0.230	0.560	0.770	0.860	0.950	0.980

Uno de los datos más relevantes que se pueden obtener analizando la información del modelo es el Nivel de la Presión del Sonido. En este caso se utiliza la fórmula ( 26 ), similar a la fórmula original, previamente revisada, la diferencia radica en que trabajaremos con la Presión obtenida de la modelación, en lugar de la Intensidad.

$$L = 20 \log \left( \frac{P_{rms}}{|P_{ref}|} \right) \quad (26)$$

Donde:

L = Nivel de la Presión del Sonido [dB].

$P_{ref}$  = Presión de Referencia [20E-6 Pa]

$P_{rms}$  = Raíz cuadrada del Promedio de las Presiones al Cuadrado ( $P_{rms} = P/\sqrt{2}$ )

Al finalizar las modelaciones se encontraron aquellas propiedades geométricas y físicas que determinen el adecuado diseño acústico de un recinto, tomando como eje de referencia un correcto tiempo de reverberación sin ignorar los factores normalmente tomados en cuenta.

## 5.7. Matriz Experimental de los casos a revisar mediante el modelo computacional.

A continuación, y a modo de resumen, se revisarán los diferentes parámetros involucrados en el desarrollo de este trabajo.

Primeramente, es importante recordar cuáles son estos parámetros y el rango en el que trabajan. Estos conceptos ya fueron abarcados con profundidad en las diversas secciones anteriores. Ahora se muestran en un acomodo tabulado para su mejor comprensión (Ver Tabla 5-2).

Tabla 5-2 Parámetros y Rangos utilizados en los análisis.

Parámetros	Rango					
	125	250	500	1000	2000	4000
Frecuencias (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Intensidad de Foco (dB)	90					
Ubicación de Foco en x (m)	1.00					
Ubicación de Foco en y (m)	1.61					
Ubicación de Foco en z (m)	1.75	4.00	6.25			
Área de Panel	0% - 100%					
Área de Plafón	0% - 100%					
Absorción Panel	0.0 - 1.0					
Absorción Plafon	0.0 - 1.0					
Ubicación de centro de Panel	0.0 - 4.0 m					
Ubicación de centro de Plafon	0.0 - 4.0 m					

La Fig. 5-5 plantea las distintas relaciones existentes entre las propiedades de los materiales que conforman al recinto y las implicaciones que estas tienen en cuanto a comportamiento acústico se refiere. También se observan, esquemáticamente, los procesos a desarrollar en el estudio acústico del recinto, dejando en claro que se toman en cuenta las consideraciones anteriormente discutidas.

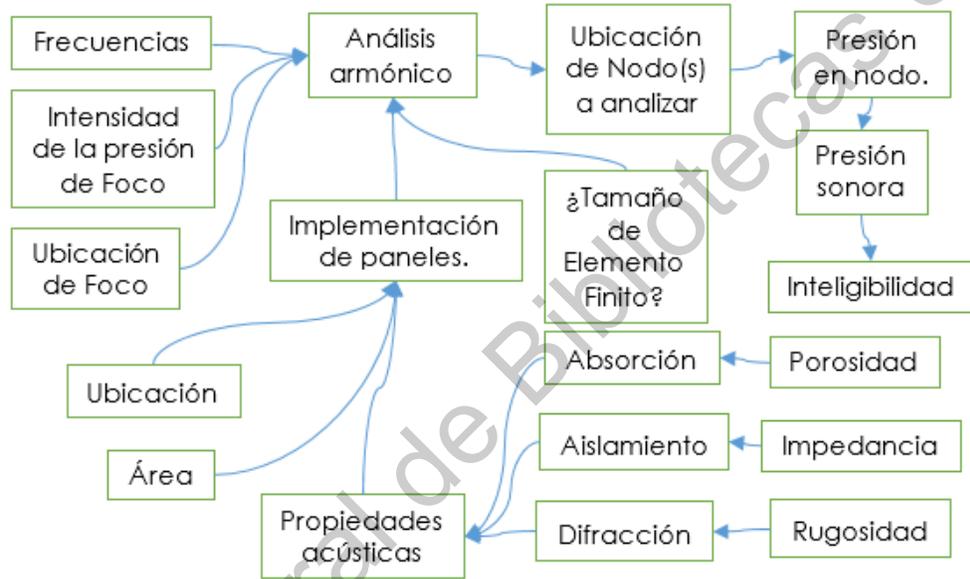


Fig. 5-5 Mapa Conceptual de Investigación. (Creación Propia)

Tabla 5-3 Interrelación de parámetros.

Parámetros	Dimensión de Panel	Absorción de Panel	Coordenada en y	Coordenada en z	Dimensión de Plafón	Absorción de Plafón	Coordenada en y	Coordenada en z
Tipo de Panel								
Ubicación de panel								
Tipo de Plafón								
Ubicación de Plafón								

Entonces, se han discutido los parámetros que están en juego en los distintos procesos, así como la existencia de una relación entre ellos, aspectos que nos permiten entender el desarrollo del estudio del recinto. Ahora, se revisa en la Tabla 5-3 cómo es que estos parámetros se interrelacionan entre sí, de aquí se puede observar los distintos casos de

estudios presentes en la investigación, y de los cuales se obtendrán los distintos resultados para poder realizar las conclusiones pertinentes.

En la Tabla 5-4 se muestra los distintos estudios de experimentación a los cuales se les realizará el pertinente análisis acústico de las distintas ubicaciones y frecuencias para conocer el comportamiento.

Tabla 5-4 Matriz Experimental.

Estudio de Experimentación	Tamaño de Panel	Tamaño de Plafon	Material Panel	Material Plafon
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	-	-	-	-
2	1	-	1	-
3	2	-	1	-
4	1	-	2	-
5	2	-	2	-
6	-	1	-	1
7	-	2	-	1
8	-	1	-	2
9	-	2	-	2
10	1	1	1	1
11	2	1	1	1
12	1	2	1	1
13	2	2	1	1
14	1	1	2	1
15	2	1	2	1
16	1	2	2	1
17	2	2	2	1
18	1	1	1	2
19	2	1	1	2
20	1	2	1	2
21	2	2	1	2
22	1	1	2	2
23	2	1	2	2
24	1	2	2	2
25	2	2	2	2

## 6. Modelo Computacional paramétrico en APDL.

Mediante la escritura de un código se programó una rutina que tiene como objetivo el análisis del comportamiento acústico de un recinto. En este caso, el recinto a analizar fue un aula docente descrita en la sección anterior. Se buscó que existiese una alta parametrización del modelo, esto con el objetivo de tener una amplia gama de posibilidades en cuanto a adecuaciones se refiere. A continuación, se hace una exhaustiva revisión al programa y a sus distintos componentes. En algunas partes, con el objetivo de no saturar el documento, se mostrarán únicamente los ejemplos necesarios para mostrar con claridad el proceso.

Primeramente, es importante resaltar la estructura de Macros en la que se encuentra organizado el programa. A lo largo del programa se tienen distintos macros, los cuales son parte del programa que tienen una función específica, éstos son los responsables de generar los distintos cuadros de diálogo, generar la geometría y realizar el análisis acústico.

Otro aspecto de suma importancia son las unidades en las que se está trabajando con el programa. Para las distancias son metros, para el tiempo segundos y para las fuerzas toneladas.

### 6.1. Macro de Información.

Este Macro es el encargado de pedir la información al usuario por medio de ventanas de interfaz (Fig. 6-1). Igualmente, aquí se encuentran las órdenes necesarias para comenzar un archivo nuevo en la configuración requerida.

Las ventanas de datos piden al usuario información específica de las diferentes propiedades geométricas y físicas de los distintos elementos del aula. Se requieren datos de la geometría en general del recinto; de los elementos arquitectónicos del recinto; de la geometría de los distintos perfiles estructurales del recinto, tanto elementos primarios como

secundarios, así como elementos de confinamiento de muros de mampostería; para análisis posteriores, datos de los elementos exteriores del recinto; tamaño del elemento finito y propiedades de los distintos materiales que constituyen al recinto.

```

/COM,+++++ Ventana de Ingreso de Datos Generales. +++++
/COM, Ventana de datos de entrada.
multipro,'start',6
    *cset,1,3,CLZ,'Claro de Marcos (m)',8
    *cset,4,6,CLX,'Distancia entre Marcos (m)',3.24
    *cset,7,9,HMAX,'Altura máxima en Cumbre (m)',3.68
    *cset,10,12,PEND,'Pendiente de la techumbre (%)',10
    *cset,13,15,CPAS,'Ancho Cubierta en Pasillo (m)',2.20
    *cset,16,18,CJAR,'Ancho Cubierta en Jardín (m)',1.20
    *cset,61,62,'Indique las dimensiones generale',s de la estructura.'
    *cset,63,64,'Favor de revisar las unidades.'
multipro,'end'
PEND = PEND/100

```

Fig. 6-1 Código de ventana de datos de entrada.

En la Fig. 6-2 se muestra un ajuste de las unidades de los datos. Para que el programa fuera más amigable con el usuario se buscó que algunos datos fueran requeridos en unidades más comunes. Por tanto, era necesario realizar los cálculos pertinentes para que esta información se encontrara acorde con las unidades previamente establecidas.

Otro aspecto a resaltar, son los distintos cálculos geométricos que el programa realiza para poder obtener las coordenadas de los distintos puntos que se encuentran en la zona de la pendiente.

```

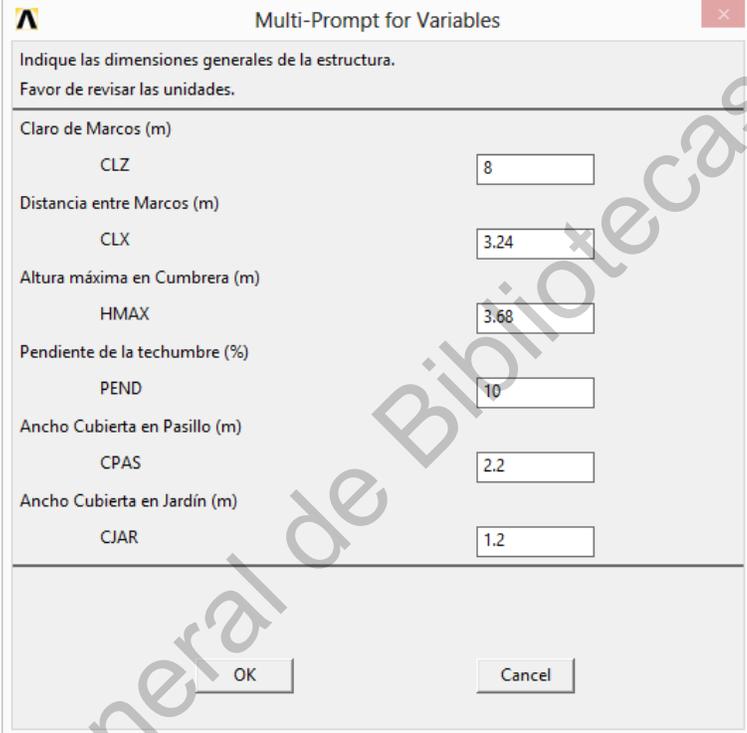
ANPU = ANPU/100
ESPM = ESPM/100

HLOS = HLOS/100
HAZO = HAZO/100
HPAZO = SQRT((HAZO**2) + ((HAZO*PEND)**2))
LOSEXT = LOSEXT/100

```

Fig. 6-2 Código para ajuste de unidades.

De la Fig. 6-3 a la Fig. 6-4 se ejemplifican algunas ventanas de diálogo en la que el usuario debe ingresar los datos del recinto. En estas resaltan las distintas unidades en las que se pueden ingresar los datos de entrada, esto no afecta a los cálculos posteriores debido a las equivalencias mostradas previamente.



The image shows a software dialog box titled "Multi-Prompt for Variables". The main text inside the box reads: "Indique las dimensiones generales de la estructura. Favor de revisar las unidades." Below this, there is a list of variables with their corresponding values entered in text boxes:

Variable	Value
Claro de Marcos (m) CLZ	8
Distancia entre Marcos (m) CLX	3.24
Altura máxima en Cumbre (m) HMAX	3.68
Pendiente de la techumbre (%) PEND	10
Ancho Cubierta en Pasillo (m) CPAS	2.2
Ancho Cubierta en Jardín (m) CJAR	1.2

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Fig. 6-3 Ventana de Dimensiones generales de la estructura.

## 6.2. Macro de Elementos.

En este macro se establecen las distintas propiedades de los materiales y de los elementos finitos.

Se establecen los distintos tipos de elementos finitos. Para las líneas se usaron elementos tipo viga; para las áreas, coraza y fluidos para los volúmenes. Es importante recordar que son utilizados dos tipos de fluidos, el que se está en contacto con la estructura y el interno, esto impacta en la forma en que propongamos los volúmenes ya que se deberán generar por separado. (Fig. 6-5)

Multi-Prompt for Variables	
Ingrese datos requeridos de las Traves y Columnas Indicadas. Favor de revisar las unidades.	
Base de la Trabe 1 (cm)	
BT1	25
Peralte Total de Trabe 1 (cm)	
HT1	55
Base de la Trabe 3 (cm)	
BT3	25
Peralte Total de Trabe 3 (cm)	
HT3	55
Base de Trabe Faldón (cm)	
BTE	12
Ext. Inferior de T-E (cm)	
ETE	10
Base de la Columna (cm)	
BCOL	30
Peralte Total de Columna (cm)	
HCOL	45
OK Cancel	

Fig. 6-4 Ventana de Dimensiones de Traves y Columnas.

```

/COM,+++++ Tipos de Elementos. +++++
ET,1,BEAM188
ET,2,SHELL63
ET,3,FLUID30,,1      !Es el interior.
ET,4,FLUID30,,0      !Es el que está en contacto con la interfaz.

```

Fig. 6-5 Tipos de Elementos.

Se definen las propiedades mecánicas de los distintos materiales involucrados en el análisis. Se consideran los materiales que constituyen al recinto, tanto estructural como arquitectónicamente. En esta sección también se involucran los datos del fluido que será el aire. (Fig. 6-6)

En la sección de Perfiles, se establece la geometría de los perfiles de los distintos elementos tipo viga. (Fig. 6-7)

```

/COM,+++++ Materiales. +++++
! Concreto (1)
MP,EX,1,EXCON
MP,PRXY,1,PRCON
MP,DENS,1,DENSCON

! Mampostería (2)
MP,EX,2,EXMAM
MP,PRXY,2,PRMAM
MP,DENS,2,DENSMAM

! Vidrio (3)
MP,EX,3,EXVEN
MP,PRXY,3,PRVEN
MP,DENS,3,DENSVEN

! Puerta (4)
MP,EX,4,EXPU
MP,PRXY,4,PRPU
MP,DENS,4,DENSPU

! Aire (5)
MP,DENS,5,DENSAIR
MP,SONC,5,SONI

```

Fig. 6-6 Propiedades de los Materiales.

```

/COM,+++++ Perfiles. +++++
!Columna (1)
SECTYPE,1,BEAM,RECT
SECDATA,BCOL,HCOL

!Cadena CD1 (2)
SECTYPE,2,BEAM,RECT
SECDATA,BCD1,HCD1
SECOFFSET,USER,0,-NINF-0.5*HLOS-0.5*HCD1

!Cadena CD1 Extra (3)
SECTYPE,3,BEAM,RECT
SECDATA,BCD1,-NINF
SECOFFSET,USER,0,-NINF*0.5-0.5*HLOS

! Trabe T3 (4)
SECTYPE,4,BEAM,RECT
SECDATA,BT3,HT3
SECOFFSET,USER,0,0.5*HT3-0.5*HAZO

```

Fig. 6-7 Perfiles de elementos tipo Vigas.

Se indican los Reales utilizados en el modelo. Estas son cantidades utilizadas por algunos tipos de elementos finitos, en este caso son utilizados por el elemento coraza, son involucrados en la consideración del espesor de la misma. Por tanto, se indican directamente con el espesor de los distintos elementos. (Fig. 6-8)

```

/COM,+++++ Reales. +++++
! Losa de Piso (1)
R,1,HLOS
! Losa de Azotea (2)
R,2,HAZO
! Muros de Mampostería (3)
R,3,ESPM
! Ventanas (4)
R,4,ESPVEN
! Puerta (5)
R,5,ESPPU

```

Fig. 6-8 Reales.

### 6.3. Macro de Geometría.

En esta Macro se programan los procesos a seguir para la construcción de la geometría del recinto. Se generan las distintas líneas, áreas y volúmenes, que posteriormente son discretizadas para los cálculos requeridos.

Se muestra el proceso de creación de las líneas, junto a estas se muestran los elementos finitos correspondientes, esto se muestra para un mejor entendimiento de la correspondencia de las líneas, sin embargo, el mallado se realiza en procesos posteriores. (Fig. 6-9)

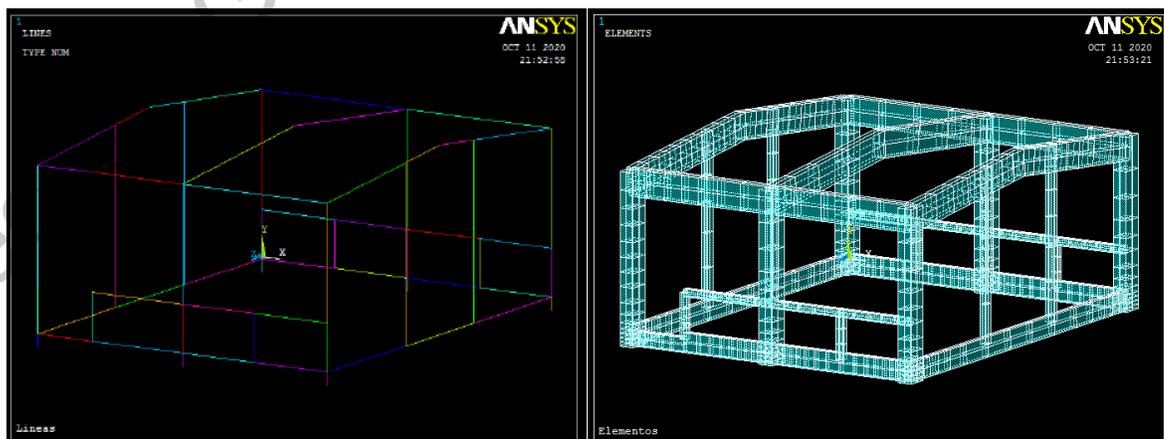


Fig. 6-9 Líneas/Elementos usados en el Modelo.

Posteriormente, y teniendo como base las líneas generadas será necesario la generación de las distintas áreas utilizadas en el modelo. Las áreas son las que simularán los elementos planos del modelo, tales como; losas, ventanas, muros, puertas, etc. Tal y como se ejemplifica en la Fig. 6-10.

De forma análoga se generan los volúmenes, mostrados en la Fig. 6-11, recordando que se tiene que generar distintos volúmenes para los diferentes tipos de fluido utilizados. Otro aspecto a resaltar es el hecho de que las superficies de los volúmenes deberán ser las áreas previamente definidas, incluso aquellas que sean coplanares deberán indicarse como áreas distintas.

Tanto las áreas como los volúmenes podrán apreciarse mejor en la parte de mallado.



Fig. 6-10 Áreas generadas.

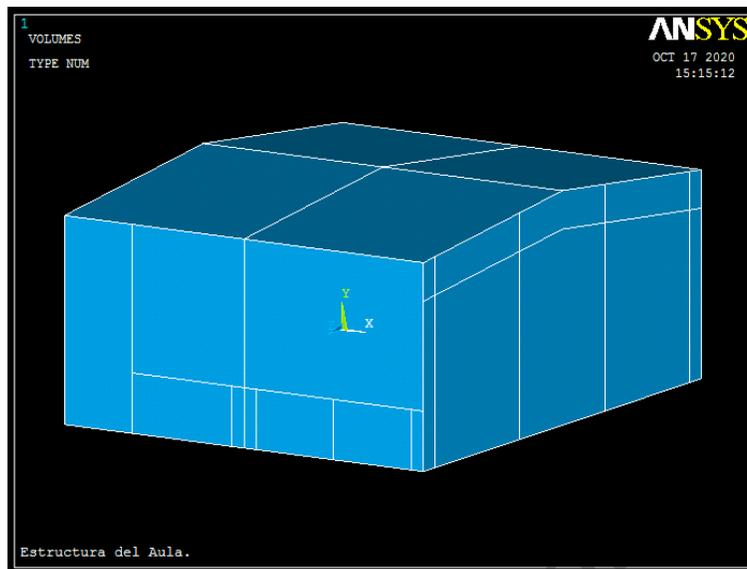


Fig. 6-11 Volúmenes generados.

#### 6.4. Macro de Mallado.

En este Macro se realizan los procesos correspondientes al mallado de las distintas entidades geométricas previamente generadas. Esto tomando en consideración los tipos de elementos y materiales previamente discutidos.

Primeramente, se establecen las propiedades de los elementos finitos en general. En este caso, y debido a la complejidad del modelo, se optó por trabajar con elementos tetraédricos, es decir, en forma de pirámide triangular. Igualmente, se establece el tamaño de los elementos finitos. (Fig. 6-12)

```
ESIZE,EFS  
MSHKEY,0  
MSHAPE,1
```

Fig. 6-12 Especificaciones.

Es importante mencionar que las vigas requieren de un *sentido*. Por tanto, se generan los puntos que orientaran este tipo de elementos (Fig. 6-13).

```

/COM,+++++++ KeyPoints de Orientación. ++++++
NUMCMP,KP
ALLS
*GET,KOR1,KP,0,COUNT
KOR1 = KOR1+1
K,,0,100,-100
K,,CLX,100,-100
K,,CLX*2,100,-100
ALLS
*GET,KOR2,KP,0,COUNT
KOR2 = KOR2+1
K,,-100,100,0
K,,-100,100,CLZ

```

Fig. 6-13 KeyPoints de Orientación.

Antes de realizar el mallado es necesario brindar de atributos a las distintas entidades geométricas. Para esto, por cada material, sección, orientación y/o real, se seleccionan las geometrías correspondientes y se establecen los atributos requeridos. (Fig. 6-14 - Fig. 6-16)

```

/COM,+++++++ Atributos Cadenas CD1 (Líneas). ++++++
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,-0.5*HLOS
LATT,1,,1,,KOR2,,2
LSEL,S,LOC,Z,CLZ
LSEL,R,LOC,Y,-0.5*HLOS
LSEL,U,LOC,X,(0.5*BCOL+ANPU+0.5*HKR)*0.5
LATT,1,,1,,KOR2+1,,2
LSEL,S,LOC,Z,CLZ
LSEL,R,LOC,Y,-0.5*HLOS
LSEL,R,LOC,X,(0.5*BCOL+ANPU+0.5*HKR)*0.5
LATT,1,,1,,KOR2+1,,3
*DO,I,1,2,1
LSEL,S,LOC,X,(I-1)*2*CLX
LSEL,R,LOC,Y,-0.5*HLOS
LATT,1,,1,,KOR1+I-1,,2
*ENDDO

```

Fig. 6-14 Ejemplo de selección y especificación de atributos (Líneas).

```

/COM,+++++++ Atributos Losa de Piso (Áreas). ++++++
ASEL,S,LOC,Y,-0.5*HLOS
ASEL,R,LOC,X,0,2*CLX
ASEL,R,LOC,Z,0,CLZ
AATT,1,1,2
/COM,+++++++ Atributos Losa de Azotea (Áreas). ++++++
ASEL,S,AREA,,A12A+1,A12B
AATT,1,2,2

```

Fig. 6-15 Ejemplo de selección y especificación de atributos (Áreas).

```

/COM,+++++ Atributos Aire Interior (Volumen). +++++
VSEL,S,VOLU,,4
VATT,5,,3

/COM,+++++ Atributos Aire Interfaz (Volumen). +++++
VSEL,S,VOLU,,4
VSEL,INVE
VATT,5,,4

```

Fig. 6-16 Ejemplo de selección y especificación de atributos (Volúmenes).

Se procede con el mallado de las diferentes entidades geométricas del modelo en elementos viga, coraza y fluido. (Fig. 6-17)

Se muestran los elementos tipo viga, ya mallados, de acuerdo a las distintas secciones transversales. (Fig. 6-18)

```

/COM,+++++ Mallado de Volúmenes (Volumen). +++++
VSEL,S,VOLU,,4
VMESH,ALL
VSEL,S,VOLU,,4
VSEL,INVE
VMESH,ALL

/COM,+++++ Mallado de Áreas (Áreas). +++++
*GET,NMAT,MAT,0,COUNT
ASEL,S,MAT,,1,NMAT
AMESH,ALL

/COM,+++++ Mallado de Líneas (Lineas). +++++
*GET,NMAT,MAT,0,COUNT
LSEL,S,MAT,,1,NMAT
LMESH,ALL

```

Fig. 6-17 Mallado de Elementos.

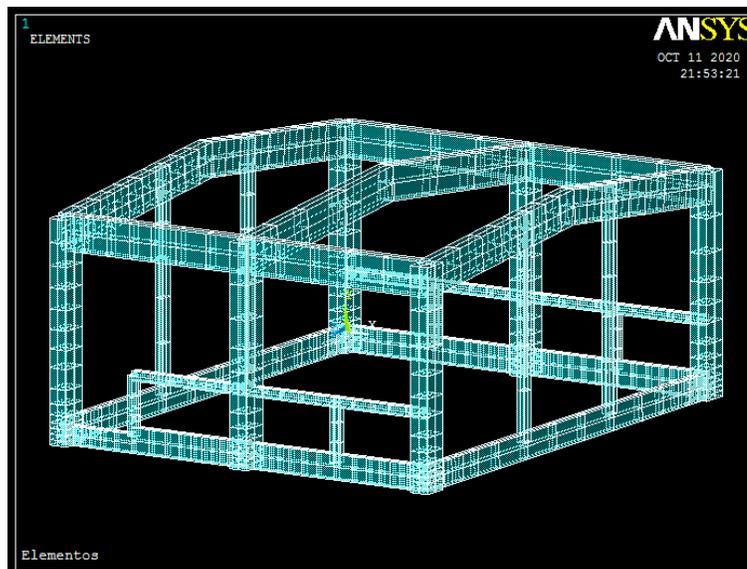


Fig. 6-18 Elementos correspondientes a Líneas.

Se muestran los elementos tipo coraza, ya mallados, conforme a sus distintos materiales. (Fig. 6-19)

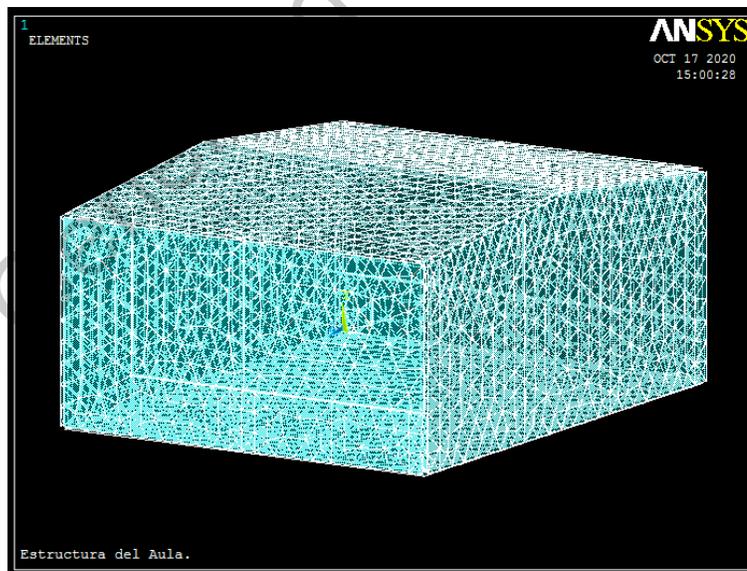


Fig. 6-19 Elementos correspondientes a Áreas.

Se muestran los elementos tipo fluido mallados. (Fig. 6-20 & Fig. 6-21)

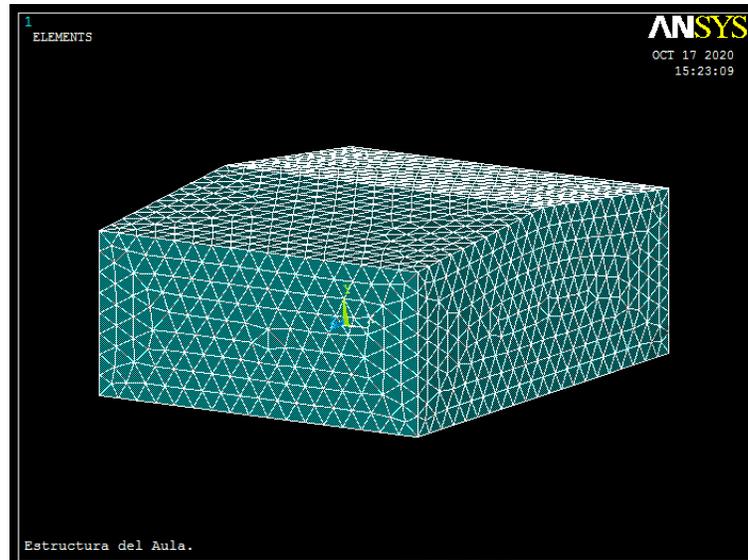


Fig. 6-20 Elementos de Volumen Interno.

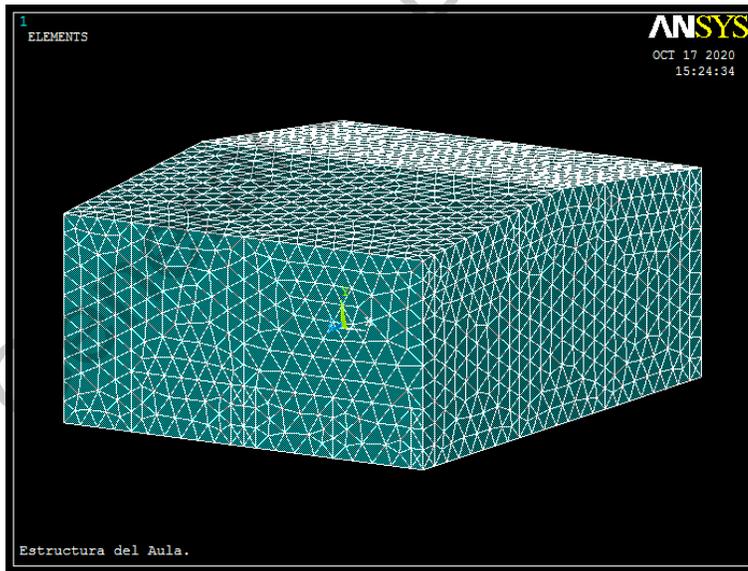


Fig. 6-21 Elementos correspondientes a Volúmenes.

## 6.5. Macro de Restricciones.

En esta sección del programa se procede a definir las distintas restricciones del modelo. También, es aquí donde se define la excitación armónica con la que se realiza el análisis acústico del recinto.

Es requerido, por cuestiones de cálculo, definir aquellas superficies que se encuentren entre los elementos de fluido y los elementos sólidos. Esta superficie se denomina Interfaz Fluido-Estructura, y es el nexo que existe entre estos dos tipos de elementos. Se seleccionan las áreas correspondientes y se designan estas como Interfaz. (Fig. 6-22)

Para que el sistema se encuentre en equilibrio es necesario definir algunas restricciones. Estas son consideradas en la base del modelo, y tendrá restricción de desplazamiento y presión nula en estos puntos. (Fig. 6-22)

```
ASEL,S,AREA,,A12A+1,A12B
ASEL,A,LOC,Z,0
ASEL,A,LOC,Z,CLZ
ASEL,A,LOC,X,0
ASEL,A,LOC,X,CLX*2
ASEL,A,LOC,Y,-0.5*HLOS

! Aplicación de Interfaz Fluido-Estructura.
SFA,ALL,,FSI

NSEL,S,LOC,Y,NINF
D,ALL,ALL
```

Fig. 6-22 Definición de I.F.E. y Restricción.

Ahora es momento de indicar la excitación de análisis de nuestro sistema. La fuente sonora la representaremos como una excitación armónica de presiones. La cual tendrá amplitud, la cual se encuentre directamente relacionada con el nivel del sonido. Igualmente, se ingresa la ubicación del foco de la fuente, así como la frecuencia, la cual define el tono de nuestra señal (Fig. 6-23). Posteriormente, estos datos son utilizados para la aplicación en el modelo de dicha fuente. (Fig. 6-24)

Variable	Valor
Amplitud (T/m)	
AMPL	6e-005
Coor. X de ubicación de Foco (m)	
FOCOX	2.1
Coor. Y de ubicación de Foco (m)	
FOCOY	1.8
Coor. Z de ubicación de Foco (m)	
FOCOZ	2.95
Frecuencia de la Señal (Hz)	
FREQ	440

Fig. 6-23 Ventana de Ingreso datos de Excitación Armónica.

```
! Aplicación de Presión en Determinada Ubicación.
NSEL,S,NODE,,NODE(FOCOX,FOCOY,FOCOZ)
ESLN
NSLE
D,ALL,PRES,AMPL
```

Fig. 6-24 Aplicación de Carga Armónica.

## 6.6. Macro de Solución.

El software genera las matrices y resuelve el sistema. Con esto, se obtiene el campo de presiones en el dominio del aula. Directamente, con esta información, se puede obtener el valor del Nivel de Presión Sonora en cualquier punto deseado.

En la Fig. 6-25 se muestra el mencionado campo de Presiones en T/m<sup>2</sup>. En la primera parte de la Figura se muestran estas presiones en aquellos elementos que conforman la frontera del recinto, mientras que la otra parte muestra los elementos de volumen interno (aire). Como ya se comentó, las presiones a lo largo del recinto fluctuarán entre valores positivo y negativo. En este caso, y basado en la escala colorimétrica anexa, se puede observar que las presiones van desde  $-0.531E-04$  T/m<sup>2</sup> hasta  $0.463E-04$  T/m<sup>2</sup>. Esto supone

puntos máximos de Nivel de 88.3 dB y 87.1 dB respectivamente, recordando que para el cálculo de Nivel de Presión Sonora se utilizan los valores absolutos del campo de Presión.

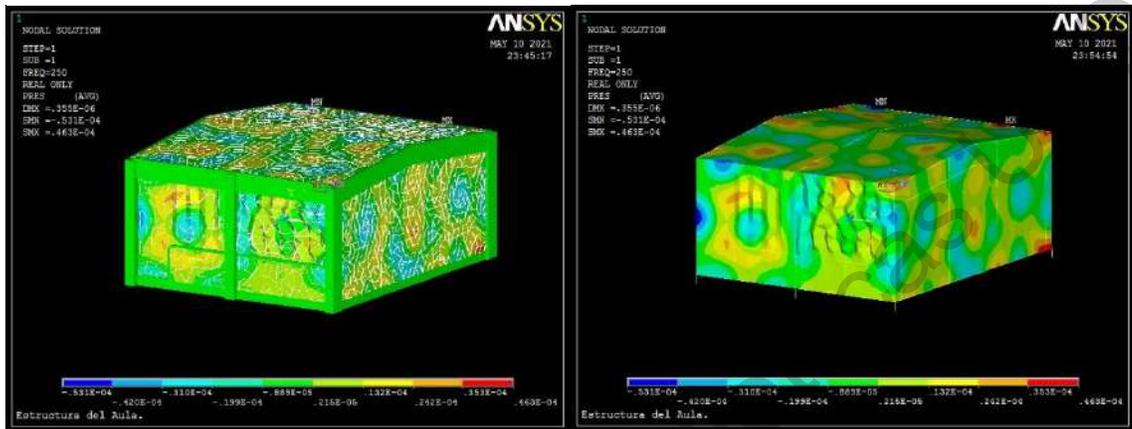


Fig. 6-25 Campo de Presiones en Modelo Discreto.

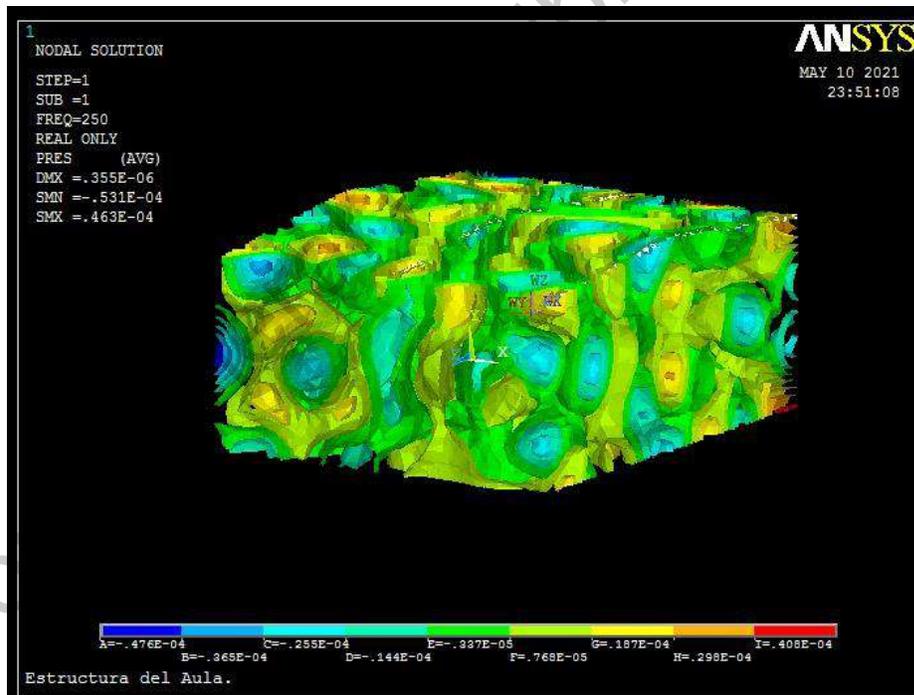


Fig. 6-26 Isosuperficies del Campo de Presiones en el Modelo Discretizado.

Para una mejor comprensión del campo de presiones en el aula, en la Fig. 6-26 se muestran las Isosuperficies correspondientes. Esto grafica una superficie por cada intervalo de valor del campo.

Ahora, es necesario restringir la toma de datos a una zona de interés en particular. Por tanto, se revisó el plano que se encuentra a una altura de 1.00 m. Esta altura corresponde a la donde se encontrarán las fuentes receptoras de las señales, es aquí donde se estará el canal auditivo de los usuarios del aula. En la Fig. 6-27 se muestra este campo a dicha altura, los datos numéricos en los distintos puntos receptores serán mostrados en la sección siguiente. La primera parte de la imagen muestra el aula sin ningún tipo de adecuación, mientras que la otra parte muestra el caso en el que se aplican paneles y plafones cuadrados de 1.10 metros de lado. Se puede observar de manera preliminar que a pesar de que se tienen mayores presiones en el recinto adecuado, éstas se distribuyen de manera más uniforme y no tienen picos tan grandes como el escenario sin modificar. Esta es una comparación visual de dos casos planteados. Se muestran en el capítulo siguiente únicamente los resultados numéricos del resto de casos indicados en la Tabla 5-4, así como las frecuencias faltantes.

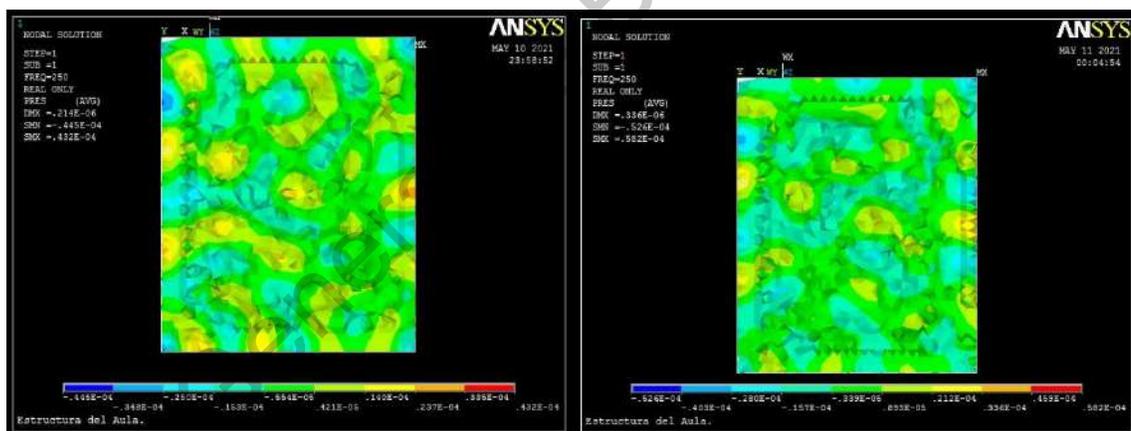


Fig. 6-27 Campo de Presiones, corte horizontal a altura de 1.00 m.

## 7. Resultados.

En esta sección se define el aula a analizar, y se especifican las propiedades arquitectónicas de ésta. Es importante recalcar que para conocer el comportamiento de los elementos en la frontera es necesario conocer sus propiedades, por lo que estas son especificadas en esta sección.

Considerando únicamente el escenario A en primera instancia, se obtienen resultados de Nivel de Presión Sonora en puntos receptores. El estudio preliminar se realizó con los parámetros previamente definidos, para entonces, descartar aquellos menos significativos.

Se realiza un nuevo estudio sólo considerando los parámetros más significativos con un mayor rango. En esta ocasión sí se consideran los tres escenarios propuestos.

Aunado a esto se considera una modelación en el software COMSOL, en el que se revisa por el método de trazado de rayos, el cuál es utilizado para frecuencias altas. Se explica brevemente lo realizado y se muestran los resultados obtenidos.

### 7.1. Especificación de Recinto a analizar.

Se trata de un aula tipo CAPFCE U1C (Urbana de 1 nivel de Concreto). Construcción de un nivel, estructura tipo A, base de marcos rígidos de concreto armado, con claros longitudinales de 8.00 m y claros transversales de 3.24 m, acabado aparente.

La cubierta de azotea es una losa de concreto a dos aguas, con una pendiente del 10%. Acabado por el lecho inferior con pintura vinílica semimate en color blanco y por el lecho superior nivelado y liso para recibir impermeabilización.

Los muros se suponen de tabique de barro rojo recocido o similar, aplanado de mezcla terminado fino por ambas caras y acabados con pintura vinílica semimate en color según muestra aprobada (S.M.A.). Zoclos de concreto aparente de 10 cm.

Los pisos están conformados de loseta cerámica de 31.5 x 31.5 cm, para tráfico pesado, en color y modelo S.M.A., asentada con adhesivo específico para el caso, con juntas máximo de 1 cm y boquilla color S.M.A., con sellador integral en las mismas, sobre fino de mortero de cemento de 3 cm, para nivelar sobre firme sin afinar.

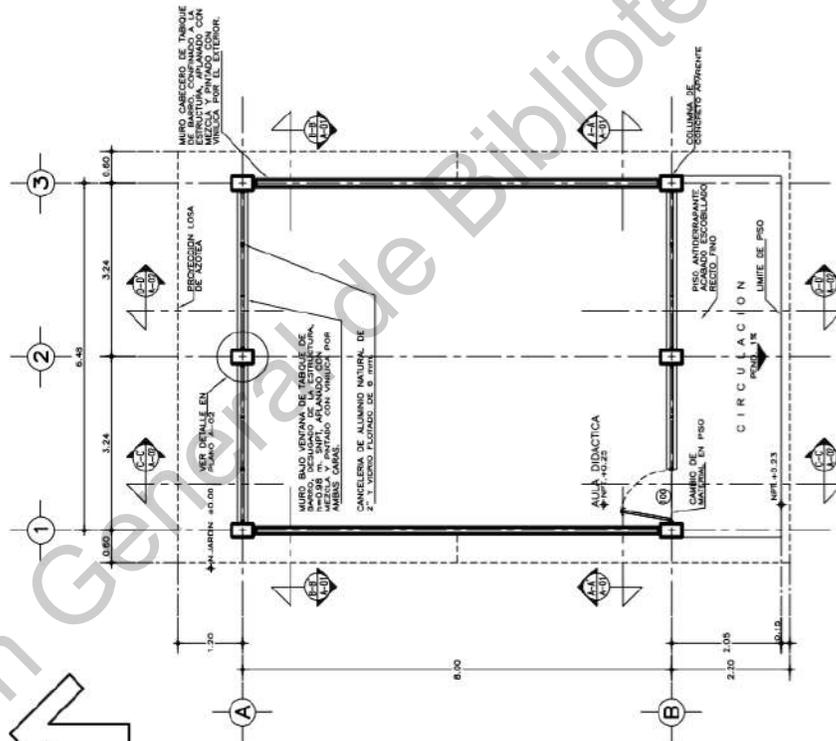


Fig. 7-1 Planta de aula tipo U1C. (INIFED, 2012)



## 7.2. Ondas obtenidas.

Se revisaron con los diversos casos mencionados las distintas distribuciones de ondas. Se supuso una fuente receptora en una ubicación con  $x$  de 5.48 m,  $y$  de 1.30 m y  $z$  de 1.00, 4.00 y 8.00 m. Considerando esto, a continuación, se revisarán los niveles de onda recibidos en los distintos escenarios de estudio.

Primeramente, se revisaron los niveles con las frecuencias a estudiar simulando nula adecuación, es decir, utilizando los coeficientes de absorción determinados para los materiales en estado natural del aula.

Por cada Escenario, se modificará en cada análisis la frecuencia de excitación y los coeficientes de absorción de los materiales. El nivel de la señal será constante de 90 dB. La velocidad del sonido se considerará constante de 344 m/s. El análisis se realizará con un tamaño de elemento finito de 0.30 m

### 7.2.1. Resultados preliminares.

De la Tabla 7-1 a la Tabla 7-3, se muestran los resultados correspondientes con los distintos escenarios de experimentación propuestos. Como se había establecido, son tres ubicaciones donde se obtendrán las señales de salida.

Como se alcanza a percibir, existen limitaciones a la hora de realizar cálculos con fuentes armónicas. Esto se debe a que la longitud de onda es demasiado pequeña y no alcanza a ser calculada correctamente por los elementos finitos.

Tabla 7-1 Fuente receptora 1.

Estudio de Experimentación	Señal de Salida			
	125	250	500	1000
1	57.31	64.52	64.91	71.55
2	56.16	65.09	68.45	75.16
3	56.24	62.81	64.63	70.33
4	56.15	65.09	68.45	75.16
5	56.24	62.80	64.63	70.33
6	56.51	64.76	66.93	72.50
7	57.37	64.47	67.46	69.20
8	56.51	64.76	66.93	72.50
9	57.37	64.47	67.46	69.21
10	55.94	60.26	65.33	66.65
11	55.82	58.61	66.78	73.78
12	55.67	62.67	64.31	71.56
13	56.06	62.28	68.94	71.38
14	55.94	60.25	65.33	66.65
15	55.82	58.61	66.78	73.78
16	55.66	62.67	64.31	71.56
17	56.06	62.28	68.94	71.38
18	55.94	60.26	65.33	66.65
19	55.82	58.61	66.78	73.78
20	55.67	62.67	64.31	71.56
21	56.06	62.28	68.94	71.38
22	55.94	60.25	65.33	66.64
23	55.81	58.60	66.78	73.78
24	55.66	62.67	64.31	71.56
25	56.05	62.28	68.94	71.38

Tabla 7-2 Fuente receptora 2

Estudio de Experimentación	Señal de Salida			
	125	250	500	1000
1	52.93	61.70	70.72	71.42
2	52.54	60.66	63.53	69.92
3	51.92	60.40	66.76	69.26
4	52.54	60.66	63.53	69.92
5	51.91	60.40	66.76	69.26
6	52.45	61.92	65.79	70.65
7	50.64	61.35	59.64	70.88
8	52.45	61.93	65.79	70.65
9	50.64	61.34	59.64	70.88
10	55.94	64.47	70.02	69.91
11	51.10	56.26	69.16	69.22
12	52.33	59.50	62.11	61.54
13	50.54	63.39	68.50	73.40
14	54.44	64.47	70.02	69.91
15	51.10	56.25	69.16	69.22
16	52.33	59.50	62.11	61.54
17	50.53	63.39	68.50	73.40
18	54.44	64.47	70.02	69.91
19	51.10	56.25	69.16	69.22
20	52.33	59.50	62.11	61.54
21	50.54	63.39	68.50	73.40
22	54.44	64.47	70.02	69.91
23	51.09	56.25	69.16	69.22
24	52.33	59.50	62.11	61.54
25	50.53	63.39	68.50	73.40

Tabla 7-3 Fuente receptora 3

Estudio de Experimentación	Señal de Salida			
	125	250	500	1000
1	54.12	66.86	68.31	68.06
2	51.54	66.45	65.56	66.51
3	50.65	66.84	70.81	68.06
4	51.54	66.45	65.56	66.51
5	50.64	66.84	70.81	68.06
6	51.46	63.72	64.53	67.87
7	53.70	66.72	66.27	71.49
8	51.46	63.72	64.53	67.87
9	53.70	66.72	66.26	71.49
10	55.94	63.18	67.70	66.41
11	51.32	67.31	69.56	71.70
12	47.56	66.95	67.27	65.26
13	51.38	65.63	69.55	61.35
14	51.84	63.18	67.70	66.41
15	51.32	67.31	69.56	71.70
16	47.56	66.95	67.27	65.26
17	51.37	65.63	69.55	61.35
18	51.84	63.18	67.70	66.41
19	51.32	67.31	69.56	71.70
20	47.56	66.95	67.27	65.26
21	51.38	65.63	69.55	61.35
22	51.84	63.18	67.70	66.41
23	51.31	67.31	69.56	71.70
24	47.55	66.95	67.27	65.26
25	51.37	65.63	69.55	61.35

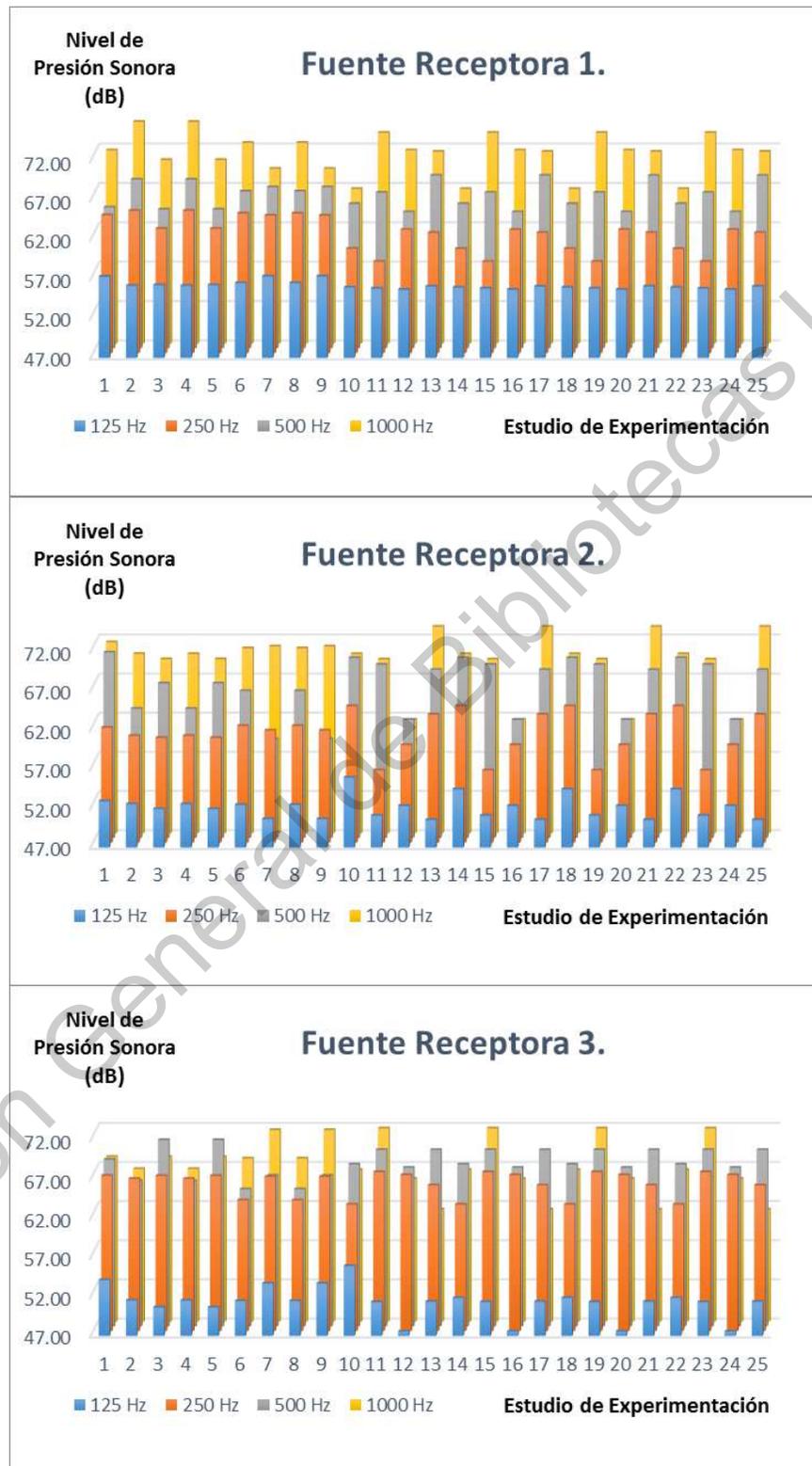


Fig. 7-3 Nivel de Presión Sonora en los puntos receptores.

### 7.3. Refinamiento de Estudios.

Como es apreciable en la sección anterior, existen casos en los que algunos factores no afectan significativamente en los distintos casos. Es por eso que se optó por desestimar estos parámetros y profundizar en los restantes.

En primera instancia se observa que el parámetro relacionado con el material de los distintos plafones y paneles no es significativo. Por lo que se decidió enfocar la atención en los parámetros restantes.

Tabla 7-4 Matriz experimental.

Estudio de Experimentación	Tamaño de Panel	Tamaño de Plafon
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-	-
2	1	-
3	2	-
4	3	-
5	4	-
6	-	1
7	-	2
8	-	3
9	-	4
10	1	1
11	2	1
12	3	1
13	4	1
14	1	2
15	2	2
16	3	2
17	4	2
18	1	3
19	2	3
20	3	3
21	4	3
22	1	4
23	2	4
24	3	4
25	4	4

Actualmente se tienen considerados dos tamaños posibles para el panel y los plafones. Placas cuadradas de 0.7 m y 1.1 m de lado. Ahora bien, para los casos siguientes se usarán 4 distintas medidas 0.6, 0.8, 1.0 y 1.2 m de lado, estas medidas se enumerarán para los siguientes estudios como 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Quedando los estudios a analizar propuestos tal y como muestra la Tabla 7-4. En cuanto a los coeficientes de absorción, se tomarán los correspondientes al Panel de Fibra de Vidrio.

#### 7.4. Resultados.

En esta sección se describen los resultados obtenidos de los distintos estudios descritos en la Tabla 7-4. A diferencia de la sección anterior en esta ocasión se revisaron los estudios en los tres escenarios propuestos anteriormente (Fig. 5-4). Por lo que no sólo se tienen los resultados de Nivel de Presión Sonora en las tres fuentes receptoras para el Escenario A (Tabla 7-5), sino también para el Escenario B y el Escenario C.

Tabla 7-5 Nivel de Presión Sonora Escenario A, Escenario B, Escenario C.

Escenario	Fuente Receptora 1				Fuente Receptora 2				Fuente Receptora 3			
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz
A												
1	57.31	64.52	64.91	71.55	52.93	61.70	70.72	71.42	54.12	66.86	68.31	68.06
2	56.761	62.501	68.58	69.635	52.324	61.488	68.887	76.286	52.579	64.598	70.097	65.785
3	56.31	63.336	64.612	69.627	52.935	61.589	63.884	68.624	52.419	66.232	66.955	63.917
4	57.454	62.566	69.165	70.641	52.685	60.733	67.662	68.228	52.664	61.79	69.444	64.672
5	55.839	62.681	60.176	74.409	50.904	60.523	66.137	61.768	50.82	66.68	71.286	66.41
6	57.54	63.469	66.913	64.915	52.448	61.37	64.662	66.98	54.452	67.831	66.069	67.629
7	57.02	64.134	67.249	72.016	51.841	60.55	73.364	69.378	52.324	67.994	69.507	68.727
8	57.342	65.111	61.364	72.597	52.044	62.018	63.918	70.474	52.337	67.838	66.395	69.52
9	57.55	61.091	64.809	72.856	53.721	60.752	62.851	71.293	52.671	65.864	62.452	63.963
10	57.662	61.942	66.665	73.773	52.181	59.204	63.08	71.605	54.477	66.463	67.308	74.355
11	57.099	64.064	67.051	71.285	52.758	64.064	65.886	67.239	53.8	64.064	64.289	71.972
12	57.742	62.657	64.419	70.779	52.067	60.533	63.702	68.856	52.796	63.995	68.619	65.903
13	57.961	62.592	66.288	66.343	52.086	59.298	66.574	72.743	52.38	65.828	67.695	72.269
14	57.317	63.124	65.239	72.646	51.904	61.367	67.836	69.786	53.123	64.281	68.747	75.183
15	57.332	64.601	67.482	70.949	50.575	59.502	65.078	73.416	51.225	66.277	70.53	72.461
16	57.376	64.46	70.021	67.71	51.712	61.686	67.365	64.716	52.353	63.667	72.632	69.425
17	55.574	63.814	67.21	70.023	50.557	59.871	69.294	62.55	51.826	66.765	69.383	75.853
18	56.783	63.433	69.178	76.004	51.449	62.137	65.388	73.095	52.664	63.202	67.396	71.512
19	56.771	65.541	65.819	73.344	52.144	61.469	68.514	70.241	49.783	67.295	70.847	69.495
20	56.871	61.881	64.729	68.799	51.883	58.175	64.828	71.175	50.647	68.283	66.181	67.23
21	55.499	63.099	64.464	67.961	50.074	61.954	61.716	67.146	51.998	67.413	64.73	69.563
22	56.888	62.64	70.008	65.027	52.904	59.824	67.541	67.285	53.687	63.781	67.676	63.035
23	57.347	63.477	68.395	76.391	53.296	61.693	65.464	71.548	52.846	66.29	66.251	72.617
24	57.151	62.756	69.44	72.524	52.345	62.633	67.199	71.841	53.561	64.8	69.207	67.491
25	56.307	62.869	67.009	70.23	52.393	62.18	71.358	65.726	52.86	63.941	67.952	68.595
Escenari												
o B												
1	64.16	68.15	66.56	68.19	64.71	60.11	66.21	61.08	63.92	70.39	67.68	69.97
2	62.553	64.998	69.012	69.684	61.195	67.114	73.375	68.255	64.614	62.371	71.881	67.09
3	64.013	69.303	65.914	73.352	61.636	66.782	70.907	64.944	64.742	64.65	68.59	63.09
4	62.883	71.737	69.502	70.654	60.679	66.134	69.481	68.463	64.624	64.86	71.335	63.067
5	63.027	70.187	63.817	64.179	62.054	66.75	66.459	65.007	64.068	67.615	71.398	63.297
6	64.292	67.983	62.279	68.152	61.499	69.645	67.655	52.96	63.911	70.769	69.759	59.698
7	67.345	71.207	68.008	64.669	61.757	67.964	64.007	64.239	64.039	71.456	71.599	65.478
8	64.215	69.278	65.355	63.593	61.039	68.286	63.422	64.004	63.329	71.723	68.999	67.203
9	65.131	66.382	62.256	68.36	64.77	68.032	64.779	68.673	63.9	66.955	64.123	63.943
10	65.743	69.137	67.274	72.716	61.101	61.367	63.577	63.799	64.361	65.331	65.838	57.697
11	63.543	68.344	68.297	71.831	61.514	66.959	61.831	62.588	65.989	63.388	63.23	67.862
12	62.791	70.055	69.898	75.939	61.314	67.861	67.928	71.976	65.337	64.795	69.887	64.412
13	66.931	69.334	67.992	67.384	63.475	65.983	70.63	63.776	64.17	66.759	73.06	63.675
14	65.871	69.985	65.18	66.951	61.486	59.564	69.877	61.742	64.452	63.917	71.537	64.002
15	64.952	70.315	67.857	70.955	62.355	65.988	71.712	68.72	63.955	65.271	68.104	63.722
16	63.096	71.388	68.563	71.481	61.299	65.721	66.664	60.964	65.958	64.222	70.919	64.983
17	63.09	70.345	63.39	67.577	62.416	65.745	62.789	65.017	63.998	65.876	69.798	67.122
18	62.684	70.059	66.238	71.51	61.002	57.722	66.732	63.251	64.276	65.193	69.069	58.157
19	63.353	68.888	61.693	64.372	62.144	64.503	69.613	60.524	64.556	62.658	67.165	64.965
20	64.646	68.319	66.275	68.096	60.815	66.748	70.382	64.515	64.613	65.888	70.341	61.101
21	62.898	69.445	70.149	65.966	62.797	66.792	68.482	59.868	64.163	63.601	68.443	56.471
22	62.503	67.671	69.634	62.662	62.318	63.591	67.299	58.261	64.789	64.483	69.528	61.052
23	64.201	67.812	68.255	63.731	61.593	64.951	64.803	66.54	64.099	61.109	66.664	59.646
24	64.333	68.38	71.293	67.556	60.591	68.21	66.661	68.733	64.366	65.097	67.941	66.496
25	62.732	67.924	68.944	67.067	61.991	66.74	63.943	63.023	64.197	64.591	66.82	68.537
Escenario												
C												
1	58.85	65.42	63.31	59.36	58.29	60.79	63.82	65.16	57.83	62.22	65.86	68.90
2	57.226	61.317	57.513	60.694	56.304	60.438	64.389	62.325	58.778	59.581	60.184	62.481
3	58.311	61.653	66.473	57.466	55.108	61.984	68.277	60.787	59.246	63.81	64.485	61.543
4	58.131	66.431	60.549	64.448	55.911	59.951	63.322	63.198	59.387	64.258	59.328	64.667
5	57.271	66.677	63.374	66.279	56.848	61.443	60.303	60.829	58.351	62.999	61.948	62.931
6	58.972	65.899	62.769	70.321	54.964	62.332	69.867	64.369	58.276	61.261	65.232	66.966
7	60.044	64.759	66.488	64.152	55.711	61.869	70.061	65.353	57.859	63.668	64.967	66.312
8	58.723	64.372	62.895	61.498	54.936	65.02	65.373	60.278	57.729	63.363	63.449	69.046
9	58.918	60.926	65.397	64.175	57.74	64.424	65.414	64.412	57.894	59.769	65.981	67.21
10	58.383	63.19	66.969	67.847	56.728	57.469	63.305	65.079	58.67	63.982	63.462	66.639
11	58.136	67.819	63.737	68.183	55.412	60.735	64.709	60.246	60.764	62.801	67.203	63.858
12	58.104	66.408	63.026	62.761	56.705	61.428	67.109	60.659	59.498	65.078	60.661	60.327
13	59.84	61.406	62.009	63.489	56.044	59.696	66	62.54	58.674	62.076	62.829	69.717
14	58.223	62.282	59.64	61.521	56.733	58.968	66.213	62.677	58.737	63.848	58.315	66.622
15	58.228	63.016	63.011	66.814	56.794	61.858	67.142	63.451	58.078	64.495	64.131	60.784
16	57.836	63.732	64.129	59.805	55.496	60.619	64.727	62.865	59.07	66.377	67.95	61.422
17	57.379	67.814	61.027	61.35	56.91	60.141	65.046	58.33	58.175	63.83	63.36	69.507
18	57.394	67.315	63.886	65.575	56.37	57.352	65.325	63.086	58.628	65.891	61.874	63.622
19	57.847	66.163	60.342	64.601	55.881	60.444	66.514	64.363	58.166	64.14	66.721	66.291
20	58.642	66.863	66.721	65.302	56.757	61.621	70.157	65.198	58.001	65.153	65.506	66.905
21	56.968	66.614	59.714	64.589	56.576	61.797	61.362	65.107	58.17	63.96	62.904	60.947
22	57.367	66.027	64.59	68.305	55.658	59.213	61.152	64.386	58.956	64.715	62.008	70.527
23	58.411	63.112	64.599	65.153	54.755	61.658	65.421	61.718	57.889	62.041	57.771	68.335
24	58.071	62.582	61.608	65.709	56.429	63.241	60.399	68.376	59.33	64.319	60.618	67.696
25	57.312	65.281	57.549	67.949	56.665	62.568	65.567	64.614	58.486	64.156	62.606	65.824

## 7.5. Procesamiento de datos

Una vez obtenidas las señales se correlacionaron conforme las propiedades del panel propuesto. La Fig. 7-4 ilustra una gráfica donde se pueden apreciar los distintos Niveles de Presión Sonora de todos los escenarios propuestos. En un eje se varía el tamaño del Panel, mientras que en el otro el del Plafón. En este caso en particular, se muestra el escenario A considerando las dos frecuencias indicadas en la gráfica. El estudio de las señales se realizó de forma análoga en los demás escenarios.

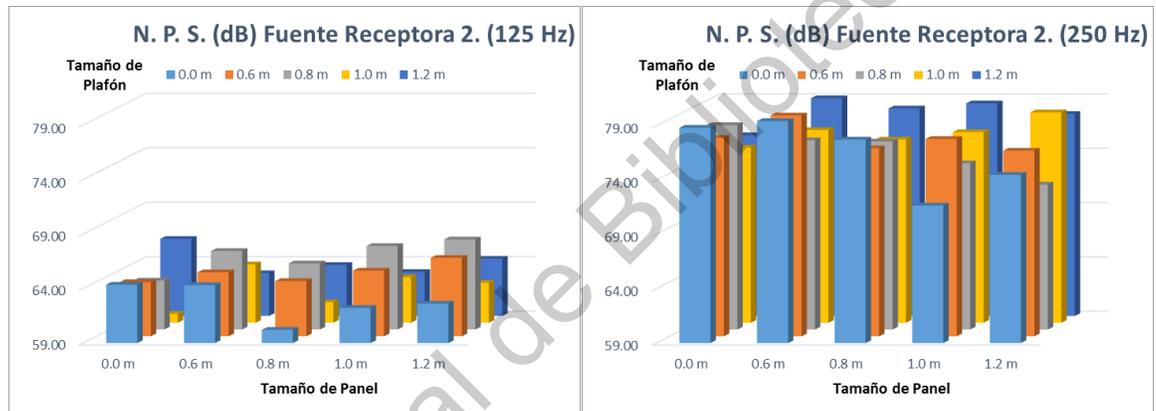


Fig. 7-4 Nivel de Presión Sonora de las diferentes propuestas analizadas.

Para la obtención de Niveles de Presión Sonora, fue necesario hacer el análisis de distribución de presiones, es decir, saber con determinada frecuencia y escenario cuál será la presión en cada punto del espacio. La Fig. 7-5 muestra dicha distribución de frecuencias, en este caso el escenario observado es el C, el cual es cuando el foco se encuentra más próximo a la puerta. Cada cuadrante de la imagen muestra el mismo escenario modificando la frecuencia.

Por otro lado, la Fig. 7-6 muestra el escenario B, con un corte longitudinal en la distancia de ubicación del foco. Nuevamente cada cuadrante es una frecuencia. Tanto esta imagen como la anterior son resultados de la distribución en condiciones normales, sin ningún tipo de mejora simulada.

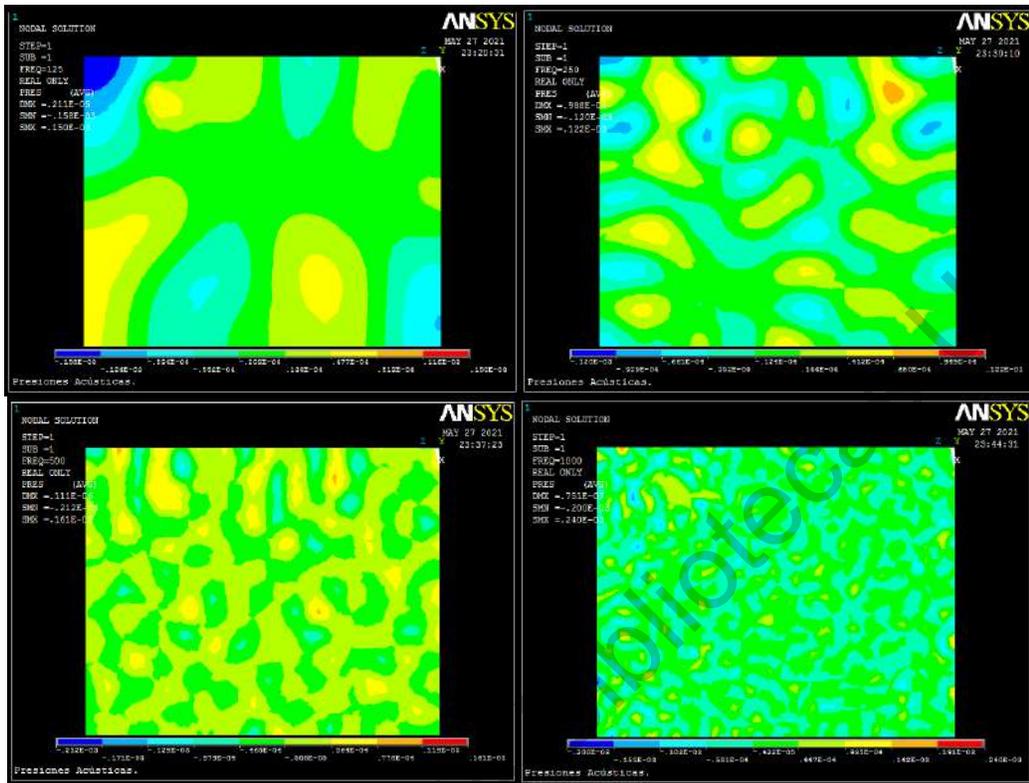


Fig. 7-5 Distribución de Presiones Vista en planta.

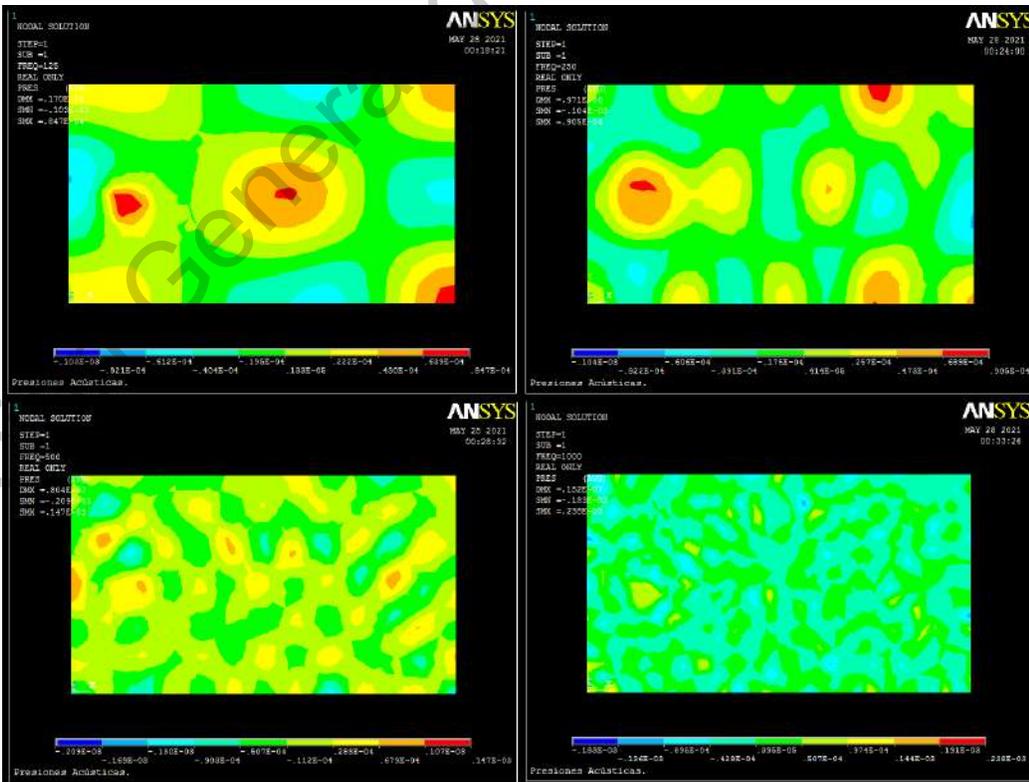


Fig. 7-6 Distribución de Presiones Corte Longitudinal.

La Fig. 7-7 muestra las isosuperficies de la distribución de las presiones considerando la misma ubicación de foco, pero variando las mejoras, teniendo en la primera parte la condición sin mejora y en la segunda una adecuación simulada. Las isosuperficies son superficies que varían conforme el nivel de presión lo hace, de forma análoga a las curvas de nivel.

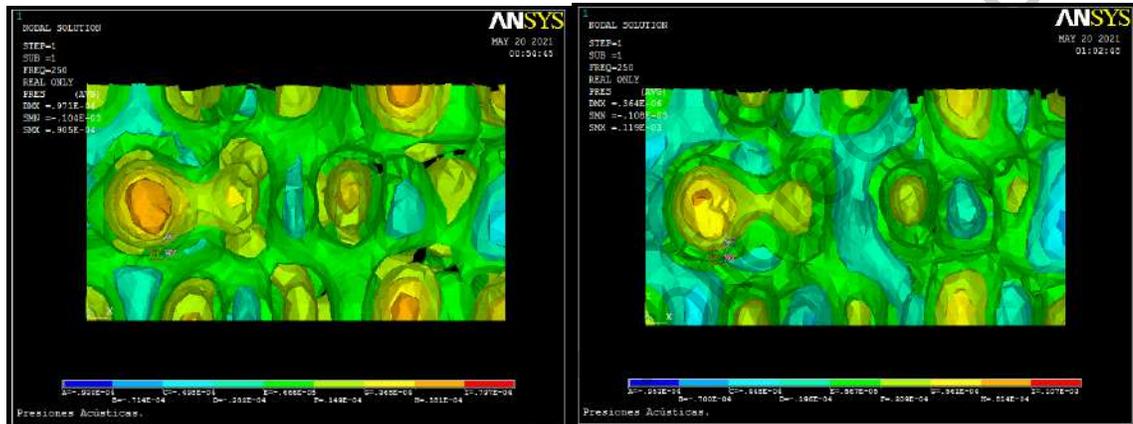


Fig. 7-7 Isosuperficies con diferentes condiciones.

## 7.6. Nivel de Presión Sonora en un Trayecto

Fueron revisados los Niveles de Presión Sonora a lo largo de varios trayectos rectos requeridos. Teniendo en cuenta lo observado anteriormente, la frecuencia de revisión será de 250 Hz.

En primera instancia se revisó el trayecto en dirección del eje X teniendo como punto de referencia el foco emisor. Es decir, en la ubicación del foco fueron medidos los N.P.S. en distintos puntos a lo largo del salón en el trayecto del eje mencionado. Esta información se plasma en la Fig. 7-8, donde se muestra el caso con adecuación y sin adecuación. De esta imagen se rescata que existen dos zonas en las que se presenta inestabilidad en las ondas, por lo que los siguientes análisis fueron realizados estas ubicaciones.

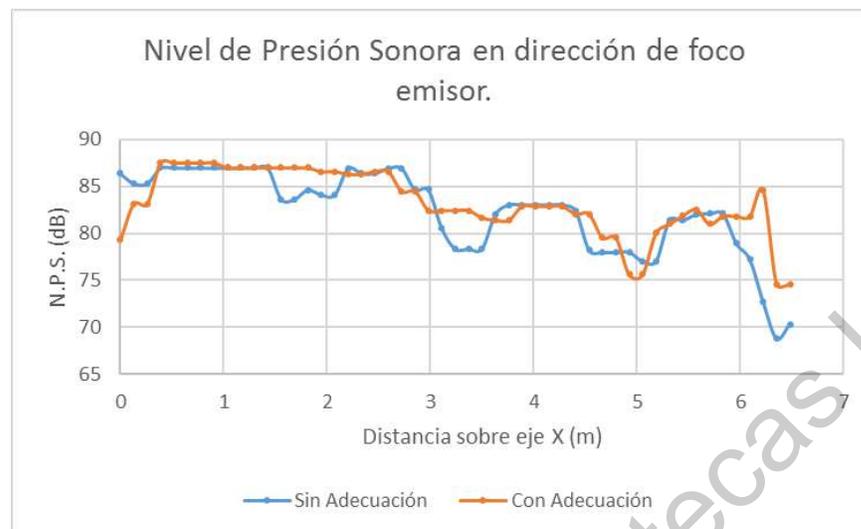


Fig. 7-8 Nivel de Presión Sonora en trayecto  $z = 1.5\text{m}$   $y = 1.61$

La primera zona hace referencia a la ubicación entre las columnas del marco intermedio en dirección X, es aquí donde se realizó un análisis de Niveles de Presión Sonora, pero ahora en dirección Z (Fig. 7-9).

La otra, es la zona del fondo, donde se han estado considerando las fuentes receptoras a lo largo del trabajo. Para un mejor entendimiento, se optó por realizar también una extracción de N.P.S. en esta zona, pero ahora ya no sólo considerando tres puntos, sino tomando en cuenta toda la trayectoria desde un extremo del salón hasta el otro en dirección Z (Fig. 7-10).

En este último caso, se observa que, a pesar de tener una estabilización de las señales con la adecuación, éstas aún resultan ser un poco inestables, por lo que se optó por revisar distintos casos donde el factor a variar fuese la ubicación de la fuente emisora, esto también buscando conocer el comportamiento general del recinto en cuanto acústica se refiere, en esta zona. Por lo anterior se obtuvieron las Envolventes de Nivel de Presión Sonora en este trayecto, tal y como indica la Fig. 7-11.

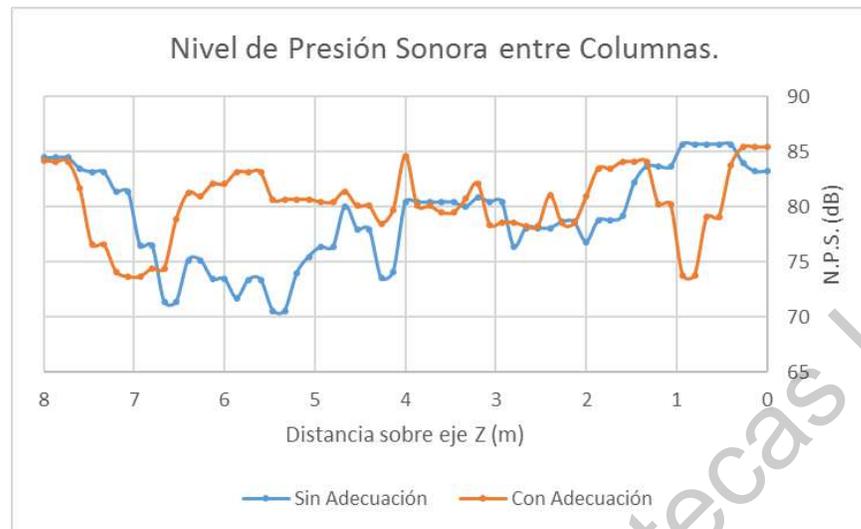


Fig. 7-9 Nivel de Presión Sonora en trayecto  $x = 3.24$  y = 1.30



Fig. 7-10 Nivel de Presión Sonora en trayecto  $x = 5.48$  y = 1.30

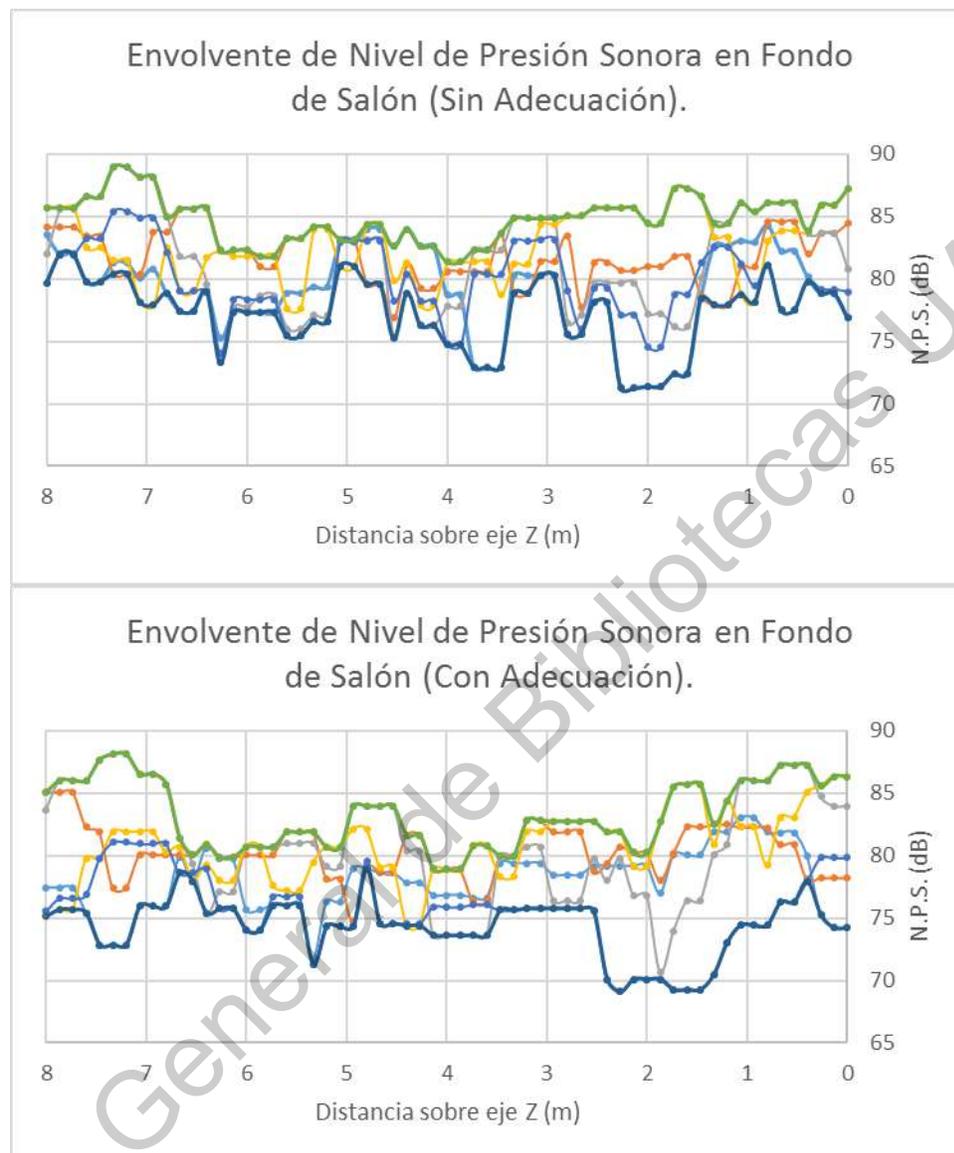


Fig. 7-11 Envolvente de Niveles de Presión Sonora.

### 7.7. Modelo en COMSOL.

Se realizó un análisis geométrico de dispersión de rayos. Este análisis consideró el decaimiento natural de dispersión en el aire. Así como los coeficientes de absorción de cada una de las superficies.

En primera instancia se revisó el modelo en condiciones actuales, sin ningún tipo de mejora propuesta. Se optó por revisar la condición natural con la condición mejorada óptima.

El análisis comenzó con un modelado geométrico del aula en cuestión (Fig. 7-12). Para tema de cuestión de simplificación analítica, el modelado geométrico omitió ciertas áreas que por su tamaño no presentan un impacto fuerte en dicho análisis.

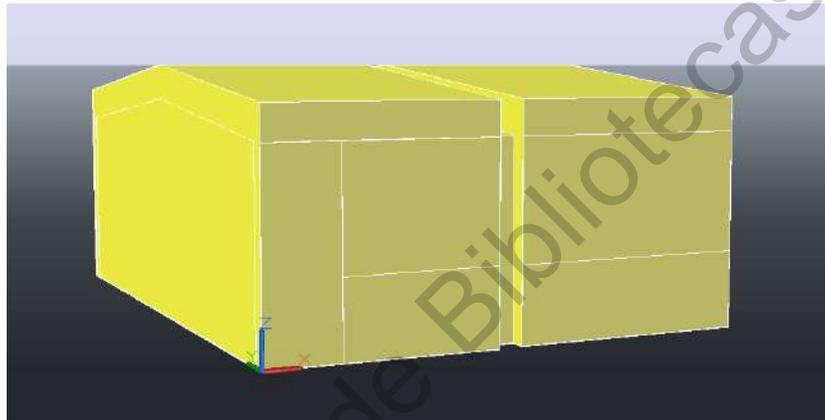


Fig. 7-12 Modelo geométrico del aula analizada.

El modelo geométrico fue importado al software COMSOL Multiphysics 5.6. Y se procedió a realizar un análisis por rayos. Es importante recalcar que este estudio es favorable para altas frecuencias, dichas frecuencias tienen una longitud de onda bastante corta, por tanto, sería necesario un análisis con elementos finitos extremadamente pequeños, estos análisis son bastante difíciles de resolver por la gran cantidad de grados de libertad y entes matemáticos que intervienen.

Se observa la proyección de los rayos en el tiempo 0.01 s en la Fig. 7-13. Esto sirve para tener un mayor entendimiento de cómo es que los rayos se transmiten y rebotan a través del aula. Al igual que lo planteado en la sección del programa en ANSYS existirá un Foco y un punto receptor, los cuales se encontrarán en la misma ubicación con un Nivel de Presión Sonora de mismo valor. En la figura se muestran en la escala de colores la Potencia acorde a los distintos Niveles de Presión Sonora involucrada.

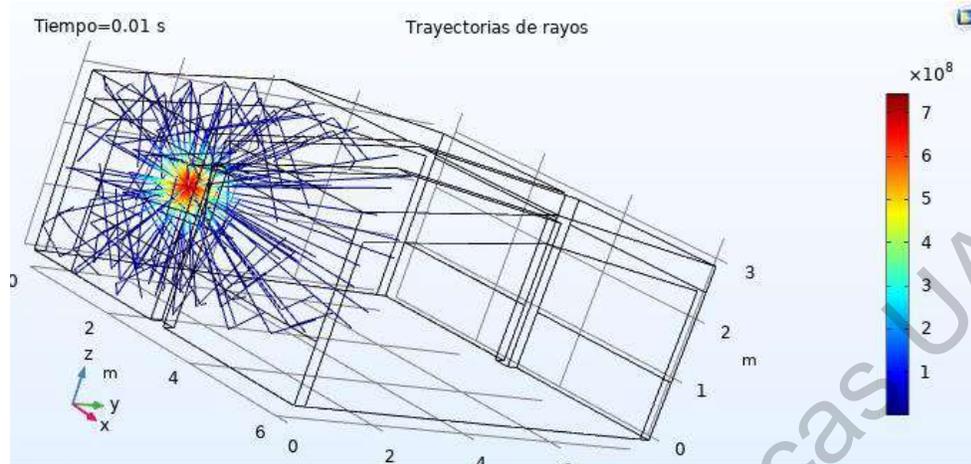


Fig. 7-13 Trayectoria de Rayos.

Al igual que en el programa de Ansys, en este caso se tiene una fuente receptora en la misma ubicación. El análisis de Rayos no solo toma en cuenta la propagación, sino también considerando dicha fuente, se analizan los rayos que llegan a ésta. En la Fig. 7-14 se muestran aquellos rayos que llegan a la fuente receptora. Como se alcanza a observar, existe un decaimiento en la potencia de los rayos, esto es de esperarse. Los Rayos pierden potencia conforme van rebotando por las superficies, también debido a la absorción de los distintos materiales y a la absorción mínima que el mismo aire provoca. Se alcanza a percibir que tienen una tendencia, si se continúa esta tendencia hasta el punto de potencia del umbral de audición, se podría decir que los rayos perdieron completamente todo Nivel de Presión Sonora. Con lo anterior y utilizando este gráfico, es posible estimar gráficamente el tiempo de reverberación. En el gráfico únicamente se muestran a manera de esquema las frecuencias extremas, aunque el cálculo sería análogo para todas las frecuencias.

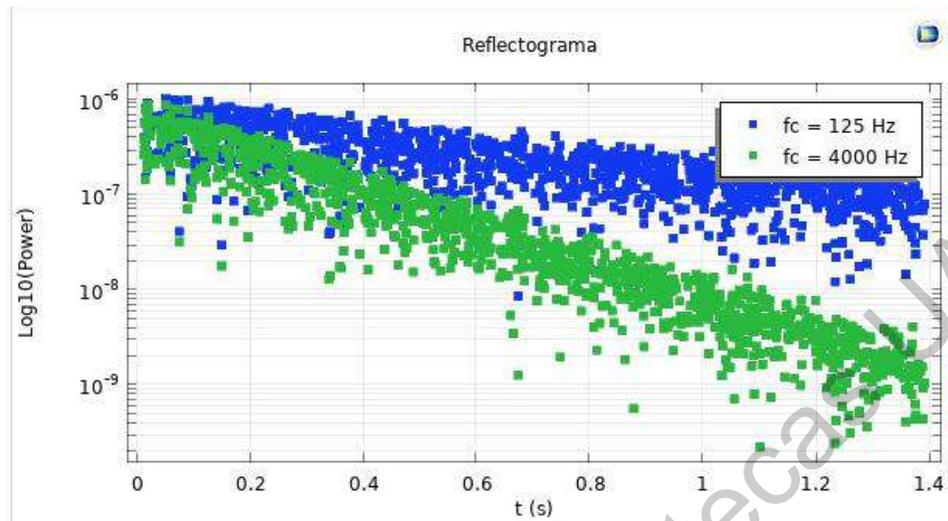


Fig. 7-14 Reflectograma de la fuente Receptora.

En la Fig. 7-15 se muestran los distintos Tiempos de Reverberación en 60 dB. Este es calculado utilizando distintas expresiones. En el gráfico se muestran los comparativos en función de las frecuencias. Estos considerando los distintos coeficientes de absorción de las distintas superficies que comprenden al aula.

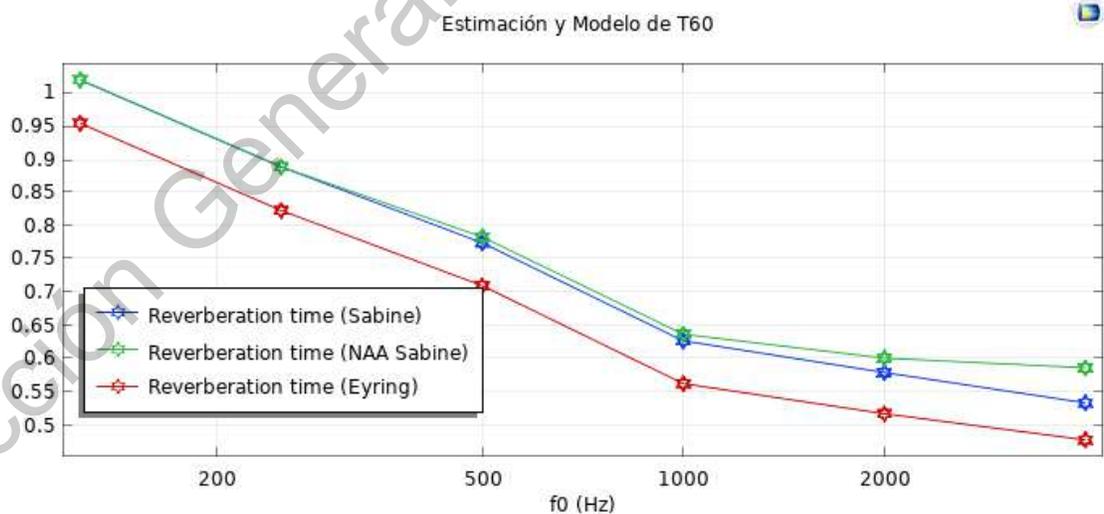


Fig. 7-15 Estimación del Tiempo de Reverberación.

## 8. Conclusiones.

Analizando los datos obtenidos se deduce que, en primera instancia, la ubicación del panel no representa un factor decisivo a la hora de mostrar un efecto en el comportamiento de las ondas acústicas. Más bien, es el tamaño de estos el que representa un impacto más importante a la hora de obtener resultados.

Incluso se modelaron un par de opciones en cuanto a material se refiere. Es verdad que existió una diferencia al momento de obtener las señales, sin embargo, el hecho de colocar un material de una absorción mayor a la de la superficie en la que se encuentra genera una diferencia más notable. Es decir, mientras se usen materiales más absorbentes que la superficie, se tendrá un resultado tangible, independientemente de qué tan absorbente sea este material.

Las distribuciones de onda son variadas dependiendo de la frecuencia. Considerando la Fig. 7-4 se distingue que a pesar de tener las señales una presión inicial de misma magnitud, la frecuencia más baja tuvo más problema en propagarse en el medio que aquellas frecuencias más altas.

De igual manera se aprecia no sólo la distribución de las ondas a través del aula, sino también, las distintas longitudes de ondas correspondientes a las diferentes frecuencias considerando los picos de presiones. (Fig. 7-5 y Fig. 7-6)

Así como se expresa en la sección 6.6. Se alcanza a percibir una diferente distribución de ondas con las distintas mejoras planteadas, siendo el escenario de los paneles de dimensión de 1.2 metros aquel donde se aprecian las diferencias más significativas. Se observa que no solo las ondas presentan más estabilidad, sino que también en términos generales se tiene un Nivel de Presión Sonora mayor.

Tomando en cuenta los diversos escenarios y propuestas analizadas, y pudiendo observar la distribución de las ondas acústicas, se notan que existen impactos en las distribuciones dependiendo de las mejoras propuestas. Esto fue posible gracias a la implementación de software de análisis mecánico y apoyo de software especializado, por lo que es posible entender y tener una aproximación del estudio de las ondas acústicas por medio de la programación para el estudio pertinente.

Otro aspecto a destacar conociendo la distribución de las ondas, es el conocimiento de las zonas en las que se tengan mejores comportamientos de ondas acústicas. La sección 7.6 refleja esta información. Como era de esperarse, existe una zona en las cercanías del foco emisor en las que las ondas permanecen con un Nivel constante y cercano al de la excitación inicial. Posteriormente esta señal decae, en su camino rebota con las distintas superficies del recinto, en algunas zonas existe mayor inestabilidad debido a estos reflejos que en otras.

Una de las zonas de inestabilidad es la zona del marco intermedio, es decir, entre las columnas. La otra, es aquella ubicada en el fondo del salón, donde se han estado tomando la mayoría de los N.P.S. a lo largo del trabajo. Un análisis más a detalle en estas ubicaciones arrojó que cuanto más en el centro y alejado de las superficies más estabilidad se tiene.

Observando las envolventes de Niveles, se aprecia esto último, además de que el hecho de la existencia de la adecuación genera una mejora en este aspecto, teniendo N.P.S. más constantes. Esta información resulta un referente importante para criterios prácticos del uso del aula, como por ejemplo, el conocer ubicaciones idóneas para la colocación de los usuarios, con el objetivo de tener un mejor entendimiento.

## 9. Referencias.

Amable Álvarez I., Méndez Martínez J., Delgado Pérez L., Acebo Figueroa F., de Armas Mestre J., Rivero Llop M. L. (2017). Contaminación ambiental por ruido. *Rev Médica Electrónica*, 2017 May-Jun; 39(3). Recuperado el 13 de Junio de 2021 de: <http://www.revmedicaelectronica.sld.cu/index.php/rme/article/view/2305/3446>

AEMPPI Ecuador. (2018). Peligros del ruido y sus efectos en nuestra salud. Recuperado el 07 de septiembre de 2020 de: <https://www.elsevier.com/es-es/connect/actualidad-sanitaria/efectos-negativos-del-ruido-y-su-repercusion-en-nuestra-salud>

Álvarez, M. del R. (2011). La Sala Nezahualcóyotl, sede de la temporada de la Orquesta Sinfónica de Minería. *Quodlibet*. (3),p. 4.

Álvarez-Morales, L., Molina-Rozalem, J. F., Girón, S., Alonso, A., Bustamante, P. y Álvarez-Corbacho A. (2017). Virtual Reality in Church Acoustic: Visual and acoustic experience in the cathedral of Seville, Spain. *24th International Congress on Sound and Vibration*. London, England. 23-27 July 2017.

Artigas H., Juan B. (2006). *UNAM México: guía de sitios y espacios: edificios antiguos*. Ciudad Universitaria, Centro Cultural Universitario e investigación y desarrollo. Universidad Nacional Autónoma de México.

Belendez, A. (1992), *Acústica, Fluidos y Termodinámica*. Alicante, España, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Comunicaciones, Escuela Universitaria Politécnica, Universidad de Alicante.

Boschi, C. E. (2008). Método para medir el tiempo de reverberación en recintos. *Proyecto Leonardo*, 3(1).

Cobrerros Rodríguez, C. (2015). *Paneles prefabricados termo-acústicos para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.

Cravero, G. A., Ferreyra, S. P., Flores, M. D., Budde, L., Longoni, H. C., Ramos, O. A. y Tommasini, F. C. (2013). Medición y Simulación de Tiempo de Reverberación y otros Parámetros acústicos de aulas. *Mecánica Computacional. Vol XXXII*. Mendoza, Argentina. 19-22 noviembre 2013.

Presenta la CANAIVE los resultados del Estudio ¿Cuánto mide México? (8 de febrero de 2012). *Movimiento Salud, México se mueve*. Recuperado de:  
<https://movimientosalud.wordpress.com/2012/02/08/presenta-la-canaive-los-resultados-del-estudio-cuanto-mide-mexico/#:~:text=La%20altura%20promedio%20de%20las,la%20zona%20centro%20de%2072.37>.

Del Rey, R., Alba, J., Crespo, J. E. y Fontoba, J. (2017). Propuesta de Soluciones Ligeras para Aislamiento Acústico a Ruido Aéreo Basadas en Lana de Oveja y Green Composites. *48 Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica*. Universidad Politécnica de Valencia.

Díaz-Chyla, A., de la Prida, D., Pedrero, A. y Navacerrada, M. A. (2018). El aumento del aislamiento a ruido aéreo de la fachada de las aulas y su efecto en la inteligibilidad del mensaje oral. *XI Congreso Iberoamericano de Acústica*. Cádiz, España. 24-26 de octubre, 2018.

Feijóo, S., Álvarez, J. M. (2003). *Acústica de Aulas: Percepción Fonética en Presencia de Ruido*. Departamento de Física Aplicada, Facultad de Física, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España.

Ferreyra, S. P., Cravero, G. A., Flores, M. D., Budde, L., Longoni, H.C., Ramos, O. A., Tommasini, F. C. (2013). Análisis Modal de Aulas Universitarias. *Mecánica Computacional. Vol XXXII*, 3978-3993. Mendoza, Argentina. 19-22 noviembre 2013.

Garza, C., Medina, A., Padilla, P., Ramos, A., & Zalaquett, F. (2008). Arqueoacústica maya. La necesidad del estudio sistemático de efectos acústicos en sitios arqueológicos. *Estudios de cultura maya*, 32, 63-87.

Godoy Lara, H. (2014). *Caracterización térmica acústica y mecánica de un mortero celular ecológico*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.

Hartmann, W. M. (2013). *Principles of Musical Acoustics*. New York, EUA: Springer.

Instituto de Infraestructura Física Educativa Del Estado de Querétaro, IIFEQ. (S.F.). Decreto de creación. Santiago de Querétaro, Querétaro, México: *Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro*. Recuperado de:

<https://www.queretaro.gob.mx/IIFEQ/contenido.aspx?q=pvp1bOtJyj2IMBAINBJ6SCfj2FgzyCk9>

Lozano, P. (18 de febrero de 2018). ¿Cómo te afecta el ruido que te rodea? *El Mundo*. Sección Vida Sana. Recuperado el 7 de Septiembre de 2020 de: <https://www.elmundo.es/vida-sana/bienestar/2018/02/18/5a8702cd468aebab7d8b45f0.html>

May, J. (2000). Occupational Hearing Loss. *American Journal of Industrial Medicine*, 37, 112-120.

Montoya Morado, E. (2015). *Mejoramiento del confort acústico a través de la implementación de nuevos procesos y formas constructivas*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.

Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos Construcción e Instalaciones. Habitabilidad y Funcionamiento. Acondicionamiento Acústico. Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED). 2011.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (1999). *Guías para el Ruido Urbano*. Londres, Reino Unido, abril de 1999.

OSMAN, Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía. (S.F.). Ruido y Salud. *Junta de Andalucía*. Unión Europea.

Pérez-Egea, A., Jiménez, L. L., Martínez, E. J. y Castro E. (2019). Procedimiento de Análisis y mejora de inteligibilidad en espacios docentes. *23rd International Congress on Project Managment and Engineering*. Málaga, España. 10-12 de Julio, 2019.

Postma, B. N. J., Katz, B. F. G. (2016). Acoustics of Notre-Dame cathedral of Paris. *22nd International Congress on Acoustics*, Buenos Aires, Argentina. 5-9 September 2016.

Ramírez Ortega, A. R. (2014). *Caracterización, desarrollo y aplicaciones de un ferrocemento celular ecológico*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.

Recuero López, M. (2000). *Acústica Arquitectónica. Soluciones Prácticas*. Madrid, España: Editorial Paraninfo.

Turón, L. A. (2017). *Medidas Acústicas en Centros Escolares con Alumnos Normoyentes y con Discapacidades Auditivas*. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.

Ureña Gómez, C. (2017). *Sistema Aislantes Acústicos en Plafones y Muros Caso Amstrong*. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, Tecamachalco, Estado de México, México.

Dirección General de Bibliotecas UAO

## 10. Bibliografía de Imágenes.

Bautista, V. (2016). *Sala Nezahualcóyotl; es como un instrumento* [Fig.]. Recuperado de <https://www.excelsior.com.mx/expresiones/2016/12/30/1137018>

Hery. (2012). *El Sonido del Silencio* [Fig.]. Recuperado de <https://marcianomx.com/el-sonido-del-silencio/>

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## 11. Anexo A: Funcionamiento de Comsol.

En esta sección se explicará el funcionamiento del software utilizado en este trabajo, COMSOL Multiphysics 5.6. Esto tomando como fundamento lo explicado en el manual de usuario de dicho software.

En este caso, se realizó un análisis Acústico de Rayos. Este análisis es usado para calcular trayectorias e intensidad de rayos, y es válido en el tratamiento de altas frecuencias, donde la longitud de onda es pequeña en comparación con los elementos finitos.

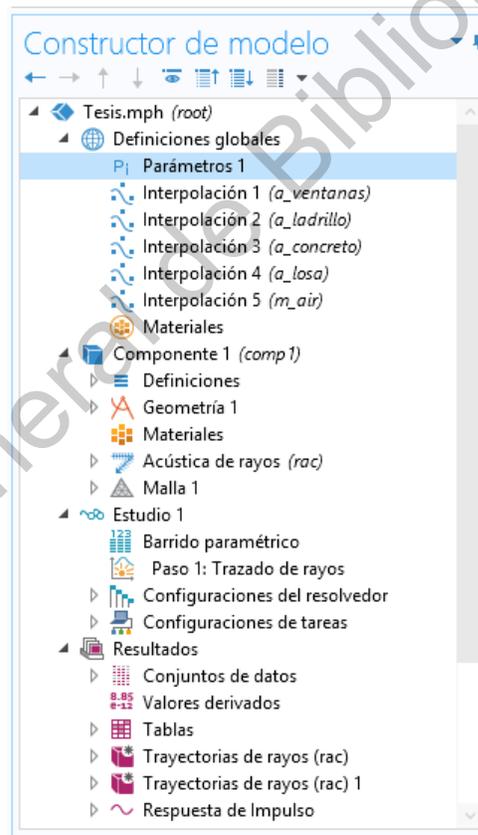


Fig. 11-1 Ventana "Constructor de Modelo".

Las propiedades del medio pueden cambiar continuamente en el dominio o discontinuamente en la frontera. En éstas últimas es posible asignar condiciones, incluidas combinaciones de reflexión, impedancia y absorción, las cuales puede depender de la frecuencia.

Los distintos procesos que el software realiza se divide en varias secciones que se revisarán a continuación. En la Fig. 11-1 se pueden observar dichas secciones y cómo el software las va utilizando.

### 11.1. Parámetros.

En la primera sección de parámetros se ingresan todos los datos a utilizar en el modelo. Es importante recalcar que, a diferencia del modelo en ANSYS, en este la geometría será importada y, por tanto, no habrá parámetros referentes a esta. En este caso los parámetros a ingresar serán propiedades del medio de transmisión así como la ubicación de las fuentes receptoras como el foco, al igual que la información necesaria para el análisis en cuestión.

Tabla 11-1 Parámetros, modelo COMSOL.

Nom	Expresión	Valor	Descripción
dsr	$\sqrt{(x_s-x_r)^2+(y_s-y_r)^2+(z_s-z_r)^2}$	4.5529 m	Source to receiver distance
lam0	$c0/f0$	2.744 m	Wavelength at f0
x_r	5.48[m]	5.48 m	Receiver x-coordinate
c0	343[m/s]	343 m/s	Speed of sound
Vol	155.2878[m^3]	155.29 m <sup>3</sup>	Room volume
f0	125[Hz]	125 Hz	Band center frequency
Nrays	100	100	Number of released rays
y_r	1[m]	1 m	Receiver y-coordinate
x_s	1[m]	1 m	Source x-coordinate
y_s	1.75[m]	1.75 m	Source y-coordinate
z_s	1.61[m]	1.61 m	Source z-coordinate
z_r	1.3[m]	1.3 m	Receiver z-coordinate
rho0	1.2[kg/m^3]	1.2 kg/m <sup>3</sup>	Density
s_diffu...	0.2	0.2	Scattering coefficient of...
P0	0.001 [W]	0.001 W	Source power

En cuanto a la absorción de los materiales, estos se ingresaron por medio de una tabla con información extraída de la Tabla 5-1 Coeficientes de absorción ( $\alpha$ ) para diferentes materiales y frecuencias utilizadas en el modelo. Extraídos del libro de Recuero (2020). Tabla 5-1. Para que el programa utilizara de manera automática los coeficientes en cuestión fue necesario indicar una función de interpolación llamada “vecino cercano”, la cual funciona brindando el dato más cercano del rango en el que nos encontremos.

En este tipo de análisis las propiedades acústicas se aplican directamente a los dominios, por lo que no será necesario definir materiales como tal, por tanto, no se hará uso de esta sección.

## 11.2. Definiciones.

En esta sección, como su nombre lo indica, se definen algunas variables y otros conceptos.

### 11.2.1. Integración.

Esto se refiere al conjunto de todos aquellos dominios que comparten una misma propiedad, en este caso el coeficiente de absorción. Es decir, por ejemplo, todas las superficies que representen zonas de muro de ladrillo serán seleccionadas e integradas en un conjunto, esto para una mayor facilidad en procesos futuros.

### 11.2.2. Tiempo de Reverberación.

En esta subsección se definen aquellas variables relacionadas con los tiempos de reverberación. La obtención de este parámetro se realizará mediante el cálculo de tres ecuaciones: Sabine ( 27 ), Sabine sin considerar absorción del aire ( 28 ), Eyring ( 29 ).

$$TR_S = 0.161 \frac{V}{A + 4m_{air}V} \quad (27)$$

$$TR_{Sna} = 0.161 \frac{V}{A} \quad (28)$$

$$TR_E = 0.161 \frac{V}{-S \cdot \log(1 - \frac{A}{S}) + 4m_{air}V} \quad (29)$$

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \alpha_i \quad (30)$$

$$S = \sum_{i=1}^n A_i \quad (31)$$

Donde:

$TR_S$  = Ecuación de Sabine para Tiempo de Reverberación.

$TR_{Sna}$  = Ecuación de Sabine para Tiempo de Reverberación sin considerar absorción del aire.

$TR_E$  = Ecuación de Eyring para Tiempo de Reverberación.

$V$  = Volumen del recinto.

$A$  = Sumatoria de la absorción total de las superficies.

$m_{air}$  = Absorción del aire.

$S$  = Sumatoria de las áreas de las superficies.

$A_i$  = Área de cada una de las superficies.

$\alpha_i$  = Coeficiente de absorción de cada una de las superficies.

### 11.3. Geometría.

En esta sección se plantea la geometría del modelo, la cual como se ha mencionado, no será creada paramétricamente en el software, sino que será importada. Para más detalle ver sección 7.7 Modelo en COMSOL.

Posterior al importe fue necesario hacer ajustes por unidades, por lo que una función de escala fue aplicada. Así mismo fue conveniente, por el tipo de análisis, no trabajar con un dominio de volumen, por lo que se convirtió a un dominio de superficie el modelo.

También es en esta sección donde, utilizando el modelo, se seleccionan y agrupan las superficies que comparten propiedades para mayor facilidad para los procesos posteriores.

#### 11.4. Acústica de Rayos.

Es en esta sección donde se revisan los ajustes referentes al análisis de datos. En primera instancia se revisarán los datos del medio de propagación de los rayos, el aire. Se ingresan las propiedades de este, tales como Densidad, Velocidad del Sonido y su Absorción. Esta información es tomada de los parámetros ingresados previamente.

Se solicitará al software que calcule la intensidad y la potencia de los rayos, para utilizar esta información en los análisis posteriores. Es importante recordar que para aspectos acústicos el Nivel de Presión Sonora es fundamental, para obtener este valor es necesario especificar la presión mínima de referencia, lo que se conoce como umbral de audición.

También es en esta sección donde se define la posición del foco, indicando sus coordenadas. Igualmente se establece la frecuencia de análisis. Es importante aclarar que el programa realiza un análisis por cada frecuencia, por lo que el valor asociado a la frecuencia será variable, y cambiará por cada análisis realizado.

$$\omega = ck + u \cdot k \quad (32)$$

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial q} \quad (33)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (34)$$

Donde:

$\omega$  = Frecuencia angular de onda.

$c$  = Velocidad del sonido.

$k$  = Vector de onda.

$u$  = Vector de Velocidad.

$q$  = Vector posición.

Se definen la frecuencia angular ( 32 ). Y se utiliza la ecuación de onda acústica de la forma indicada en ( 33 ) y ( 34 ).

Cada rayo será analizado como un frente de onda. La intensidad a lo largo del recorrido será calculada usando ( 35 ). Esto se realiza considerando la intensidad inicial  $I_0$  la cual es reinicializada cada vez que exista una discontinuidad o contacto con frontera.

$$I = I_0 \frac{r_{1,i} r_{2,i}}{r_1 r_2} \quad (35)$$

Donde:

$I_0$  = Intensidad inicial de Rayo.

$r_{1,i}$  y  $r_{2,i}$  = Radios principales de curvatura iniciales.

$r_1$  y  $r_2$  = Radios principales de curvatura.

Los principales radios de curvatura  $r_1$  y  $r_2$  representan el máximo y mínimo radio de curvatura de la intersección del frente de onda con un plano arbitrario. Las relaciones indicadas en ( 36 ) son resueltas, el valor negativo indica que el frente de onda se está expandiendo debido a la propagación de los rayos

$$\frac{dr_1}{ds} = -1 \quad \frac{dr_2}{ds} = -1 \quad (36)$$

Los rayos pueden gradualmente perder energía mientras se propagan a través del medio. El decaimiento de la intensidad puede calcularse con la expresión ( 37 ).

$$\frac{dI}{ds} = -2\alpha I \quad (37)$$

Donde:

$dI/ds$  = Diferencial de intensidad.

$\alpha$  = Coeficiente de absorción del medio.

#### 11.4.1. Propiedades de las paredes.

Se proporcionan las propiedades a las superficies del recinto tomando en cuenta lo grupos previamente realizados con las distintas superficies conforme los materiales en común de estas. Se aplican las propiedades de reflexión de rayos, así como su relación con la variable correspondiente a los distintos coeficientes de absorción. Para así calcular la intensidad con la que el rayo reflejado se propagara.

#### 11.4.2. Ajustes de Rayos.

En esta sección se especifican los ajustes correspondientes a cómo se disiparán los rayos desde el foco. En este caso se especifica que se realice de forma esférica, al igual que las coordenadas de punto de partida, así como el número de rayos simulados y la potencia inicial.

Es importante indicar cuándo ya no será de nuestro interés considerar los rayos, es decir, su terminación. Es por eso que se indica una intensidad mínima de rayo, al ser la intensidad menor a este valor el rayo *desaparecerá*. Esta intensidad mínima será la equivalente al umbral mínimo de audición.

### 11.5. Malla.

En esta sección se proponen las especificaciones relacionadas con el mallado de los elementos geométricos. En este caso se optó por la complejidad utilizar elementos triangulares, con reducido tamaño, seleccionando el tamaño “extrafino”.

Posterior a esto se realizó el mallado para obtener los elementos finitos del modelo discreto.

### 11.6. Estudio.

En esta sección se declaran los ajustes últimos para el desarrollo del estudio en cuestión. Se profundizarán en los distintos requerimientos necesarios para hacer las corridas pertinentes.

#### 11.6.1. Barrido Paramétrico.

Como quedó explícito en la sección pasada, por cada análisis se tendrá una variable independiente, la cual se hará variar. Esta es la frecuencia.

En esta subsección se establecen las frecuencias que sean de nuestro interés realizar los análisis pertinentes, y se solicita al programa que vaya guardando la información de salida.

#### 11.6.2. Trazado de Rayos.

Es necesario indicar la unidad de tiempo del ensayo, el cual puede ser una división de la unidad principal que es el *segundo*. De igual manera se especifica el intervalo de tiempo en el que se requieren los resultados, es decir, el tiempo inicial y final.