

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA A ESCALA

**TESIS DE MASTER**

Autor:

***Jeniffer Victoria Torres Romero***

Director:

***D. Jesús Alba Fernández***

***Dña. Romina del Rey Tormos***

***GANDIA, 2 de septiembre de 2011***

Autor: Jeniffer Victoria Torres Romero

# Diseño y construcción de una cámara de transmisión acústica a escala

Directores: Jesús Alba Fernández y Romina Del Rey Tormos

*Resumen* —La cámara de transmisión permite, bajo ciertas limitaciones, el estudio del aislamiento acústico a ruido aéreo de diferentes materiales y composiciones. Para la actual normativa en edificación española es el único dato experimental válido. Sin embargo, construir una cámara de estas características es costoso. Además, cada ensayo en una cámara de este tipo, por lo complicado del montaje, también suele tener un precio elevado. Por ello se ha planteado la construcción de una cámara a escala, que permita facilitar el cambio de materiales, valorando mejoras entre ellos, reduciendo costes.

El proyecto del laboratorio de medición del índice de reducción acústica a escala con relación 1:5 que se diseña cumple los requerimientos de las normas UNE EN ISO 140-1:1997 y 140-3:1995. Se ha elaborado cuidando los detalles de la teoría de escalamiento, aislamiento acústico, distribución espacial de la difusividad, y se ha predicho el funcionamiento del mismo.

Las cámaras de transmisión son dos recintos adyacentes que permiten caracterizar la propiedad acústica de materiales de construcción llamada índice de reducción sonora, se logra poniendo una muestra o probeta entre los dos recintos

La relación geométrica propuesta para los recintos se evalúa a través de las frecuencias propios de resonancias usando el método de elementos finitos (FEM) y se evalúa el diseño de interacción de energía usando un Modelo SEA (Análisis estadístico de energía) finalmente se ofrecen sugerencias sobre el uso del laboratorio, incluyendo la metodología de medida. Actualmente está en construcción.

*Abstract*— The transmission chamber allows, under certain limitations, the study of airborne sound insulation of different materials and compositions. For the current building regulations in Spain is the unique valid experimental data. However, building a camera like this one is too expensive. In addition, each test in a camera of this type because of the complicated assembly usually has a high price. Therefore it has been set up to build a camera to scale, which allows the exchange of materials, evaluating improvements, such as reducing costs

The project of the laboratory about measurement of acoustic reduction index at 1:5 ratio follows the guidelines of the UNE EN ISO 140:1997 and 140-3:1995 standards. It has been prepared, taking care of the details of the scaling theory, acoustic insulation, spatial distribution of diffusivity, and its operation was predicted.

The transmission chambers are two adjacent enclosures which allow characterizing the acoustical property of materials of construction, latter property known as the noise reduction index, is achieved by placing a sample or test tube between the two enclosures.

The geometric relationship that has been proposed to the enclosures is evaluated through the frequencies of resonances using the Finite Elements Method (FEM), and the design of energy interaction is evaluated using SEA Model (Statistical Energy Analysis), finally suggestions on laboratory use are provided, including the methodology of measurement.

Autor: Jeniffer Victoria Torres Romero

email: jectorro@upvnet.upv.es

Fecha de entrega: 01-09-11

**ÍNDICE**

<b>I</b>	<b>Introducción y Objeto de Estudio</b> .....	3
<b>II</b>	<b>Objetivos</b> .....	4
	<i>II.1 Objetivo General</i> .....	4
	<i>II.2 Objetivos Específicos</i> .....	4
<b>III</b>	<b>Conceptos</b> .....	5
	<i>III.1. Modelos a Escala Reducida</i> .....	5
	<i>III.2. Transmisión Sonora</i> .....	10
	<i>III.3. Modos Propios</i> .....	16
	<i>III.4. Método Numérico de Elementos Finitos (FEM)</i> .....	19
	<i>III.5. Método Acústico Estadístico de Energía (SEA)</i> .....	21
<b>IV</b>	<b>Diseño</b> .....	27
<b>V</b>	<b>Modelo Acústico de Energía (SEA)</b> .....	43
<b>VI</b>	<b>Metodología de Medición: Recomendaciones sobre el uso del laboratorio</b>	46
<b>VII</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	51
	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	52
	AGRADECIMIENTOS	53
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	53
	ANEXOS	54

## I. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE ESTUDIO

La cámara de transmisión acústica es el laboratorio donde se mide el aislamiento acústico al ruido aéreo y de impacto de tabiques, suelos, fachadas y demás elementos constructivos para la edificación, referenciado con el índice de reducción sonora,  $R$ , [2] en las normativas europeas y “transmission loss”, TL, en las normas americanas. Los requerimientos acústicos en el diseño y construcción de ésta son demasiado exigentes, lo que sugiere un alto coste en infraestructura, razón por la cual en este trabajo se propone un sistema a escala de este laboratorio que permite evaluar las características acústicas de productos para la construcción.

Según se puede deducir de la norma, y como podrá comprobarse en los cálculos realizados en este trabajo, el laboratorio para el caso de estudio (aislamiento a ruido aéreo) puede constar de dos cámaras reverberantes contiguas con una apertura de ensayo de  $10(0,4)^1$  m<sup>2</sup>, con una longitud de la arista más corta no inferior a los 2,3 (0,46) m entre ellas donde se inserta la muestra a estudiar, con una diferencia entre ellas del 10% en su volumen, sugiriendo un volumen de  $60(0,44)$  m<sup>3</sup> para la sala emisora y de  $50(0,38)$  m<sup>3</sup> para la receptora según indican los lineamientos de las normas de referencia UNE EN ISO 140-1:1997, 140-3:1995[1][2], el índice de reducción sonora que se calcula posteriormente a las mediciones en las salas, debe ser motivado por la transmisión directa, de allí la razón de que se les llame desacopladas, puesto que no debe existir contacto mecánico-acústico entre ellas.

Los otros 7 caminos de transmisión (transmisiones indirectas) que se dividen en dos grupos aéreos y estructurales (flancos), deben aportar el mínimo por no decir el nulo de la energía en el recinto receptor, puesto que ***la función del laboratorio es la de evaluar el aislamiento acústico proporcionado por el tabique o partición sin la intervención de otro camino de transmisión, siendo esta idea el objetivo principal del diseño y posterior construcción del laboratorio.***

Ahora bien, la atención para lograr hacer la mejor propuesta que cumpla el objetivo anteriormente descrito debe contemplar los siguientes aspectos que darán solución al problema planteado:

1. El laboratorio es un sistema a escala reducida, concretamente con una relación 1:5, por lo que es imprescindible proponer una metodología de diseño y caracterización de la misma consecuente con esta nueva proporción, ya que un escalamiento en dimensión sugiere un desplazamiento en el rango de estudio en frecuencia, esto quiere decir que si las bandas normalizadas por tercio de octava a las que se desea medir la muestra, están centrados desde los 100 Hz hasta los 5kHz, a la nueva proporción estarán entre los 500Hz a los 25kHz.

<sup>1</sup> Los datos que aparecen entre paréntesis corresponden a la magnitud escalada con relación 1:5

2. Al ser cámaras reverberantes indica que el campo acústico de medición debe tener condiciones de campo difuso y la muestra será impactada en incidencia aleatoria, por tanto las salas deben cumplir los requerimientos de acondicionamiento acústico indicados en la norma UNE EN ISO 354:2004[3], pero al ser recintos tan pequeños las ondas estacionarias o modos de resonancia pueden ser un problema en lo homogéneo del campo difuso por lo que la geometría de las salas debe procurar seguir el criterio de Bolt para salas pequeñas. Al tener la geometría definida, se evalúa su pertinencia mediante el método matemático de elementos finitos (F.E.M) usando la herramienta computacional COMSOL® en su versión 4.1. A fin de verificar que la distribución de la densidad modal sea homogénea en el rango de frecuencias de interés.

3. El método SEA Análisis Estadístico de la Energía (*Statistical Energy Analysis*), es utilizado para predecir la resonancia de sonido y vibración en la transmisión de los sistemas dinámicos formado por recintos acústicos acoplados y sistemas estructurales. Allí el comportamiento acústico del sistema se define en términos de energía o potencia. Este método permite de manera analítica caracterizar el diseño propuesto y verificar el no acoplamiento de la propuesta del sistema constructivo.

El desarrollo de estos aspectos se explican siguiendo la siguiente estructura; en el capítulo II se describen los objetivos que persigue esta investigación, en el capítulo III se encontraran las bases conceptuales que fundamentan los criterios para el posterior diseño descrito en el capítulo VI, en el capítulo V se expone el modelo diseñado explicado con el método S.E.A, en el VI se sugieren criterios básicos sobre el uso del laboratorio (*“manual de usuario”*)y como último apartado se concluye la pertinencia del sistema propuesto.

## II. OBJETIVOS DEL PROYECTO:

### II.1. *Objetivo General:*

- ✓ Proyectar el laboratorio de medición del índice de reducción acústica a escala reducida con relación 1:5, siguiendo las recomendaciones de la norma UNE EN ISO 140-1:1997, 140-3:1995 y UNE EN ISO 354:2003.

### II.2. *Objetivos Específicos:*

- ✓ Diseñar el aislamiento y acondicionamiento acústico del laboratorio teniendo en cuenta las recomendaciones constructivas para modelos a escala.
- ✓ Simular numéricamente la geometría de los recintos usando el Método de Elementos Finitos F.E.M.
- ✓ Valorar analíticamente mediante un modelo SEA la transmisión energética entre recintos.

### III. CONCEPTOS.

#### III.1. MODELOS A ESCALA REDUCIDA

##### **Pautas de las escalas de construcciones acústicas [4]:**

Con el fin de obtener un óptimo resultado en el escalamiento del campo acústico se deben seguir las siguientes pautas que garantizan que los procesos físicos sean equivalente en el modelo y el caso original, estas pautas generales con las cuales se puede indicar la aplicación de diferentes elementos de construcción y las situaciones de medición.

1. El indicativo “o” indica la escala original y “m” la del modelo.
2. El sonido en el aire es no disperso y por tanto fácil de escalar. De acuerdo a la teoría de la similitud, dos procesos físicos se dicen que son similares entre sí, si las invariantes específicas tiene el mismo valor. La invariante más importantes en la acústica es el número de Helmholtz, que se define como: la proporción de una longitud  $L$  y el  $\lambda$  longitud de onda. Por lo tanto, es una cantidad sin dimensión:

$$H_e = \frac{L}{\lambda} \quad (1)$$

La longitud  $L$  se puede definir como la longitud de onda de flexión de una placa y como  $\lambda$ , la longitud de onda del sonido en el aire radiado para indicar las regiones con diferentes eficiencia de radiación.

Se define un  $n$  factor de escala como la relación entre una longitud característica  $L_o$  en el original, y su equivalente en  $L_m$  en el modelo. Una de longitud en el modelo es  $n$ -veces más pequeño que en el original:

$$n = \frac{L_o}{L_m} \quad (2)$$

Esto indica que el número de Helmholtz debe ser el mismo para el modelo y para el original, obtenidos. Esto permite encontrar la longitud de onda como:

$$\lambda_m = \frac{1}{n} \lambda_o \quad (3)$$

Que se aplica a las longitudes de onda de todo tipo de onda.

En este caso el medio es el aire tanto en el modelo como en el original, por tanto la velocidad del sonido depende únicamente de la temperatura:

$$c = \lambda f \quad (4)$$

Encontrando la frecuencia como:

$$fm = nfo \quad (5)$$

Esto indica que la frecuencia se escala con el modelo.

3. No obstante el aire no es el único medio que se tendrá en el modelo a escala también se encuentran estructuras sólidas, por tanto también se debe encontrar la relación para la longitud de onda en un medio solido (ondas de flexión).

Se relaciona nuevamente con el número de Helmholtz la longitud de onda en el sólido en la longitud de onda en el aire como:

$$H_{es} = \frac{\lambda_{estructurasolida}}{\lambda_{aire}} \quad (6)$$

Indica entonces, que la relación entre las longitudes de onda tiene que ser invariante. Esto quiere decir que el cambio de propagación por un cambio en el medio debe ser el mismo en el modelo que en el original. Por tanto se tiene la siguiente relación:

$$c_{sólido} = c_{sólido} \quad (7)$$

En la acústica de la edificación, se presenta interés por las ondas longitudinales y de flexión en vigas y placas, esto condice a una relación entre materiales y propiedades geométricas.

- Ondas cuasi-longitudinal en vigas, la velocidad del sonido es:

$$c_{cusiLvigas} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

Donde E es el módulo de Young y  $\rho$  la densidad del material

- Ondas cuasi-longitudinal en vigas, la velocidad del sonido es:

$$c_{cusiLvigas} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \mu^2)}} \quad (9)$$

Donde  $\mu$  es el número de Poisson.

- Ondas de Flexión en vigas:

$$c_{Fv} = \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \omega^2 \quad (10)$$

Donde, B es la rigidez de flexión de la viga, m 'de su masa por unidad de longitud y  $\omega$  es la frecuencia angular.

- Ondas de Flexión en placas:

$$c_{Fp} = \sqrt[4]{\frac{B'}{m''}} \omega^2 \quad (11)$$

B es la rigidez de flexión normalizada de la placa y  $m''$  su masa por unidad área. B y B 'se define como el producto del módulo de Young y el momento de inercia de la viga y de la placa. (E, I).

Se puede decir entonces, que la rigidez de flexión de una viga y una placa es mucho menor en el modelo que en la escala original obteniendo: (Modelo simplificado propuesto por Cremer [5]), La teoría es sencilla suficiente para doblar una longitud de onda mayor de aproximadamente seis veces el espesor de la placa

$$B_m = \frac{1}{n^4} B_0, \text{ paravigas} \quad (12)$$

$$B'_m = \frac{1}{n^3} B'_0, \text{ paraplacas}$$

4. El factor de pérdida de radiación se produce debido al amortiguamiento interno del material y el acoplamiento entre ellos está dado por:

$$\eta_{radiación} = \frac{\rho_0 c_0 \sigma}{\pi f m''} \quad (13)$$

Donde  $\rho_0 c_0$  son la densidad y la velocidad en el aire y  $\sigma$  es la eficiencia de radiación, El escalamiento de la frecuencia y la masa por unidad de área, se compensan entre sí. Por lo tanto, la pérdida de la radiación en la escala sólo depende de la eficiencia de radiación. Por tanto:

$$\eta_{radiaciónmodelo} = \frac{\sigma_m}{\sigma_o} \eta_{radiaciónom} \quad (14)$$

La eficiencia de la radiación depende de la relación entre la longitud de onda de flexión y la longitud de onda longitud en el aire, que es invariante como ya se dijo anteriormente. Sobre todo, por encima de la frecuencia de coincidencia con la siguiente relación  $\sigma \approx 1$ , el factor de pérdida de la radiación en el modelo será entonces igual a la original.

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{U}{2\pi\mu k_{aire} S\sqrt{u^2-1}} \cdot \left( \ln \frac{u+1}{u-1} + \frac{2u}{u^2-1} \right) \quad \text{cuando } f < f_{corte} \\ \sigma &= \left( 0,5 - 0,15 \frac{a_1}{a_2} \right) \cdot \sqrt{k_{air} a_1} \quad \text{cuando } f = f_{corte} \\ \sigma &= (1 - \mu^2)^{-1/2} \quad \text{cuando } f > f_{corte}\end{aligned} \quad (15)$$

Donde:  $k_{aire} = \frac{\omega}{c_{aire}}$ ,  $\mu = \sqrt{\frac{f_{corte}}{f}}$

$U$ : Longitud total del perímetro.

$S$ : Área de radiación.

$a_1$ : Borde más pequeño.

$a_2$ : Borde más largo.

Esto se aplica para el módulo de Young y el módulo de corte, así como para la rigidez de flexión, en función del tipo de movimiento.

$$\eta_{acoplada} = \frac{c_o L_{ij} \tau_{ij}}{\pi^2 S_i \sqrt{f} f_c} \quad (16)$$

Donde  $L_{ij}$  es la longitud de acoplamiento entre la placa  $i$  y  $j$ ,  $\tau_{ij}$  es el coeficiente de transmisión,  $S_i$  superficie de la placa emisora (fuente),  $f_c$  frecuencia de coincidencia a escala y  $f$  frecuencia a estudiar.

El coeficiente de transmisión depende del tipo de unión entre las placas de acoplamiento, en general, sólo dependen de la relación de los espesores de las placas, que es el mismo en el modelo y, en la escala original. Por lo tanto, el factor de pérdida de acoplamiento es invariante.

$$\eta_{acoplamiento, m} = \eta_{acoplamiento, o} \quad (17)$$

El escalamiento del factor de pérdida total depende de la escala del tiempo de reverberación de la placa. Por otro lado, la pérdida total de la una placa es la suma de las pérdidas individuales. Si estos factores de pérdidas individuales son invariantes, entonces la suma también será invariante.

5. Tiempo de reverberación, debe escalar linealmente.

El tiempo de reverberación  $T$  de una sala dada por Sabine:

$$T = 0,161 \frac{V}{m A} \tag{18}$$

La constante incluye la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente,  $V$  es el volumen de la sala y  $A$  el área de absorción equivalente.

El volumen disminuye con la relación de  $1/n^3$  en el modelo., el  $T$  disminuye a una razón de  $1/n$ .

$A$  viene dada por Eyring como:

$$A = -S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV \tag{19}$$

Donde  $\bar{\alpha}$  es coeficiente promedio de las superficies y  $m$  es la pérdida por la propagación en el aire (Np/m).

Suponiendo que  $\bar{\alpha}$  es invariante a las relaciones de escalamiento y  $m$  lineal en el modelo, entonces el área equivalente de absorción de sonido se comporta como un área. En general,  $\bar{\alpha}$  es dependiente de la frecuencia, dependiendo del material. El coeficiente de pérdida por la propagación  $m$  varia con la frecuencia por tanto tendrá un comportamiento distinto dependiendo de la frecuencia, aumentando de manera cuadrática en el rango de la baja frecuencia y lineal en altas frecuencias. Al hacer una aproximación lineal conduce a un error en  $m$ , que aumenta conforme aumenta  $n$  factor de escala en la frecuencia.

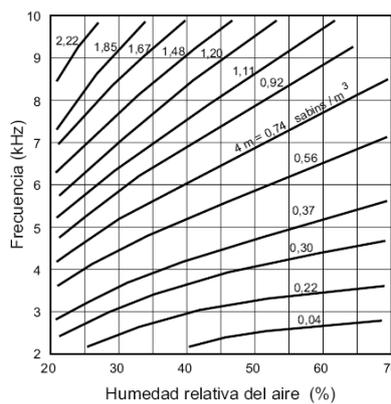


Figura 1 Gráfica para determinar la absorción del aire [6]

La figura anterior enseña la absorción del aire en altas frecuencias donde el factor  $4m$  se puede deducir de la Figura 1, para resolver la ecuación 21.

La solución a este inconveniente es la elección correcta en la escala de la absorción de la superficie del material elegido para el modelo y teniendo un estricto control de la temperatura, la presión estática o la humedad del aire.

Aceptando la relación de escala anterior, Esta aproximación es buena en el rango de frecuencia media, donde  $m$  no tiene influencia, pero en altas frecuencias  $m$  si influye en la absorción generando un error lineal, por lo que causaría tiempo de reverberación más cortos de lo previsto en el modelo inicial, el rango de frecuencia es más ancho para los modelos donde el  $n$  factor de escala es menor.

Tabla 1 Resumen reglas del modelo

<b>GEOMETRIA</b>	
$L_m = \frac{1}{n} L_o$	Característica de la longitud
$e_m = \frac{1}{n} e_o$	Característica del espesor
<b>FRECUENCIA</b>	
$f_m = n f L_o$	Frecuencia
<b>PROPIEDADES DE LOS MATERIALES</b>	
$c_{Lm} = c_{Lo} \leftrightarrow \frac{E_m(f_m)}{\rho_m} = \frac{E_o(f_o)}{\rho_o}$	Velocidad de la onda
$\eta_{Lm}(f_m) = \eta_{Lo}(f_o)$	Amortiguamiento

#### 6. Libre camino medio: Frecuencia de Schroeder:

Sirve como una estimación de la difusividad de la sala y se calcula a partir del tiempo de reverberación y el volumen  $V$ , Esta frecuencia determina la frecuencia más baja a la que puede “funcionar” la edificación

Esta dada como:

$$f_s \approx 2000^{3/2} \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (20)$$

### III.2. TRANSMISIÓN SONORA

“Cuando la perturbación del medio, representada por un frente de ondas, incide sobre las paredes de una sala que se halla conectada a otra por una pared común, éstas se ponen en movimiento vibratorio radiando energía hacia la sala receptora.”

Higini Arau, ABC de la acústica arquitectónica [7].

### 1. Aislamiento Sonoro:

El aislamiento es la oposición de la pared a que la pared en común se mueva.

- ✓ La pared vibra porque se la excita acústicamente por una de sus caras (Transducción acústico-vibracional).
- ✓ Por la otra cara la pared es un objeto en movimiento, por lo que radia ondas acústicas (transducción vibro-acústica).
- ✓ La facilidad u oposición a vibrar que presenta una pared depende de características como su masa, su elasticidad, su forma, sus dimensiones, etc.

Es muy importante no confundir absorción con transmisión de energía, una pared puede absorber y transferir a la vez, siguiendo una ley de conservación de la energía como lo muestra la siguiente expresión:

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{Reflejada}} + E_{\text{Absorbida}} + E_{\text{Transmitida}} \quad (21)$$

El aislamiento que presenta la pared será función de la frecuencia (o contenido espectral) de la onda acústica que en ella incida, esto dificultará la cuantificación de este fenómeno.

### 2. Cuantificación del aislamiento acústico al ruido aéreo:

- ✓ Aislamiento de un elemento constructivo simple:

El aislamiento específico de un elemento constructivo es función de sus propiedades mecánicas y puede calcularse aproximadamente por la ley de masa, que establece que la reducción de intensidad acústica a través de un determinado elemento es función del cuadrado del producto de la masa unitaria  $m$  por la frecuencia considerada  $f$

Encontrando así la siguiente expresión:

$$a \approx (f \cdot m)^2 \quad (22)$$

Expresión expresada en decibelios se transforma en:

$$a(\text{dB}) \equiv 10 \log_{10} (f \cdot m)^2 \quad (23)$$

Se deduce que para una frecuencia fija, el aislamiento acústico aumenta 6 dB cuando se duplica la masa. Análogamente para una masa dada el aislamiento crece 6 dB al duplicar la frecuencia.

### ***Requisitos de las Instalaciones del Laboratorio, Sin Transmisiones Indirectas [1]***

1. Campo difuso
2. Cámaras reverberantes adyacentes diferencia de volúmenes de al menos un 10%. Volúmenes de al menos  $50\text{ m}^2$  a  $60\text{ m}^2$  no deben ser iguales.
3. *Tiempo de reverberación*. Ni largo ni corto cuando en baja frecuencia exceda 2s o menor a 1s.
4. *Ruido de fondo*: Bajo para permitir la medición del sonido transmitido teniendo en cuenta la potencia de salida de la cámara emisora y el aislamiento de las probetas.
5. El sonido por vías indirectas debe ser despreciable, se logra con aislamiento estructural entre la sala emisora y sala receptora.
6. Aperturas de ensayo: Paredes y suelos:  $10\text{ m}^2$  para paredes y entre 10 y  $20\text{ m}^2$  para suelos, con una longitud de la arista más corta no inferior a 2,3 m tanto para paredes como para techos.
7. Construcciones representativas existen 3 tipos de paredes dadas las circunstancias solo se podrán evaluar paredes del tipo:

Tipo A: Ligeras: Partición de dos hojas, cada hoja comprende dos capas de cartón yeso u otro material de masa superficial similar de al menos  $30\text{ kg/m}^2$ . La cavidad entre hojas debe ser al menos 200mm de ancho y debe contener lana mineral de como mínimo 100mm de espesor. Las hojas deben soportarse sobre madera o estructuras metálicas y no debe conectarse mecánicamente la una a la otra. El perímetro de los paneles ligeros no debe ser rígidamente unido a la estructura permanente.

### ***Medición en Laboratorio del Aislamiento Acústico al Ruido Aéreo de los Elementos de Construcción: [2]***

Las mediciones se realizan en laboratorios donde las vías de transmisión indirectas están suprimidas.

#### ***Definiciones***

Nivel medio de presión sonora en un recinto: diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la media espacio-temporal de los cuadrados de las presiones y el cuadrado de la presión de referencia tomándose la media espacial en todo el local, con excepción de las zonas en las que la radiación directa de la fuente o el campo sonoro próximo de las paredes, el techo, etc., tengan influencia significativa se designa con la letra L se expresa en dB.

Micrófono fijo:  $L = 10 \log \frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{np_0^2} \text{ dB}$ , Donde  $p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2$  son las presiones eficaces r.m.s en  $n$  posiciones distintas del recinto, normalmente lo que se mide es nivel de presión sonora por tanto:  $L = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \text{ dB}$ , donde  $L_i$  a  $L_n$  son los niveles de presión sonora en distintas posiciones del recinto.

Índice de reducción sonora:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \text{ dB} \quad (24)$$

Suponiendo un campo perfectamente difuso y que el sonido radiado en el recinto receptor se ha transmitido solo a través de la muestra se deduce:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \text{ dB} \quad (25)$$

Donde:

$L_1$  Nivel de presión sonora medido en el emisor.

$L_2$  Nivel de presión sonora medido en el receptor.

$S$  Área de la muestra que es igual a la apertura de la medida en  $m^2$ .

$A$  Área de absorción sonora equivalente en el recinto receptor en  $m^2$ .

Índice de reducción sonora Aparente

$$R' = 10 \log \frac{W_1}{W_2 + W_3} \quad (26)$$

Donde:

$W_1$  Potencia sonora incidente sobre la pared bajo estudio y la transmitida por el recinto receptor si es significativa.

$W_2$  Potencia sonora transmitida a través de la muestra.

$W_3$  Potencia sonora transmitida a través de elementos laterales u otros componentes.

Suponiendo un campo perfectamente difuso y que el sonido radiado en el recinto receptor se ha transmitido solo a través de la muestra se deduce:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (27)$$

La potencia sonora transmitida se relaciona con la potencia sonora incidente con independencia de las condiciones reales de transmisión.

### ***Disposición de Medida***

Recintos: como se anotaron anteriormente.

Muestra: La transmisión depende de la temperatura, humedad por tanto estas deben ser detalladas.

Paredes: La pared se instalará preferiblemente de forma lo más similar posible a la construcción real con una cuidadosa simulación de las conexiones normales y condiciones de sellado en el perímetro y en las juntas de la propia pared. Las condiciones de montaje serán reflejadas en el informe de medición.

Si la muestra tiene una superficie significativamente más absorbente que la otra, la superficie con mayor absorción quedará al lado del recinto emisor. Deben instalarse elementos difusores en la cámara emisora.

Equipo: La precisión del equipo de medida del nivel de presión sonora deberá ser clase 0 o 1, calibración de campo difuso, filtros de tercio de octava, equipo de medida del tiempo de reverberación fuente de generación de ruido.

### ***Proceso de Medida y Evaluación***<sup>2</sup>

#### Generación del campo sonoro en el recinto emisor (fuente)

El sonido generado en el recinto emisor será estacionario y tendrá un espectro continuo en el rango de frecuencia considerado. Si se utilizan filtros, éstos deben tener un ancho de banda de un tercio de octava como mínimo. Si se utiliza ruido de banda ancha, el espectro debe conformarse para asegurar una relación señal-ruido adecuada en altas frecuencias en el recinto receptor (se recomienda ruido blanco) En cualquier caso, el espectro sonoro en el recinto emisor no tendrá diferencias de nivel mayores a 6dB entre recintos de octava adyacentes.

La potencia sonora deberá ser lo suficientemente alta como para que el nivel de presión sonora en el recinto receptor sea, al menos, 15 dB más alto que el nivel de fondo en cualquier banda de frecuencia

Debe situarse la caja del altavoz de tal forma que se cree un campo sonoro tan difuso como sea posible y una distancia de la muestra tal que la radiación directa sobre ella no sea dominante. Los campos sonoros en los recintos dependen en gran medida del tipo y de la posición de la fuente sonora.

<sup>2</sup> Datos en escala original en el Capítulo V Metodología de medición se ofrecen los datos a escala.

### Requisitos para las posiciones del altavoz en el proceso de selección

La distancia entre las distintas posiciones de altavoz no serán menores que 0,7 m. Al menos dos posiciones no estarán menos que 1,4 m.

Las distancias entre los bordes del recinto y el centro de la fuente no será menor que 0,7 m, despreciando pequeñas irregularidades en los bordes del recinto.

La orientación del altavoz será registrada con precisión a menos que se utilice una fuente con radiación omnidireccional, Se recomienda que esta orientación sea la misma para todas las posiciones con objeto de asegurar que las posiciones escogidas se reproducen exactamente, ya que girar el altavoz puede cambiar de hecho la posición del centro acústico.

### ***Medida del nivel medio de presión sonora***

#### Generalidades

Obtener el nivel de presión sonora mediante un único micrófono situado sucesivamente en cada posición, Los niveles de presión sonora en las diferentes posiciones de micrófono serán promediados de forma energética para todas las posiciones de micrófono.

#### Posiciones de micrófono

Se utilizará en cada recinto un mínimo de cinco posiciones de micrófono. Éstas se distribuirán a lo largo de todo el espacio permitido en cada recinto, uniformemente distribuidas.

La distancia separadoras mínimas y que debe superarse cuando sea posible son:

0,7 m entre posiciones de micrófono; 0,7 m entre cualquier posición de micrófono y los bordes del recinto, o difusores; 1,0m entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora; 1,0 entre cualquier posición de micrófono y la muestra.

#### Promediado temporal

Para cada posición individual de micrófono, el tiempo de promedio será, al menos, 6s en cada banda de frecuencia con frecuencias centrales menores que 400 Hz. Para bandas de frecuencias centrales mayores se permite disminuir el tiempo a no menos de 4 s.

Rango de frecuencias de medida, por tercio de 100 a 500Hz.

### ***Medida del tiempo de reverberación***

Termino correctivo de la siguiente ecuación contiene el área de absorción sonora equivalente se evalúa a partir del tiempo de reverberación medio de acuerdo con la norma UNE EN ISO 354:2003 Medición de la absorción sonora en cámara reverberante.

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (28)$$

Donde:

$A$  Es el área de absorción sonora equivalente en metros cuadrados;

$V$  Es el volumen del recinto receptor, en metros cúbicos;

$T$  Es el tiempo de reverberación del recinto receptor, en segundos.

Según la norma, el tiempo de reverberación se evalúa a partir de la curva de caída empezará alrededor de 0,1 s después de que la fuente sonora sea cortada, a partir de un nivel de presión sonora algunos decibelios por debajo del principio de caída. El rango usado no será menor que 20 dB y no deberá ser tan grande que la caída observada no pueda aproximarse a una línea recta. El extremo inferior de este rango estará, al menos, 10 dB sobre el nivel de fondo.

El número mínimo de medidas de caídas requerido para cada banda de frecuencias es seis (6), Se utilizará, al menos una posición de altavoz y tres posiciones de micrófono con dos lecturas en cada caso

### ***Corrección por ruido de fondo***

Se harán medidas de los niveles de ruido de fondo para asegurar que las observaciones en el recinto receptor no están afectadas por sonidos extraños como pueden ser ruidos del exterior del recinto de medida, ruido eléctrico en el sistema de captación o diafonías eléctricas entre el sistema de emisión y recepción. Para comprobar esto último debe reemplazarse el micrófono por un micrófono ficticio o por una impedancia equivalente. El nivel de fondo será al menos, 6 dB menor que el nivel combinado de señal y ruido de fondo (y preferiblemente menor que 15 dB).

Si la diferencia entre niveles es menor que 15 dB pero mayor que 6 dB, deben calcularse correcciones de acuerdo con la ecuación:

$$L = 10 \log(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \text{ dB} \quad (29)$$

Donde:

$L$  Es el nivel de señal ajustado, en dB;  $L_{sb}$  nivel de la señal y ruido de fondo combinados en dB;  $L_b$  nivel de ruido de fondo, en dB.

Si la diferencia en dB es menor o igual a 6 dB en cualquier banda de frecuencia, debe usarse la corrección 1,3 dB correspondiente a la diferencia de 6dB. En este caso, R se dará en el informe de tal forma que aparezca claramente que los valores dados de R son el límite de la medida.

### *III.3. MODOS PROPIOS*

La teoría de modos [8] analiza la presencia del fenómeno de resonancia, de ocurrencia frecuente en recintos pequeños, el fenómeno se puede explicar brevemente imaginando dos paredes paralelas, el sonido va y viene por múltiples reflexiones, por lo que es factible que se produzcan ondas estacionarias. Si la separación entre paredes coincide con  $\lambda/2$  de una determinada frecuencia, resultará un recorrido total de un  $\lambda$  completo, produciéndose un pico de resonancia que reforzará esa frecuencia en particular.

Considerando que un recinto posee, como mínimo, seis superficies, este efecto se repetirá para todas las combinaciones posibles de ellas y para aquellas distancias que coincidan con valores de  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$ , etc.

Sucede ya que, entre dos puntos de una sala, el sonido no se transmite de manera homogénea, sino, como consecuencia se percibe una heterogeneidad en la respuesta en frecuencia de la sala teniendo puntos con mayor o menor energía, esto sucede con mayor notoriedad en baja frecuencia ya que al aumentar la frecuencia aumenta la densidad modal y es menos notorio el fenómeno, en consecuencia lo que se busca es una distribución en frecuencia donde las concentraciones de resonancias estén distribuidas con diferencias que no se alcancen a percibir lo que quiere decir  $\Delta f$  pequeños (densidad modal).

La gran mayoría de recintos tienen formas equivalentes a paralelepípedos rectangulares, donde el fenómeno predominará con mayor intensidad, estos refuerzos ocurrirán a tres frecuencias básicas correlacionadas con sus dimensiones (alto, largo y ancho), más sus múltiplos, más los infinitos caminos posibles involucrados con reflexiones que retornen a su origen. En el rango de bajas frecuencias, existen tres tipos de modos de resonancia:

#### ***Modos axiales (dominantes)***

Son aquellos que involucran reflexiones sobre dos superficies vinculadas con las tres dimensiones principales del recinto (ancho, largo y alto), estableciéndose a partir de dos ondas que se propagan en forma paralela a cada uno de los ejes. Estos modos son los más importantes y fáciles de predecir, dado que ocurrirán en todas las frecuencias y sus múltiplos cuya longitud de onda sea igual a la mitad de las tres dimensiones principales.

#### ***Modos tangenciales:***

Son aquéllos vinculados con las reflexiones sobre dos pares de superficies opuestas, por lo que involucran cuatro superficies con un total de cuatro ondas. En cada reflexión, perderán parte de su energía debido a la absorción, por lo que tendrán menor peso que los axiales (aproximadamente 3 dB).

### ***Modos oblicuos***

Son aquéllos vinculados con las reflexiones sobre las seis superficies del recinto, con un total de ocho ondas en el trayecto, por lo que tendrán menor peso aún que las axiales (aproximadamente 6dB).

Estos modos son de frecuencias más altas que el menor modo axial. Esta es una de las razones por lo que no es conveniente ignorarlos.

La siguiente expresión matemática vincula todos los modos posibles, esta ecuación es aplicable solamente para recintos con superficies rígidas y sin absorción:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}} \quad (30)$$

Donde:

$f$ , Frecuencia del modo (Hz).

$c$ , Es la velocidad del sonido.

$p, q, r$  números enteros positivos (0,1,2,3...n) vinculados con las tres dimensiones espaciales del recinto.  $L$ , Largo (m).  $W$

$W$ , Ancho (m).

$H$ , Alto (m).

### ***Criterio de Bolt (Bolt, Beranek y Newman)***

El criterio más usado es el de Bolt otorga a la sala un amplio rango de proporciones, de tal forma de producir las características más suaves en baja frecuencia, esto es aplicable en recintos rectangulares de pequeñas dimensiones, como es el caso expuesto.

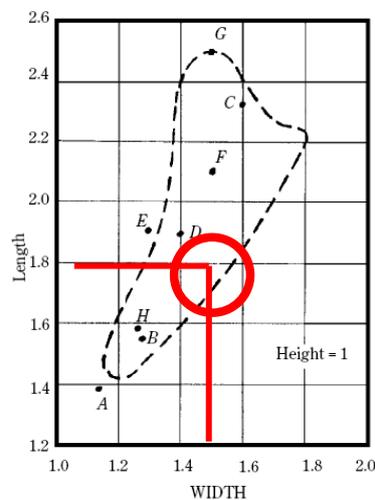


Figura 2 Diagrama de distribución modal de Bolt [8]

En la Figura 2 se observa que, a partir de una altura unitaria  $H = 1$ , se puede obtener distintas relaciones dimensionales del largo y el ancho, dentro del área punteada, con valores razonables de diseño.

Se puede dar una estimación del criterio para salas, siguiendo las siguientes proporciones remarcadas en la Figura 2 y descritas en la siguiente ecuación.

$$\begin{array}{l} H: W, L \\ 1: 1,4, 1,8 \end{array} \quad (31)$$

#### III.4.MÉTODO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS

Se trata de un método general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales. Es una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello se hace uso de la "discretización" o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas elementos finitos. El Método de los Elementos Finitos es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales de problemas continuos [9], [10], de tal forma que:

- ✓ El problema continuo se divide en un número finito de partes llamados "elementos", cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados "nodos". Estos nodos incluyen los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- ✓ La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por el acople de los elementos.
- ✓ Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- ✓ El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

El FEM, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Todas las herramientas informáticas actuales que emplean el método de los Elementos Finitos tienen tres fases bien diferenciadas [11],[12],

**Pre-procesado:** consiste en la tarea de discretizar el modelo real en elementos y nodos (mallado) en los cuales se calcularán las magnitudes donde, se realizarán las siguientes tareas:

- ✓ Dibujo del modelo o importación del mismo si se ha generado por medio de un sistema CAD.
- ✓ Selección del tipo de elemento o elementos a emplear. En función del tipo de cálculo a realizar. Estos pueden ser 1D, 2D, 3D, lineales, parabólicos, integración reducida, etc.
- ✓ Mallado del dominio (creación nodos y elementos).
- ✓ Introducción de las condiciones de contorno y la relación de este dominio con el resto de las piezas o componentes que lo rodean.
- ✓ Introducción de las propiedades mecánicas de los materiales que componen el dominio en estudio.
- ✓ Aplicación de las cargas exteriores.

**Cálculo:** consiste en la creación y resolución del sistema de ecuaciones matriciales. Se realizan las siguientes tareas:

- ✓ Se define y selecciona el tipo de fenómeno físico que se quiere estudiar.
- ✓ Configuración de los parámetros de cálculo.
- ✓ Inicio y fin del cálculo: el programa transfiere las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, realiza la triangulación de la matriz, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución.

**Post-procesado:** una vez generados los ficheros de resultados, analizar éstos de forma gráfica, tabulada, etc. Se realizan las siguientes tareas:

- ✓ Tomar las decisiones oportunas sobre la bondad o no del diseño en cuestión.
- ✓ Analizar la viabilidad respecto a los objetivos marcados al inicio del cálculo (optimizar peso, tensiones, número de ciclos, frecuencias, etc.).

*Modelo Matemático:*

Basado en la teoría acústica de la presión, Las ondas sonoras en un medio sin pérdidas se rigen por la siguiente ecuación para la presión acústica,  $p$  (unidad SI: Pa):

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q) \right) = Q \quad (32)$$

Aquí  $\rho_0$  (kg/m<sup>3</sup>) se refiere a la densidad, y  $c$  (m / s) indica la velocidad del sonido. Las fuente dipolar,  $q$  (N/m<sup>3</sup>) y monopolar  $Q$  (1/s<sup>2</sup>) son opcionales. La combinación  $\rho_0 c^2$  se llama el módulo de compresibilidad adiabático, comúnmente denotado  $K$  (Pa).

Un caso especial importante es una onda de tiempo armónica, para que la presión varíe con el tiempo.

$$p(x, t) = p(x) e^{j\omega t} \quad (33)$$

Donde:  $\omega = 2\pi f \left(\frac{rad}{s}\right)$  es la frecuencia angular, por tanto  $f$  (Hz) es la frecuencia, Asumiendo la misma dependencia armónica de tiempo de las condiciones de la fuente, la ecuación de onda acústica se reduce a una ecuación no homogénea de Helmholtz:

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c^2} \quad (34)$$

También puede optar por el tratamiento de esta ecuación como un valor propio ecuaciones parciales en diferencias para resolver modos propios y/o frecuencias propias.

Las condiciones típicas de contorno son:

- ✓ Limite duro (pared)
- ✓ Contorno suave (sin presión acústica)
- ✓ Presión acústica.
- ✓ Aceleración normal.
- ✓ Impedancia

***Estudio de Frecuencias propias:*** [13].

En la formulación de este estudio las fuentes están ausentes, y se resuelve la siguiente ecuación:

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) + \frac{\lambda^2 p}{\rho_0 c^2} = 0 \quad (35)$$

El valor propio  $\lambda$  introducido en esta ecuación está relacionada con la frecuencia propia,  $f$ , y la frecuencia angular,  $\omega$ , a través de  $\lambda = i2\pi f = i\omega$ . Porque son independientes de la presión, el solucionador ignora cualquier fuente. Se resuelve para casos 3D

### *III.5. MODELO ACÚSTICO DE ENERGÍA (SEA)*

El análisis estadístico de energía es un enfoque para resolver problemas complejos relacionados con la acústica y las vibraciones. Fue desarrollado originalmente para su uso en el diseño de las naves espaciales en la década de 1960 y desde entonces ha sido aplicado a problemas tales como la transmisión del sonido en los edificios, barcos, aviones, coches y vehículos ferroviarios.

Este tipo de análisis es llamado estadístico, ya que no tiene que ver con el conocimiento exacto de un sistema en específico. Más bien, interesa conocer una población, si las estructuras son representativamente idénticas, pero en la práctica tienen pequeñas diferencias. Pues este tipo de enfoque es útil para caracterizar el fenómeno de la transmisión del sonido en edificios, el concepto estadístico se ajusta bien con la acústica de los edificios pero los detalles de un edificio nunca se saben con gran precisión entonces hay que hacer algunas aproximaciones.

Este método funciona muy bien en dar soluciones determinísticas, para el estudio de problemas complejos, tales como la transmisión del sonido a través de edificios. Puede ser utilizado tanto para problemas sencillos, como la estimación del ruido en una habitación debido a una fuente de ruido, o problemas más complejos, tales como determinar el rendimiento global de un edificio entero.

Dado que los modelos formales teóricos fueron desarrollados para el análisis de flujo de energía entre los grupos de osciladores. El análisis estadístico fue y se refería a la media y la varianza de flujo de energía entre, y la respuesta de, osciladores.

Este análisis demostró que existe una relación entre el acoplamiento de las dos direcciones opuestas. En SEA este acoplamiento se describe mediante un parámetro conocido como el factor de pérdida de acoplamiento, CFL.

En el sentido estrictamente formal, SEA [14] es el estudio de las estadísticas de resonadores acoplado pero en su sentido más amplio se es utilizado como técnicas para el cálculo del rendimiento de los sistemas de alta complejidad usando los conceptos de flujo de potencia y energía.

#### ***Parámetros SEA:***

En SEA hay una serie de parámetros y términos que son: Sistema, subsistema, energía, flujo de energía, factor de pérdida de energía:

El *sistema* es la parte del sistema físico que está siendo modelado.

Un *subsistema* es un conjunto de modelos con las mismas propiedades y energías modales similares y por lo general se relaciona directamente con un elemento físico, como una habitación o una pared.

La *energía* es el parámetro que describe la respuesta dinámica y se relaciona con la medida más común de presión y velocidad.

El *flujo de energía* a través del sistema se describe por el factor de pérdida.

El *factor de pérdida* como la fracción de energía perdida por ciclo radianes como:

$$\eta = W/E\omega \quad (36)$$

Hay varios tipos de factores de pérdida de función en el mecanismo de pérdida. Pérdida de energía debido al calentamiento interno es el factor de pérdida interna y tiene el símbolo  $\eta_{id}$  para el subsistema i. Las pérdidas debidas al acoplamiento de un subsistema a otro es el factor de pérdida de acoplamiento y tiene el símbolo  $\eta_{ij}$  para el acoplamiento del subsistema i al j. El factor de pérdida total,  $\eta_i$  es la suma de todas las pérdidas de un subsistema.

#### ***Los subsistemas:***

Uno de los principios básicos sobre los que se realiza un análisis estadístico de energía es que sólo la mínima cantidad de información sobre un sistema o subsistema puede ser usada para calcular el rendimiento de un sistema. Una vez que los datos básicos acerca de los subsistemas se ha recogido se debe añadir información más detallada sobre el comportamiento del subsistema. Con esta información y el conocimiento de las conexiones físicas entre los subsistemas el factor de pérdida de acoplamiento se puede calcular, así como el desempeño del sistema determinado.

Por tanto factores como la densidad, el módulo de Young, la velocidad de propagación el módulo de elasticidad y el tipo de onda que se desee analizar son esenciales para el correcto desarrollo del modelo SEA.

#### ***Energía***

En SEA, la energía del subsistema parámetro se utiliza para dar una medida del sonido en una habitación o la vibración de un estructura en julios (o dB ref  $10^{-12}$ Joules). La energía de cualquier subsistema se puede dar como:

$$E = mv^2 \quad (37)$$

Donde m es la masa total del subsistema en kg y v es la velocidad en m / s. En todos los casos, el del subsistema energía se calcula a partir de la media de velocidad RMS en el tiempo y el espacio (y frecuencia). Si la masa no se distribuye uniformemente, entonces la energía de cada parte, por separado y se suman.

Para una onda plana, la presión y la velocidad de la partícula están relacionados por  $p / v = \rho_o c_o$  y la masa total de aire es  $V\rho_o$  para dar la energía en un espacio acústico:

$$E = \frac{p^2 V}{\rho_0 c_0^2} \quad (38)$$

Si la energía se convierte en decibelios para dar el nivel de energía, en dB, el nivel de energía está relacionado para el nivel de presión sonora por la ecuación:

$$L_e = L_p + 10 \log V - 10 \log \frac{p_o^2}{E_o \rho_0 c_0^2} \quad (39)$$

Donde  $E_o$  es la energía de referencia y  $p_o$  es la presión de referencia.

Para la ecuación subsistemas estructurales puede ser utilizado directamente la energía para dar el nivel del subsistema en dB

$$L_e = L_v + 10 \log m \quad (40)$$

Donde  $L_v$  es la velocidad RMS.

Si hay movimiento en más de una dirección, la energía que es asociada a cada dirección se puede calcular por separado. Así, una onda puede tener movimiento en cada una de las dos direcciones.

### ***Amortiguamiento:***

Bajo condiciones de estado estacionario la potencia que entra en un subsistema, ya sea de una fuente de ruido o de acoplamiento a otro subsistema, será igual a la potencia dejando ese subsistema. El nombre general de los mecanismos que causan la energía que se pierde es la amortiguación. En SEA la medida de amortiguación que se utiliza es el factor de pérdida,  $\eta$ , que se define como la fracción de energía perdida en el ciclo de radianes, por definición, la pérdida de potencia de un subsistema,  $W$ , es la siguiente:

$$W = E \omega \eta \quad (41)$$

Esta definición se puede utilizar como base para la medición de la amortiguación, si la entrada de energía y la respuesta de uno de los subsistemas se miden, posteriormente, la amortiguación se puede determinar.

Las pérdidas pueden llevarse a cabo por varios mecanismos diferentes. Si la energía se pierde debido al acoplamiento de otra parte de los sistemas (es decir, otros subsistemas), a continuación, el factor de pérdida se conoce como el factor de pérdida de acoplamiento. Si la pérdida se debe a cualquier otro mecanismo a continuación, el factor de pérdida se conoce como el factor de pérdidas internas,  $\eta_d$ . Por lo general, la no pérdida debida al acoplamiento será debido a la conversión interior de la vibración en calor, pero las pérdidas debido al

acoplamiento de elementos que no están incluidas en la modelo de SEA también se deben incluir como pérdidas internas.

La amortiguación debido a todos los mecanismos que se conoce como la factor de pérdida total,  $\eta$ , y es la suma de todos la factor de pérdida de acoplamiento y el factor de pérdidas internas.

Así, para  $i$  subsistema el factor de pérdida total se da por:

$$\eta_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \eta_{ij} + \eta_{id} \quad (42)$$

Al igual que con otras medidas en la acústica es conveniente expresar el factor de pérdida en dB y una referencia de  $10^{-12}$  es conveniente dar la factor de perdidas:

$$\eta(dB) = 10 \log \frac{\eta}{10^{-12}} \quad (43)$$

En acústica de la edificación la medida más común de amortiguamiento es el tiempo de reverberación (el tiempo necesario para que la energía de decaimiento cese en 60 dB, una vez la fuente de ruido estacionario ha sido detenido) el tiempo de reverberación,  $T$  y el factor de pérdida total se relacionan por:

$$\eta = \frac{\ln(10^6)}{2\pi f T} = \frac{2.2}{f T} \quad (44)$$

El tiempo de reverberación de las estructuras puede ser muy breve por lo que la instrumentación especializada es necesaria cuando se mide el tiempo de reverberación. Como puede ser difícil excitar estructuras de los edificios con el ruido estacionario es más fácil por lo general utilizar una fuente transitoria, como un martillo de plástico como fuente.

Cavidades:

Si la absorción ocurre alrededor de los bordes, se puede utilizar para dar el factor de pérdida sustituyendo el camino libre medio de una cavidad por el camino libre medio de un recinto para dar el factor de pérdida como:

$$\eta = \frac{c_0 \sum L \alpha}{2\pi^2 f S} \quad (45)$$

En muchos casos dentro de la cavidad existirá un material fibroso que agrega amortiguación encontrando:

$$\eta = \frac{\gamma c_0}{2\pi f} \quad (46)$$

El factor de pérdida de acoplamiento en un límite sería:

$$\eta = \frac{c_g L \alpha}{2\pi^2 f S} \quad (47)$$

Donde:

$c_g$ : es la velocidad de grupo que para las ondas en el aire y en las ondas planas, la velocidad el grupo y las velocidades de fase son iguales, encontrando:  $c_g = 2c_B$ , para placas es

$$c_B = \left( \frac{4\pi^2 f^2 B}{\rho_s} \right)^{1/4}$$

Si todas las placas son de aproximadamente el mismo grosor en el límite se encuentra:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{f}} + 0,015 \quad (48)$$

#### Análisis de trayectorias:

En muchos casos, es útil saber no sólo como el sonido se transmite, es de mayor interés tomar también las vías de transmisión y la importancia relativa de estos caminos esto puede ser usado para identificar áreas de reparación o rediseñar.

Para cualquier ruta, a través de cualquier sistema, para dar la energía en el subsistema n, debido a la transmisión a lo largo del camino 1-2-3-4-...-n.

$$E_n = \frac{E_1 \eta_{12} \eta_{23} \eta_{34} \dots \eta_{nm-1}}{\eta_2 \eta_3 \eta_4 \dots \eta_n} \quad (49)$$

Entonces el racionamiento de energía se convierte en  $E_n/E_1$  cada sistema extra añadido a una trayectoria de la relación de energía

La diferencia de presión sonora D se convierte en:

$$D = 10 \log \frac{p_1^2}{p_n^2} = 10 \log \frac{\eta_{12} \eta_{23} \eta_{34} \dots \eta_{nm-1}}{\eta_2 \eta_3 \eta_4 \dots \eta_n} \quad (50)$$

Cuando un camino se usa para dar la diferencia de nivel entre 2 subsistemas de la ruta de acceso debe comenzar con el subsistema de la fuente y el último el subsistema de recepción cualquier subsistema puede incluir cualquier cantidad de vías.

*Detallar las trayectorias:*

1. Contar los caminos
2. Ordenar las rutas que comienzan y terminan en el sistema de interés
3. Si por ejemplo hay 6 subsistemas la trayectoria que tenga 5 subsistemas será la última en tener en cuenta
4. Condición;  $N=0$  para todos los subsistemas excepto el de origen donde es la fuente que es  $N=1$

En cada etapa de la interacción el número de cada subsistema es la suma del número en cada uno de los subsistemas alrededor de la interacción anterior y representa el número de caminos de una longitud determinada.

#### *Técnicas numéricas:*

Al hacer el modelo se encontrará un sistema de ecuación de  $n$  ecuaciones  $n$  incógnitas por tanto la solución del sistema se hace por medio de solución de ecuaciones lineales en este caso el método que se usara la es la eliminación Gaussiana o método Gauss Jordan.

## IV. DISEÑO

Las normas UNE EN ISO 140-1:1997 e UNE EN ISO 354:2004 indican las condiciones básicas con las que debe contar el laboratorio. Es importante tener presente que una de las condiciones de campo difuso y tener una curva de tiempo de reverberación lo más plana posible, partiendo de estos supuestos se empieza el proceso de diseño [15]. En la siguiente tabla se muestra la comparativa entre las exigencias de la norma, estas observaciones escaladas (1:5) y la propuesta del modelo

Tabla 2 Datos de partida del diseño de la cámara

	<b>Original</b>	<b>Escala</b>	<b>Modelo</b>
<i>Volumen Emisión (<math>m^3</math>)</i>	60,00	0,48	0,44
<i>Volumen Recepción (<math>m^3</math>)</i>	50,00	0,40	0,38
<i>Tiempo de reverberación (s)</i>	$2 \leq 1$	$0,7 \leq 0,3$	$0,5 \leq 0,3$
<i>Superficie pared (<math>m^2</math>)</i>	10,00	0,40	0,40
<i>Longitud mínima arista (m)</i>	2,30	0,46	0,55

Como segundo paso consiste que a partir de los volúmenes se calcula la superficie total y el área de absorción acústica que debe tener el modelo a escala, como lo enseña la Tabla 3.

Tabla 3 Comparación entre el modelo real y el modelo a escala

<b>Proporciones</b>	<b>Modelo</b>	<b>Original</b>
Volumen de la Cámara emisora (m <sup>3</sup> )	0,44	60
Volumen de la Cámara receptora (m <sup>3</sup> )	0,38	50
Área de la muestra (m <sup>2</sup> )	0,40	10
Superficie acústica total cámara emisora (m <sup>2</sup> )	3,76	103,17
Superficie acústica total cámara receptora (m <sup>2</sup> )	3,29	88,8
Área de absorción acústica cámara emisora (m <sup>2</sup> )	0,17	6,44
Área de absorción Acústica cámara receptora (m <sup>2</sup> )	0,15	5,36

Con estos datos se calcula el área de absorción y el tiempo de reverberación en el rango de uso del laboratorio a escala, en bandas de tercio de octava sintonizadas entre las frecuencias centrales de 500 Hz y 25kHz. Como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4 Condiciones de absorción y tiempo de reverberación del laboratorio

<i>Cámara referencia 200 m<sup>3</sup> (cámara reverberante UNE EN ISO 354:2004)</i>		<i>Frecuencia escalada F (Hz)</i>	<i>Área de absorción A (m<sup>2</sup>)</i>		<i>Tiempo de reverberación (s)</i>		<i>Coefficiente de absorción medio <math>\bar{\alpha}</math></i>	
<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>A (m<sup>2</sup>)</b>		<b>E</b>	<b>R</b>	<b>E</b>	<b>R</b>	<b>E</b>	<b>R</b>
100	6,5	<b>500</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
125	6,5	<b>625</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
160	6,5	<b>800</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
200	6,5	<b>1000</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
250	6,5	<b>1250</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
315	6,5	<b>1575</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
400	6,5	<b>2000</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
500	6,5	<b>2500</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03

630	6,5	<b>3150</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
800	6,5	<b>4000</b>	0,11	0,10	0,7	0,6	0,03	0,03
1000	7	<b>5000</b>	0,12	0,11	0,7	0,5	0,03	0,03
1250	7,5	<b>6250</b>	0,13	0,12	0,6	0,5	0,03	0,03
1600	8	<b>8000</b>	0,14	0,12	0,6	0,5	0,03	0,04
2000	9,5	<b>10000</b>	0,16	0,15	0,5	0,4	0,04	0,04
2500	10,5	<b>12500</b>	0,18	0,16	0,4	0,3	0,04	0,05
3150	12	<b>15750</b>	0,20	0,18	0,4	0,3	0,05	0,06
4000	13	<b>20000</b>	0,22	0,20	0,4	0,3	0,05	0,06
5000	14	<b>25000</b>	0,24	0,21	0,3	0,3	0,06	0,07

En la Tabla 4 con la letra *E* se indica el recinto emisor y con la letra *R* el recinto receptor, en las columnas finales se puede observar el coeficiente medio de absorción ahora bien con esta información se procede a encontrar el material de la superficie interior de los recintos.

***Material usado para la superficie de los recintos:***

Con los anteriores resultados, se concluye que se debe usar un material altamente reflectante para alcanzar el grado de difusividad que se desea en la sala.

Un material ejemplar sería algún metal que adicionalmente proporcional rigidez útil para el aislamiento acústico, el acero podría ser la elección ideal, pero dada su peso y masa superficial es un material rápidamente descartable.

Ahora bien, en la Tabla 5, se ven distintas cualidades de los materiales comunes en la construcción con el fin de identificar materiales altamente reflectantes pero también manejables para el proyecto acá presentado, encontrando que el aluminio ubicado en la fila 2 es el material que mejores prestaciones ofrecerá a la solución constructiva propuesta.

Tabla 5 Cualidades de los materiales comunes en la construcción

<b>Material</b>	<b>Densidad</b> $Kg/m^3$	<b>Módulo de Young</b> $\times 10^9$ $N/m^2$	<b>Velocidad del sonido onda longitudinal</b> $m/s$
Acero	7850	210	5200
Aluminio	2770	70	5200
Vidrio	2600	70	5200
Placa de yeso	880	16	4300

Hormigón denso	2300	15-36	2600-4000
Ladrillos de silicato de calcio	2000	14-18	2600-3000
Maderas como el pino	480	5,5-12,5	3400-5100
Madera contrachapada	600	6-12	3200-4500
Piedra caliza	2200	10-80	2100-6000

En el mercado de la construcción se encuentra una lámina desarrollado para la arquitectura para uso en fachada, compuesta por dos láminas de aluminio de distintos espesores comerciales unidas con un núcleo de polietileno tipo LPDE (Polietileno de baja densidad) la inclusión del núcleo la hace muy atractiva para contribuir al desacople de la estructura del sistema de aislamiento.

Esta lamina tiene dos tipos de caras una es brillante y la otra opaca, se requiere saber cuál de las dos presenta el coeficiente de absorción que más se adapte a la circunstancia deseada, por tanto se mide el coeficiente de absorción a incidencia normal usando el método de función de transferencia, según la norma UNE-EN-ISO10534-2:2002 [16], en una lámina de 5 mm espesor.

Obteniendo los siguientes resultados expuestos en la Tabla 6

Tabla 6 Coeficiente de absorción Alucobond®

<b>Frecuencia f (Hz)</b>	<b>Opaco</b>	<b>Brillante</b>
100	0,03	0,12
125	0,02	0,11
160	0,02	0,12
200	0,03	0,12
250	0,03	0,11
315	0,03	0,11
400	0,03	0,11
500	0,03	0,11
630	0,04	0,10
800	0,04	0,10
1000	0,04	0,08
1250	0,03	0,07
1600	0,04	0,07
2000	0,06	0,08
2500	0,08	0,10
3150	0,07	0,09

Ahora bien, como es sabido los valores que son útiles para el diseño están comprendidos entre las frecuencias por tercio de octava centradas entre los 500 Hz y 25kHz, por tanto se hará una aproximación del comportamientos del material después de los 3150 Hz, usando el mismo valor ya que la absorción en alta frecuencia aumenta, pero por las propiedades poco porosas del material esta se puede que sea constante, por tanto se puede calcular el tiempo de reverberación dentro de la sala obtenido el siguiente resultado.

Tabla 7 Tiempo de reverberación y área de absorción acústica usando como revestimiento Alucobond®

Frecuencia escalada F(Hz)	Emisión			Recepción		
	<i>Alpha</i> <i>Alucobon®</i>	<i>Área de</i> <i>absorción</i> <i>(m<sup>2</sup>)</i>	<i>TR</i> <i>(s)</i>	<i>Alpha</i> <i>Alucobon®</i>	<i>Área de</i> <i>absorción</i> <i>(m<sup>2</sup>)</i>	<i>TR</i> <i>(s)</i>
500	0,03	0,13	0,5	0,03	0,11	0,5
625	0,04	0,14	0,5	0,04	0,12	0,5
800	0,04	0,14	0,5	0,04	0,13	0,5
1000	0,04	0,14	0,5	0,04	0,12	0,5
1250	0,03	0,13	0,5	0,03	0,11	0,5
1575	0,04	0,15	0,5	0,04	0,13	0,5
2000	0,06	0,21	0,3	0,06	0,18	0,3
2500	0,08	0,30	0,2	0,08	0,27	0,2
3150	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
4000	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
5000	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
6250	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
8000	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
10000	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
12500	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
15750	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
20000	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3
25000	0,07	0,28	0,3	0,07	0,24	0,3

Encontrando que el material funciona de manera muy satisfactoria por la capa opaca hacia el exterior entre el tiempo de reverberación calculado según la norma UNE EN ISO 354:2004 y teniendo en cuenta su volumen y calculándolo a partir del coeficiente de absorción  $\alpha$  del Alucobond®, como se muestra en la Figura 3 y Figura 4

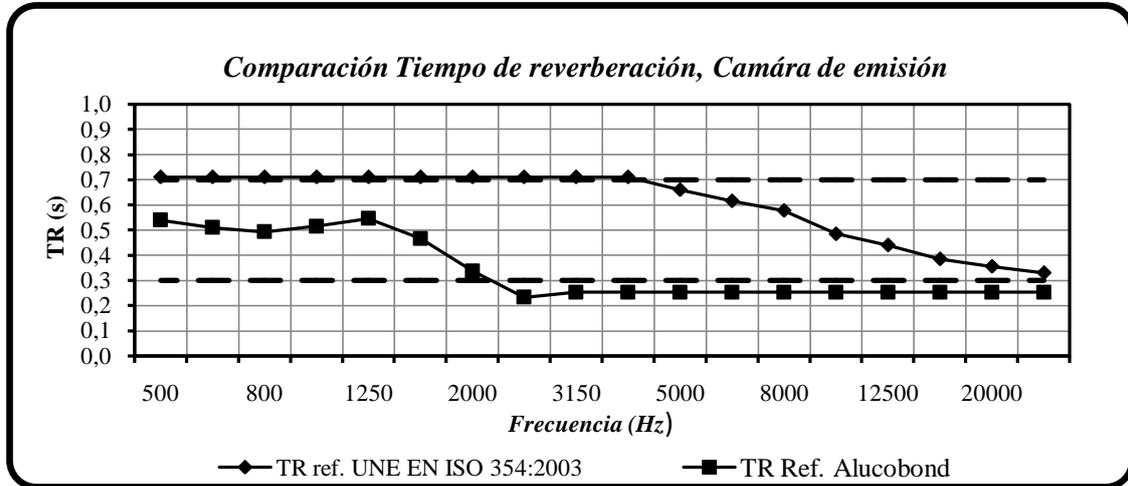


Figura 3 Comparación del tiempo de reverberación: Cámara de emisión.

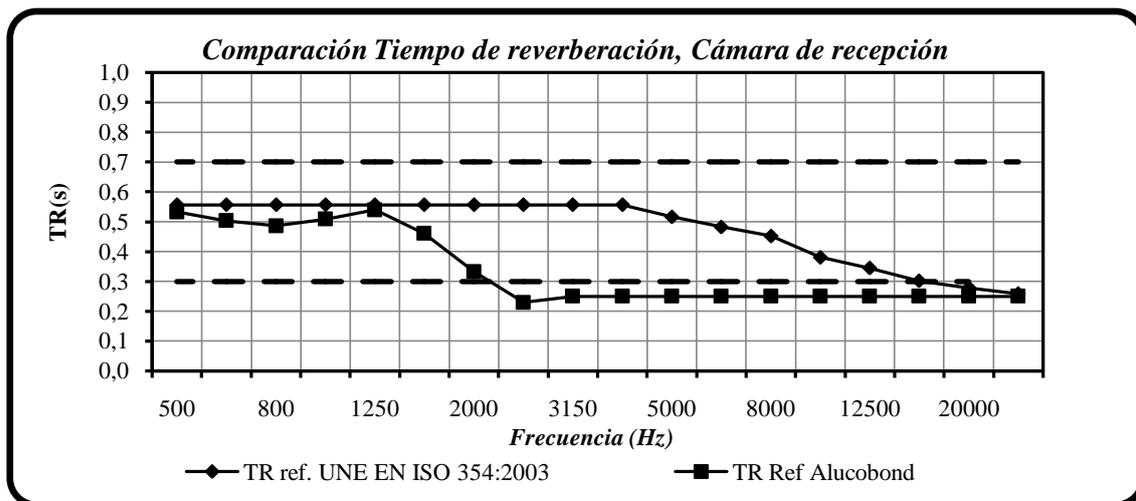


Figura 4 Comparación tiempo de reverberación: Cámara de recepción.

Entre los 1500Hz y 5000 Hz se puede observar un tiempo de alrededor 0,3 segundos, lo cual no es demasiado dramático puesto que sigue estando dentro del intervalo (indicado en línea punteada) de tiempo de reverberación referenciado por la norma.

### **Proporciones según la relación de Bolt**

Ahora, se define la geometría del recinto ya que la distribución modal debe ser lo más homogénea posible como ya se dijo en II.3, la teoría modal está pensada para recintos de forma paralelepípedo regular, las cámaras son paralelepípedos pero no son regulares ya que el techo y una pared lateral se pretenden inclinar para evitar la generación de ondas estacionarias dentro del recinto, por tanto se debe estimar las proporción de la cámara con un paralelepípedo grande que se forma con las

dimensiones más grandes de la cámara y de igual manera con el rectángulo pequeño, estas dimensiones se evalúan para saber si ambas están dentro del criterio de Bolt.

A continuación en las Tabla 8 y Tabla 9 se compara dichas proporciones con la relación de Bolt.

Tabla 8 Dimensiones de la aproximación de la cámara de emisión

	<i>Dimensiones</i>	<i>Alto(z)m</i>	<i>Largo (x)m</i>	<i>Ancho(y)m</i>
<i>Recinto grande</i>	<i>Según diseño</i>	0.55	0,85	1,21
	<i>Según Criterio de Bolt</i>	0.55	0,85	1,22
<i>Recinto pequeño</i>	<i>Según diseño</i>	0.43	0.75	1.20
	<i>Según Criterio de Bolt</i>	0.43	0.75	1,35

Tabla 9 Dimensiones de la aproximación de la cámara de recepción

	<i>Dimensiones</i>	<i>Alto(z)m</i>	<i>Largo (x)m</i>	<i>Ancho(y)m</i>
<i>Recinto Grande</i>	<i>Según diseño</i>	0.55	0,85	1,04
	<i>Según Criterio de Bolt</i>	0.55	0,85	1,22
<i>Recinto pequeño</i>	<i>Según diseño</i>	0.43	0.75	1,00
	<i>Según Criterio de Bolt</i>	0.43	0.75	1,35

*Nota: Es importante recordar que las anteriores tablas son una descomposición del diseño real.*

Observando que están dentro de la relación se procede a diseñar las geometrías internas como se enseña en Figura 5

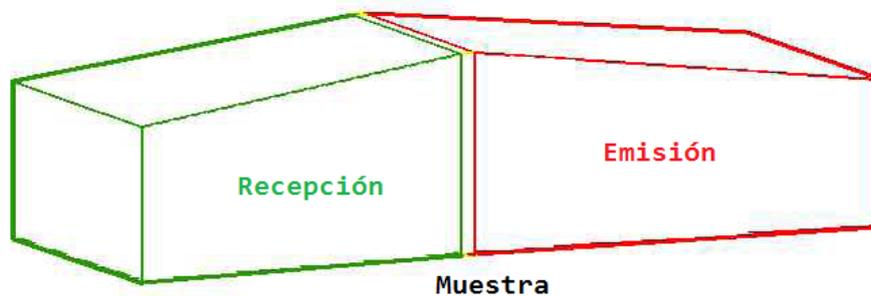


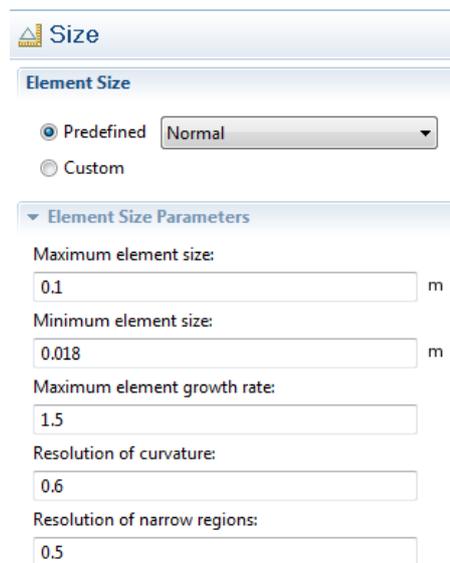
Figura 5 Descripción geometría del sistema

### **Análisis Modal**

Dado que las salas propuestas son de dimensiones irregulares y al teoría modal resuelve analíticamente recintos paralelepípedos, se usa la herramienta computacional COMSOL® en su versión 4.1 para resolver el problema usando la teoría de elementos finitos FEM (*Finite Element method*)

La geometría es 3D construida en el programa AutoCAD® de los recintos y se exporta al programa COMSOL 4.1®, en la solución de modelo se ha calculado el tamaño de la malla conociendo la frecuencia máxima que se desea simular en este caso 1500 Hz, 60 Hz por encima de la frecuencia de corte superior del sexto de octava centrado en 1355 Hz, esto sugiere un tamaño de malla de 0,03 metros, desafortunadamente el ordenador con el que se realizó este modelado no tiene los suficientes recursos computacionales para recrearlo.

Por tal motivo se toma la decisión de hacer el uso de la resolución que permite el ordenador la cual es la siguiente:



The image shows a screenshot of the COMSOL software interface for the 'Size' settings. The 'Element Size' section has 'Predefined' selected with a dropdown menu showing 'Normal'. The 'Element Size Parameters' section includes the following input fields:

- Maximum element size: 0.1 m
- Minimum element size: 0.018 m
- Maximum element growth rate: 1.5
- Resolution of curvature: 0.6
- Resolution of narrow regions: 0.5

**Figura 6 Condiciones de la Malla**

Permitiendo una resolución de 8 elementos hasta los 430 Hz, dado que los modelos no son demasiados complejos como lo enseñan las figuras 6 y 7 se hará el análisis con esta resolución.

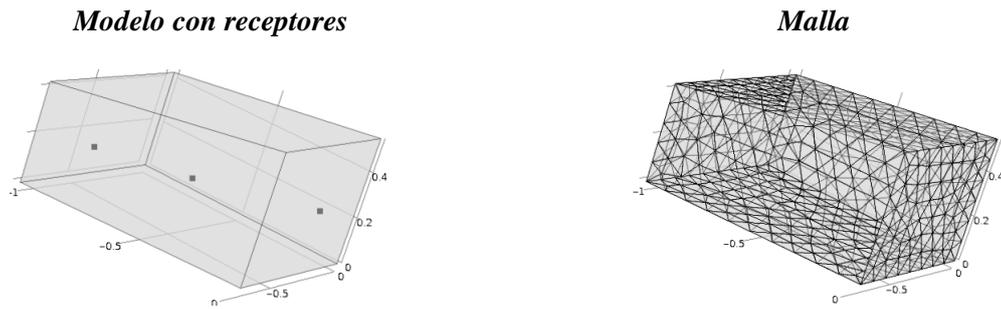


Figura 7 Modelo Emisión.

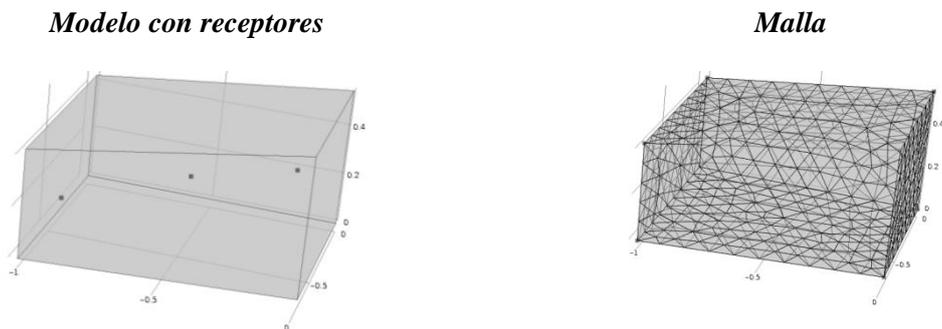


Figura 8 Modelo Recepción.

Como se puede apreciar en la parte derecha de la Figura 7 y Figura 8 , cada una contiene tres puntos los cuales son receptores para tener no solo la respuesta en frecuencia sino el comportamiento dentro de la sala. Esto, para tener en cuenta los puntos adecuados para la medición, del fenómeno físico que se desea analizar, el cual es la pérdida por transmisión, por nombrar un ejemplo, al imaginar la situación de registrar la señal en un máximo en emisión y un mínimo en recepción, o viceversa, el valor registrado será un equívoco y se tendrá un error sobre el comportamiento real del material, a causa de una patología modal del recinto.

Los contornos son duros ya que representan a las paredes son rígidas ya que el material que recubre el interior de las paredes es altamente reflectante.

### **Análisis: Post-Procesado**

Cuando la herramienta computacional COMSOL®, termina de hacer el cálculo se pueden observar los distintos modos calculados, a través de un reporte, de este se exporta a una hoja de cálculo donde se le agrupa por tercios de octava para ver detalladamente la densidad modal, como se puede ver en las figuras Densidad Modal Emisión. y Densidad Modal Recepción la curva de tendencia es exponencial en ambos casos, aproximándose a la teoría de difusividad

para salas, el cual es el objetivo de la geometría de las mismas, además aumentan vertiginosamente la densidad modal gracias a la inclinación de la pared lateral y el techo

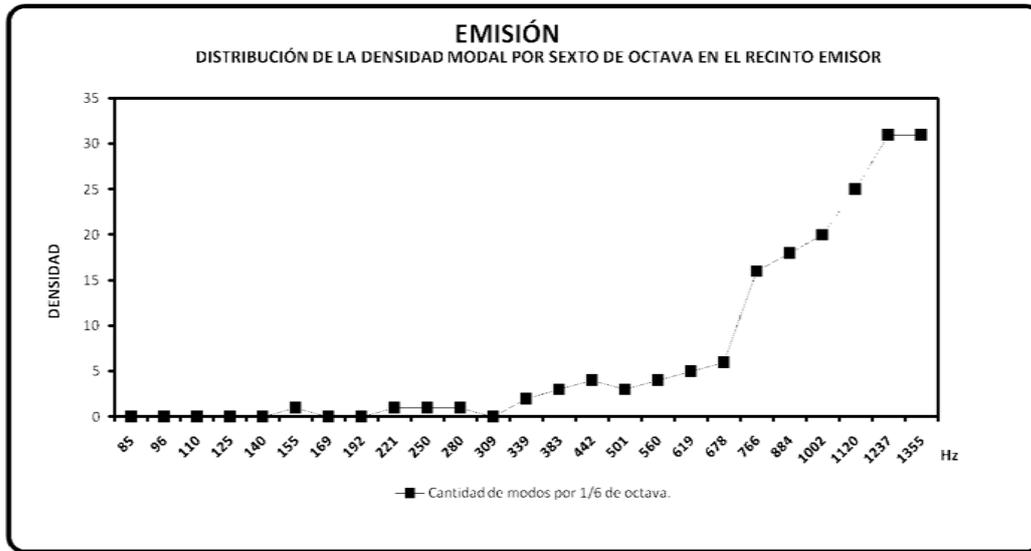


Figura 9 Densidad Modal Emisión.

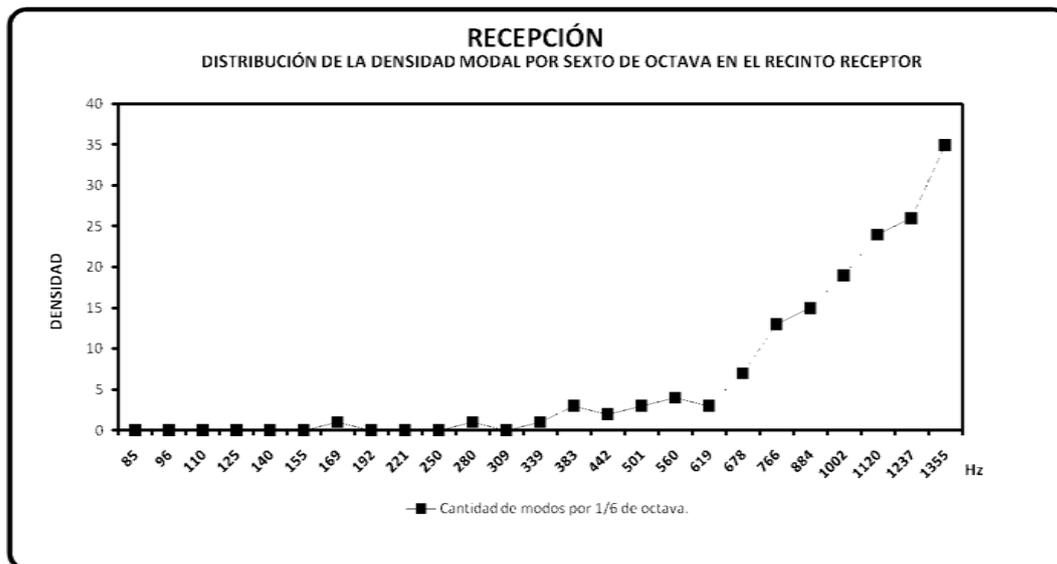


Figura 10 Densidad Modal Recepción

También se pueden obtener imágenes ilustrativas del comportamiento modal como lo enseñan las siguientes figuras.

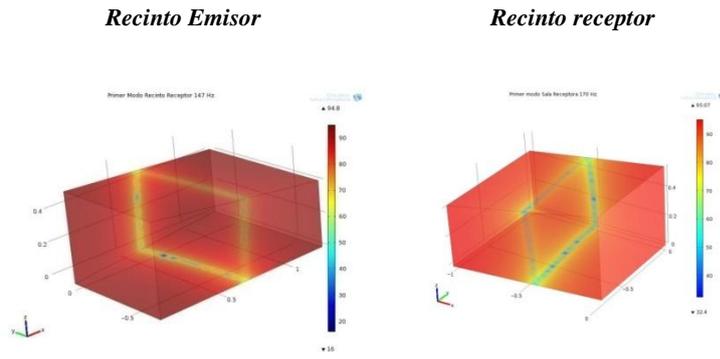


Figura 11 Primero Modo en ambos recintos

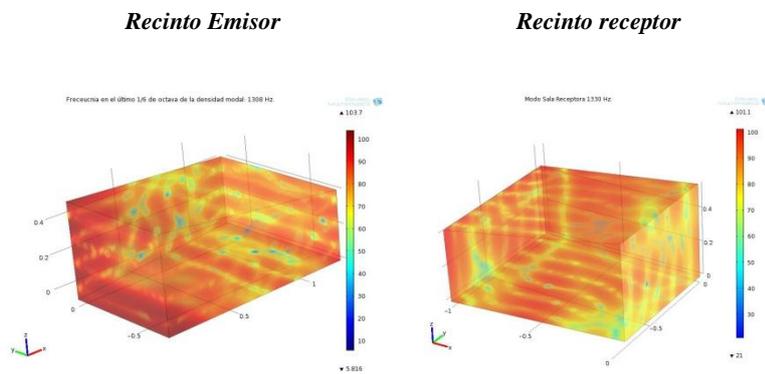


Figura 12 Modo dentro de la última banda de 1/6 de octava analizado en ambas salas.

**Medición usando los tres puntos receptores en la sala de emisión:**

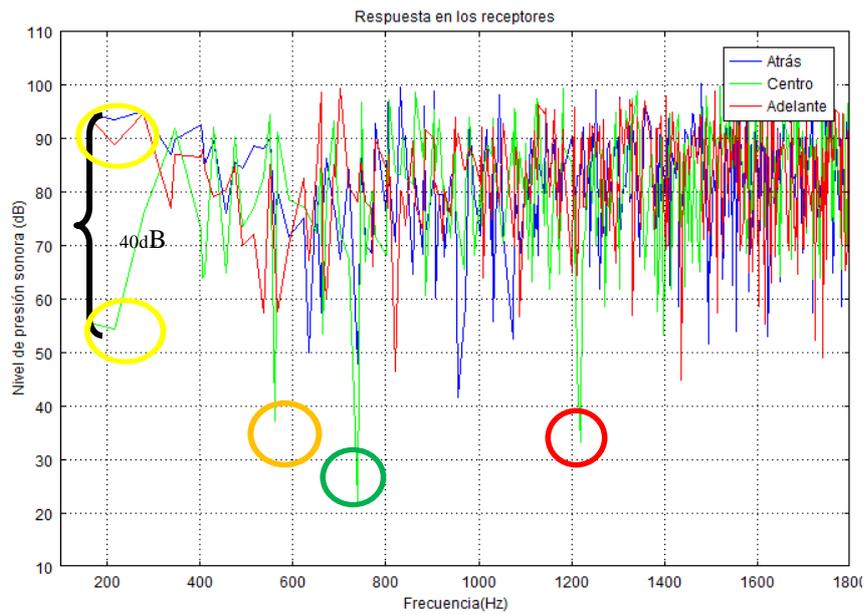


Figura13 Modos en tres posiciones distintas del recinto receptor.

Como se puede apreciar en la Figura 13 en el valor del primer modo de referencia 170 Hz, se evidencia casi 40 dB de diferencia entre los tres puntos distintos ubicados en la sala, si se deseará medir y obtener datos para esta frecuencia se debe ser muy cauteloso en el posicionamiento de los receptores ya que se pueden obtener datos errores del comportamiento del material dadas las condiciones acústicas del recinto en este caso emisor.

A su vez, se puede observar como al incrementar la frecuencia la densidad modal aumenta haciendo casi imperceptible esas pérdidas de nivel, que al usar un integrador por tercio de octava se percibe una respuesta plana después de los 700 Hz, en frecuencias por debajo como se sugirió anteriormente se debe hacer el uso de difusores que colaboren con la distribución más homogénea dentro de la sala, ya que en el centro de la sala (curva verde) se evidencian nodos alrededor de los 500(naranja), 700(verde) y 1200(rojo) Hz.

Este análisis se hizo de igual manera en el recinto emisor, ofreciendo datos similares a los expuestos en el párrafo anterior, se decidió usar como ejemplo ilustrativo el recinto receptor dado que es el más pequeño y mayores problemas modales podría sugerir.

#### ***Aislamiento Acústico:***

El aislamiento acústico [17] de los recintos es la parte más importante del diseño y de la puesta en marcha del laboratorio, ya que deben ser recintos donde la transmisión por flancos prácticamente sea nula y además, garantizar niveles de ruido de fondo para los cuales no haya que realizar correcciones de nivel.

Por tanto, el tipo de solución constructiva que se propone debe ser robusta pero a la vez liviana, este tipo de laboratorios en tamaño de origen son dos grandes estructuras de hormigón desvinculadas estructuralmente la una de la otra y del recinto que las soporta, como se ilustra en la Figura 14.

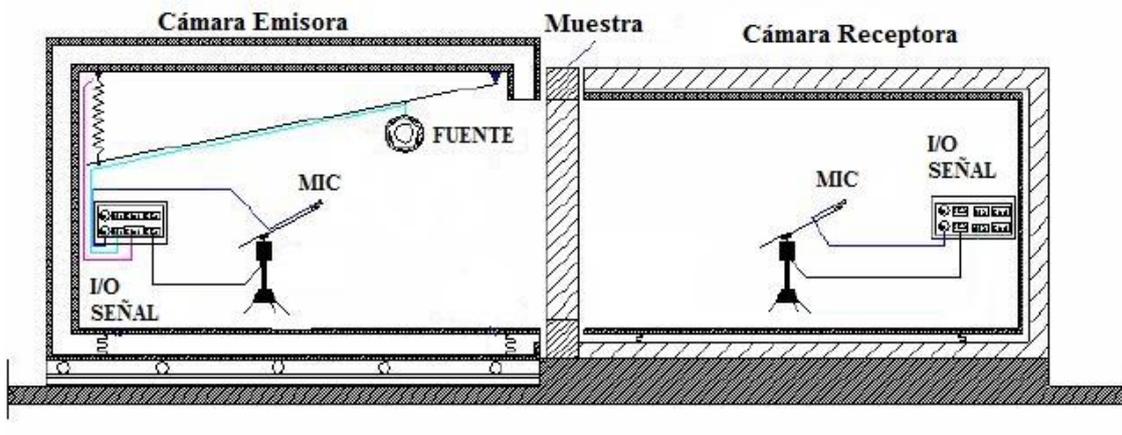


Figura 14 Ejemplo del laboratorio

Adicionalmente estos laboratorios es un continuo lugar en situación de obra ya que el tabique que por ejemplo se quiera caracterizar, necesita construirse de la manera las similar a su

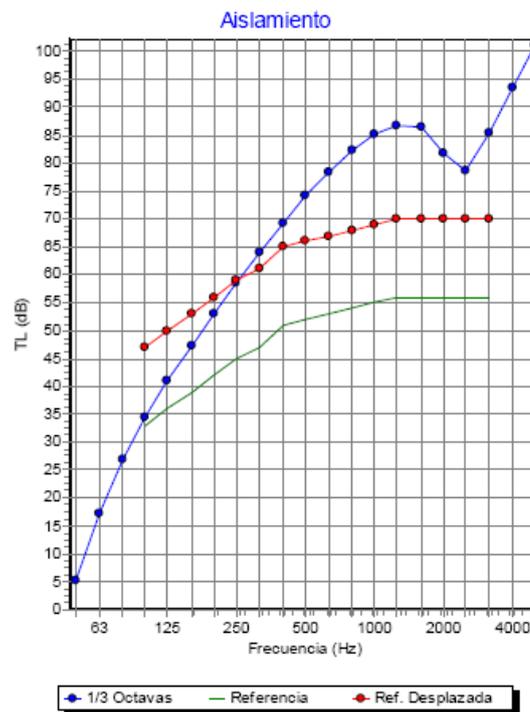
construcción real, pero sin vinculación con el techo y con el piso, ya que se desea evaluar únicamente el índice de reducción sonora que este elemento aporta a la acústica de la edificación.

El sistema entonces parte de la premisa de garantizar por encima de los 50 dB el nivel de aislamiento de cada tabique que conforme el sistema constructivo, además un material [18] que sea versátil y permita de manera sencilla inclinar las paredes necesarias.

Por tanto, lo más aconsejables es realizar un tabique doble usando láminas de playa de yeso laminado (PLY) con cámara de aire y material absorbente en su interior, y que la lamian interior y exterior estén desvinculadas, para el caso del suelo se necesita un tipo de suelo flotante que dé suficiente rigidez para soportar la estructura.

Para estimar el aislamiento acústico de este tipo de elementos constructivos se utiliza el programa AISLA en su versión 3.01 obteniendo las siguientes curvas representadas en la Figura 15 y Figura 16

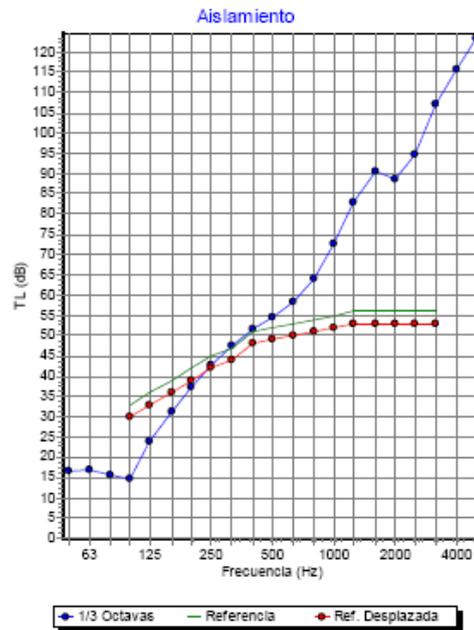
f (Hz)	R (dB)
50	5,1
63	17,3
80	26,9
100	34,4
125	41,1
160	47,3
200	53
250	58,6
315	64,1
400	69,3
500	74,1
630	78,5
800	82,3
1000	85,2
1250	86,8
1600	86,4
2000	81,7
2500	78,6
3150	85,4
4000	93,4
5000	101,1



Valoración según la Norma UNE-EN ISO 717-1:	$R_w(C;Ctr;C_{50-5000};Ctr_{50-5000}) = 66(-5;-13;-21;-36)$ dB
Valoración en decibelios A:	$R_g = 61,1$ dBA

Figura 15 Predicción del índice de aislamiento del tabique propuesto.

f (Hz)	R (dB)
50	16,6
63	16,9
80	15,8
100	14,6
125	23,9
160	31,3
200	37,2
250	42,8
315	47,4
400	51,6
500	54,4
630	58,3
800	64,2
1000	72,8
1250	83
1600	90,6
2000	88,5
2500	94,7
3150	107,2
4000	115,9
5000	123,4



Valoración según la Norma UNE-EN ISO 717-1:	$R_w(C;Ctr;G_{0,5000};Ctr_{50,5000}) = 49(-7;-15;-7;-18)$ dB
Valoración en decibelios A:	$R_g = 42,4$ dBA

Figura 16 Predicción del índice de aislamiento del suelo propuesto.

Como se puede apreciar ambos sistemas presentan más de 50 dB de aislamiento acústico en las frecuencias por encima de los 500Hz límite inferior de medida dentro del laboratorio, también es cierto que se prevé que estos resultados varíen en no más que 10 dB por el proceso de instalación y construcción de la misma.

En el anexo A.1 se encuentran los documentos que soportan la simulación.

### **Propuesta: Solución Constructiva [19] [20]**

La solución propuesta para la construcción del laboratorio de medición del aislamiento acústico por vía directa o cámaras de transmisión consta de los siguientes materiales:

**Tabla 10 Lista de materiales propuestos para la construcción del laboratorio.**

Material	Uso
Composite (Alucobond®) de 6mm	Recubrimiento interior de las cámaras, coeficiente de absorción, congruente con el diseño.
Placas de yeso de 12,5 mm	Paredes interiores del Sistema constructivo
Placas de yeso de 15 mm	Paredes Exteriores del Sistema constructivo
Fibras termo-fusionadas	Material absorbente dentro del interior de las

	cámaras entre las dos láminas del sistema
Rieles de 90 mm	Aseguran la conexión y alineación de los montantes verticales.
Montantes de 48mm y 90 mm	Encajan dentro de los raíles, conforman el entramado de la estructura portante del sistema constructivo
Madera o MDF	Base estructural del sistema. Marcos de acople entre las cámaras
Material visco elástico de 10 mm de espesor	De alta densidad, permite el desacople estructural del sistema en especial en la conexión entre las cámaras y los marcos de adaptación.
Accesorios	Materiales básicos para el acabado y creación de los sistemas con placas de yeso

Las referencias de los fabricantes se encuentran referenciadas en el anexo A.2

La solución propuesta para la construcción del laboratorio de medición del aislamiento acústico por vía directa o cámaras de transmisión consta de:

- ✓ Sistema de construcción en las paredes y techo tipo SAA (Tabique de estructura alternada) consiste en un muro doble formado por una estructura metálica simple con un doble línea de montantes, de tal manera que se reduce el espesor del tabique sin que se efectúen uniones metálicas entre las estructuras evitando puentes acústicos. En el anexo A.3 plasma las recomendaciones y el modo de construcción del sistema.

- ✓ En el suelo un sistema formado por una placa de madera a modo de base estructural seguido de doble lamina de yeso de 15 mm, después un material absorbente formado por dos capas asimétricas de napa de poliéster adheridas térmicamente a una lámina visco elástica de alta densidad, y finalmente doble placa de yeso de 12 mm con acabado de Alucobond®

Los planos que describen el sistema constructivo se encuentran en el Anexo A.3.

#### Marcos De Adaptación

Se sugiere la construcción de tres (3) marcos de adaptación para adaptar las muestras a las cámaras, fabricados en madera con espesores de 5, 10 y 20 cm y recubiertos en los bordes por un material visco elástico al igual que el borde de la cámara con el que hacen contacto.

El Anexo A.4 Referencia los planos y detalles constructivos del laboratorio describe el montaje de los marcos con la estructura, ahora bien representado por la Figura 17 y Figura 18 se muestra el diseño propuesto para el laboratorio, todas las medidas están en metros.

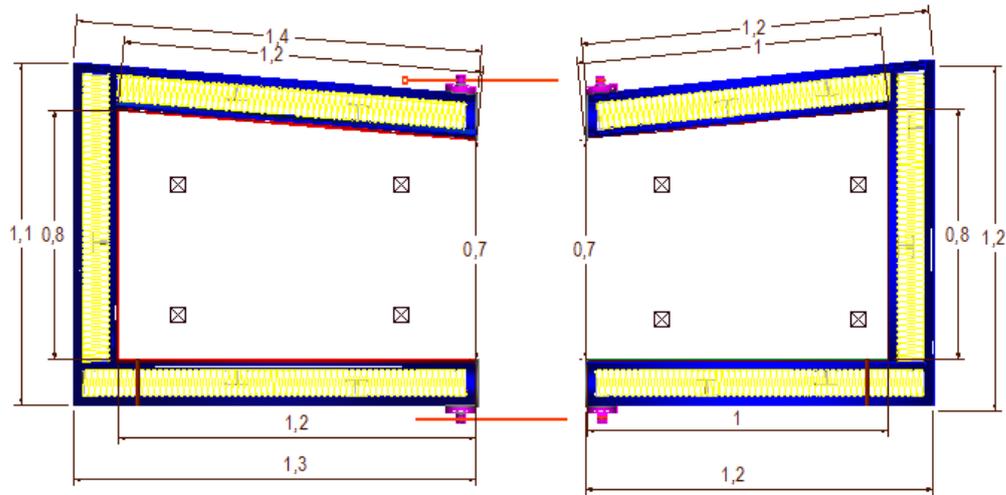


Figura 17 Planta derecha cámara emisora, izquierda cámara receptora.<sup>3</sup>

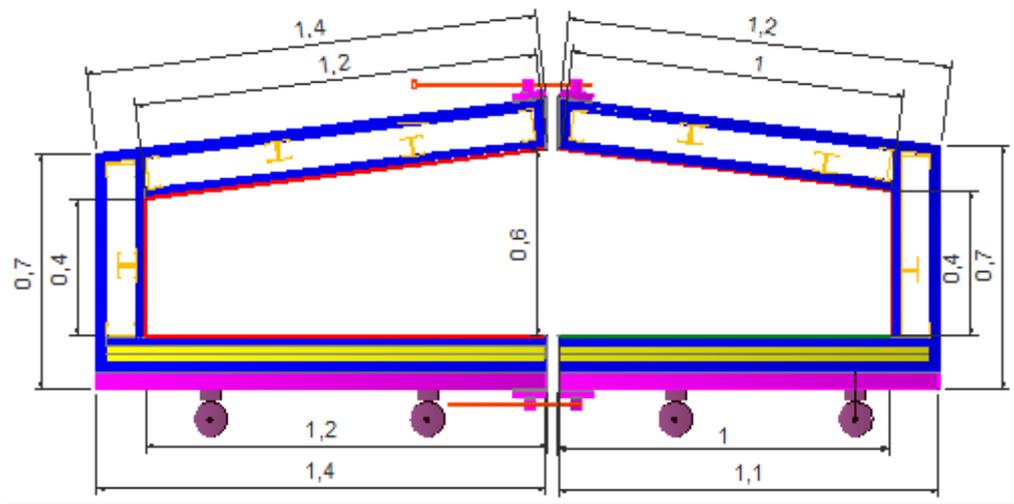


Figura 18 Corte, Derecha cámara emisora, derecha cámara receptora

#### Sistema de cableado electro acústico:

Se ha diseñado un puente acústico en las esquinas cercanas a la pared trasera coincidente con la pared recta que permite el paso de cables para poder realizar correctamente el proceso de medición, este orificio está totalmente desacoplado de la estructura por medio de bandas visco elásticas y relleno de material absorbente.

<sup>3</sup> Cada color representa un material de la tabla 10, puede ver con más detalle la referencia en los planos anexados en el Anexo A.4.

## V. MODELO SEA

El modelo SEA permite evaluar la trayectoria de la energía en estado estacionario del sistema propuesto, entre el recinto emisor (subsistema 1) y el recinto receptor (subsistema 3) cuando la radiación de dicha energía encuentra un cambio de medio (subsistema 2).

La transmisión de energía que permite la interaccionar la placa entre los dos recintos se puede evaluar como el índice de reducción sonora, como ya se ha mencionado en el apartado III.5 de este documento.

Ahora bien, se evalúan las trayectorias relacionadas con los caminos directo- directo (Dd), flanco- directo (Fd) y Directo- flanco (Df) al estar desvinculados techo y suelo no existe trayectoria flanco -flanco (Ff), se discretiza el sistema en 13 subsistemas como lo enseña la Figura 19.

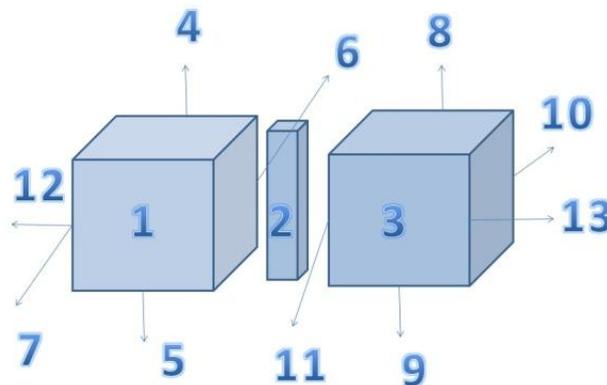


Figura 19 Elección de los sub sistemas

Donde:

**1:** Recinto Emisor, **2:** Pared de separación, **3:** Recinto Recepción, **4:** Techo E. **5:** Suelo E. **6:** Pared derecha E. **7:** Pared izquierda E. **8:** Techo R. **9:** Suelo R. **10:** Pared derecha R. **11:** Pared Izquierda R. **12:** Pared Trasera E. **13:** Pared Trasera R.

**Descripción de los subsistemas:**

Tabla 11 Dimensiones y propiedades de los materiales usados en el modelo matemático

Elemento	Emisor	Otras paredes	Techo /suelo	Pared común	Receptor	Otras paredes	Techo /suelo
<b>Dimensiones(m)</b>	0,55X0,85 X 1,21	1,21X 0,55	1,21X 0,85	0,74 X 0,55	1,04X0,85 X 0,55	1,04X0,5 5	1,04X 0,85
<b>Espesor (m)</b>		0,15	0,15	0,15		0,15	0,15
<b>Densidad (Kg/m<sup>2</sup>)</b>		15	15	15		15	15

<b>Velocidad longitudinal (m/s)</b>	4300	4300	4300	4300	4300
<b>Frecuencia crítica</b>	2500	2500	2500	2500	2500
<b>Relación de Poisson</b>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Factor de pérdida interno</b>	$0,06 \leq 0,02$				
<b>Tiempo de reverberación</b>	$0,5 \leq 0,3$		$0,5 \leq 0,3$		

Ahora se enseña la conexión entre los subsistemas

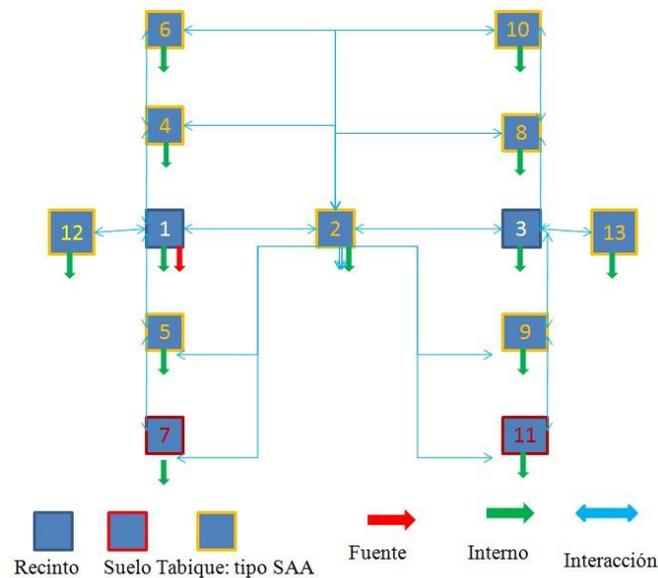


Figura 20 Manera de conexión y cálculo de la diferencia de nivel entre el envío de señal y la interacción con los sub sistemas, hasta la sala receptora.

Ahora bien se evalúa la matriz 13X 13 usando el método de la matriz inversa, para cada uno de los 19 tercios de octava que comprenden el intervalo de 500 Hz a 25kHz como se ve en la Tabla 12, es importante recordar que en la edificación se evalúa el intervalo comprendido entre 100Hz y 5000 Hz por tanto los resultados de la matriz se darán en dicho intervalo, para poder compararlo con la predicción hecha con el Aisla® (Anexo A.1) y la futura medición del panel, no obstante los cálculos realizados se encuentran en el anexo A.5 cálculo del modelo SEA.

Las ecuaciones de SEA se simplifican notablemente cuando el acoplo entre elementos (subsistemas) es grande, como es el caso expuesto.

Tabla 12 Resultados del Modelo SEA

<b>Original</b>	<b>Modelo</b>	<b>Emisión</b>	<b>Recepción</b>	<b>Diferencia de nivel</b>	<b>Absorción sonora</b>	<b>Índice de reducción</b>
<b>Fo(Hz)</b>	<b>Fm(Hz)</b>	<b>(dB)</b>	<b>(dB)</b>	<b>D(dB)</b>	<b>A(m2)</b>	<b>R' (dB)</b>
100	500	91,0	61,8	29,2	0,115	43,8
125	625	91,7	60,4	31,2	0,122	45,6
160	800	92,6	60,5	32,1	0,126	46,3
200	1000	93,8	62,6	31,2	0,120	45,6
250	1250	91,0	61,8	34,7	0,113	49,3
315	1575	85,2	46,5	38,8	0,133	52,7
400	2000	94,9	51,5	43,3	0,184	55,9
500	2500	84,2	36,6	47,6	0,267	58,6
630	3150	85,6	35,9	49,7	0,245	61,0
800	4000	86,6	35,2	51,4	0,245	62,7
1000	5000	87,6	40,4	47,2	0,245	58,5
1250	6250	88,6	23,2	65,4	0,245	76,6
1600	8000	89,6	24,9	64,8	0,245	76,0
2000	10000	91,6	21,8	72,4	0,245	83,7
2500	12500	92,6	16,7	69,8	0,245	81,1
3150	15750	88,6	23,2	75,9	0,245	87,2
4000	20000	93,6	15,4	78,2	0,245	89,5
5000	25000	94,6	13,8	80,8	0,245	92,1

Obteniendo los siguientes resultados, basados en los valores de la curva de referencia.

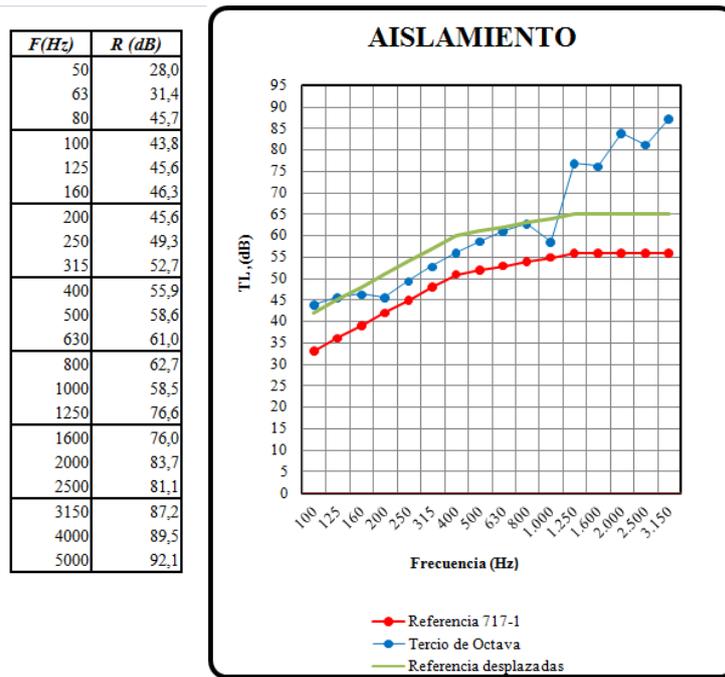


Figura 21 Pérdida por transmisión del montaje de la pared SAA usando el modelo SEA y las trayectorias Directo- Directo, Flanco -Directo, Directo- Flanco

Valoración según la Norma UNE EN ISO 717-1

$$R_w (C, C_{Tr}) = 61(-1, -6) \text{ dB}$$

Valoración en decibelios A:

$$R_A = 60 \text{ dB}$$

Es importante destacar como debajo de los 100 Hz, los valores no tienen el comportamiento que se obtuvo con la predicción con la ley de masa, esto ocurre por el que el modelo debajo de los 500 Hz, tiene dispersión debido al estar por debajo de la resonancia de la pared, además la densidad modal no es suficiente condición para el correcto desarrollo del modelo como se dijo anteriormente en el apartado III.5.

## VI. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN: RECOMENDACIONES SOBRE EL USO DEL LABORATORIO

El siguiente método de medición y obtención de los resultados se propone con las frecuencias escaladas por tanto se debe prever esto para no entrar en conflicto con los resultados el rango de medida en el modelo original está comprendido por los tercios de octava de 100 Hz hasta 5kHz, el modelo comprende el rango entre 500 Hz y 25kHz.

***Posición de las fuentes y micrófonos.***

Tabla 13 Distancias mínimas de posición de altavoces y micrófonos

<b>Posición</b>	<b>Original</b>	<b>Modelo</b>
<b><i>Altavoces</i></b>		
Distancia entre altavoces	0,7 m	0,14 m
Borde del recinto y fuente	0,7 m	0,14 m
<b><i>Micrófonos</i></b>		
Entre micrófonos	0,7 m	0,14 m
Respecto al borde	0,7 m	0,14 m
Respecto a difusores y fuente	1,0 m	0,20 m
Respecto a la muestra	1,0 m	0,20 m

El promediado temporal debe ser de 6s para frecuencias por debajo de los 400 Hz y de 4s para frecuencias superiores lo que indica para este caso que con un promediado temporal de 4 segundos se puede realizar cada medida puesto que el ancho de banda está comprendido entre 500Hz y 25kHz.

***Equipos necesarios para la medición:***

Los equipos usados para realizar las mediciones acústicas son los siguientes:

- Analizador de espectro.
- Calibrador.
- Micrófonos omnidireccional clase 1 para campo difuso.
- Fuentes de ruido lo más omnidireccional posible.
- Amplificador con generador de ruido.
- Termohigrómetros
- Flexómetro

***Procedimiento de Medición y Evaluación******Método de Ensayo***

El ensayo se realiza según el procedimiento, basado en la norma UNE-EN ISO 140-3:1995, Para medir el aislamiento al ruido aéreo entre dos salas con una separación común, de forma vertical, se debe genera nivel de presión acústica en una el recinto emisor lo suficientemente elevado como para que el nivel en la otra sala, llamada recinto receptor, supere en 15 dB como mínimo el ruido de fondo (ruido ambiental) en todas las bandas de frecuencia dentro

del margen de estudio. Si el nivel medido no supera el ruido de fondo como mínimo en 15 dB, se ha de realizar la corrección determinada por la norma (Pagina 16 de este documento).

Se mide el nivel de ruido en la sala emisora en mínimo 5 posiciones y se promedia. A continuación se repite esta operación en la sala receptora, de estos dos niveles promediados se puede obtener la diferencia de niveles D:

$$D = L_1 - L_2 \quad (51)$$

Donde:

- L1 es el nivel medio de presión acústica en la sala emisora.
- L2 es el nivel medio de presión acústica en la sala receptora (con la corrección del nivel de ruido de fondo si es necesario).

Esta diferencia de niveles se ha de corregir mediante un factor que depende del tiempo de reverberación, del volumen de la sala receptora y de la superficie común de separación que hay entre las dos salas. Así se obtiene el índice de reducción acústica R ecuación 25 de este documento.

#### Cálculo del Índice Global De Reducción Acústica $R_w$

El índice global de reducción acústica  $R_w$  se define en la norma UNE-EN ISO 717-1:1997[23] como el valor, en decibelios, que toma el espectro de referencia a la frecuencia de 2500 Hz (500Hz), después de desplazarlo tal y como se explica a continuación.

Para evaluar los resultados de una medida de R (aislamiento acústico por frecuencia en bandas de tercio de octava), el espectro de referencia se desplaza en saltos de 1 dB (positivo o negativo) hacia la curva medida mientras la suma de desviaciones desfavorables, en el margen de frecuencia entre 500 y 15750 Hz, sea lo mayor posible pero sin superar los 32,0 dB. Una desviación desfavorable, a una determinada banda de frecuencia, se da cuando el resultado de la medición es menor que el valor de la curva de referencia en aquella banda.

#### Términos de Adaptación al Espectro (C; Ctr)

Definido en la norma ad [23], el término de adaptación al espectro es el valor, en decibelios, que se debe añadir al valor de la magnitud global ( $R_w$ ) Estos parámetros los introduce la norma para tener en cuenta los diferentes espectros de las fuentes de ruido (como ruido rosa y ruido de tráfico) y para evaluar curvas de aislamiento acústico con valores muy bajos en una sola banda de frecuencia.

*Incertidumbre de los Resultados*

La incertidumbre del resultado se expresa como la incertidumbre típica de medida multiplicada por un factor de cobertura  $k=2$ , que para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

*Medida del tiempo de reverberación en la sala receptora ad[3]*

El Tiempo de reverberación se mide en la sala receptora y existen dos métodos:

1. Método: Señal de ruido Interrumpida, resultado de un procesos estadístico y es obligatorio promediar varias curvas de decaimiento de la señal medidos en 1 posición de altavoz y de micrófono para obtener la repetitividad adecuada.

2. Método: Respuesta Impulsiva Integrada, es una función determinística y no está sujeta a desviaciones estadísticas, por lo tanto no es necesario promediar.

Tabla 14 Posición de la fuente y micrófonos en la medida de tiempo de reverberación

<b>Posición</b>	<b>Original</b>	<b>Modelo</b>
<i>Altavoces mínimo dos posiciones</i>		
Distancia entre altavoces	3,0 m	0,6 m
<i>Micrófonos</i>		
Número de curvas registradas en diferentes posiciones mínimo 12.		
Entre ellos	1,5 m	0,3 m
Respecto fuente	2,0 m	0,4 m
Respecto a la muestra y bordes de la cámara	1,0 m	0,2 m

El nivel de señal de excitación debe ser lo suficientemente alto para sobrepasar como mínimo 10 dB el ruido de fondo en todas las frecuencias.

El rango de evaluación mínimo contempla una caída de 20dB a partir de -5dB (T20).

La expresión de los resultados del tiempo de reverberación de la cámara en cada banda de frecuencia se expresa por la media aritmética del total de mediciones del tiempo de reverberación realizadas en cada banda.

*Aspectos adicionales a tener en cuenta.*

- ✓ La transmisión depende de la temperatura, humedad por tanto estas deben ser detalladas.
- ✓ Construir lo más similar posible a la construcción real con unas cuidadosa simulación de las conexiones normales y condiciones de sellado en el perímetro y en las juntas de la propia pared.

- ✓ Si la muestra tiene una superficie significativamente más absorbente que la otra, la superficie con mayor absorción quedará al lado del recinto emisor. Deben instalarse elementos difusores en la cámara emisora.
- ✓ El contenido básico del informe de medida se encuentra referenciado en el numeral 9 de la norma UNE EN ISO 140-3:1995 página 14.

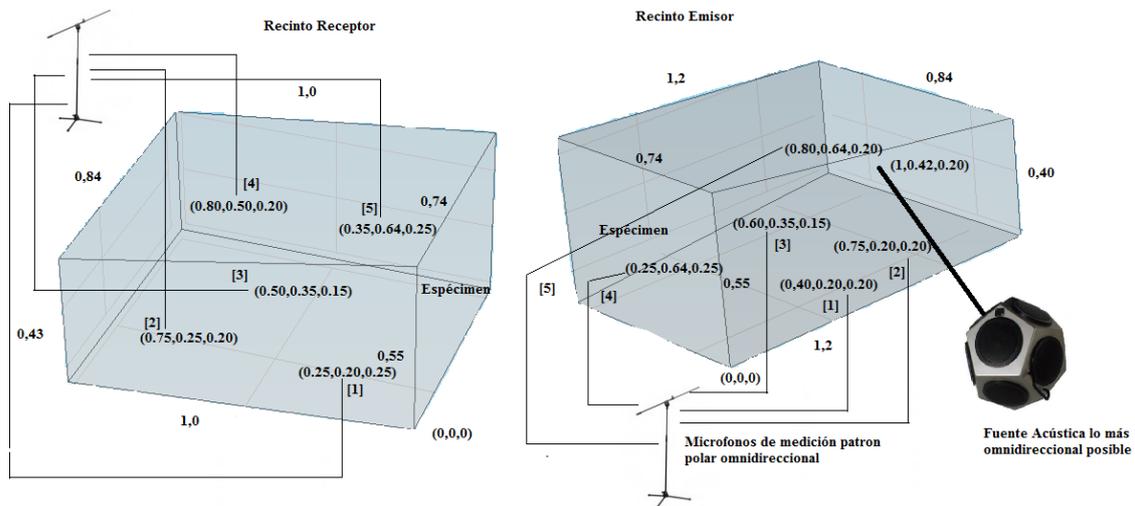


Figura 22 Recomendación en la distribución de los altavoces y micrófonos para la realización de la medición del índice de reducción sonora.

### Observaciones Adicionales

Los cables que transportan la señal para el procesamiento de los datos atraviesa el aislamiento acústico de la cámara por tanto es indispensable asegurarse que quede bien sellado en el momento de realizar la medición, puesto que puede contribuir con el ingreso de ruido de fondo, el cual se debe evitar.

La unión entre las cámaras y el marco de adaptación debe ser lo más preciso posible ya que el sellamiento debe ser hermético, y preciso, no solo porque se pierda la medición si no que puede ocurrir un accidente, ya que la muestra se podría caer.

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha presentado una alternativa en la solución constructiva frente a lo acostumbrado en modelar a escala ya que tradicionalmente se ha usado madera o acrílico, en este caso se propone un moderno sistema constructivo usando doble placas de yeso desvinculándolas con montantes alternados en H y relleno de fibra absorbente. Este sistema se ha puesto a prueba usando herramientas matemáticas para asegurar el funcionamiento de la propuesta del diseño en su futura construcción y puesta en marcha.

El aislamiento acústico es bastante robusto, y según las recomendaciones de hacer modelos a escala, presta ventajas en cuanto al bloqueo de caminos de transmisión que para este tipo de laboratorio deben ser mínimos, no obstante y como todo en acústica el éxito dependerá de la construcción de los recintos y correcto montaje de los marcos de adaptación que contengan la muestra y las cámaras, también importante tener en cuenta que el laboratorio este diseñado para medir paredes representativas del tipo A, (ligeros), referenciadas en la Norma UNE EN ISO 140-1:1997.

En cuanto al acondicionamiento acústico, el material elegido para el revestimiento acústico de los recinto, el material permitió por medio del diseño obtener una curva bastante plana en el tiempo de reverberación, lo que facilita la distribución espacial del sonido en todas las frecuencias, la geometría propuesta, también proporciona un buen desempeño en la distribución modal homogénea de las frecuencias a analizar, según el análisis con FEM

El modelo analítico usando el Análisis Estadístico de Energía SEA y compararlo con la predicción de la pared divisoria asumiendo que es un sistema de construcción SAA figuras 21 y 15 respectivamente, se puede observar una dinámica muy similar en la proyección del aislamiento del panel, obteniendo el mismo Índice de reducción sonora  $R_w$  de 55dB y los términos de adaptación espectral C de -2dB y  $C_{tr}$  de -8dB.

Las recomendaciones del uso del laboratorio y posición de fuente y micrófonos están derivados de las recomendaciones de la norma no obstante al hacer el análisis modal del recinto usando el Método de elementos finitos FEM, se puede asegurar que la distribución de esta manera de los puntos de medición garantiza la reproducibilidad del sistema de medición.

### **Recomendación**

El uso de difusores puede ser una excelente opción para mejorar la difusividad en baja frecuencia por tondo se proponen los siguientes que al ser livianos y se puede ajustar con cinta adhesiva sobre el Alucobond®, ver anexo A.6.

La fuente sonora debe clasificarse según los lineamientos del ANEXO C de la norma UNE EN ISO 140-3:1995

## **FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:**

Lo primordial después de la construcción de la cámara es el proceso de validación, dicho proceso debe cumplir con el procedimiento indicado en la norma UNE EN ISO 140:1:1995 Anexo A “Estimación del máximo índice de reducción acústica alcanzable”, es importante aclarar que este laboratorio está proyectado para la medición de Paredes *del tipo A “Paneles Ligeros”*. Se debe medir un material con información reconocida por la normativa española para la edificación y el panel usado en la construcción del laboratorio (panel tipo SAA).

Después de la validación de la cámara al comparar sus resultados con otros laboratorios de certificación reconocidos por la actual normativa en edificación española, según los lineamientos abordados en la norma EN 20140-2:1993 [24] para la determinación de los valores de repetibilidad ( $r$ ) y de reproducibilidad ( $R$ ) mediante ensayos inter-laboratorios. Se podrá certificar la construcción y protocolos de medición del laboratorio del índice de reducción sonora de materiales y composiciones para la edificación.

Como una de las limitaciones del laboratorio por el hecho de estar escalado es el no poder medir paneles del tipo B y C se podrá estimar el funcionamiento de paredes ligeras y pesadas de albañilería usando un modelado con el método de elementos finitos por ejemplo con la herramienta computacional COMSOL® para estimar el funcionamiento de este tipo de paredes una vez validado el funcionamiento para paneles tipo A.

Se puede implementar la estimación de ruido de impacto, norma UNE EN ISO 140-8:199, sobre muestras de la categoría 1 (muestras pequeñas) Incluye revestimientos flexibles que pueden instalarse sueltos o adherirse al suelo siempre y cuando se fabrique una maquina escalda.

Fabricar la pared soporte para la medida del índice de reducción sonora para la apertura de medida de ventanas, acristalamientos, elementos de fachada y puertas.

La limitación de la cámara es la baja frecuencia por lo que se sugiere el estudio de la amortiguación, ya que adicionalmente dará información sobre el comportamiento del material no solo en la transmisión del flanco directo-directo ( $D_d$ ) si no de su comportamiento respecto a los otros flancos que son los que bajan el rendimiento del material en la edificación.

## AGRADECIMIENTOS

TOUTONGE. José de Aviz. Projetoeconstrução de câmaras reverberantes em escala reduzida para o estudo das características de perda de transmissão de divisórias confeccionadas a partir de materiais regionais. Belém – Pará – Brasil Setembro 2006 Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Mestrado em Engenharia Mecânica.

KLING Christoph. Investigatio into Damping in Building Acoustics by Use of Downscaled Models. Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors Der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation Aachen Deutschland 2008.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] UNE EN ISO 140-1:1997. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Requisitos de las instalaciones del laboratorio sin transmisiones indirectas. Versión oficial en español, de la Norma Europea EN ISO 140-1 del octubre de 1997.
- [2] UNE EN ISO 140-3:1995. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en el laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción. Versión oficial en español de la Norma Europea EN ISO 140-3 de mayo 1995.
- [3] UNE EN ISO 354:2003. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. Versión oficial en español, de la Norma Europea EN ISO 354 de mayo de 2003.
- [4] KLING, Christoph: Miniaturising a Wall Test Facility. *Building Acoustics* 14 (4), 2007, pp. 243-266.
- [5] CREMER, Lothar; Heckl, Manfred: *Acoustic: Physics principles and technical applications*. Springer, 1996.
- [6] CARRION Isbert Antoni Figura 2.2 Diseño de espacios Acústicos Arquitectónicos Ediciones UPC, 1998.
- [7] ARAU. Higini. *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Ediciones CEAC, 1998.
- [8] EVEREST. Alton. *Master handbook of Acoustics*. Fourth edition. Mc. Graw Hill. 2001. fig 14-6 pag 276.
- [9] PERERA R., *Introducción al Método de los Elementos Finitos*, SP.ETSII, 2004.
- [10] SCHWAB A.J, *Field theory concepts: Electromagnetic fields, Maxwell's equations grad, curl, div etc. Finite element method, finite-difference method, charge simulation methods, Monte Carlo method*, Springer, 1988.
- [11] PRYOR, Roger W. *Multiphysics Modeling using COMSOL®, A first principles Approach*, Comsol®. 2011.
- [12] Comsol® *Multiphysics Release Note versión 4.1*. October 2010.
- [13] Comsol *Multiphysics Acoustic Module. User guide. Versión 4.0.a* June 2010.
- [14] CRAIK Robert J.M.. *Sound Transmission Through Buildings: Using Statistical Energy Analysis* 1998.
- [15] PAPADOPOULOS, C. I., *Development of an Optimised, Standard-Compliant Procedure to Calculate Sound Transmission Loss: Design of Transmission Rooms, Applied Acoustic*.

- [16] UNE EN ISO 10534-2:1998 Acústica: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: método de función de transferencia. Esta norma es la versión oficial en español de la norma europea EN ISO 10534-2 de junio de 2001 que a su vez se adopta íntegramente la norma internacional ISO 10534-2:1998.
- [17] BARRON. Randall. Industrial Noise Control and Acoustics. Marcel Dekker Inc. 2003.
- [18] BRUNEAU.M.Putel.C. Material Acoustics Handbook. Wiley. 2006
- [19] GUTHRE Pat. The Architect's Portable Handbook, first step rules of thumb for building design, Third edition. Mc. Graw. Hill 2003
- [20] KUTTRUFF, Heinrich: Room acoustics. Applied science publishers LTD London., 1973.
- [21] CRAIK,R.J.M, SMITH.R.S.Sound Transmission through lightweight parallel plates. Part I: Airborne Sound Part II: Structure-borne sound.Elsevier applied acoustics1999.
- [22] CRAIK. The contribution of long flanking paths to sound transmission in building.Elsevier applied acoustics1999.
- [23] UNE-EN-ISO 717-1:1996. Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Versión oficial en español, de la Norma Europea EN ISO 717-1 de diciembre 1996.
- [24] UNE-EN 20140-1993. Medición del Aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de edificación Parte 2: Determinación, verificación y aplicación de datos de precisión (ISO 140-2:1991)

#### Referencias Asociadas

- [25] UNE EN 12354-1:2000. Acústica: Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte: 1 aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos
- [26] HOPKINS. Carl. Sound insulation Elsevier 2007.

#### ANEXOS:

<i>TITULO</i>	<i>REFERENCIA</i>
Predicción del sistema constructivo con el programa AISLA V3.01	A.1
Referencias de los materiales	A.2
Recomendaciones de la instalación de los materiales.	A.3
Planos	A.4
Modelo SEA	A.5
Recomendación, Difusores Techo	A.6