

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Sobre la medición del aislamiento de barreras acústicas basadas en cristales de sonido”

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

Autor/a:

**Jaime Galiana Nieves**

Tutor/a:

**Francisco Javier Redondo Pastor  
Romina María del Rey Tormos**

**GANDIA, 2020**



## **Abstract**

Acoustic barriers are often classified according to their intrinsic characteristics. Mainly the acoustic reduction they produce. The method used for measuring this parameter is the one described in the European standard EN 1793-2, in which a lone parameter, DLR, is defined to assign four different levels of isolation. This method presumes that the element under study produces acoustic reduction in all the hearable frequencies analyzed.

However, acoustic barriers based on sonic crystals have been put under study in recent years. These barriers's main characteristic is that, for some frequencies, they do not produce any acoustic isolation. Our goal is to adapt the measurement method for those cases in which a near-zero acoustic reduction is found, and so, obtaining a coherent "R" level.

In this project we will propose a modification of the current method and test its proper performance through computerized simulations and its subsequent processing.

**Keywords:** Sonic Crystal, Acoustic Reduction, FDTD, Acoustic Barrier.

## Resumen

Las barreras acústicas suelen clasificarse atendiendo a sus características acústicas intrínsecas, fundamentalmente por el aislamiento que proporcionan. El método de medida está estandarizado en la norma europea EN 1793-2, en la que se define un único parámetro, DLR, para asignar cuatro niveles diferentes de aislamiento. Este método supone que el elemento estudiado produce un aislamiento más o menos elevado en todo el rango de frecuencias sobre el que se trabaja.

Sin embargo, en los últimos años se han introducido barreras acústicas basadas en cristales de sonido que tienen la peculiaridad de que para ciertas frecuencias no proporcionan aislamiento acústico alguno. Nuestro objetivo es adaptar el método de medida para que, en el caso de niveles nulos de aislamiento, devuelva valores del índice de reducción sonora "R" coherentes con la realidad.

En este proyecto se propondrá una variación del método actual y se comprobará su correcto funcionamiento a partir de simulaciones y su posterior procesado.

**Palabras clave:** Cristal de Sonido, Reducción Acústica, FDTD, Barrera Acústica.

<b>1. Objeto y antecedentes</b>	<b>2</b>
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivos	3
<b>2. Estado del arte</b>	<b>4</b>
2.1 Barreras acústicas	4
2.2 Barreras basadas en cristales	5
2.2.1 Cristales	5
2.2.2 Cristales de sonido	7
2.3 Método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)	8
2.3.1 Definición del método	8
2.3.2 Perfectly Matched Layer (PML)	11
2.4 Tiempo de reverberación	11
2.5 Recintos acoplados	12
2.6 Índice de reducción acústica	13
2.7 Desarrollo de la fórmula para la obtención de R según UNE EN ISO 140-3	14
<b>3. Desarrollo del proyecto</b>	<b>19</b>
3.1 Solución analítica	19
3.1.1 Desarrollo completo	20
3.1.2 Comparativas iniciales entre ambas expresiones:	22
3.2 Simulaciones mediante FDTD.	25
3.2.1 Cámara de transmisión con una barrera cristalina como elemento separador.	26
3.2.2 Cámara de transmisión con una PML como elemento separador.	27
3.2.3 Cámara de transmisión con material denso como elemento separador.	28
3.2.4 Simulación para el cálculo de las absorciones del recinto.	28
3.2.5 Medida de <i>Insertion Loss</i> en tubo de onda plana.	29
3.3 Procesado de la señal.	30
3.3.1 Señal de excitación utilizada y obtención de niveles de presión.	30
3.3.2 Obtención del tiempo de reverberación.	31
<b>4. Resultados de las simulaciones.</b>	<b>33</b>
4.1 Simulaciones con un coeficiente de transmisión definido.	33
4.1.1 Comparativa general.	35
4.2 Simulaciones con un elemento separador denso.	37
4.3 Resultados con barreras cristalinas.	40
<b>5. Conclusiones y líneas futuras.</b>	<b>46</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>47</b>

Figura 1: Esquema de un cristal 3D .....	6
Figura 2: Interferencia destructiva en una reflexión de bragg.....	7
Figura 3: Ejemplo de una barrera cristalina 2D .....	8
Figura 4: Matrices de presión y velocidad en un esquema ftdt en dos dimensiones ..	10
Figura 5: Esquema de elemento separador .....	13
Figura 6: Evolución del balance energético.....	15
Figura 7: Ejemplo de recintos acoplados .....	17
Figura 8: Balance energético para el desarrollo de la propuesta de solución .....	21
Figura 9: Gráfica comparativa entre métodos .....	23
Figura 10: Factor C de la expresión .....	24
Figura 11: Comparativa entre expresiones .....	25
Figura 12: Planta de los recintos de la cámara de transmisión a escala [6] .....	26
Figura 13: Máscaras de trabajo para el cálculo de la presión acústica y la velocidad de partículas en el eje x y el eje y .....	26
Figura 14: Aspecto de una simulación a los 2 ms(izquierda) y a los 11 ms.....	27
Figura 15: Esquema de la simulación con una PML como elemento separador.....	28
Figura 16: Simulación con PML en el recinto izquierdo para cálculo de TR .....	29
Figura 17: Esquema de disposición del tubo para el cálculo del il.....	30
Figura 18: Ondas de Ricker centradas a 1000, 4000 y 6000 Hz. ....	31
Figura 19: Visualización de las simulaciones con tau fijado .....	33
Figura 20: Resultados para R esperado de 50 dB .....	34
Figura 21: Resultado para R esperado de 70 dB .....	34
Figura 22: Resultado para R esperado de 7 dB .....	35
Figura 23 índices de reducción sonora a distintas frecuencias .....	36
Figura 24: Comparativa general.....	37
Figura25: Visualización de la primera simulación con agua como elemento separador .....	38
Figura 26: Comparación de ambos métodos con la ley de masas. Elemento de 5 cm de agua .....	38
Figura 27 Comparación de ambos métodos y la ley de masas. Elemento ficticio de 5 cm de espesor. ....	39
Figura 28 Comparación de ambos métodos con la ley de masas. Elemento de 1 cm de agua. ....	40
Figura 29: TR para la barrera centrada en 500 Hz.....	41
Figura 30: IL para barrera de 500 Hz .....	41
Figura 31: índice de reducción acústica. barrera a 500 Hz .....	42
Figura 32: Tiempo de reverberación para primer caso a 1000 Hz.....	42
Figura 33: Insertion Loss para barrera de 1000 Hz .....	43
Figura 34: R para barrera de 1000 Hz. Factor de llenado de 0,65.....	43
Figura 35: Tiempo de reverberación para segunda barrera de 1000Hz .....	44
Figura 36: IL para barrera de 1000 Hz .....	44
Figura 37: Reducción acústica producida por barrera a 1000 hz .....	45

# 1. Objeto y antecedentes

## 1.1 Introducción

Para caracterizar el comportamiento acústico de cualquier elemento constructivo se tienen en cuenta multitud de parámetros: el aislamiento a ruido de impactos, el nivel de reducción sonora, el aislamiento a ruido aéreo etc.

La forma para obtener todos estos valores a partir de las mediciones realizadas, así como los procedimientos a seguir para que estas medidas sean correctas, viene estandarizada en las normativas de calidad españolas UNE en ISO.

Como trabajadores en el campo de la ingeniería acústica, hemos de atenernos a estas normas para garantizar la uniformidad de los estudios que realicemos en todo el ámbito nacional, favoreciendo así la comparación entre los elementos constructivos bajo estudio, aunque los laboratorios encargados de generar los informes sean distintos.

Sin embargo, a veces nos encontramos con propuestas de estandarización que son válidas de manera general, pero, debido a avances tecnológicos o cambios en el uso de ciertas técnicas, han caído en la obsolescencia y deberían atenerse a cierta revisión.

Este es el caso de la expresión utilizada para la obtención del índice de reducción sonora ( $R$ ). Este parámetro se obtiene siguiendo la normativa UNE EN ISO 140-3 [1] y se aplica para la obtención del  $DL_R$  en la EN 1793-2 [2].

Esta expresión describe el coeficiente de energía que se transmite a través de un elemento separador. Cuanto menor sea la transmisión, mayor será el índice de reducción acústica que definirá el elemento bajo estudio.

El principal problema de este parámetro es que si seguimos la forma de obtención propuesta por la norma UNE EN ISO 140-3 nos encontramos con que, cuando la transmisión es muy elevada, el índice de reducción acústica devuelto no se ajusta correctamente a los bajos niveles que cabría esperar.

Para barreras acústicas rígidas, que provocan cierto aislamiento (en mayor o menor medida) en prácticamente todas las frecuencias audibles, no es un problema de vital importancia. Sin embargo, con el desarrollo en los últimos años de barreras acústicas diseñadas de tal manera que sean prácticamente transparentes para ciertas bandas de frecuencia (barreras basadas en estructuras cristalinas), es más relevante una correcta caracterización de su comportamiento acústico. Por ello es necesaria una revisión de los métodos de obtención de distintos parámetros acústicos para verificar su correcto desempeño en todos los casos de barreras acústicas existentes.

## 1.2 Objetivos

El objeto de este proyecto es el estudio de las expresiones utilizadas para obtener los parámetros que caracterizan el índice de reducción acústica un elemento separador y, a partir de ese estudio, proponer una nueva expresión con la que intentar subsanar los problemas existentes cuando nos encontramos ante aislamientos reducidos.

Junto con la propuesta de la nueva expresión, se intentará demostrar su correcto funcionamiento. Para ello se realizarán una serie de simulaciones en *MATLAB* utilizando el método matemático de las diferencias finitas (FDTD), comprobando así la validez del método propuesto para señales variantes en el tiempo y en una extensa banda de frecuencias.



## 2. Estado del arte

### 2.1 Barreras acústicas

Una barrera acústica es un elemento constructivo de tamaño considerablemente mayor que las longitudes de onda sobre las que se pretende actuar, actuando como obstáculo en una línea recta de propagación entre una fuente sonora y un punto receptor [3].

Al introducir una barrera en un entorno acústico, puede actuar de distintas maneras sobre el sonido:

- Puede absorber energía acústica.
- Puede reflejar energía acústica.
- Puede difractar energía acústica por sus bordes.
- Puede transmitir energía acústica.

Para aproximar la influencia que tiene la introducción de una barrera acústica en un entorno de transmisión, se calcula lo que se conoce como pérdidas por inserción, o en inglés, *Insertion Loss* (IL).

La forma de obtenerlo es comparando el comportamiento del sonido antes y después de la introducción de la barrera acústica en el entorno. Se realiza una medida previa a la colocación de dicha barrera. A continuación, se coloca la barrera y se realiza una medida en las mismas condiciones. Como resultado se obtendrán dos niveles distintos, diferenciándose entre ellos por la influencia que ha causado la barrera en la propagación del sonido.

$$IL = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{previa}^2}{P_{post}^2} \right) \quad (1)$$

Siendo  $P_{previa}$  y  $P_{post}$  las presiones acústicas antes y después de la inserción de la barrera.

Dentro del IL se engloban todas las interacciones citadas anteriormente, por lo que es útil para obtener el comportamiento global de la barrera, pero no nos sirve para la obtención de parámetros acústicos más específicos.

Para la caracterización acústica de una barrera o pantalla, es útil disponer de parámetros que definan qué parte de esas pérdidas de inserción se corresponden con la absorción, o cuál es exactamente el porcentaje de energía que se transmite a través de la pantalla. Para ello tenemos parámetros como el índice de reducción acústica ( $R$ ), que desarrollaremos más adelante.

El uso de las barreras acústicas está muy extendido, por ejemplo, en carreteras con un elevado tráfico o en vías ferroviarias cercanas a núcleos urbanos. Permiten una importante reducción de las molestias causadas por estas fuentes de ruido, mejorando así las condiciones de habitabilidad de las zonas afectadas.



FIGURA 1: PANTALLA ACÚSTICA DE METACRILATO

Suelen caracterizarse por ser plataformas rígidas de considerable altura. Esto puede acarrear problemas en autovías y vías ferroviarias en localizaciones en las que haya una fuerte concentración de lluvias o vientos, ya que puede provocar situaciones de anegación de las vías, imposibilitando su utilización, al funcionar como un cerramiento evitando el paso del agua.

Por este, entre otros motivos, se han empezado a estudiar barreras acústicas basadas en cristales de sonido, formadas por estructuras periódicas que permiten el paso de aire y agua entre sus separaciones, además de actuar sobre bandas de frecuencias específicas determinadas en su diseño.

## 2.2 Barreras basadas en cristales

En los últimos tiempos se han venido estudiando las posibilidades acústicas de la disposición de elementos reflectantes simples de forma periódica debido a su interacción con las ondas sonoras que las atraviesan en función de la frecuencia.



FIGURA 2: EJEMPLO DE BARRERA ACÚSTICA BASADA EN CRISTALES (DISEÑO DE UPV Y BECSA)

Este tipo de barreras pueden centrar su capacidad de reducción acústica en una banda de frecuencia deseada a partir de las dimensiones de su diseño.

Su funcionamiento se basa en los estudios realizados sobre la difracción de ondas de rayos X sobre cristales.

### 2.2.1 Cristales

Un cristal es todo aquel sólido cuyos elementos fundamentales se encuentran distribuidos en el espacio de forma periódica. De tratarse de un cristal natural, estos elementos fundamentales serían simplemente los átomos que lo conforman.

La existencia en la naturaleza de estos materiales se demostró a raíz de los estudios sobre la difracción que causaban en la propagación de rayos-X a través de su estructura; estudios llevados a cabo por Laue, Friedrich y Knipping en torno a 1912 [2].

A partir de estas experiencias se comenzó a indagar más en el comportamiento de las ondas al propagarse por medios de este tipo. Se observaban patrones de transmisión que demostraban la existencia de bandas de frecuencia para las que el medio era prácticamente transparente.

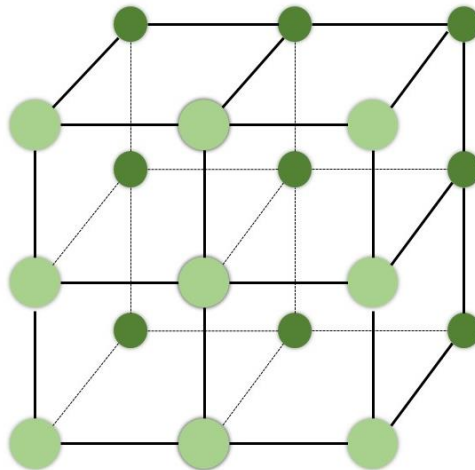


FIGURA 1: ESQUEMA DE UN CRISTAL 3D

Estas interacciones son provocadas por la disposición interna de los componentes que forman el cristal, actuando como difusores individuales que, al estar dispuestos de manera periódica, generan patrones concretos de difracción frente a la transmisión de la onda.

Todo quedó desarrollado teórica y experimentalmente por W.L Bragg [3] en su conocida como “*Ley de Bragg*”.

En ella relaciona estas interacciones de la onda con el medio por la forma de su “*celda unidad*”. La celda unidad no es la mínima expresión geométrica que conforma la estructura cristalina.

Otra forma de definir estas estructuras es a partir de lo que se conoce como una *red de Bravais*. Esto no es más que la definición de los vectores de traslación necesarios para definir la posición de los elementos de la red cristalina. Conociendo las características de esta *red de Bravais* y el elemento que se situará periódicamente siguiendo esos vectores de posición, se puede definir la red cristalina.

En el caso de las frecuencias que se transmiten a lo largo del elemento, nos referimos a ellas como “*bandas permitidas*”, y a las que no, “*bandas prohibidas*” o “*band gap*”. Una ventaja importante de los cristales es que, de tener la capacidad de diseñarlos, se puede determinar en qué frecuencias queremos que se encuentren esas bandas prohibidas, evitando así su propagación.

Esto se puede obtener a partir del parámetro de red del material, un valor que relaciona la distancia entre los elementos utilizados con la frecuencia a la que se quiera centrar una banda prohibida de energía.

### 2.2.2 Cristales de sonido

Utilizando elementos de tamaño considerablemente grande, dado que las ondas acústicas tienen una longitud de onda mucho mayor que las electromagnéticas, podemos diseñar elementos que actúen sobre las bandas de frecuencias deseadas.

Lo más habitual es tomar como elementos fundamentales cilindros de un radio determinado para diseñar la estructura.

Las bandas de frecuencia a las que queremos que la energía no se propague (*band gaps*) dependerán de las dimensiones del cristal diseñado.

Cuando una onda atraviesa una barrera formada por cilindros de este tipo, se irá reflejando en cada uno de los elementos difusores. Estas reflexiones pueden ser de carácter destructivo, provocando la onda reflejada en un cilindro y la reflejada en alguno de los demás componentes de la barrera se anulen entre sí. Si esto se repitiese un gran número de veces, a la frecuencia a la que eso ocurre, la onda no se propagaría.

Por ello es importante que la barrera sea mucho mayor que la longitud de onda correspondiente a la frecuencia sobre la que se quiera actuar principalmente.

Este fenómeno ocurre separando una cierta distancia cada elemento difusor dependiendo de la frecuencia seleccionada. Esta separación la ilustra la ley de *Bragg* como:

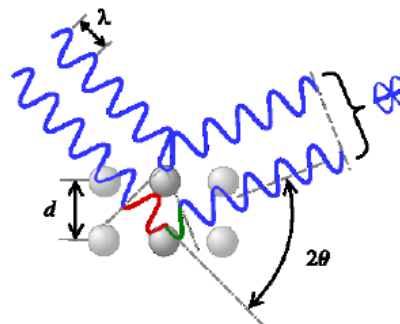


FIGURA 2: INTERFERENCIA DESTRUCTIVA EN UNA REFLEXIÓN DE BRAGG

Esto nos permite calcular a qué distancia han de situarse los elementos que conforman el cristal entre ellos para producir ese efecto de reflexión periódicamente.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2)$$

Siendo  $n = 1, 2, 3 \dots$  y  $d$  la distancia entre los elementos. Si tomamos esa distancia  $d$  y la aplicamos como vector de traslación de los elementos que conforman el cristal, tendremos una red de Bravais cuyo parámetro de red será concretamente esa distancia, y cuya banda prohibida de energía será aquella para la que hayamos calculado el parámetro de red.

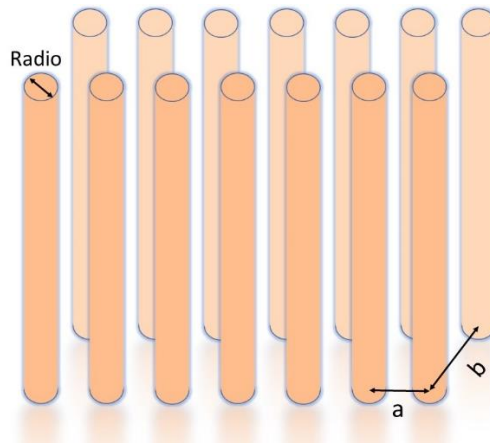


FIGURA 3: EJEMPLO DE UNA BARRERA CRISTALINA 2D

En términos de la frecuencia, en lugar de la longitud de onda, y dado que la distancia entre filas de elementos será siempre constante, nos deshacemos del valor multiplicador  $n$  y obtenemos:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{2a} \quad (3)$$

Donde:

- $c$  es la velocidad del sonido en el aire.
- $a$  es la distancia entre los elementos, también conocido como *parámetro de red*.
- $f_{Bragg}$  es la frecuencia, en Hertzios, en la que encontraremos una banda prohibida de energía en transmisión.

Del radio de los elementos utilizados dependerá el valor conocido como "*factor de llenado*", que nos indica qué porcentaje de la celda unidad se encuentra ocupado por los elementos fundamentales.

Este valor es importante para el diseño de elementos con características específicas, ya que, a mayor factor de llenado, más ancho será el "*band gap*" generado [4].

## 2.3 Método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)

### 2.3.1 Definición del método

Este método de simulación fue presentado a finales de la década de los 60 por Yee [2] como propuesta para la realización de simulaciones del campo electromagnético. Este método se basaba originariamente en una discretización de las ecuaciones de Maxwell.

Si realizamos esa misma discretización con la ecuación de onda acústica, podemos obtener un método para la simulación del comportamiento del sonido en el dominio temporal con la misma estabilidad y fiabilidad de resultados.

Al realizar las simulaciones en el dominio del tiempo podemos trabajar con un gran ancho de banda, y no solo con frecuencias específicas, como ocurre con otros métodos de simulación de sonido.

Las ecuaciones de onda del sonido se pueden definir de la siguiente forma:

$$\nabla p + \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0 \quad (5)$$

Donde:

- $p(r, z, t)$  es la presión sonora.
- $\vec{u}(r, z, t)$  es la velocidad de partícula.
- $\rho_0$  es la densidad del medio.
- $c$  es la velocidad del sonido en el medio.

En el caso de buscar la solución temporal en un dominio 2D desarrollamos las expresiones de tal forma que obtenemos una versión de la ecuación (1) para la dirección  $x$  y otra para la dirección  $y$ , resultando en:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho_0 \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial t} \right) = 0 \quad (8)$$

A continuación, podemos discretizar estas ecuaciones siguiendo la definición básica de qué es una derivada, que no es más que el cálculo de la pendiente entre dos puntos separados por un espacio diferencial (tanto en el dominio espacial como en el temporal).

Para la realización de estas simulaciones, ya que se discretizan las ecuaciones, ha de discretizarse también el dominio espacial que se estudia.

Para ello dividiremos el espacio en “celdas” de una longitud determinada  $\Delta x$ , tanto en la dirección  $x$  como en la dirección  $y$ . Este será el conocido como “incremento espacial”. A partir de este valor, y conociendo las características del medio en el que se propaga el sonido, podemos obtener también el incremento temporal, del que obtendremos datos de vital importancia como la frecuencia de muestreo y la frecuencia máxima de trabajo.

Este valor se obtiene mediante el número de Courant:

$$C = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \quad (9)$$

Donde:

- $C$  es el número de Courant, que ha de ser menor que 1 para garantizar la estabilidad del sistema.
- $u$  es la velocidad del sonido en el medio.

Conociendo las dimensiones del dominio a simular y las propiedades de este, se generan tres matrices: una para el cálculo de la presión acústica y dos para el cálculo de las velocidades en cada punto del dominio, tanto en el eje  $x$  como en el eje  $y$ .

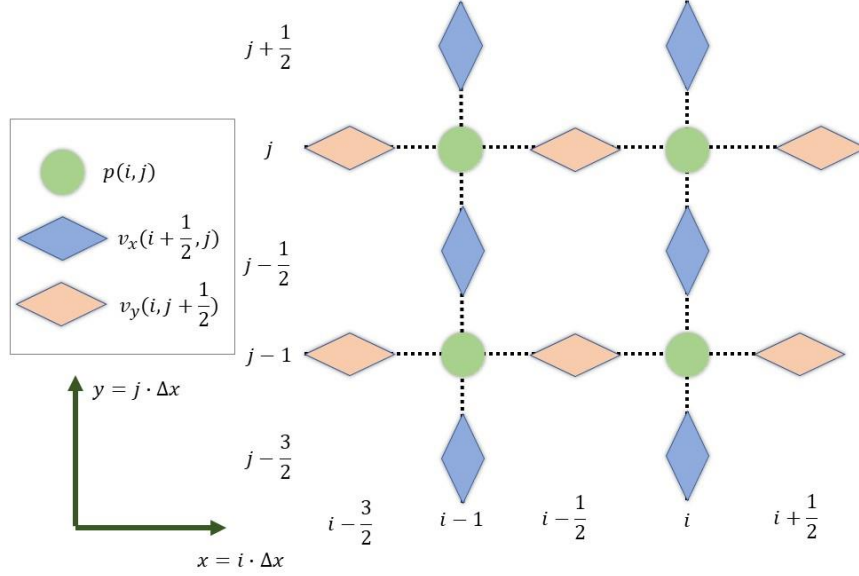


FIGURA 4: MATRICES DE PRESIÓN Y VELOCIDAD EN UN ESQUEMA FDTD EN DOS DIMENSIONES

Con todo esto obtenemos finalmente las expresiones discretizadas para la implementación computacional de este método.

$$v_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j\right) = v_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j\right) - \frac{\Delta t}{\rho\Delta x} [p^n(i+1,j) - p^n(i,j)] \quad (10)$$

$$v_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2}\right) = v_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\rho\Delta y} [p^n(i,j+1) - p^n(i,j)] \quad (11)$$

$$p^{n+1}(i,j) = p^n(i,j) - k \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ v_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j\right) - v_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i-\frac{1}{2},j\right) \right] \dots \quad (12)$$

$$- k \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ v_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2}\right) - v_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i,j-\frac{1}{2}\right) \right]$$

Se realizan finalmente una continuación de iteraciones incrementando  $\Delta t$  hasta que se alcanza el tiempo de simulación que se desee.

Se ha implementado este proceso en MATLAB para la realización de las simulaciones de este proyecto.

### 2.3.2 Perfectly Matched Layer (PML)

Para la realización de este método es importante tener en cuenta las condiciones de contorno utilizadas en el modelo a simular.

De esta manera, en el caso de querer una capa que absorba completamente la energía acústica que incide sobre la misma, ha de diseñarse una PML.

Una PML es una capa que aplica una absorción sonora creciente a medida que se aleja de la superficie sobre la que incide la energía acústica. De esta manera, se evitan descompensaciones en el modelo al intentar introducir absorciones muy altas de manera muy repentina, ya que esto podría provocar reflexiones indeseadas.

Podemos así aproximar espacios del modelo a simulaciones en campo abierto o elementos totalmente absorbentes sin ningún tipo de reflexión.

## 2.4 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación es el valor, en segundos, que nos indica cuánto tarda el nivel de presión sonora emitido en una sala por una fuente en caer 60 decibelios desde el momento en el que esta deja de emitir.

El tiempo de reverberación dependerá, principalmente, de la absorción producida por las paredes de la sala y la superficie de estas.

Cada vez que el sonido incide sobre una de las paredes, cierta parte de la energía se refleja, mientras el resto se disipa, disminuyendo la energía acústica total de la sala.

Si esto se produce continuamente, se irá produciendo una caída en la densidad de energía existente en la sala, a partir de la cual podremos obtener el tiempo de reverberación.

Este valor nos ayuda a obtener la absorción producida por la sala, conociendo previamente las dimensiones de esta.

Esto se consigue mediante la ecuación de Sabine:

$$t_r = \frac{0,162 \cdot V}{S \cdot \alpha} \quad (13)$$

Donde:

- $t_r$  es el tiempo de reverberación (en segundos).
- $V$  es el volumen de la sala (en  $m^3$ ).
- $S$  es la superficie total de las paredes de la sala (en  $m^2$ )
- $\alpha$  es el coeficiente de absorción medio de las paredes de la sala (un valor adimensional entre 0 y 1).

Esta fórmula está definida para el cálculo del tiempo de reverberación en tres dimensiones. Dado que en este proyecto vamos a realizar las simulaciones en dos dimensiones, utilizaremos la siguiente fórmula, que aproxima el caso de un espacio reverberante en 2 dimensiones [6]:



$$t_{r2D} = \frac{\pi 0,162 \cdot S}{4 L \cdot \alpha} = \frac{0,128 \cdot S}{L \cdot \alpha} \quad (14)$$

Donde:

- $t_{r2D}$  es el tiempo de reverberación del recinto en dos dimensiones (en segundos).
- $S$  es la superficie del espacio (en  $m^2$ ).
- $L$  es la longitud total de las paredes de la sala (en  $m$ )
- $\alpha$  es el coeficiente de absorción medio de las paredes de la sala (un valor adimensional entre 0 y 1).

## 2.5 Recintos acoplados

Para los estudios de aislamiento a ruido aéreo y de impactos producido por un elemento constructivo se utiliza para una caracterización normalizada un espacio conocido como “cámara de transmisión”.

Una cámara de transmisión se compone por dos recintos conectados. En uno de ellos se posicionará una fuente sonora omnidireccional, en ambos se distribuirán una serie de sensores siguiendo la normativa necesaria y en el espacio separador entre dos recintos se situará el elemento a estudiar.

A partir de las medidas obtenidas en estos sensores podemos promediar la energía acústica existente en cada uno de los recintos y, a partir de ahí, calcular los índices acústicos deseados de reducción acústica o pérdidas de transmisión.

Pero la fórmula utilizada para la obtención de estos valores viene de un desarrollo matemático extenso teniendo en cuenta las maneras que tiene la energía de distribuirse por el dominio.

En el caso de disponer de un único recinto, sabemos que la causa principal de pérdidas de energía es la absorción de las paredes, y es de fácil cálculo a partir del tiempo de reverberación del recinto. La absorción producida por el aire, generalmente y en recintos tan pequeños, puede considerarse nula.

Sin embargo, si nos encontramos ante más de un recinto que se encuentra conectado físicamente con otro, el balance energético existente es más complejo.

En el caso de una cámara de transmisión las pérdidas energéticas dependerán de la absorción de las paredes de cada uno de los recintos, ya que podrían ser distintas, y de la cantidad de energía que se transmiten los recintos mutuamente.

Y este balance energético es el fundamento para la obtención de las fórmulas utilizadas en la normativa reguladora para el cálculo de la reducción acústica de elementos constructivos, que se desarrollarán en profundidad en apartados posteriores.

## 2.6 Índice de reducción acústica

Un elemento separador puede influir de tres maneras sobre una onda acústica incidente: puede reflejar la onda, puede transmitirla a través de su masa o puede absorber la energía acústica que lo atraviesa.

El balance energético de estas acciones ha de ser constante, lo que quiere decir que la suma de la energía perdida, la transmitida y la reflejada, ha de ser igual a la energía incidente en un primer momento.

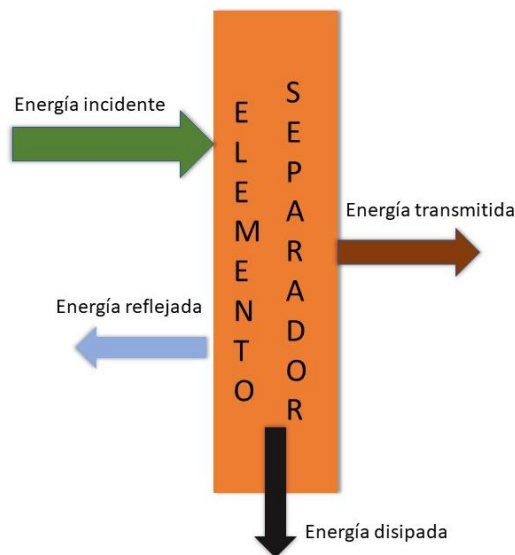


FIGURA 5: ESQUEMA DE ELEMENTO SEPARADOR

En este proyecto nos estamos centrando en la obtención del índice de reducción acústica, que está relacionado con el porcentaje de energía transmitida mediante una proporcionalidad inversa.

El índice de transmisión de un elemento separador será el coeficiente entre la energía incidente y la energía transmitida. Esto se traduce en la expresión:

$$\frac{E_t}{E_i} = \tau \quad (15)$$

Siendo:

- $\tau$  el coeficiente de transmisión.
- $E_i$  la energía que incide sobre la barrera.
- $E_t$  la energía transmitida al otro lado de la barrera.

El coeficiente  $\tau$  tendrá un valor comprendido entre 0 y 1. Cuanto mayor sea el porcentaje de energía que pasa al otro lado del elemento, mayor será el valor de  $\tau$ .

A partir de aquí, se define el índice de reducción acústica, que se expresa en decibelios y que se define como el logaritmo en base diez de la inversa del coeficiente de transmisión. Este valor indica una relación de magnitud entre la energía acústica a un lado y a otro de la barrera que será mayor cuanto menor sea la energía transmitida.

La formulación básica sería entonces:

$$R = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad (16)$$

## 2.7 Desarrollo de la fórmula para la obtención de R según UNE EN ISO 140-3

Para obtener de manera exacta este resultado habría que conocer el valor concreto del coeficiente de transmisión del elemento bajo estudio, algo que es muy complicado de conseguir incluso en condiciones de laboratorio óptimas.

Para ello se realizó una aproximación a partir de las leyes de conservación de la energía y la teoría de los recintos acoplados que intenta desglosar todo el balance energético existente en una transmisión entre dos recintos a través de un elemento separador para así aislar el coeficiente de transmisión y poder calcular el índice de reducción acústica.

La fórmula para la obtención del índice de reducción acústica viene definida en la norma UNE-EN ISO 140-3 como:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (13)$$

Donde:

- $R$  es el índice de reducción acústica (en decibelios).
- $L_1$  es el nivel de presión sonora obtenido en el recinto emisor de una cámara de transmisión (en decibelios).
- $L_2$  es el nivel de presión sonora obtenido en el recinto receptor de una cámara de transmisión (en decibelios).
- $S$  es la superficie del elemento separador (en metros cuadrados).
- $A$  es la absorción efectiva de las paredes del recinto receptor (en metros cuadrados).

El primer paso para entender este desarrollo será echar un vistazo a cómo evoluciona el sonido en un recinto cuando se sitúa una fuente en su interior.

En acústica estadística, podemos separar el comportamiento de lo que ocurre en tres fases:

En la primera de ellas, la fuente comenzará a emitir energía acústica, que irá distribuyéndose por todo el espacio hasta alcanzar la segunda fase de estado estacionario. Cuando la energía alcanza el estado estacionario significa que la energía emitida por la fuente y la atenuada por el entorno alcanzan un equilibrio y se mantienen constantes. Tras apagar la fuente, dejando esta de emitir sonido, la energía decaerá con el tiempo debido a la absorción del entorno en el que se genere el sonido.

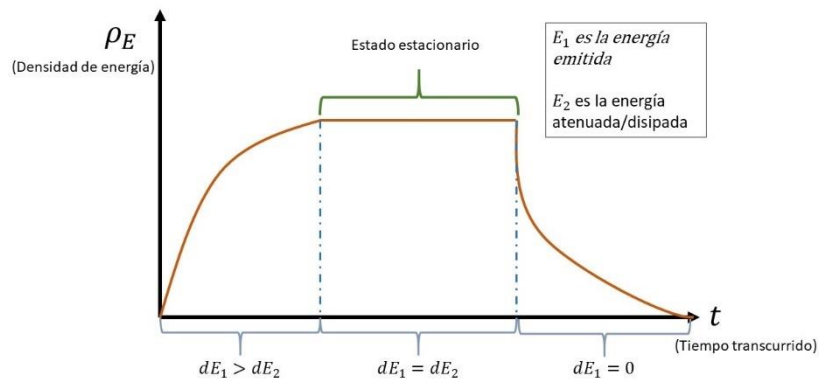


FIGURA 6: EVOLUCIÓN DEL BALANCE ENERGÉTICO

En el estudio de la reducción acústica nos centramos en la fase de estado estacionario.

En este instante, la energía que se inserta en el sistema es la misma que la energía que absorbe el propio sistema a lo largo del tiempo.

Por lo tanto, en un espacio en el que situamos una fuente vamos a tener en cuenta:

- La potencia sonora de la fuente.
- La absorción producida por la misma.

La potencia sonora se relaciona con la energía acústica como:

$$dE_{dt} = Wdt \quad (17)$$

Siendo  $W$  la potencia acústica.

En un recinto simple, esa sería la energía acústica que se introduce en el sistema.

La energía que se perderá debido a la absorción de las paredes del recinto estará definida mediante el área de absorción equivalente, que es la absorción total de la superficie del recinto, calculada como:

$$A = S \cdot \alpha \quad (18)$$

Donde:

- $A$  es el área de absorción equivalente (en metros cuadrados).
- $S$  es el área total de las paredes del recinto (en metros cuadrados).
- $\alpha$  es el índice de absorción acústica, que tendrá un valor entre 0 y 1 (siendo 1 el caso de superficie completamente absorbente y 0 superficie completamente reflectante).

Este sería el caso ideal en el que la absorción acústica es la misma para toda el área del recinto, que no es lo normal, por lo que una forma más apropiada de calcular el área de absorción equivalente sería mediante:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (19)$$

Siendo  $n$  las distintas superficies existentes en el recinto.

A lo largo del tiempo, la energía perdida mediante absorción se calcula cómo:

$$dE_{dt} = \frac{1}{4} \rho_E \cdot c \cdot A \cdot dt \quad (20)$$

Siendo  $\rho_E$  la densidad de energía y  $c$  la velocidad del sonido en el aire.

El factor de  $\frac{1}{4}$  que multiplica al resultado se obtiene por el cálculo integral del balance energético en un espacio en tres dimensiones. En el caso de estar en una o dos dimensiones, este valor multiplicativo variaría, aunque el resultado final no sería distinto.

Como hemos comentado previamente, la energía que gana el sistema es la misma que la que se pierde. Por lo tanto, el balance de la densidad energética del mismo será:

$$d\rho_E = \frac{dE_{ganada}}{V} - \frac{dE_{perdida}}{V} \quad (21)$$

Donde  $V$  es el volumen total del recinto.

Substituyendo por las ecuaciones previas obtenemos:

$$\frac{d\rho_E}{dt} = \frac{1}{V} (W - \frac{1}{4} \rho_E \cdot c \cdot A) \quad (22)$$

Sabemos que la característica principal del estado estacionario es que:

$$\frac{d\rho_E}{dt} = 0 \quad (23)$$

Por lo que:

$$W = \frac{1}{4} \rho_E \cdot c \cdot A \quad (24)$$

$$\rho_E = \frac{4W}{c \cdot A} \quad (25)$$

Transformando esta expresión a escala logarítmica, obtenemos que:

$$L_{P,R} = L_W + 6 - 10 \log_{10} A \quad (26)$$

Siendo:

- $L_W$  el nivel de potencia sonora (en decibelios).
- $L_{P,R}$  el nivel de presión sonora existente en el recinto.

Este sería el cálculo del balance energético en régimen estacionario en el caso de tener un único espacio bajo estudio.

Para aplicar esto a la obtención del índice de reducción acústica tenemos que suponer dos recintos similares separados por el elemento bajo estudio con una fuente de potencia acústica en el interior de uno de ellos.

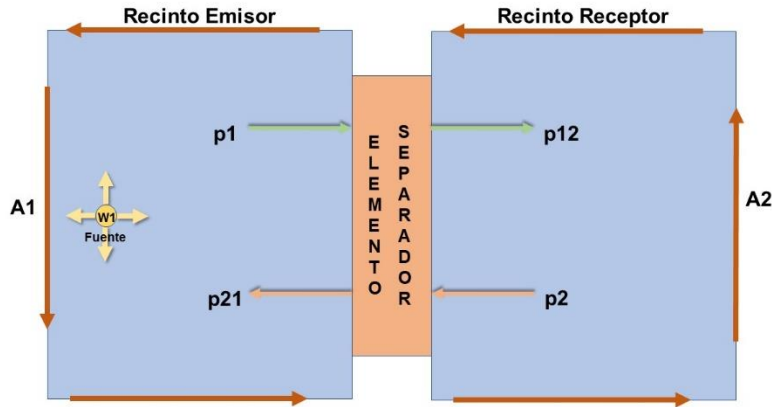


FIGURA 7: EJEMPLO DE RECINTOS ACOPLADOS

En este caso tomaremos dos fórmulas distintas, que representarán el nivel de presión sonora en el recinto emisor y el nivel en el recinto receptor.

$$LP_1 = LW_T + 6 - 10 \log_{10} A_1 \quad (27)$$

$$LP_1 = 10 \log_{10} \left( \frac{W_T}{10^{-12}} \right) + 6 - 10 \log_{10} A_1 \quad (28)$$

Donde:

- $LP_1$  es el nivel de presión sonora en el recinto emisor, en el que se sitúa la fuente.
- $W_T$  es la potencia generada por la fuente. Se divide por  $10^{-12}$  Wattios al ser la potencia de referencia para el cálculo del nivel de potencia acústica.
- $A_1$  es el área de absorción equivalente de las paredes del recinto emisor.

Para obtener la misma ecuación, pero para el recinto receptor, en el que no hay una fuente de potencia sonora, tenemos que saber el porcentaje de la potencia generada en el primer recinto que se transmite al recinto receptor a través del elemento separador.

Para ello comenzamos con la siguiente expresión:

$$LP_2 = 10 \log_{10} \left( \frac{\tau W_i}{10^{-12}} \right) + 6 - 10 \log_{10} A_2 \quad (29)$$

La diferencia principal en la obtención del nivel de presión sonora en este recinto con respecto al recinto emisor, se encuentra en que contamos como fuente de potencia acústica la que se transmite desde el recinto emisor. Esta transmisión se caracteriza mediante el índice  $\tau$ , como ya se ha explicado previamente.

A partir de aquí, para obtener el índice de reducción acústica, debemos aislar el coeficiente de transmisión de la fórmula desarrollando de la siguiente manera:

$$LP_2 = 10 \log_{10} \left( \frac{\tau SI}{10^{-12}} \right) + 6 - 10 \log_{10} A_2 \quad (30)$$

En esta expresión,  $S$  es la superficie del elemento separador e  $I$  es la intensidad acústica generada por la fuente situada en el recinto emisor, en  $W/m^2$ .

Si continuamos el desarrollo atendiendo a relaciones previamente explicadas:

$$LP_2 = 10 \log_{10} \left( \frac{\tau \frac{1}{4} \rho_E \cdot c \cdot S}{10^{-12}} \right) + 6 - 10 \log_{10} A_2 \quad (31)$$

$$LP_2 = 10 \log_{10} \left( \frac{\tau \frac{1}{4} \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c^2} \cdot c \cdot S}{10^{-12}} \right) + 6 - 10 \log_{10} A_2 \quad (32)$$

De esta expresión podemos extraer el coeficiente de transmisión y el mismo desarrollo que nos llevó a obtener la fórmula para  $LP_1$ .

Por lo tanto:

$$LP_2 = -R - 6 + 10 \log_{10} S + LP_1 + 6 - 10 \log_{10} A_2 \quad (33)$$

$$R = LP_1 - LP_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (34)$$

Siendo esta la expresión para la obtención del índice de reducción acústica según la normativa UNE-EN ISO 140-3 [1].

## 3. Desarrollo del proyecto

### 3.1 Solución analítica

Por lo general, la fórmula de la normativa para definir el nivel de reducción acústica funciona correctamente si se siguen las condiciones de medida apropiadas.

Sin embargo, con los últimos avances en la creación de barreras basadas en cristales de sonido, se ha observado que en las bandas de frecuencias en las que la barrera debería ser completamente transparente, la fórmula propuesta nos devuelve un nivel de aislamiento que no es realista.

En el apartado anterior hemos desarrollado la fórmula para la obtención del índice de reducción acústica.

Si en lugar de pensar primero en el caso de un único recinto para después introducir un segundo, contamos desde el principio con que tenemos dos recintos acoplados, podríamos obtener las siguientes expresiones que, desarrolladas, nos darían la expresión para el índice de reducción acústica.

$$W_1 - \frac{1}{4}\rho_{E1}cA_1 - \frac{1}{4}\rho_{E1}cS + \frac{1}{4}\rho_{E2}cS = 0 \quad (35)$$

$$\frac{1}{4}\rho_{E1}cS - \frac{1}{4}\rho_{E2}cA_2 - \frac{1}{4}\rho_{E2}cS = 0 \quad (36)$$

La primera expresión correspondería al balance energético del recinto emisor y la segunda al del recinto receptor.

Añadiendo el coeficiente de transmisión del elemento separador y desarrollando un poco las expresiones cambian a:

$$\frac{4W_1}{c} = A_1\rho_{E1} - \tau S\rho_{E2} \quad (37)$$

$$0 = -\tau S\rho_{E1} + A_2\rho_{E2} \quad (38)$$

De aquí se puede obtener el factor de acoplamiento entre una sala y la otra. Esto es el factor por el que hay que multiplicar la densidad de energía del recinto transmisor para obtener, aproximadamente, la del recinto receptor.

En este caso, el factor de transmisión  $K_2$  se define como:

$$K_2 = \frac{\tau S_2}{A_2} = \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} \quad (39)$$

Este planteamiento tiene un problema:

Sólo tiene en cuenta el coeficiente de transmisión del elemento separador.



Como hemos explicado previamente, una barrera puede provocar tres fenómenos en la energía acústica incidente:

- Reflexión.
- Transmisión.
- Disipación.

El problema del factor de transmisión obtenido de la forma habitual es que únicamente tiene en cuenta las pérdidas provocadas por el elemento separador en la energía de cualquiera de los dos recintos si estas son las provocadas por la transmisión al otro recinto.

Esto quiere decir que la fórmula supone que, la energía que incide sobre el elemento separador, o se refleja o se transmite.

Esta no es una aproximación demasiado cierta, ya que el sonido, al atravesar cualquier cambio de impedancia, va a atenuarse en mayor o menor medida y es algo que hay que tener siempre en cuenta.

Por ello, hemos decidido desarrollar una fórmula, de la misma manera que la explicada anteriormente, pero añadiendo distintos factores a tener en cuenta, para así obtener unas expresiones más fieles a la realidad, reduciendo la posibilidad de encontrar errores en las medidas.

### 3.1.1 Desarrollo completo

Comenzamos con la fórmula completa de balance energético en el caso de contar también con las pérdidas relacionadas con la disipación provocada por el elemento separador. Al índice de disipación lo llamaremos  $\alpha_E$ , y actuará sobre la fórmula de la misma manera que lo hace el índice de transmisión  $\tau$ .

$$W_1 - \frac{1}{4}\rho_{E1}cA_1 - \frac{1}{4}\rho_{E1}\alpha_E S - \frac{1}{4}\rho_{E1}\tau S + \frac{1}{4}\rho_{E2}\tau S = 0 \quad (40)$$

$$\frac{1}{4}\rho_{E1}\tau S - \frac{1}{4}\rho_{E2}cA_2 - \frac{1}{4}\rho_{E2}\alpha_E S - \frac{1}{4}\rho_{E2}\tau S = 0 \quad (41)$$

Donde:

- $\rho_{E1}$  es la densidad de energía acústica en el recinto emisor.
- $\rho_{E2}$  es la densidad de energía acústica en el recinto receptor.
- $W_1$  es la potencia acústica generada por la fuente en el recinto emisor.
- $A_1$  es el área de absorción equivalente del recinto emisor.
- $A_2$  es el área de absorción equivalente del recinto receptor.
- $S$  es la superficie del elemento separador.
- $\tau$  es el índice de transmisión del elemento separador
- $\alpha_E$  es el índice de disipación del elemento separador.

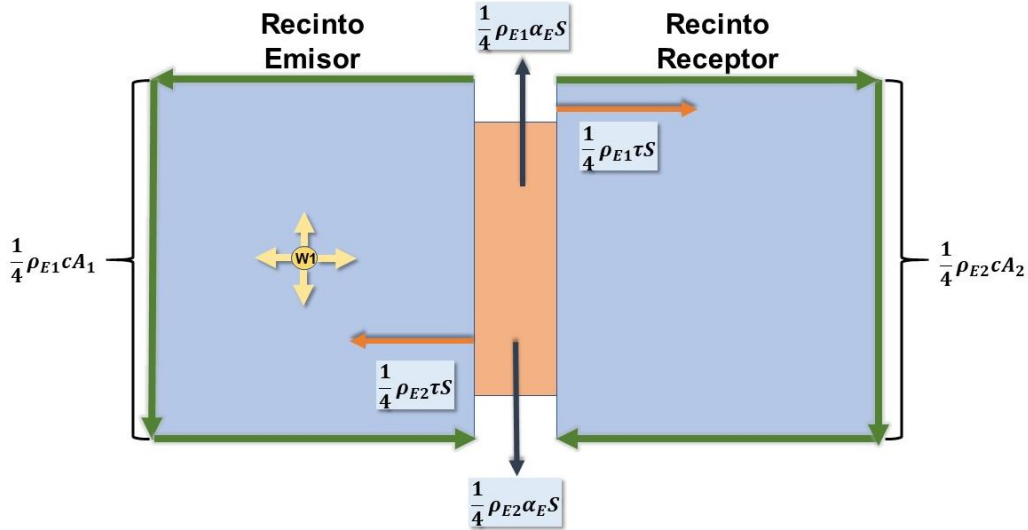


FIGURA 8: BALANCE ENERGÉTICO PARA EL DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Si desarrollamos la ecuación correspondiente al recinto receptor, podemos obtener el factor de acoplamiento entre un recinto y otro:

$$K_2 = \frac{\tau S}{A_2 + \alpha_E S + \tau S} = \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} \quad (42)$$

A partir de esta expresión, podremos desarrollar hasta aislar  $\tau$  y obtener así el índice de reducción acústica  $R$ .

En primer lugar, dividimos en la parte derecha de la igualdad por  $S$ , tanto arriba como abajo:

$$\frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} = \frac{\tau}{\frac{A_2}{S} + \alpha_E + \tau} \quad (43)$$

A continuación, invertimos la división a ambos lados de la igualdad y desarrollamos:

$$\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} = \frac{\frac{A_2}{S} + \alpha_E + \tau}{\tau} \quad (44)$$

$$\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} = \frac{\frac{A_2}{S} + \alpha_E}{\tau} + 1 \quad (45)$$

$$\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1 = \frac{\frac{A_2}{S} + \alpha_E}{\tau} + 1 \quad (46)$$

Aislamos el coeficiente de transmisión como  $1/\tau$ :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1}{\frac{A_2}{S} + \alpha_E} \quad (47)$$

Comenzamos la conversión a unidades logarítmicas, para así poder definir el índice de reducción acústica  $R$ :

$$R = 10 \log_{10} \left( \frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1 \right) - 10 \log_{10} \left( \frac{A_2}{S} + \alpha_E \right) \quad (48)$$

Conociendo la propiedad del logaritmo que dicta que:

$$\log(a - b) = \log \left( a \left( 1 - \frac{b}{a} \right) \right) = \log(a) + \log \left( 1 - \frac{b}{a} \right) \quad (49)$$

Entonces desarrollamos como:

$$R = 10 \log_{10} \frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} + 10 \log_{10} \left( 1 - \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{A_2}{S} + \alpha_E \right) \quad (50)$$

Sabemos, por desarrollos anteriores, que:

$$10 \log_{10} \frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} = L_1 - L_2 \quad (51)$$

Siendo  $L_1$  y  $L_2$  los niveles de presión sonora (en decibelios) existentes en el recinto emisor y el receptor respectivamente.

Por lo tanto:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \left( 1 - \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{A_2}{S} + \alpha_E \right) \quad (52)$$

Simplificamos el tercer término de la expresión:

$$10 \log_{10} \left( 1 - \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} \right) = 10 \log_{10} \left( 1 - 10^{\frac{-(L_1 - L_2)}{10}} \right) = C \quad (53)$$

Utilizaremos la etiqueta  $C$  para este índice de corrección para trabajar con una expresión visualmente más corta.

Finalmente, la expresión obtenida para la definición del índice de reducción acústica, siguiendo el criterio expuesto en este proyecto, será:

$$R = L_1 - L_2 + C + 10 \log_{10} \left( \frac{A_2}{S} + \alpha_E \right) \quad (54)$$

### 3.1.2 Comparativas iniciales entre ambas expresiones:

Para comenzar a comprobar las diferencias básicas entre esta propuesta y la fórmula original, se han realizado una serie de gráficas en MATLAB donde se observa la evolución de ambas utilizando un caso hipotético de situación de medidas.

En este primer caso se ha supuesto un elemento separador de 3 metros y una sala con un área de absorción equivalente de 2,6 m<sup>2</sup>.

Se han supuesto dos vectores de valores, uno para  $L_1$  y otro para  $L_2$ . El de  $L_1$  se mantiene constante, mientras que  $L_2$  va incrementando su valor hasta alcanzar el mismo que en el nivel de presión del que sería el recinto emisor.

Obtenemos la siguiente gráfica:

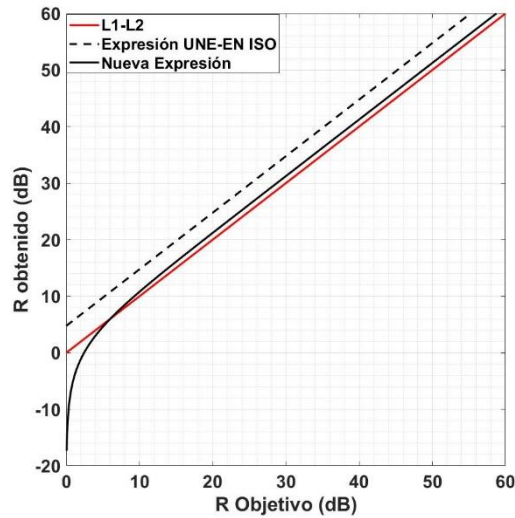


FIGURA 9: GRÁFICA COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS

Se observa en esta gráfica la evolución de ambas fórmulas. Cuanto más cerca está el nivel registrado en el recinto receptor del obtenido en el emisor, menor es el nivel de reducción acústica.

Los dos métodos evolucionan de una manera muy similar, pero, mientras que el método original tiende a cero de manera lineal, el nuevo método tiende mucho más drásticamente hacia valores bajos cuando los niveles son muy cercanos, evitando valores del índice de reducción acústica demasiado elevados para lo que sería normal que devolviese en esos casos.

Cuando la diferencia de nivel entre ambas medidas es alta, los datos obtenidos son muy parecidos al método original, por lo que no sería un problema en medidas de barreras con características normales y aislamiento acústico elevado.

La importante caída de nivel que ocurre en la nueva expresión formulada se debe al factor que hemos llamado  $C$ . Recordemos que:

$$C = 10 \log_{10} \left( 1 - 10^{-\frac{(L_1 - L_2)}{10}} \right) \quad (55)$$

Esta expresión nos indica que, en el caso de que el nivel en el recinto receptor sea muy cercano al nivel existente en el recinto emisor, devolverá un valor negativo que se acrecentará a cuanto mayor sea esta similitud.

La caída provocada por este factor es la siguiente:

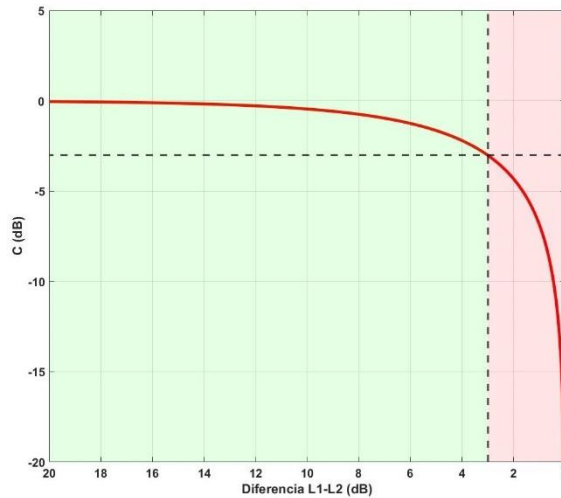


FIGURA 10: FACTOR C DE LA EXPRESIÓN

En esta figura se muestra la evolución del nivel devuelto por la expresión del factor C dependiendo de la diferencia entre el nivel del recinto emisor y el recinto receptor.

Cuando esta diferencia sea mayor a, aproximadamente, 16 dB, el nivel de C será de aproximadamente 0 dB, siendo irrelevante para el resultado final.

Sin embargo, a partir de esa diferencia, el valor devuelto por C tornará negativo, interfiriendo en el resultado final, hasta alcanzar el punto en el que la diferencia entre el recinto emisor y el receptor sea menor que 3 dB.

En este caso, pasaremos a entrar en una zona en la que el valor de C sobrepasará la diferencia de niveles, dando un resultado negativo a expensas del comportamiento del resto de la expresión, que dependerá de los factores de absorción y disipación del experimento.

Esto ayuda a que, en casos de tener una reducción acústica muy baja, el nivel devuelto tienda a valores cercanos a cero e incluso negativos. Al contrario que la expresión utilizada en las normativas UNE-EN ISO para la obtención del índice de reducción acústica, en la que es común obtener valores de  $R$  cercanos a los 5-10 dB aun cuando no hay ningún elemento separador situado en la cámara.

Otra forma de comparar ambas expresiones es la siguiente gráfica:

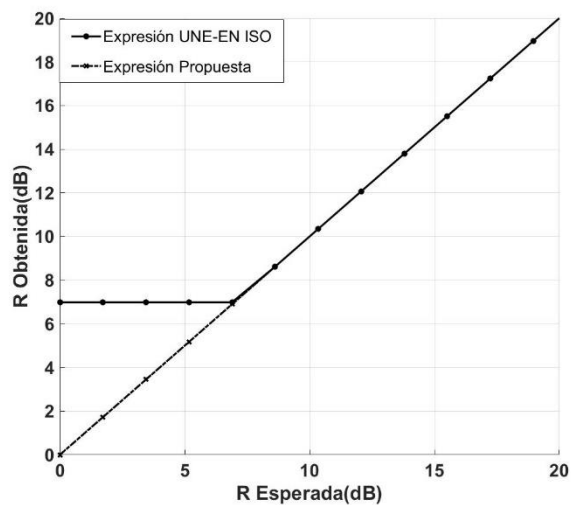


FIGURA 11: COMPARATIVA ENTRE EXPRESIONES

Para su obtención se ha creado en primer lugar un vector que contiene valores del índice de reducción sonora desde 0 decibelios hasta 20 decibelios.

Se han tomado valores del área de absorción equivalente y la superficie del elemento separador que fuesen realistas y se ha calculado la diferencia de niveles necesaria para que cada una de las expresiones devuelva exactamente el valor del índice de reducción acústica que se desea.

Dado que en una cámara de transmisión no vamos a poder obtener un nivel en la cámara emisora mayor que la cámara receptora, hemos sustituido todos los valores negativos de las diferencias de niveles por cero decibelios, ya que sería el valor mínimo posible.

Lo que se puede observar en la gráfica es que ambas expresiones pueden obtener resultados muy similares. pero la diferencia más importante reside en que, al acercarnos a niveles muy bajos, la expresión correspondiente a la norma UNE-EN ISO tiende a saturar, haciendo prácticamente imposible la obtención de niveles cercanos a 0 dB, aun cuando la diferencia de niveles sea muy pequeña.

### 3.2 Simulaciones mediante FDTD.

Para llevar a cabo las experiencias necesarias para realizar este proyecto, hemos implementado en *MATLAB* una serie de modelos de simulación en 2 dimensiones siguiendo el método de las diferencias finitas, explicado en apartados anteriores.

Los estudios se dividen en distintas partes de simulación temporal y procesamiento de los datos obtenidos.

Cada uno de estos modelos se utiliza para comprobar distintos escenarios en los que se comprobará el correcto comportamiento de la expresión bajo estudio.

### 3.2.1 Cámara de transmisión con una barrera cristalina como elemento separador.

Para la elección de las dimensiones de las cámaras utilizadas se han utilizado las medidas de una de las cámaras de transmisión a escala que se encuentran en la Escuela Politécnica de Valencia (Campus de Gandía) [6].

Las dimensiones de los recintos de la sala son las siguientes:

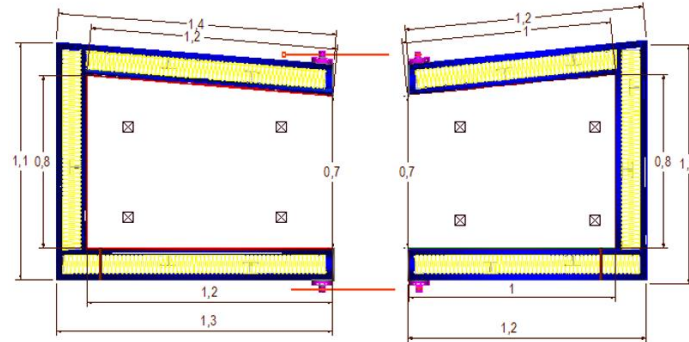


FIGURA 12: PLANTA DE LOS RECINTOS DE LA CÁMARA DE TRANSMISIÓN A ESCALA [6]

En el momento de la creación del dominio de trabajo para la simulación, se determina la posición de las superficies exteriores.

La anchura del elemento separador se ha determinado de 20 cm en el programa escrito. Este espacio será rellenado por una serie de *cilindros* en 2 dimensiones separados entre ellos por un parámetro de red  $\alpha$  introducido en la inicialización del programa.

El número de cilindros utilizados dependerá del parámetro de red y, por lo tanto, de la frecuencia en la que se quiera centrar el cristal.

Por ejemplo, en el caso de querer diseñar una barrera centrada en 4000 Hz con un factor de llenado de 0,9 necesitaremos un total de 5x17 cilindros, cada uno con un radio de 1,92 cm, para rellenar los 0,7x0,2 m<sup>2</sup> de separación entre los dos recintos.

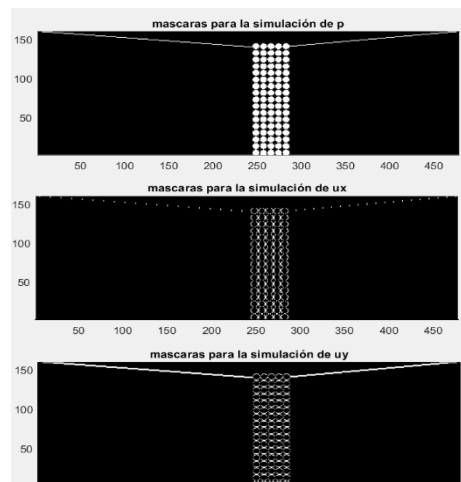


FIGURA 13: MÁSCARAS DE TRABAJO PARA EL CÁLCULO DE LA PRESIÓN ACÚSTICA Y LA VELOCIDAD DE PARTÍCULAS EN EL EJE X Y EL EJE Y

El ejemplo anterior está realizado con un incremento espacial de  $0,5\text{ cm}$ , resultando en una malla de trabajo de  $480 \times 160$  puntos. El espaciado puede modificarse también en la inicialización del programa.

Para simplificar el comportamiento del modelo, a la hora de determinar la absorción producida por las paredes de la cámara, se definirá únicamente en las condiciones de contorno correspondientes a las paredes paralelas y perpendiculares a los ejes  $x$  e  $y$ . Las paredes oblicuas situadas en la parte superior del dominio serán consideradas completamente rígidas ante el sonido.

La fuente que generará la señal excitadora se situará en el recinto emisor (el recinto situado a la izquierda) en las coordenadas  $x = 0,2\text{ m}$  y  $y = 0,42\text{ m}$ .

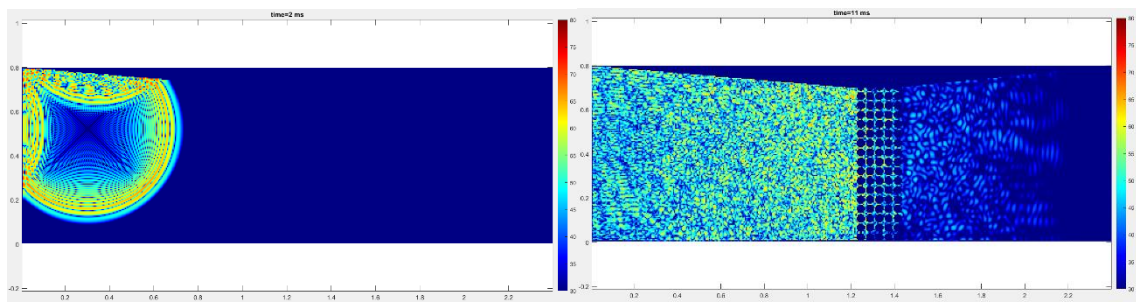


FIGURA 14: ASPECTO DE UNA SIMULACIÓN A LOS 2 MS(IZQUIERDA) Y A LOS 11 MS

En cada uno de los dos recintos se determinarán cinco posiciones de micrófono bien distribuidas por todo el espacio, para poder obtener unos resultados fiables en la fase de análisis de los resultados.

### 3.2.2 Cámara de transmisión con una PML como elemento separador.

Utilizando la misma geometría que en el caso anterior, podemos intentar estudiar condiciones algo más sencillas, en las que podremos obviar ciertos parámetros físicos para obtener expresiones más simples y comparar el funcionamiento de estas a un nivel más básico.

Para ello se ha implementado un modelo de simulación idéntico al anterior, con la diferencia de que, en lugar de una barrera cristalina, se sitúa entre los recintos una capa completamente absorbente.

Gracias a esto, podemos determinar un índice de transmisión concreto. Esto lo realizamos indicando al programa que un corte vertical en el recinto emisor, será reproducido directamente en el recinto receptor, pero multiplicado por el factor de transmisión deseado.

El corte vertical que funciona como fuente en el recinto receptor será una fuente transparente, para así garantizar que se tiene bajo control la absorción producida por el elemento separador.

La transmisión se realiza únicamente del recinto emisor al recinto receptor. La energía no vuelve a transmitirse a través del elemento separador hacia el recinto emisor. Este hecho no resulta una inconveniencia a la hora de obtener los resultados a partir de las expresiones estudiadas.

Esto nos ayudará a comprobar si las expresiones utilizadas pueden obtener con fiabilidad el nivel de reducción acústica que debería resultar de manera teórica.



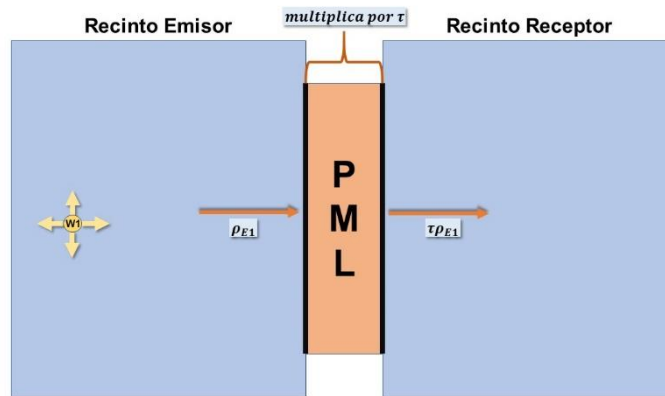


FIGURA 15: ESQUEMA DE LA SIMULACIÓN CON UNA PML COMO ELEMENTO SEPARADOR

### 3.2.3 Cámara de transmisión con material denso como elemento separador.

De la misma manera que en los casos anteriores, realizamos un modelo de cámara de transmisión en dos dimensiones, solo que esta vez se define como elemento separador una capa con una densidad y un módulo de bulk determinados para comprobar el comportamiento de las expresiones ante materiales que no tienen bandas prohibidas de energía.

Además, así podemos comprobar si la expresión propuesta devuelve resultados que se ajusten a la ley de masas, que nos sirve para aproximar el aislamiento producido por paredes simples conociendo las dimensiones y las propiedades físicas de estas.

### 3.2.4 Simulación para el cálculo de las absorciones del recinto.

Para obtener los valores correspondientes a la absorción producida por las paredes del recinto receptor, se modifica el modelo, situando la fuente en el interior del recinto receptor en lugar de el emisor y cerrando la abertura entre ambos con una pared completamente reflectante.

A continuación, se ejecuta la simulación durante un tiempo suficiente para tener una reverberación con una caída a partir de la cual podemos calcular correctamente el tiempo que tarda la energía de la sala en caer 60 dB, obteniendo así el tiempo de reverberación  $T_{60}$  para cada banda de frecuencia estudiada.

Una vez obtenido este valor, podemos calcular a partir de la fórmula de Sabine la absorción producida por las paredes del recinto, necesaria después para el cálculo del área de absorción equivalente ( $A$ ).

A continuación, podemos calcular cómo afecta la colocación de una barrera cristalina como elemento separador. Para ello, se retira la capa reflectante en el espacio separador y se sitúa en su lugar una barrera con la disposición de red que se desee.

El recinto emisor se sustituirá por una PML, provocando así que la energía que atraviese la barrera no vuelva al recinto receptor. De esta manera estamos tratando la barrera cristalina como una pared más del recinto, produciendo pérdidas en la sala y afectando al tiempo de reverberación.

Tras calcular el tiempo de reverberación de nuevo se obtienen nuevos valores de la absorción de la sala, que será la misma que en la simulación con el recinto cerrado, pero con el añadido de las pérdidas producidas por la nueva barrera.

La energía que se pierde al atravesar esta barrera será toda aquella que no se refleje, por lo tanto, el coeficiente de absorción obtenido será la suma del coeficiente de transmisión  $\tau$  y el coeficiente de la disipación causada por el elemento separador.

De esta manera podemos calcular los coeficientes necesarios para la obtención de los índices de reducción sonora, tanto de la fórmula ISO como de la propuesta de este proyecto.

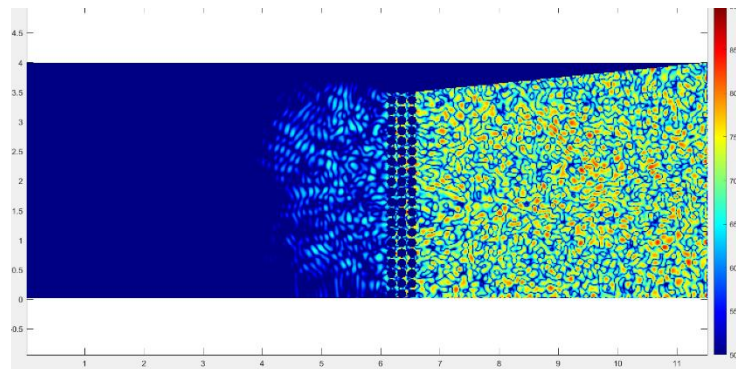


FIGURA 16: SIMULACIÓN CON PML EN EL RECINTO IZQUIERDO PARA CÁLCULO DE TR

### 3.2.5 Medida de *Insertion Loss* en tubo de onda plana.

El *Insertion Loss* es un parámetro que mide la diferencia en la transmisión de energía a través de un dominio antes y después de introducir algún elemento absorbente o aislante.

La forma más sencilla de obtenerlo es creando un modelo de simulación en forma de tubo en dos dimensiones.

De esta manera podemos situar en el interior del tubo una única fila de elementos difusores para así observar cómo evita la transmisión del sonido su versión más simple y así saber qué esperar de las simulaciones en la cámara de transmisión completa.

Para el diseño del tubo ha de tenerse en cuenta el parámetro de red del cristal que se quiera analizar, ya que con esto se intenta simular el comportamiento de una red de dimensiones aproximadamente infinitas.

Por ello, la altura seleccionada para el tubo diseñado será el parámetro de red.

La longitud del tubo ha de ser la suficiente como para que la onda que incida sobre el elemento separador se pueda considerar una onda plana.

A ambos extremos del tubo se situarán PMLs para así evitar cualquier reflexión que no esté directamente relacionada con el elemento separador. Tengamos en cuenta que lo que buscamos es obtener únicamente cómo este actúa sobre la señal.

La información se medirá desde un micrófono situado en la mitad más alejada con respecto a la fuente.

El procedimiento a seguir para la obtención del IL constará de dos fases: en primer lugar, se realiza una simulación con el tubo vacío, para así obtener los niveles que recibe el punto de grabación directamente desde la fuente. A continuación se repite el proceso introduciendo en el interior del tubo los elementos difusores deseados.

De esta manera, podemos comprobar la diferencia de niveles entre la simulación sin la muestra en su interior y una vez se introducen los elementos de separación.

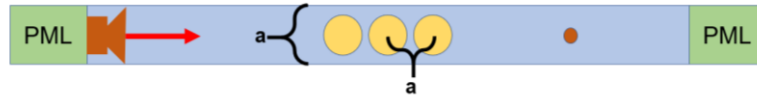


FIGURA 17: ESQUEMA DE DISPOSICIÓN DEL TUBO PARA EL CÁLCULO DEL IL

### 3.3 Procesado de la señal.

#### 3.3.1 Señal de excitación utilizada y obtención de niveles de presión.

La señal de excitación utilizada en las simulaciones en cámara de transmisión es una onda impulsiva de Ricker. Esta señal se caracteriza por ser de muy corta duración y ocupar una banda de frecuencia muy extensa, pudiendo ser centrada en una frecuencia específica.

$$a = \frac{4f}{\sqrt{\pi}/2} \quad (56)$$

$$w(t) = -\left( e^{-\frac{a^2 t^2}{2}} (a^2 t^2 - 1) \right) \quad (57)$$

Donde;

- $w(t)$  es la onda de Ricker.
- $t$  es el tiempo en segundos.
- $f$  es la frecuencia central de la señal, en Hz.

Esto nos ayuda a realizar simulaciones en el dominio del tiempo en el mayor rango de frecuencias posibles, obteniendo simultáneamente información de todas ellas.

Se ha decidido optar por la onda de Ricker por su facilidad de implementación. Otras ondas impulsivas como la onda de Ormsby o la de Klauder tienen una respuesta en frecuencia mucho más plana, pero su implementación es bastante más compleja [7].

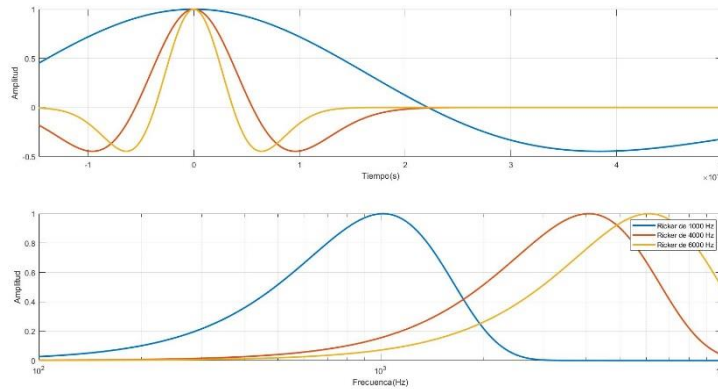


FIGURA 18: ONDAS DE RICKER CENTRADAS A 1000, 4000 Y 6000 HZ.

Las simulaciones se realizarán durante un tiempo definido en segundos, que se traducirá en muestras tomadas mediante el espaciado temporal definido en la creación del modelo FDTD.

Durante este tiempo, se irá guardando la información de presión acústica calculada en cinco puntos del recinto emisor y cinco puntos del recinto receptor. Con esto, podemos posteriormente realizar el promediado energético por frecuencias necesario para tener un resultado adecuado de los niveles de presión sonora por bandas.

Se ha decidido trabajar con bandas de  $1/12$  y  $1/3$  de octava, al ser más útil un promediado más fino para la visualización del comportamiento en las bandas de energía prohibidas de los cristales que un análisis por octavas.

Una vez se realiza las simulaciones, se realiza un filtrado por bandas para cada uno de los 10 micrófonos utilizados. Tras esto, se realiza un promediado energético para cada una de esas bandas de los datos del recinto emisor y del receptor.

De esta manera obtenemos los niveles de presión sonora  $L_1$  y  $L_2$ , que utilizamos posteriormente en las expresiones para el cálculo del índice de reducción acústica.

### 3.3.2 Obtención del tiempo de reverberación.

Al tratarse de una señal impulsiva en el dominio del tiempo es relativamente fácil obtener el valor del tiempo de reverberación de un modelo simulado mediante este método.

Se recogen datos durante un tiempo suficiente como para que la caída de nivel provocada por la absorción de los contornos del modelo sea útil para un correcto análisis de su pendiente.

Se filtra la señal obtenida en bandas de tercio de octava, obteniendo así la respuesta al impulso para cada una de las bandas de frecuencia.

A continuación, se obtiene la envolvente de la respuesta y se suaviza para así obtener un resultado lo más lineal posible.

Este proceso se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. Se calcula la envolvente de la señal filtrada realizando una transformada de Hilbert y obteniendo el valor absoluto de la misma.

2. Para realizar un primer suavizado, se le aplica a la envolvente un filtro de promediado, reduciendo la prominencia de los picos de esta.
3. Se aplica una integración de Schroeder para suavizar aún más la respuesta del sistema, además de realizar la conversión a decibelios, tomando el valor máximo como 0 dB.

Tras procesar la señal de esta manera podemos obtener finalmente el tiempo de reverberación de la señal para cada banda de frecuencia.

Dado que la obtención del  $T_{60}$  puede dar lugar a tiempos de procesamiento muy elevados, en la mayoría de los casos optaremos por calcular el  $T_{20}$ , siendo un indicador generalmente acertado del tiempo de reverberación dado que son casos en los que la caída de nivel de presión sonora tiende a ser bastante lineal.

## 4. Resultados de las simulaciones.

En este apartado se realizan las simulaciones pertinentes para demostrar la validez de la expresión desarrollada en el capítulo anterior.

Para ello se realizarán simulaciones con distintas configuraciones del elemento separador de la cámara de transmisión.

### 4.1 Simulaciones con un coeficiente de transmisión definido.

Realizamos varias simulaciones cambiando el coeficiente de transmisión que multiplicará la energía incidente en un lado de la separación para emitirla en el lateral correspondiente al espacio receptor.

El objetivo de estas simulaciones es comprobar que la expresión desarrollada en este proyecto se aproxima a la definición del índice de reducción acústica:

$$R = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad (58)$$

El valor de  $\tau$  se introduce en el programa y será el índice que multiplicará a la energía incidente.

Este coeficiente tendrá un valor comprendido entre 0 y 1, pero preferiblemente se seleccionará un valor muy pequeño, para poder obtener niveles cómodos de visualizar.

Realizamos una primera simulación tomando como coeficiente de transmisión  $\tau = 10^{-5}$ . Con este valor esperamos obtener un índice de reducción acústica de 50 dB atendiendo a la definición de este.

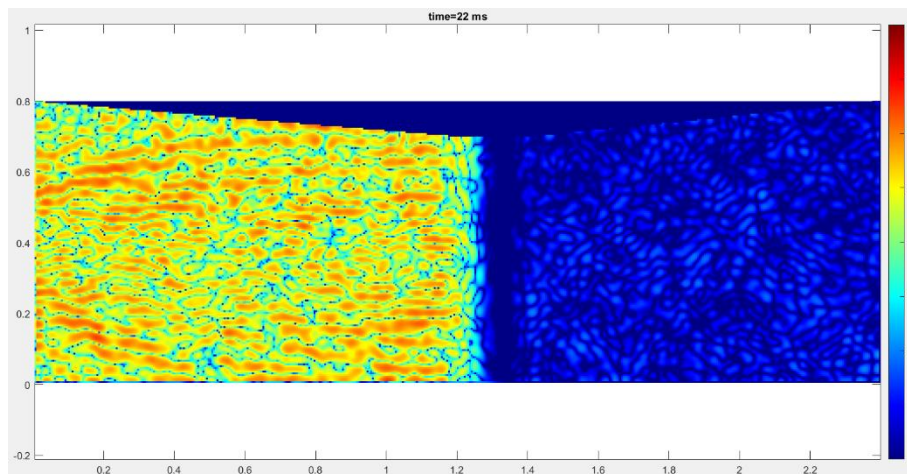


FIGURA 19: VISUALIZACIÓN DE LAS SIMULACIONES CON TAU FIJADO

Se puede observar a simple vista que la diferencia de presión sonora entre un recinto y otro es de aproximadamente 50 decibelios, comprobando que el modelo de simulación se ajusta a lo esperado.

Se observa la absorción producida por la PML, que nos ayuda a eliminar las reflexiones producidas por el elemento separador, dejándonos únicamente con su capacidad para transmitir o disipar el sonido.

Tras el análisis de los datos obtenemos lo siguiente para este primer caso:

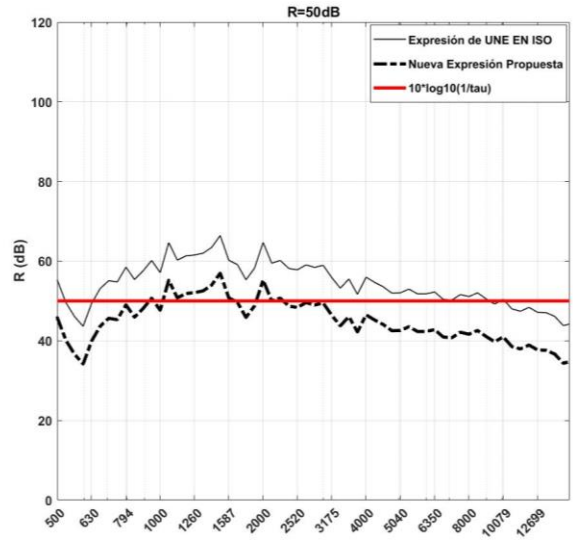


FIGURA 20: RESULTADOS PARA R ESPERADO DE 50 DB

Podemos observar que la expresión propuesta en este proyecto para la obtención del índice de reducción acústica se aproxima correctamente al resultado esperado, sobre todo en frecuencias medias entre 600 y 3000 Hz. A partir de ese punto realiza una pequeña caída de unos 10 dB.

Realizamos una segunda simulación de la misma manera, pero esta vez con un coeficiente de transmisión aún más pequeño:  $\tau = 10^{-7}$ . Esperamos de aquí un índice de reducción sonora de 70 dB. Tras simular el modelo obtenemos el siguiente resultado:

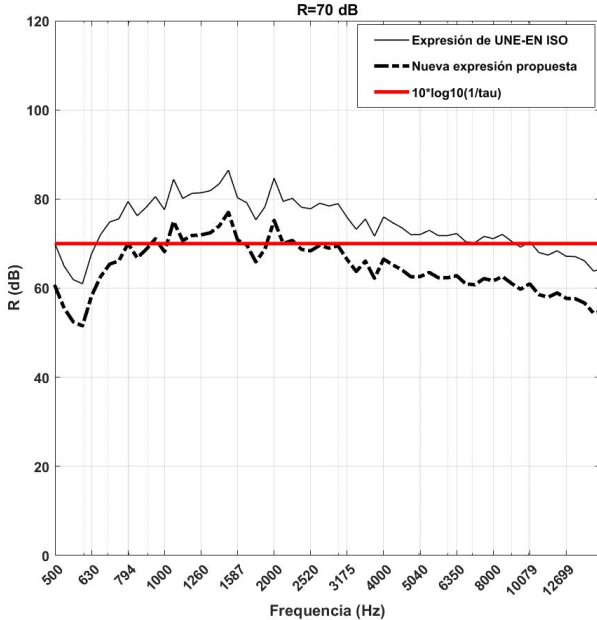


FIGURA 21: RESULTADO PARA R ESPERADO DE 70 DB

Observamos de nuevo una correcta aproximación al nivel esperado en frecuencias medias, con una ligera caída a partir de 4000 Hz.

Sin embargo, lo interesante es observar qué ocurre cuando la transmisión es muy alta y, por lo tanto, el índice de reducción acústica es bajo.

Por ejemplo, tomaremos un índice de transmisión  $\tau = 0,2$ . De esta manera, el índice de reducción esperado sería de aproximadamente 7 dB.

Tras realizar la simulación obtenemos los siguientes resultados:

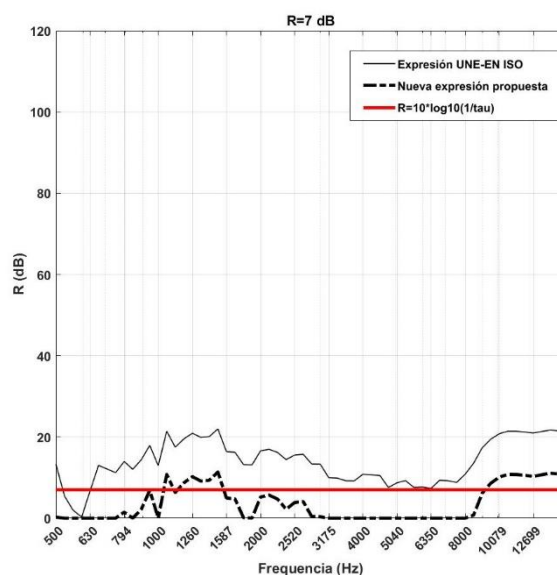


FIGURA 22: RESULTADO PARA R ESPERADO DE 7 DB

Podemos observar en este caso como la expresión desarrollada en este proyecto no sobrepasa casi en ningún momento el valor esperado por la teoría, mientras que la expresión utilizada en la normativa UNE-EN ISO alcanza a exceder en 14 decibelios en algunas de las frecuencias estudiadas al nivel calculado mediante la definición del índice de reducción acústica.

A partir de los 3000 Hz y hasta los 8000 Hz, el nivel devuelto por la expresión es de 0 dB o menor, ya que al estar próximos los niveles del recinto emisor y el receptor, el factor de la expresión llamado  $C$  tiende a valores muy bajos, como ya se ha explicado anteriormente.

#### 4.1.1 Comparativa general.

Para obtener una visualización general y más clara de lo ocurrido en este caso en el que se aplica un coeficiente de transmisión determinado, se han realizado varias simulaciones para una serie de valores de  $\tau$ . Se han representado de forma que se observe cómo varían los resultados obtenidos mediante cada uno de los métodos para una única banda de frecuencias variando el índice de reducción acústica objetivo.

El objetivo es comprobar qué método se ajusta más a la línea recta (en escala logarítmica) formada al comparar el nivel teórico buscado y el nivel medido durante la simulación.



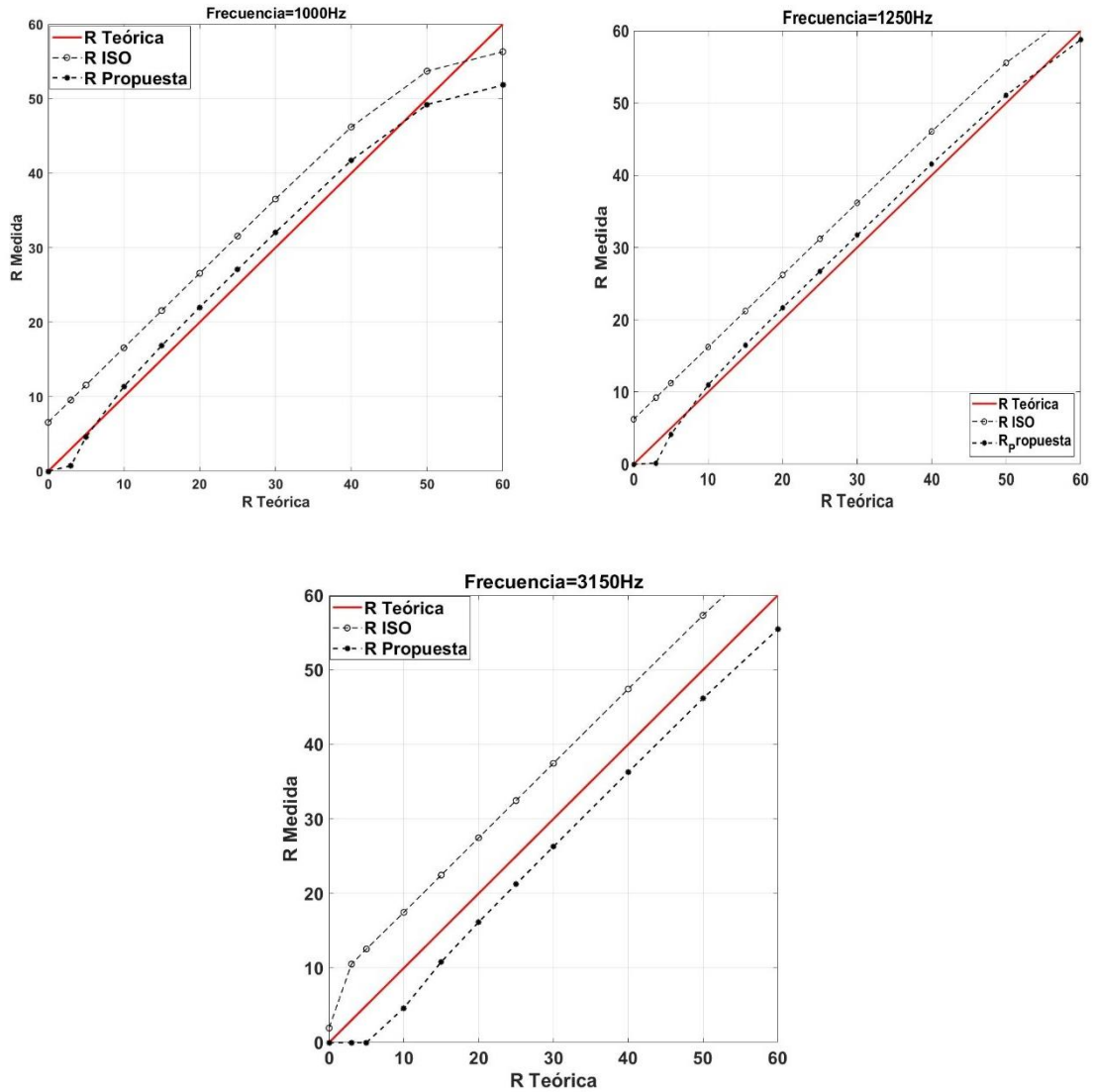


FIGURA 23 ÍNDICES DE REDUCCIÓN SONORA A DISTINTAS FRECUENCIAS

Podemos observar cómo el nivel devuelto de la fórmula de la UNE-EN ISO tiende a dar un valor más alto del que se correspondería con el nivel real.

También se observa como el índice de reducción sonora no tiende a cero cuando debería hacerlo. Sin embargo, sí que lo hace cuando se utiliza la fórmula propuesta en este proyecto.

Cuando obtenemos valores de  $R$  menores a 0 decibelios, los consideraremos como 0, dado que no es realista obtener niveles en el recinto receptor más elevados que en el recinto emisor, por muy bajo que sea el aislamiento producido por el elemento separador.

En la siguiente gráfica se muestran los resultados para varios valores de  $\tau$  y varias frecuencias simultáneamente:

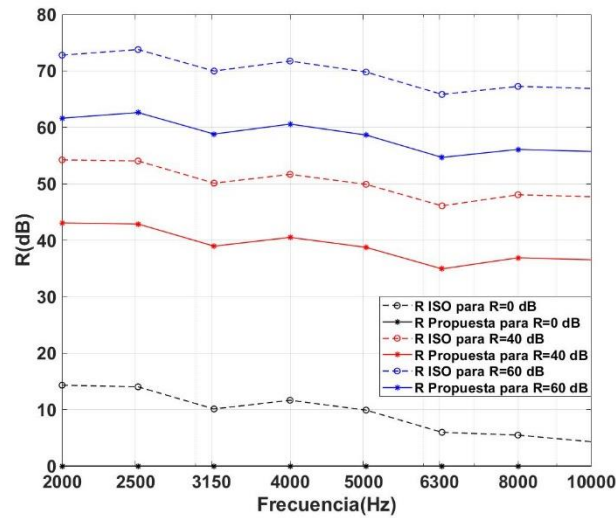


FIGURA 24: COMPARATIVA GENERAL

## 4.2 Simulaciones con un elemento separador denso.

Generamos un modelo en el que, como elemento separador, definiremos una capa del grosor que deseemos que tendrá las propiedades físicas del material que deseemos simular.

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo para los casos en los que el elemento separador seleccionado produzca reducción acústica en todas las frecuencias estudiadas, se comparará el nivel de  $R$  obtenido mediante la expresión desarrollada en este proyecto con la recta producida por la ley de masas del aislamiento acústico.

La ley de masas aproxima la reducción acústica, en decibelios, producida por una capa simple de un material de una densidad y dimensiones conocidas.

La expresión más simplificada para la obtención de este parámetro es:

$$R = 20 \log_{10}(M \cdot f) - 43 \quad (59)$$

Donde:

- $M$  es la masa del elemento separador (en  $Kg$ ).
- $f$  es la frecuencia a la que se quiera obtener el índice de reducción acústica (en  $Hz$ ).
- $R$  es el índice de reducción acústica (en decibelios).

Esta expresión nos proporciona una línea recta con cierta pendiente. En un caso real, el nivel obtenido seguirá aproximadamente la pendiente de esa línea teórica, pero se observarían caídas de reducción acústica en las llamadas “frecuencias de amortiguación”, en las que factores como las dimensiones del elemento separador pueden influir en la efectividad del material como aislante.

Definimos en el modelo un elemento separador formado por agua. La velocidad del sonido en el agua y la densidad del material las definimos como:

- $\rho = 997 \text{ Kg}/\text{m}^3$ .
- $c = 1480 \text{ m}/\text{s}$ .

En este primer ejemplo se sitúa una capa de 5 cm de agua como elemento separador. El espaciado temporal elegido para esta simulación es  $dh = 0,005 \text{ cm}$  y el tiempo simulado será de 2 segundos.

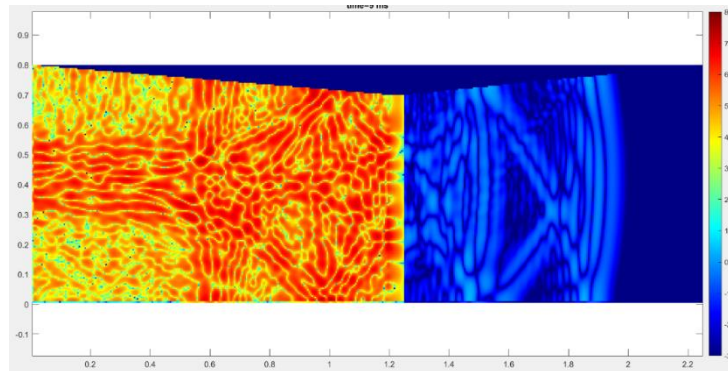


FIGURA25: VISUALIZACIÓN DE LA PRIMERA SIMULACIÓN CON AGUA COMO ELEMENTO SEPARADOR

Tras realizar la simulación completa, procedemos a realizar el cálculo del índice de reducción acústica a partir de la expresión de la ley de masas que se ha descrito anteriormente.

Mostramos en una gráfica logarítmica el valor obtenido para cada frecuencia. Junto a este valor, se muestran los niveles que se obtienen de la simulación a partir de la fórmula para la obtención del índice de reducción acústica de la norma UNE-EN ISO 140-3 y el valor obtenido a partir de la expresión propuesta en este proyecto.

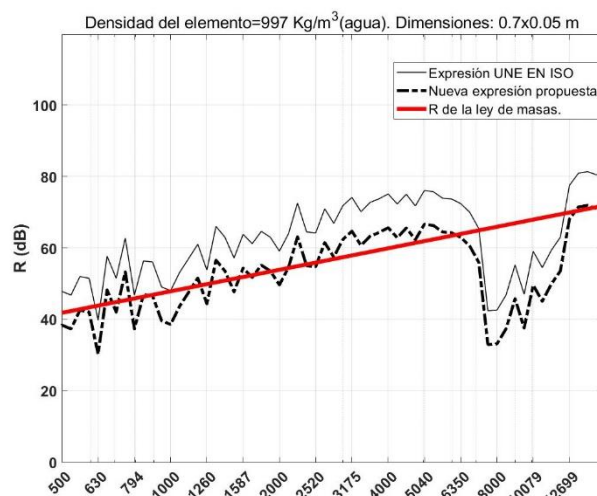


FIGURA 26: COMPARACIÓN DE AMBOS MÉTODOS CON LA LEY DE MASAS. ELEMENTO DE 5 CM DE AGUA

Podemos observar una aproximación muy acertada de la expresión descrita en este trabajo al valor teórico obtenido por la ley de masas. A lo largo de todo el espectro de frecuencias estudiado la pendiente de ambas expresiones es constante, a excepción de la banda entre 7000 y 11000 Hz, en la que podemos observar una caída importante en el aislamiento acústico.

Realizamos una segunda simulación, para comprobar la estabilidad de los resultados. En este caso el material utilizado será un material ficticio con sus propiedades físicas definidas por:

- $\rho = 350 \text{ Kg/m}^3$ .
- $c = 777 \text{ m/s}$ .

Se sigue el mismo procedimiento de simulación que en el caso anterior para obtener la comparativa de las expresiones que definen el índice de reducción acústica con la ley de masas.

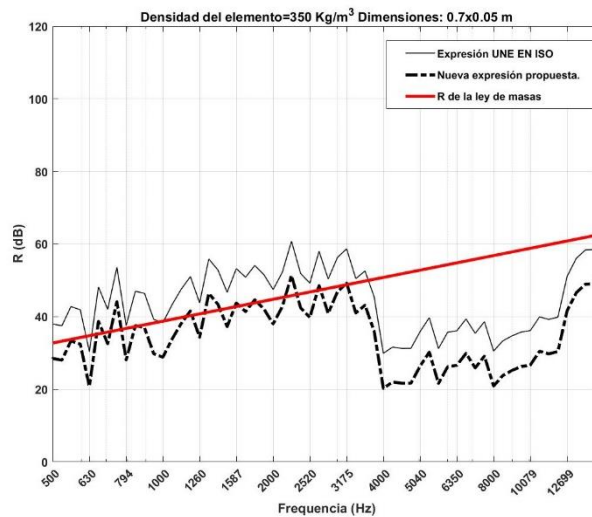


FIGURA 27 COMPARACIÓN DE AMBOS MÉTODOS Y LA LEY DE MASAS. ELEMENTO FICTICIO DE 5 CM DE ESPESOR.

Observamos de nuevo una adecuada aproximación de la expresión propuesta al nivel teórico esperado a partir de la ley de masas. Sobre todo para frecuencias inferiores a los 4000 Hz.

Realizamos una última simulación. En este caso volvemos a utilizar agua como elemento separador, solo que en esta ocasión el espesor de la capa será de 1 cm. Las condiciones de simulación seguirán siendo las mismas, obteniendo los siguientes resultados:

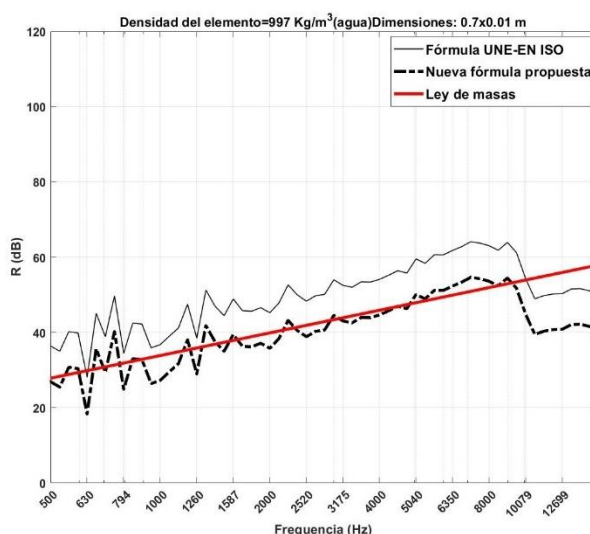


FIGURA 28 COMPARACIÓN DE AMBOS MÉTODOS CON LA LEY DE MASAS. ELEMENTO DE 1 CM DE AGUA.

Observamos de nuevo una aproximación muy acertada al resultado esperado por la fórmula de la ley de masas.

Podemos afirmar entonces que la expresión propuesta en este proyecto es útil para casos en los que el aislamiento se produce en todo el espectro de frecuencias bajo estudio.

### 4.3 Resultados con barreras cristalinas.

Para este último caso de simulación se ha re-escalado la sala para que tenga sus dimensiones reales, para así evitar problemas a la hora de la configuración de los ejes de representación

Se realizaron varias simulaciones para distintas disposiciones de barreras cristalinas, cada una con una banda prohibida de energía centrada en una frecuencia determinada y con un factor de llenado definido en el propio programa.

Las simulaciones pasan por tres fases definidas previamente.

En primer lugar, se calcula el tiempo de reverberación del recinto receptor y la influencia de la colocación de la barrera en la misma. De esta manera podemos obtener el área de absorción equivalente del modelo de simulación, que es necesario para el cálculo del índice de absorción sonora.

A continuación, se realiza un cálculo del *Insertion Loss* para el estudio de una única hilera del elemento a estudiar, y así podemos hacernos una idea de cuál debe ser aproximadamente el resultado esperado.

Por último, se ejecuta la simulación en cámara de transmisión, obteniendo los niveles de reducción acústica finales para cada uno de estos casos.

**Barrera conformada por 3 columnas de cilindros. *Band Gap* en 500 Hz y factor de llenado de 0,68:**

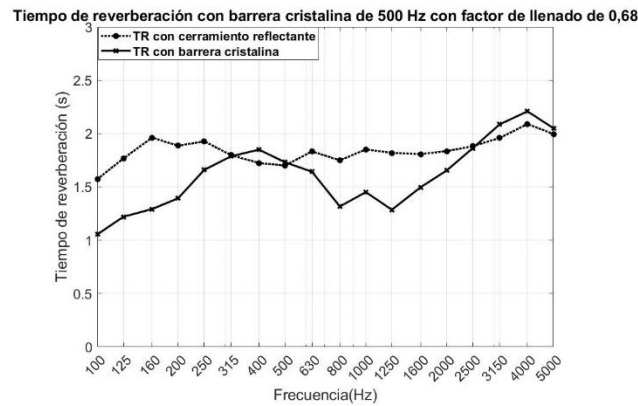


FIGURA 29: TR PARA LA BARRERA CENTRADA EN 500 HZ

Podemos observar en el estudio del tiempo de reverberación que, al emplazar el elemento separador, este tiende a disminuir de manera importante, a excepción de la banda de frecuencias en torno a 500 Hz, en la cuál debemos encontrar un nivel muy bajo de transmisión a la sala contigua.

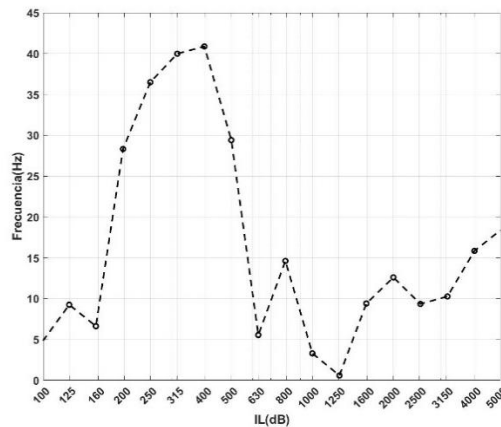


FIGURA 30: IL PARA BARRERA DE 500 HZ

Puede observarse con la misma claridad dónde encontraremos la banda de frecuencia en la que no obtendremos transmisión a través de la barrera en la simulación del *Insertion Loss*. Vemos que tenemos un alto nivel de pérdidas cerca de la banda de frecuencias en la que queremos que nuestra barrera esté centrada.

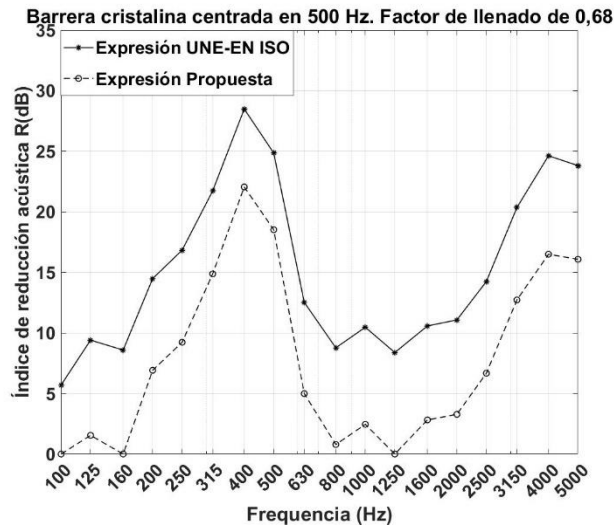


FIGURA 31: ÍNDICE DE REDUCCIÓN ACÚSTICA. BARRERA A 500 HZ

Realizando la simulación en cámara de transmisión obtenemos los niveles del índice de reducción sonora, tanto mediante la normativa UNE-EN ISO 140-3 [1] como mediante el método desarrollado en el proyecto.

Podemos observar que, en las bandas en las que se espera una reducción acústica baja, el nivel devuelto por la nueva fórmula es aproximadamente 0 dB.

**Barrera conformada por 5 columnas de cilindros. Band Gap en 1000 Hz y factor de llenado de 0,65:**

Probamos a realizar un modelo moviendo la banda prohibida de energía a los 1000 Hz y situando más columnas de elementos difusores en la barrera. Realizando los mismos cálculos que en el apartado anterior, obtenemos los siguientes resultados:

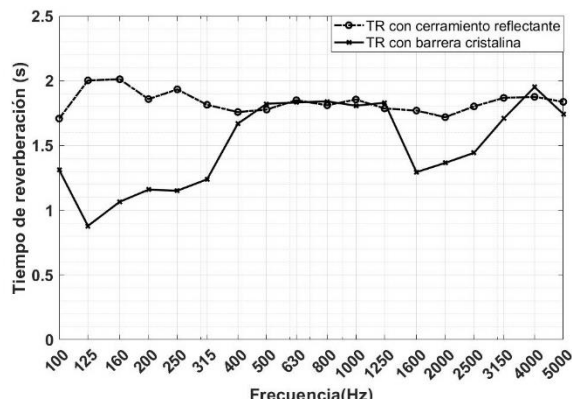


FIGURA 32: TIEMPO DE REVERBERACIÓN PARA PRIMER CASO A 1000 HZ

Observamos de nuevo cómo el tiempo de reverberación apenas varía con respecto a la sala sellada en la banda de energía prohibida que se ha seleccionado.

El *Insertion Loss* obtenido para este caso tiene la siguiente forma:

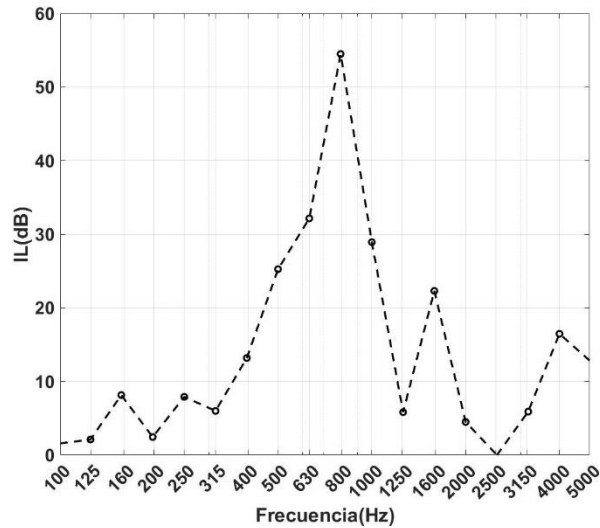


FIGURA 33: INSERTION LOSS PARA BARRERA DE 1000 HZ

Finalmente, el índice de reducción acústica aparece representado como:

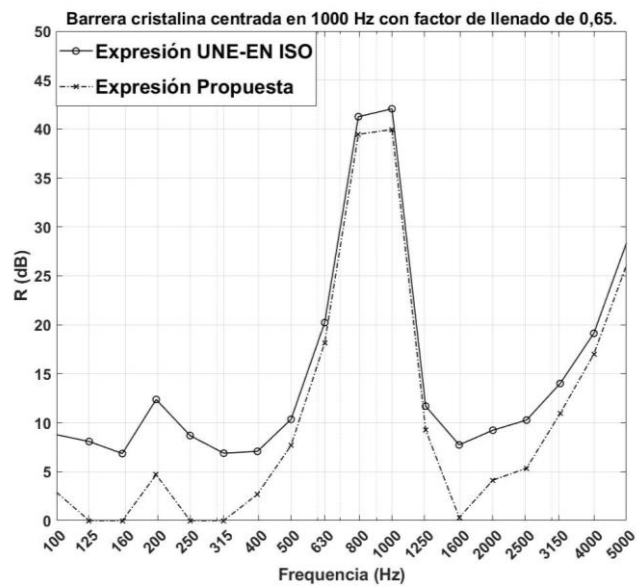


FIGURA 34: R PARA BARRERA DE 1000 HZ. FACTOR DE LLENADO DE 0,65

Observamos de nuevo una aproximación muy buena a valores elevados de reducción acústica. Al mismo tiempo tenemos niveles que tienden a cero en las bandas en las que la transmisión a través del cristal tiende a ser muy elevada.



**Barrera conformada por 3 columnas de cilindros. *Band Gap* en 1000 Hz y factor de llenado de 0,5:**

Para este caso realizaremos un diseño similar al anterior con la diferencia de que tendremos un factor de llenado algo menor y un menor número de filas con las que trabajar.

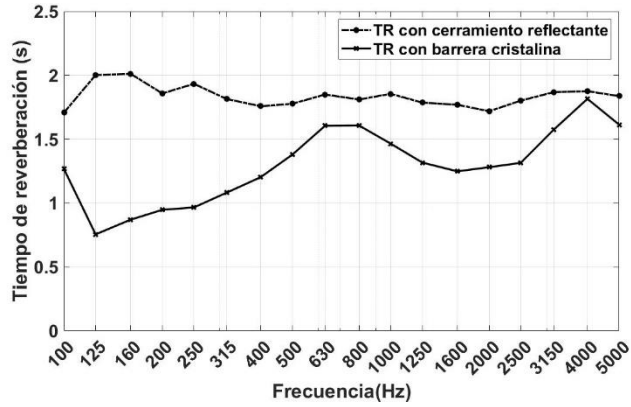


FIGURA 35: TIEMPO DE REVERBERACIÓN PARA SEGUNDA BARRERA DE 1000HZ

Observamos en este caso que, debido al bajo factor de llenado, la cantidad de energía que se pierde por la barrera con respecto a la sala sellada es bastante elevada. Aun así, seguimos observando una banda con mayor reflexión cercana a la frecuencia de diseño.

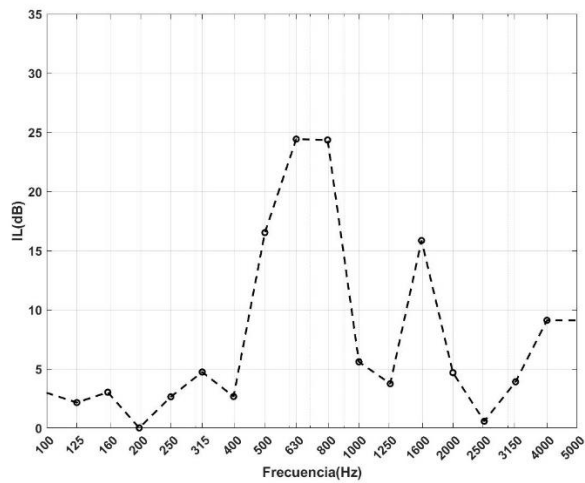


FIGURA 36: IL PARA BARRERA DE 1000 HZ

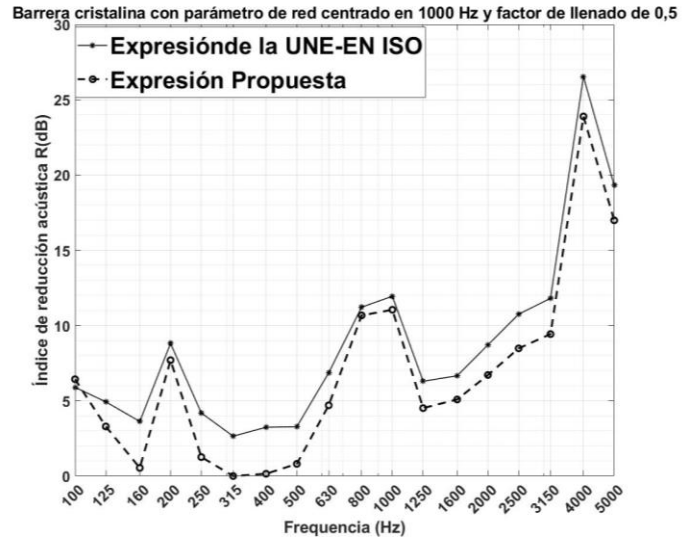


FIGURA 37: REDUCCIÓN ACÚSTICA PRODUCIDA POR BARRERA A 1000 HZ

Nuevamente observamos una especial reducción acústica centrada en la banda prohibida de energía, además de un valor cercano a los 0 decibelios en bandas en las que la transmisión a través del elemento separador es prácticamente completa.

## 5. Conclusiones y líneas futuras.

El objetivo del proyecto era obtener una fórmula que, para niveles de reducción acústica cercanos a cero, devolviese cero decibelios de nivel de reducción.

Con las simulaciones y los resultados matemáticos a mano, podemos decir que este objetivo se ha cumplido, habiendo así obtenido una expresión que nos aproxima para niveles de reducción altos los resultados que obtendríamos con los métodos utilizados hasta ahora y, para aislamientos acústicos prácticamente inexistentes, nos proporciona niveles realistas de reducción acústica.

Esto podría ser útil para la caracterización de las propiedades acústicas de todos aquellos materiales que puedan resultar “transparentes” para ciertas bandas de frecuencia.

El siguiente paso para la compleción de este proyecto, será comprobar el funcionamiento de esta nueva expresión a nivel físico en condiciones reales. O bien en cámara a escala o bien en una cámara a tamaño real.

Al realizar estas experiencias a nivel experimental, podremos aproximar con mayor fiabilidad un caso real, teniendo mayor facilidad para la obtención de parámetros como la absorción producida por el elemento separador bajo estudio, y comprobar la repercusión de estos parámetros en la expresión propuesta.

Además, habrá que realizar un estudio de la incertidumbre provocada por los distintos factores que influyen en los resultados, pudiendo comparar así de manera más fiel los distintos métodos estudiados.

Una vez se realicen estos estudios y se compruebe la validez en físico de la expresión propuesta en este proyecto, podremos confirmar la utilidad de este método para la obtención del índice de reducción acústica.

También tendría que estudiarse la propia expresión de la fórmula, buscando la posibilidad de simplificarla de alguna manera, desarrollando alguno de los parámetros de tal manera que resulte lo menos complicada de aplicar posible.

## Bibliografía

- [1] ISO, Acústica. 140-3. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3. Medición en laboratorio del aislamiento al ruido aéreo de los elementos de construcción., 1995.
- [2] B.-E. 1793-2, «Road traffic noise reducing-Test method for determining the acoustic performance,» bsi, 2012.
- [3] E. D. O. Cancino, «Evaluación de la pérdida por inserción de una barrera acústica aplicada en un proyecto lineal,» Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile, 2002, pp. 20-21.
- [4] W. Friedrich, P. Knipping y M. Laue, «Sitzungsber. K. Bayer. Akad. Wiss. Math. Phys. Kl.,» pp. 302-322, 192.
- [5] W. L. Bragg, «Diffraction of short electromagnetic waves by a crystal,» *Proc. Cambridge Philos.*, vol. 17, pp. 43-57, 1913.
- [6] R. A. Navarro, «Diseño y modelado de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido 2D para ruido de ferrocarril,» Agosto 2016.
- [7] K. Yee, «Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, nº 3, pp. 302-307, Mayo 1966.
- [8] J. Redondo, R. Picó y T. J. Cox, «Prediction of the Random-Inidence Scattering Coefficient Using a FDTD Scheme,» *Acta Acústica united with Acustica*, Noviembre 2009.
- [9] J. V. T. Romero, «Diseño y construcción de una cámara de transmisión acústica a escala,» 2 Septiembre 2011.
- [10] H. Ryan, «Ricker, Ormsby, Klauder, Butterworth-A Choice of Wavelets,» *Hi-Res Geoconsulting*, p. 9, 1994.