

ALGORITMO PARA DETERMINAR EL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE PARTICIONES COMPUESTAS

S. Rendón¹, A. Ladino²

¹ Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
{sararenblandon@hotmail.com}

² Instituto para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC) Universidad Politécnica de Valencia
{anlave@doctor.upv.es}

Resumen

Se ha desarrollado un algoritmo en Matlab con interfaz de usuario para determinar la pérdida por transmisión (TL, por sus siglas en inglés), el STC (*Sound Transmission Class*) y el índice de reducción acústica (R) de particiones compuestas por n cantidad de particiones simples, dobles o de lámina doble capa. El método utilizado para el cálculo de TL y STC es el descrito por R. Barron en su libro *Industrial Noise Control and Acoustics*. El cálculo de R se realizó con base en el estándar UNE-EN ISO 10140-2:2010. Para determinar la precisión del algoritmo, se calculó el aislamiento de una partición compuesta por una pared de ladrillo y una ventana doble con cámara de aire, comparando con los resultados de su medición *in situ*, de acuerdo con el estándar UNE-EN ISO 16283-1:2014, y su simulación en 2D con el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés). Se concluye que el algoritmo puede ser utilizado en la fase de diseño para determinar el aislamiento acústico de una partición.

Palabras clave: Pérdida por transmisión (TL), Sound Transmission Class (STC), particiones compuestas, aislamiento acústico, FEM.

Abstract

This paper presents an algorithm to determine Transmission Loss (TL), Sound Transmission Class (STC) and Sound Reduction Index (R) of composite walls with n single-wall, double-wall or two-layer laminate panels. The theory described by Barron in his book “Industrial Noise Control and Acoustics” has been used to estimate TL and STC, and the UNE-EN ISO 10140-2:2010 standard was followed for R. Developed in Matlab, the algorithm was designed to be interacted with using a Graphic User Interface (GUI). In order to establish the accuracy of the algorithm, its estimates were compared against the results of an *in situ* measurement, in which the UNE-EN ISO 16283-1:2014 standard was followed, and a 2D Finite Element Method (FEM) simulation of a composite wall consisting of a brick wall and a double-glass window with air space. It is concluded that the algorithm can be used in the design phase to determine transmission loss for walls.

Keywords: Transmission Loss (TL), Sound Transmission Class (STC), composite walls, sound isolation, FEM.

PACS no. 43.55.Rg, 43.58.Ta

1 Introducción

En el proceso del diseño de aislamiento acústico, se ha podido evidenciar que la configuración de algunos programas para predecir el aislamiento acústico de paredes, pisos y techos, permiten que las particiones contengan únicamente un material por cada superficie, impidiendo realizar cálculos con particiones donde se tienen diferentes materiales en una misma superficie.

A pesar de que en Colombia se regula la emisión de ruido mediante el establecimiento de niveles máximos permitidos en la Resolución 0627 de 2006 [1], se carece, no sólo de normativas para regular la transmisión de ruido a través de las particiones de una edificación, sino también de soluciones de planeación urbanística y control de ruido, ya que no hay regulaciones como, por ejemplo, el Código Técnico de Edificación en España [2] que establezcan los lineamientos para construir con calidad acústica suficiente y teniendo en cuenta los niveles de ruido adecuados según los espacios. Por tanto, el uso de softwares de predicción para el aislamiento acústico no es estrictamente necesario, y se encuentran inconvenientes sobre sonidos indeseados una vez materializados los proyectos, lo que implica más uso de recursos. Así, surge el propósito de comenzar con el desarrollo de un programa que permita obtener resultados precisos y eficientes para el cálculo de la pérdida por transmisión de particiones compuestas por diferentes superficies, con el fin de agilizar el proceso de diseño acústico para este tipo de estructuras e incentivar su planeación.

2 Metodología

La metodología se ha desarrollado en 3 etapas, como se muestra en la figura 1. Como primer paso, el desarrollo del algoritmo en Matlab por medio de la implementación de funciones y haciendo uso de la herramienta GUI. Continuando con la medición *in situ* de un elemento separador ya construido con el fin de observar la aproximación del algoritmo respecto a resultados experimentales, tomando dicha partición como ejemplo de cálculo del algoritmo. Para finalizar, la partición se ha modelado mediante el método de elementos finitos, con el propósito de obtener otro punto de vista para la validación del algoritmo, esta vez, respecto a resultados también calculados computacionalmente e ingresando para los materiales los mismos parámetros utilizados en el ejemplo del algoritmo.

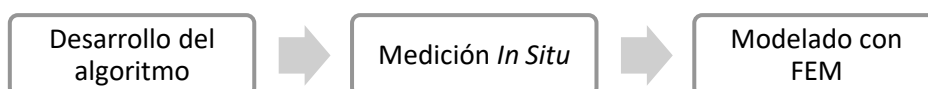


Figura 1 - Metodología para el desarrollo del proyecto.

2.1 Desarrollo del algoritmo

Teniendo en cuenta las propiedades necesarias para el cálculo de cada tipo de partición y la posibilidad de ingresar n cantidad de superficies, se ha desarrollado en Matlab el diseño de la interfaz de usuario haciendo uso de la herramienta GUI. El resultado se observa en la figura 2.

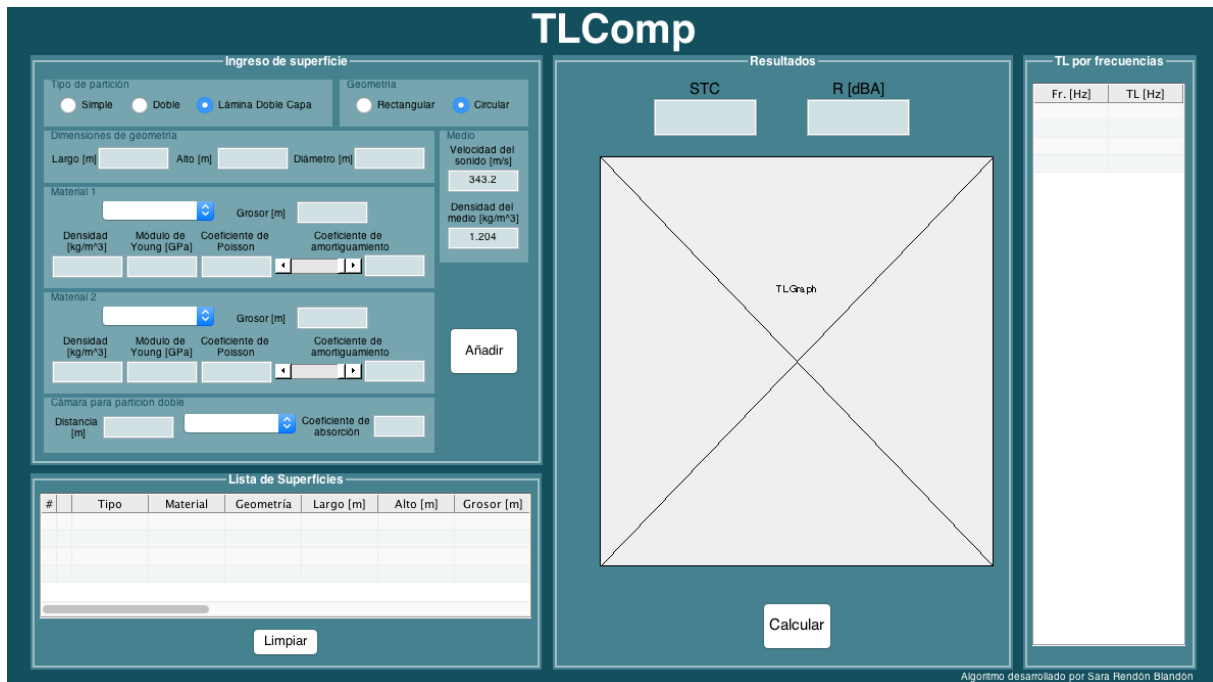


Figura 2 - Interfaz gráfica en MATLAB para el algoritmo.

En la interfaz gráfica, se selecciona el tipo de partición y geometría de la superficie que se desea añadir. Posteriormente, se ingresan las dimensiones de la geometría, se selecciona el tipo de material y se define su grosor. Para el caso de una partición doble se ingresa la distancia de la cámara y se selecciona su material. La velocidad del sonido en el medio y la densidad del medio están predeterminadas con valores que corresponden al aire como medio de transmisión y pueden ser modificados por el usuario. La selección en el menú desplegable de los materiales de las superficies y de la cámara para la partición doble determinan las propiedades del material y el coeficiente de absorción, respectivamente. Esto, a partir de la importación de una librería cuyos valores son tomados de [3-4]. Para ingresar varias superficies, el botón ‘Añadir’ agrega los datos ingresados en la tabla que se observa en la figura 3, donde se guardan todas las especificaciones definidas para cada superficie.

#	Tipo	Material	Geometría	Largo [m]	Alto [m]	Grosor [m]
Diámetro [m]		Superficie [m ²]		Densidad [kg/m ³]		C. Amortiguamiento
Módulo Young [GPa]		C. Poisson		Distancia Cámara [m]		C. Absorción Cámara
Material Cámara						

Figura 3 - Tabla que contiene las especificaciones de la lista de superficies en la interfaz gráfica.

Se establecen funciones para calcular el TL de cada tipo de partición añadida. Dichas funciones retornan como salida un vector con el valor de TL de la partición para las frecuencias de 20 Hz a 20 kHz distribuidas por bandas de tercio de octava. Los algoritmos para cada función se han desarrollado de acuerdo con la teoría indicada por R. Barron [3].

Los resultados de TL, STC y R para la partición compuesta por las n superficies ingresadas, se obtienen seleccionando el botón ‘Calcular’. Los resultados de TL por frecuencia obtenidos se muestran gráfica y numéricamente en el lado derecho de la interfaz de usuario. Los valores de STC y R se imprimen en la

parte superior de la gráfica. También se muestra en la gráfica la curva de referencia S50 utilizada para hacer el cálculo del STC.

2.2 Medición *in situ*

Para realizar la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo de acuerdo con el estándar UNE-EN ISO 16283-1:2014, fue necesario realizar las mediciones de ruido de fondo y tiempo de reverberación estipuladas en el estándar UNE-EN ISO 3382-2:2008. La partición de referencia para la evaluación y ensayo funciona como elemento separador entre la sala de control y la sala de grabación de un estudio. Se toma el recinto con mayor volumen como el recinto emisor y el de menor volumen como el receptor, de acuerdo con el estándar para la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo.



Figura 4 – Vista del elemento separador desde el recinto emisor (izquierda) y el receptor (derecha).

El elemento separador se compone de una pared en bloque de cemento con una ventana de vidrio laminado de 4 mm, cuya construcción es del tipo de una partición doble. Las dimensiones de la partición vistas desde el recinto receptor se pueden observar en la figura 5.

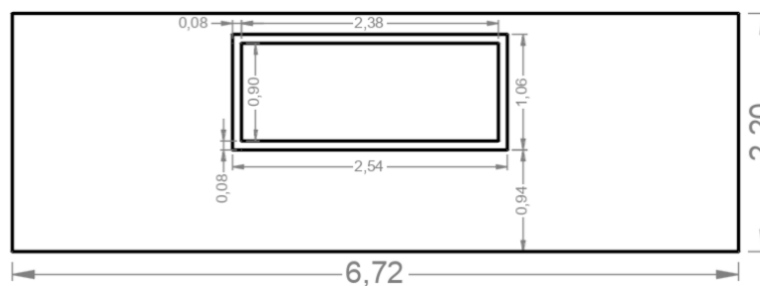


Figura 5 - Dimensiones de la partición y ubicación de la ventana que la compone.

Se ha realizado la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo para el rango de frecuencias entre 100 Hz y 3150 Hz por bandas de tercio de octava, de acuerdo con el estándar. Debido a que ambos recintos tienen volúmenes superiores a 25 m³, se ha seguido el procedimiento por defecto. Se determinaron 2 posiciones de altavoz en el recinto emisor separadas un mínimo de 1,4 m entre ellas, a una distancia mínima de paredes, suelo y techo de 0,5 m y a una distancia mínima del elemento a ensayo de 1 m. Las posiciones de micrófono establecidas fueron 5 en cada recinto para cada una de las dos posiciones de fuente, separadas un mínimo de 0,7 m entre ellas, 0,5 m de los límites del recinto y 1 m de la posición de la fuente en el recinto emisor.

2.3 Modelado con método de elementos finitos

Se ha realizado el modelado 2D en vista de corte del elemento separador bajo estudio mediante el método de elementos finitos. Debido a que el elemento de interés es la partición evaluada en condiciones similares a las planteadas matemáticamente en el algoritmo, se pueden excluir propiedades del recinto como el tiempo de reverberación y las reflexiones. El desarrollo del modelado se ha dividido en tres etapas: pre-procesado, procesado y post-procesado.

En la etapa de pre-procesado, el modelo a simular se define mediante las siguientes propiedades:

- Geometría: corte transversal.
- Dimensión espacial y simetría del problema: 2D.
- Tipo de problema físico: ‘Interacción acústica-sólido, Frecuencia’. Este módulo combina, en el dominio de la frecuencia, el comportamiento de la presión acústica y la mecánica estructural al considerar las vibraciones en el sólido producidas por las ondas de presión en el medio [5].
- Tipo de estudio acústico: en este caso nos interesa evaluar el dominio de la frecuencia.
- Condiciones iniciales: presión acústica de 2Pa en la fuente de excitación.
- Condiciones de contorno: PML de los límites de los recintos como se observa en la figura 6.

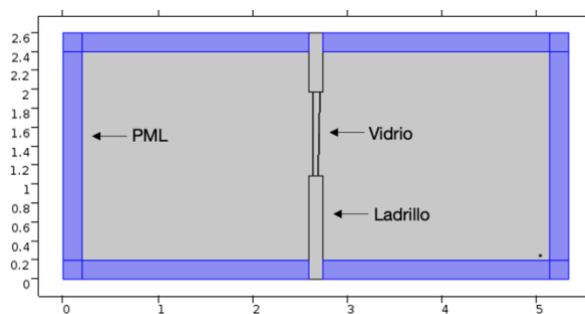


Figura 6 - PML implementada en la simulación mediante elementos finitos del elemento separador bajo estudio.

Las frecuencias de interés y el tamaño de los elementos se han especificado en la etapa de procesado de la siguiente manera:

- Frecuencias de interés: desde 100 Hz (f_{min}) hasta 3150 Hz (f_{max}).
- Tamaño del elemento de la malla: Varios estudios hablan sobre utilizar 6 u 8 veces la longitud de onda de la frecuencia máxima de trabajo [6]. En este caso, se utilizará 8 veces la longitud de onda. El tamaño de los elementos está dado por la ecuación (1) [7]:

$$Tamaño\ elemento = \frac{c}{f_{max} \cdot N} = \frac{344}{3150 \cdot 8} = 0.01365 \quad (1)$$

La información de interés obtenida en el post-procesado es la siguiente:

- Magnitudes acústicas representadas: nivel de presión sonora en dB.
- Tipo de figura: 2D plots.

Al realizar la simulación, el cálculo computacional requerido tiene las siguientes especificaciones:

- Tiempo de simulación: 2746 s (45min 46s).
- Número de grados de libertad resueltos para 454171.

- Memoria física: 1,21 GB.
- Memoria virtual: 1,44 GB.

3 Resultados

3.1 Algoritmo desarrollado

Los valores ingresados para la superficie de ladrillo como partición simple y la superficie de vidrio como partición doble con cámara de aire son los que se observan en las figuras 7 y 8.

Figura 7 - Valores ingresados para la superficie de ladrillo en el algoritmo desarrollado.

Figura 8 - Valores ingresados para la superficie de vidrio en el algoritmo desarrollado.

Se obtiene un STC de 35 y un R de 40.7, como se observa en la figura 9, donde también se muestran los resultados de TL por frecuencia en bandas de tercio de octava desde 20 Hz hasta 20 kHz.

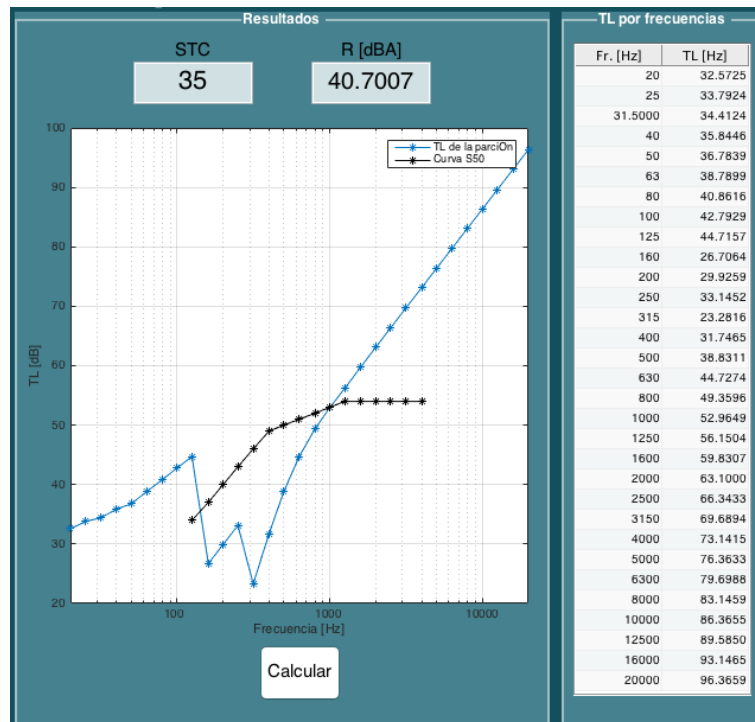


Figura 9 - Valores obtenidos con el algoritmo desarrollado para la predicción de la partición compuesta bajo estudio.

Acotando los valores al rango de análisis, se puede observar que la región contralada por la masa se encuentra comprendida alrededor de 125 Hz y 315 Hz, donde a partir de 325 Hz se evidencia el comportamiento de la región controlada por el amortiguamiento. La región controlada por la rigidez se encuentra en las frecuencias inferiores a 125 Hz.

3.2 Medición *in situ*

Los resultados de ensayo obtenidos para el D_{nT} y el R' del elemento separador, se presentan en las figuras 10 y 11, respectivamente. Se puede observar que los valores para la región controlada por masa en los resultados de la medición *in situ* son similares a los calculados en el algoritmo, encontrándose alrededor de las frecuencias entre 160 y 315 Hz.

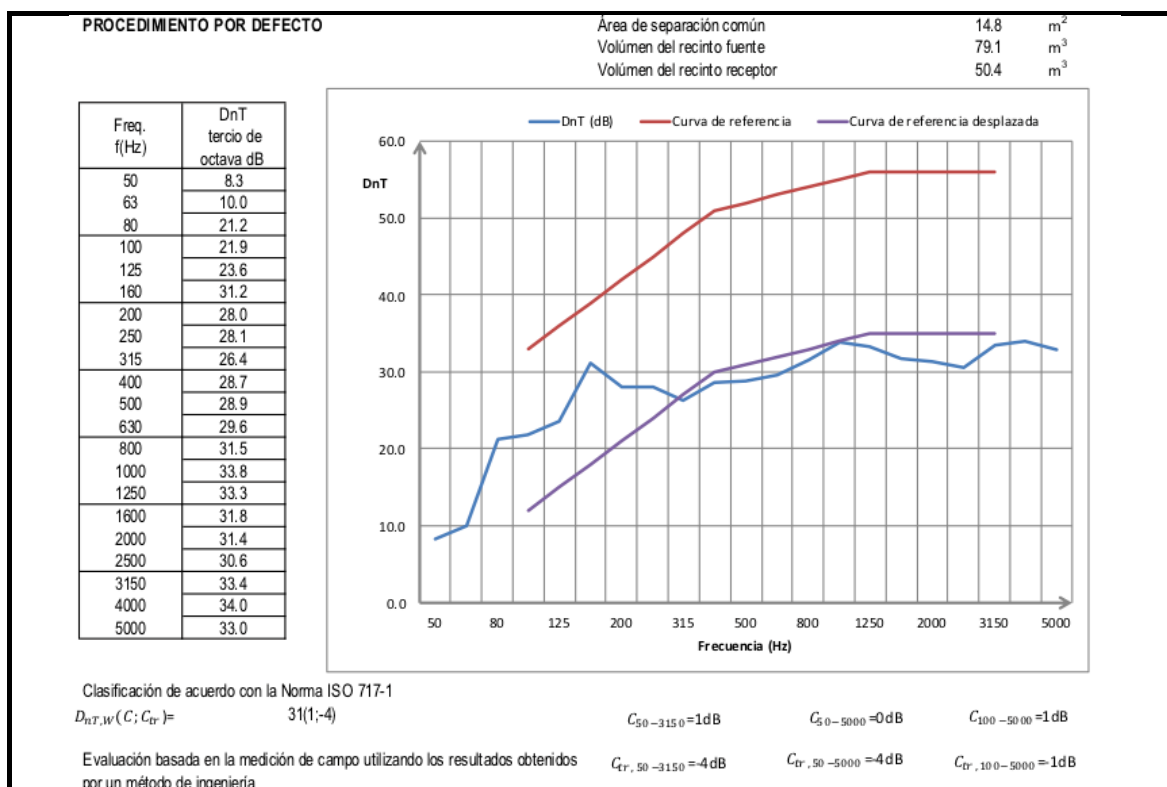


Figura 10 - Informe de resultados obtenidos para el D_{nT} del elemento separador.

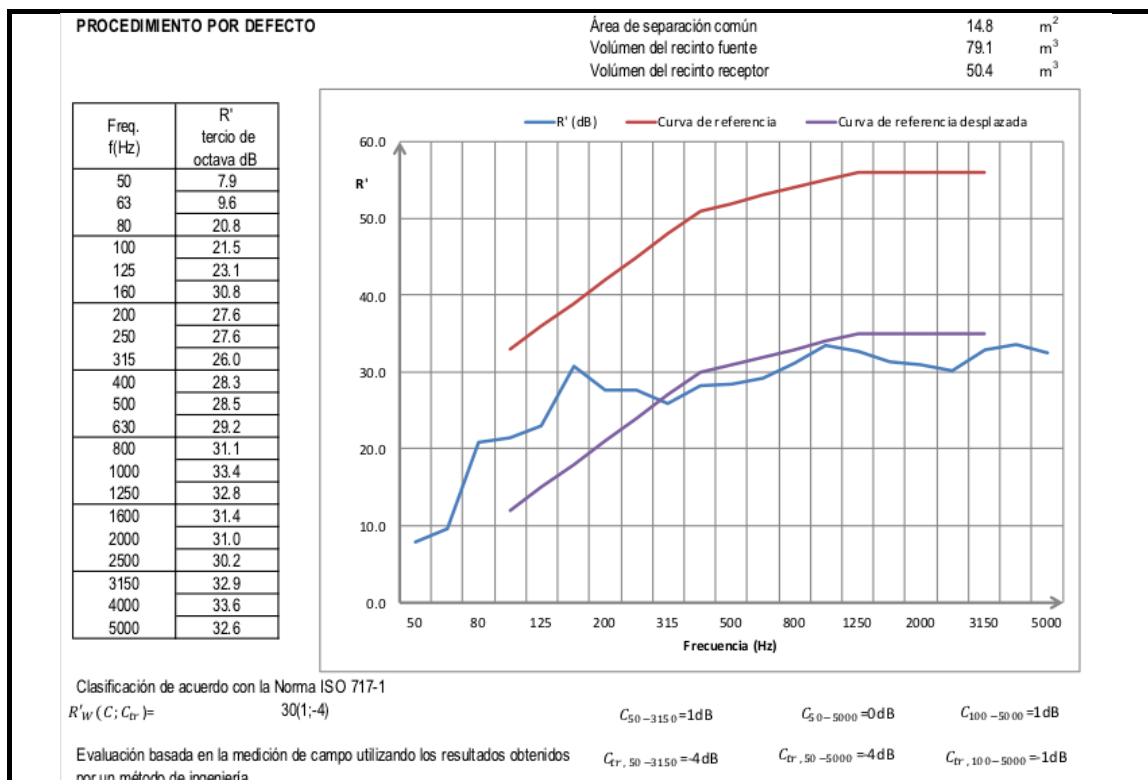


Figura 11 - Informe de resultados obtenidos para el R' del elemento separador.

3.3 Modelado con método de elementos finitos

El nivel de presión sonora se visualiza como en la figura 12 para la frecuencia más cercana a 500 Hz obtenida, 501,16 Hz. Se observan niveles de presión sonora entre 60 y 80 dB en la sala emisora, ubicada a la derecha, y niveles entre 10 y 40 dB en la sala receptora. Visualmente se puede deducir que hay una disminución de alrededor de 35 o 40 dB. En la cámara de aire de la ventana se identifican niveles entre 40 y 60 dB, permitiendo inferir que la ventana impide el paso de nivel en la sala receptora alrededor de 20 dB.

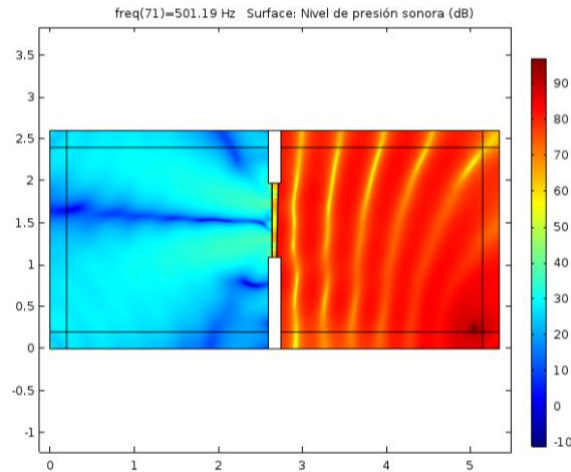


Figura 12 - Nivel de presión sonora obtenido en FEM para 501.19 Hz. Ejes en metros y SPL en dB.

Se han promediado los valores de TL obtenidos por bandas de tercio de octava para tener un valor único por cada frecuencia de interés. Los resultados de aislamiento obtenidos se observan en la tabla 1.

Tabla 1 - Resultados de TL obtenidos por medio de la simulación en FEM.

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Frecuencia [Hz]	TL [dB]
100	12.5	630	39.1
125	20.6	800	43.8
160	10.9	1000	28.4
200	17.7	1250	50.7
250	18.8	1600	77.1
315	28.2	2000	89.4
400	28.2	2500	99.9
500	33.1	3150	74.5

La región controlada por la masa se encuentra alrededor de las frecuencias 125 Hz y 200 Hz. De acuerdo con el procedimiento especificado por R. Barron [3], se obtuvo un STC de 32.

4 Discusión

Debido a que el rango de frecuencias más limitado es el de la medición *in situ*, se toma para el análisis el rango de frecuencias desde 100 hasta 3150 Hz. Los resultados se muestran en la figura 13, donde se observa que los valores de aislamiento tienen a converger en las frecuencias de 315 Hz y 400 Hz, con diferencias no mayores a 3 dB. Para las frecuencias por debajo de 315 Hz, los resultados varían drásticamente. A partir de 400 Hz, en general, las curvas tienen una tendencia a aumentar el valor de aislamiento a medida que aumenta la frecuencia.

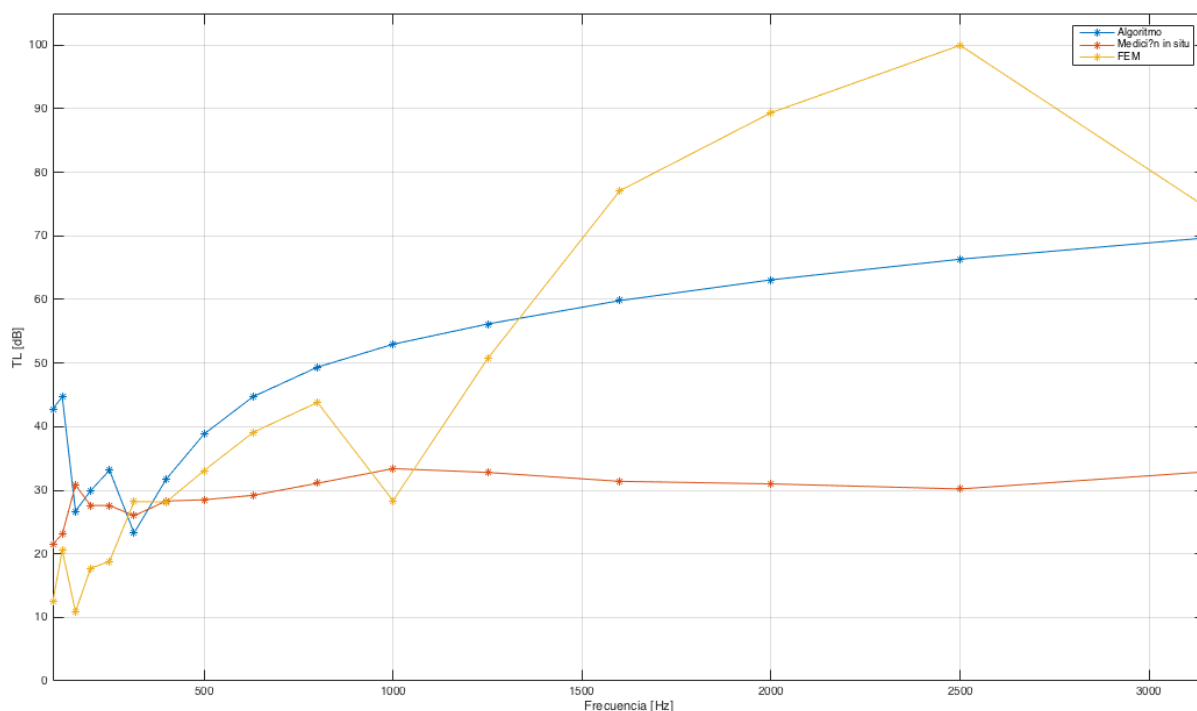


Figura 13 - Resultados de aislamiento acústico para el algoritmo (azul), la medición *in situ* (naranja) y la simulación con FEM (amarillo).

En la curva correspondiente a la simulación en FEM, la caída drástica de nivel en 1000 Hz y 3150 Hz se puede deber a que el modelado tiene en cuenta únicamente las dimensiones de la vista de corte. Sin embargo, sí considera las condiciones físicas de la estructura como los modos vibración correspondientes a las frecuencias de flexión, lo que depende de la composición de cada material en la estructura, sus dimensiones, rigidez y masa por unidad de superficie.

Las diferencias marcadas en los resultados de la medición *in situ* respecto al algoritmo y a la simulación en FEM se pueden presentar debido a que las condiciones y lineamientos de construcción e instalación de la estructura influyen en el resultado de la medición, donde sí existen variaciones que dependen, por ejemplo, de la forma y dirección (horizontal o vertical) como se implemente el mortero con la estructura. A parte de factores como la transmisión vía estructural por las diferentes vías indirectas (flancos) y los modos de vibración que debilitan el aislamiento, en las condiciones *in situ* existen pérdidas producidas por el factor de amortiguamiento generado por las juntas del techo, paredes y piso que no se tienen en cuenta en la predicción con el software desarrollado o la simulación realizada en FEM. Todas estas variaciones resultantes de la instalación se pueden atribuir a la falta de un código de edificación en Colombia que reglamente los métodos de construcción.

Otros factores que afectan en la diferencia de los resultados del algoritmo y de FEM con la medición, son los valores de las propiedades de los materiales, cuyos valores para la partición en estudio son desconocidos. Por tanto, los valores utilizados en el algoritmo y en FEM corresponden a una base de datos que contiene materiales similares.

Para la medición *in situ* tenemos como valor único de aislamiento el $R'_w = 30$. Aunque el valor único de aislamiento calculado en el algoritmo y los resultados con FEM es el STC, el procedimiento para obtener estos dos valores es similar con una posible diferencia entre ellos de uno o dos puntos, por tanto, se pueden comprobar para el análisis [8]. Sin embargo, se ha realizado el cálculo del STC a partir de los resultados obtenidos en la medición *in situ* para verificar dicha afirmación y, en este caso, se obtuvo el mismo valor que para el R'_w . Los valores de aislamiento único para cada uno de los casos se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2 - Valor único de aislamiento obtenido en cada uno de los casos.

Caso	STC
Algoritmo	35
Medición <i>in situ</i>	30
FEM	32

5 Conclusiones

Se ha desarrollado un algoritmo en MATLAB con interfaz de usuario (GUI) para el cálculo del aislamiento acústico de particiones compuestas en frecuencias por banda de tercio de octava desde 20 Hz hasta 20 kHz. Este permite que cada una de las superficies que conforman la partición compuesta pueden ser, a su vez, particiones simples, dobles o de lámina doble capa. Para analizar la precisión del algoritmo se han realizado 3 casos con el elemento separador de un estudio: una predicción con el algoritmo desarrollado, una medición *in situ* de acuerdo con el estándar UNE-EN ISO 16283-1:2014 y una simulación de la vista de corte en 2D con FEM.

Entre el resultado del algoritmo y la simulación en FEM el valor único de aislamiento difiere en 2 puntos, mostrando resultados aproximados entre estos dos tipos de cálculo. El valor único de aislamiento difiere en 5 puntos entre el resultado del algoritmo y la medición *in situ*, por lo tanto, se puede afirmar que el algoritmo puede ser usado en la primera fase de diseño de una partición con una tolerancia de 5 puntos en el STC.

Un siguiente paso en el trabajo de investigación a futuro es el desarrollo del algoritmo como aplicación ejecutable, así como la implementación de otras características como una base de datos con las propiedades de los materiales utilizados comúnmente en Colombia, la representación en 3D de la partición que se está calculando y una auralización para dar al usuario una idea de como se percibirá auditivamente el resultado.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo en el proceso de investigación a la Universidad de San Buenaventura sede Medellín, Colombia.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución 0627 de 2006: Norma de emisión de ruido y ruido ambiental*, Colombia, 2006.
- [2] Código Técnico de la Edificación, *Presentación*, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2015, Disponible en: <https://bit.ly/2pg3jbR>.
- [3] Barron, R. *Industrial Noise Control and Acoustics*, Marcel Dekker, INC., New York, 2002.
- [4] Bies, D. A.; Hansen, C. H. *Engineering Noise Control*, Spon Press, New York, 2009.
- [5] COMSOL, *Acoustic-Structure Interaction*, COMSOL INC., 2017, Disponible en <https://bit.ly/2QDabdv>.
- [6] COMSOL, *COMSOL Documentation: Acoustics module / User's Guide / Structural Mechanics with the Acoustics Module*, 2015.
- [7] Berreiro Pérez, J. M. *Estudio sobre la mejora de la difusión del campo sonoro en una sala mediante la técnica de simulación diferencias finitas en dominio temporal*. Universidad Politécnica de Valencia, 2014.
- [8] American Society for Testing and Materials, *ASTM E413 - 16 Classification for Rating Sound Insulation*, ASTM International, 2016.