



# Desarrollo de software para el cálculo de aislamiento acústico a ruido aéreo de particiones

**Jose Sierra Pastor**

**Tutor: Antonio Uris Martínez**

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2018-2019

Valencia, 22 de noviembre de 2019

## Resumen

Este trabajo estudia los modelos de predicción de aislamiento acústico más conocidos y prácticos, así como su implementación en un software que permite obtener los resultados a partir de la información introducida sobre el sistema que vamos a estudiar.

Previamente se explican las bases del sonido y del aislamiento acústico, así como la legislación al respecto, para dar al lector una idea global sobre los modelos de predicción y sobre el aislamiento acústico, partiendo de nociones básicas, para que cualquier lector, este familiarizado o no con el campo de la acústica, pueda comprender la importancia de estos modelos y del aislamiento acústico.

Se ha utilizado Matlab para programar el software, y se han incluido los modelos que, por facilidad de comprensión y por utilidad, son los más adecuados.

## Resum

Aquest treball estudia els models de predicció d'aïllament acústic més coneguts i pràctics, així com la seua implementació en un software que permet obtenir els resultats partint de l'informació del sistema que esturiarem.

Prèviament s'han explicat les bases del so i de l'aïllament acústic, així com la legislació al respecte, per donar al lector una idea global sobre els models de predicció i sobre l'aïllament acústic, partint de nocions bàsiques, de manera que, qualsevol lector, estiga familiaritzat o no amb el camp de l'acústica, pugui comprendre l'importància d'aquests models i de l'aïllament acústic.

S'ha utilitzat Matlab per a programar el software, i s'han inclòs els models que, per facilitat de comprensió i d'utilitat, són els més apropiats.

## Abstract

This research project assesses well-known, practical methods for acoustic isolation, including its application in software that allows for compiling results based on information put into the system, which is reviewed further in the study.

This work not only explains the fundamentals of sound and acoustic isolation but also includes its current legislation to give the reader a global view for any audience, regardless of his or her familiarity with acoustics.

This study has utilized Matlab to program the software discussed in the project, and it has incorporated appropriate models taking into account both feasibility and usability.

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Mapa de distribución de nivel sonora de una sala en EASE. Fuente: <https://ease.afmg.eu>

Ilustración 2. Simulación de un array de altavoces en EASE. Fuente: <https://ease.afmg.eu>

Ilustración 3. Simulación en 3D de la reflexión de ondas en una sala con Odeon. Fuente: Room Acoustics simulations and measurements. Fuente: <https://odeon.dk/>

Ilustración 4. Esquema del pabellón auditivo. Fuente: Audiopacks: [http://www.audiopacks.es/audicion/anatomia\\_funcional\\_eapro\\_200\\_2.html](http://www.audiopacks.es/audicion/anatomia_funcional_eapro_200_2.html)

Ilustración 5. Curva isofónica. Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Curva\\_isof%C3%B3nica](https://es.wikipedia.org/wiki/Curva_isof%C3%B3nica)

Ilustración 6. Esquema de transmisión del sonido entre salas por las diferentes vías. Fuente: Stefan Schoenwald, Flanking sound transmission through lightweight framed double leaf walls; Prediction using statistical energy analysis (SEA)

Ilustración 7. Diferentes capas que forman una pared. Fuente: 47531262-3D Render, closeup view of a cross-section of a wall (123RF)

Ilustración 8. Diagrama de incidencia, reflexión y absorción de ondas sonoras impactando contra una superficie.

Ilustración 9. Variación del coeficiente de absorción de un material en función de la frecuencia, y efecto de absorción en un material poroso. Fuente: Antoni Carrión Isbert: Diseño acústico.

Ilustración 10. Representación de las ondas de flexión. Fuente: Joaquín Mansilla, Ernesto Accolti: Universidad Nacional de Tres de Febrero (Acústica y Psicoacústica II).

Ilustración 11. Ejemplo de aplicación de la Ley de masa utilizando el software.

Ilustración 12. Ejemplo de aplicación de la Ley de masa en paredes dobles con incidencia aleatoria

Ilustración 13. Ejemplo de aplicación del modelo de Sharp en el software

Ilustración 14. Menú principal del software para modelos de predicción basados en la ley de masas en Matlab

Ilustración 15. Menú principal del software para modelos de predicción basados en el modelo de Sharp en Matlab.

Ilustración 16. Flujograma de funcionamiento del programa y sus modelos

Ilustración 17. Flujograma de funcionamiento del programa y sus funciones en Matlab

Ilustración 18. Esquema del sistema medido en laboratorio (TL-93-305)

Ilustración 19. Ilustración del sistema medido en laboratorio (TL-93-305) vs resultados de la simulación en el software.

Ilustración 20. Esquema del sistema medido en laboratorio (TL-93-304)

Ilustración 21. Ilustración del sistema medido en laboratorio (TL-93-304) vs resultados de la simulación en el software

Ilustración 22. Ilustración del sistema medido en laboratorio (TL-93-307) vs resultados de la simulación en el software

Ilustración 23. Representación de los resultados obtenidos simulando en el software

## Índice de tablas

Tabla 1: Valores de referencia para el cálculo de aislamiento a ruido aéreo. Fuente: UNE-EN ISO\_717-1

Tabla 2: Coeficientes de absorción de los materiales más utilizados en la construcción de edificios. Fuente: Antoni Carrión Isbert: Diseño acústico de espacios arquitectónicos

Tabla 3: Ejemplos de frecuencias críticas, densidad y factores de amortiguamiento en materiales utilizados en la construcción. Fuente: Tor Erik Vigran: Building acoustics.

Tabla 4: Variables utilizadas en cada modelo de predicción aplicado en Matlab

Tabla 5: Descripción de las particiones empleadas en el cálculo del caso práctico

Tabla 6: Resultados obtenidos empleando el software en el caso práctico

## Índice

1. Introducción .....	5
2. Objetivos del trabajo .....	7
2.1. <i>Objetivos principales</i> .....	7
2.2. <i>Objetivos secundarios</i> .....	7
3. Estado de la cuestión .....	8
4. Sonido (Conocimientos previos).....	11
5. Introducción a la normativa sobre mediciones.....	16
6. Aislamiento acústico y materiales.....	21
7. Modelos de predicción .....	26
7.1. <i>Modelos empleados en el software</i> .....	34
8. Implementación mediante software .....	39
8.1. <i>Comparación de datos de laboratorio con software</i> .....	43
8.2. <i>Caso práctico: Influencia del espesor de la cavidad y el número de placas de yeso laminado en el índice ponderado de reducción sonora, <math>R_w</math></i> .....	72
9. Conclusiones .....	52
Anexo .....	54
Bibliografía .....	66

## 1. Introducción

Para empezar, debemos saber que es la Acústica. Esta se define como la parte de la física que estudia la producción, transmisión, recepción y tratamiento de las ondas mecánicas y el efecto que producen estas en la materia. El estudio de la acústica está directamente relacionado con el medio en el que la onda se propaga ya que su comportamiento puede variar en función de este.

Las bases de la acústica moderna se establecieron en el siglo XIX, cuando en 1877, Lord Rayleigh publica su obra titulada “The Theory of Sound”, libro que reúne las anteriores investigaciones y las propias de Lord Rayleigh en el campo del sonido. Se encuentran inscritas distintas áreas, como la teoría sobre la propagación de las ondas, vibraciones armónicas, o vibraciones en el aire entre muchas otras bases de la acústica, así como experimentos prácticos. Por ello, este libro, del cual hablaremos más adelante con mayor detalle en algunos puntos, sirve como punto de partida para las múltiples teorías que estudian la transmisión del sonido, las cuales van a ser revisadas en este trabajo.

Vamos a tratar la transmisión del sonido a través de cerramientos simples y dobles mediante diferentes métodos de cálculo matemático para obtener una aproximación a cómo responderá el sonido ante las diferentes configuraciones y ante todas las variables que se presentan en los posibles casos que vamos a estudiar.

Existe un gran número de métodos de aproximación y diferentes modelos teóricos por los que se pueden obtener los resultados antes mencionados, ya que, con cada nuevo método, se intenta realizar una aproximación más fidedigna, más simple, o más práctica. Además, para saber cuál es más conveniente, deberemos estudiar varios modelos. Por ello, es importante tomar varios ejemplos prácticos normalizados como base de estudio, ya que esto nos permitirá saber qué método (y concretamente, en qué casos), es mejor para obtener una simulación próxima a la realidad. De esta manera, podremos tomar algunos de estos métodos como aproximaciones fieles que nos permitan, de una forma rápida, realizar una valoración previa a un experimento o a un montaje sin realizar una inversión de esfuerzo elevada.

Los resultados que vamos a comparar en estos casos son el Índice de reducción sonora,  $R$  (también conocido como TL, del inglés “Transmission Loss”), en función de la frecuencia, además del Índice de reducción sonora ponderado,  $R_w$ . También tendremos en cuenta las diferencias de resultados que existan entre los diferentes métodos y los experimentos prácticos para tener una visión más global de lo fidedigno que es un método.

La finalidad de este trabajo es comparar las diferentes teorías que sean más relevantes e interesantes (tanto teóricamente como con resultados prácticos), que nos permitan realizar un software para poder obtener los diferentes resultados de una forma sencilla, gráfica e intuitiva, es decir, que con un simple vistazo nos muestre cómo responderá un posible sistema real.

Este tipo de casos se aplican a la realidad, ya que hoy en día el aislamiento acústico es un campo muy importante y de aplicación diaria, debido a que existen gran número de normativas y de situaciones que nos exigen tener un aislamiento acústico adecuado.

El aislamiento acústico trata las técnicas empleadas para impedir que el sonido de un recinto escape de este o penetre en otro a fin de evitar la contaminación acústica en lugares no deseados, añadiendo que también engloba los materiales y métodos de construcción utilizados para este fin.

El aislamiento se basa en el uso de materiales, tanto absorbentes como aislantes, para reflejar y/o absorber la energía (en forma de ondas sonoras) incidente, y evitar que estas puedan propagar fuera del recinto en el cual se producen. Debido en muchos casos a exigencias por normativas, es necesario realizar estudios previos que deben aproximarse lo máximo posible a la realidad para poder realizar un aislamiento adecuado sabiendo de antemano cuál va a ser el resultado, evitando así, resultados indeseados que pueden conllevar un gran costo económico. Por ello, se utilizan herramientas de predicción (como la que vamos a diseñar en este trabajo) que permiten realizar simulaciones muy próximas a la realidad, en este caso, sobre el aislamiento mediante paredes simples o dobles, método que tiene un gran número de posibilidades como: variar el material, el grosor de este o dejar más espacio vacío entre las dos paredes; pudiendo así ajustarse a los requerimientos de la instalación que vamos a estudiar.

En cuanto a los materiales, intervienen un gran número de factores como la densidad de este, su porosidad o su capacidad de disipación del sonido. Este punto lo trataremos detalladamente más adelante, indicando cuáles son los factores más importantes de los materiales para el aislamiento acústico y en qué casos debemos utilizar un tipo de material u otro.

También es importante nombrar la Reflexión, un fenómeno asociado a las ondas sonoras al entrar en contacto con un material que provoca que parte de las ondas “reboten” y cambien de dirección, el cual debemos de tener muy en cuenta a la hora de hacer un estudio sobre el aislamiento acústico.

Vamos a tratar también la transmisión del sonido en los diferentes medios, tanto a través de un medio físico, cuando ha impactado con un material, como a través del aire, cuando el ruido se está propagando sin haber ningún material de por medio.

Por último, vamos a explicar los diferentes experimentos normalizados que se realizan en laboratorio y que vamos a utilizar para comparar los resultados de los métodos teóricos con la práctica, ya que es importante que todos los experimentos estén realizados bajo condiciones concretas que permitan su reproducción y que nos aseguren un resultado que concuerde con la realidad.

## 2. Objetivos del trabajo

### 2.1. *Objetivos principales*

- Tratar los principios del aislamiento acústico y sus motivos.
- Estudiar los métodos de predicción de cálculo de efecto de paredes simples y dobles.
- Comparar teóricamente los métodos elegidos teniendo en cuenta los datos introducidos y las fórmulas empleadas para obtener los resultados.
- Realizar un software que permita introducir los parámetros necesarios y muestre gráfica y numéricamente los resultados que nos permitan ver de manera rápida una aproximación a la realidad.

### 2.2. *Objetivos secundarios*

- Elegir el algoritmo que más se aproxime a la realidad y verificarlo mediante comparativas con experimentos normalizados realizados en laboratorio por entidades fiables.
- Indicar qué tipos de materiales aislantes existen y qué propiedades son interesantes para este fin.
- Realizar una base de datos de materiales, con la información necesaria para calcular los valores deseados.
- Redactar una guía de utilización del software e indicar en qué resultados debemos fijarnos para obtener una buena referencia a la hora de realizar predicciones de cómo responderá en la realidad la simulación a realizar.



### 3. Estado de la cuestión

En la actualidad, la acústica arquitectónica emplea programas informáticos como parte fundamental de las herramientas de los ingenieros. Estos softwares permiten realizar cálculos con resultado muy próximo a la realidad sobre diferentes situaciones reales, sin tener que invertir tiempo en montajes y mediciones muy costosas (tanto económicamente, como en tiempo y recursos). Existen múltiples herramientas, cada una indicada para un tipo de simulación, ya que en función de la situación que planteemos debemos utilizar un software u otro ya que algunos están pensados para espacios abiertos, otros para recintos cerrados. Además, en ellos se deben incluir modelos del equipamiento/materiales que vayamos a utilizar en la situación real para ser lo más próximo a la realidad posible.

Para utilizar estos programas de manera profesional, se requieren ciertos conocimientos de física y acústica, ya que cuentan con múltiples variables y ajustes que deben ser configurados debidamente para realizar una simulación adecuada. Pese a ello, son un gran avance y desde los años 90 son una herramienta imprescindible de los ingenieros que tratan el campo de la acústica.

Uno de los softwares más utilizados y reconocidos es EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineer), el cual se presentó por primera vez en 1990 en la convención nº 88 de la AES (Audio Engineering Society), donde se trataba la imposibilidad de modelar una solución mediante ecuaciones de onda para una habitación real. Por ello, mediante dos métodos, trazado de rayos (ray tracing) y el método fuente-imagen, se implementó un software que permite obtener información sobre la sala simulada, información como el tiempo de reverberación o la distribución del nivel de presión sonora <sup>(1), (2)</sup>.

Algunos de los softwares más importantes en la actualidad son:

- EASE: Paquete de software distribuido por la empresa Renkus Heinz, que permite simular de manera profesional recintos acústicos. Incluye herramientas de diseño CAD, que permiten modelar la sala a estudiar, base de datos de diferentes materiales y altavoces (así como diseño de altavoces y clusters/arrays), herramientas estadísticas y creación de mapas de distribución del nivel de presión sonora como parte de sus principales características.

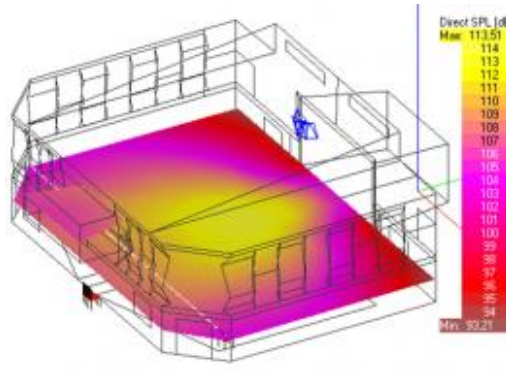


Ilustración 1. Mapa de distribución de nivel sonora de una sala en EASE.

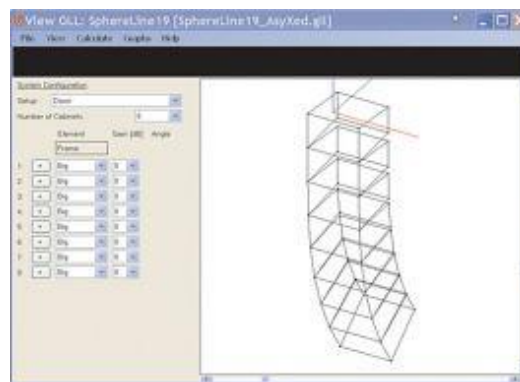
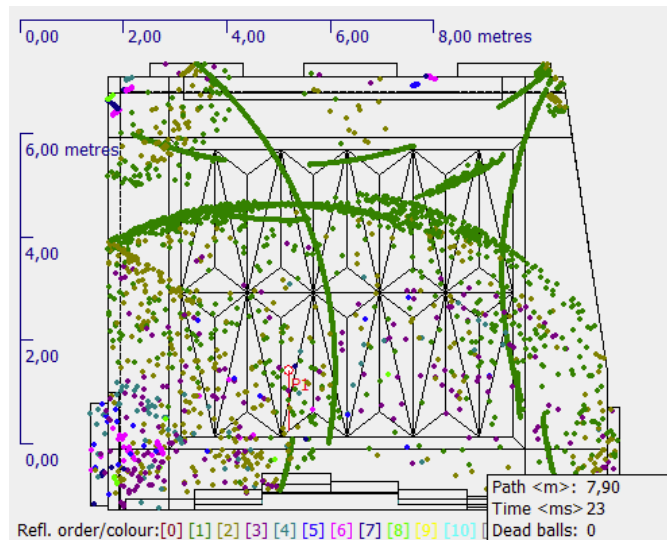


Ilustración 2. Simulación de un array de altavoces en EASE.

Actualmente se encuentra en su actualización 4.4.22, existiendo múltiples versiones del software (tales como Ease JR o Ease Standard), las cuales parten de los 898€ a los 2110€ en su versión más completa <sup>(3), (4)</sup>.

- **Odeon**: software de simulación acústica de salas comercializado por la compañía danesa Brüel & Kjær. Este software en cuanto a características y funcionalidades es similar a EASE, permitiendo realizar simulaciones de modelos 3D, tomar medidas de salas reales, reproducir situaciones acústicas de modelos 3D entre otras características principales. Este software también tiene la ventaja de tener un gran número de manuales y guías para poder ser utilizado desde cero por una persona que posea los conocimientos de acústica requeridos para su uso. Existen 4 versiones del software, que van desde los 2180€ para la versión educativa del software más básico, a los 17550€ de la versión comercial más avanzada.



*Ilustración 3. Simulación en 3D de la reflexión de ondas en una sala con Odeon.*

- Modeler sound system software: Programa de la compañía estadounidense BOSE para el diseño y análisis de recintos acústicos, tanto interiores como exteriores. Igual que los anteriores softwares, permite obtener predicciones del rendimiento acústico de una sala, inteligibilidad, así como importar modelos desde CAD y demás funciones básicas que comparte con los softwares mencionados anteriormente. En este caso, actualmente es una versión gratuita para su uso <sup>(5)</sup>.

Existen otros softwares muy populares tales como CATT Acoustic o Epidaure, los cuales tienen funcionalidades muy similares y cuyo fin es también realizar simulaciones lo más reales posible.

Como vemos, los softwares son una herramienta imprescindible. Estos se basan en diferentes modelos de los cuales hablaremos más adelante. No todos los softwares utilizan los mismos modelos y la mayoría de programas optimizan los modelos y los modifican según el uso que vayan a darle, no solo para mejorar el rendimiento del software, sino, sobre todo, para mejorar los resultados y hacer que estos se aproximen más a la realidad.

La mayoría de los softwares pueden realizar funciones muy similares, por lo que la elección de este dependerá de las preferencias personales, del precio, y sobre todo de que el software permita utilizar los datos que vamos a utilizar en la situación real (altavoces, materiales, modelo 3D...).

#### 4. Sonido (Conocimientos previos)

Para empezar, es importante saber que el sonido es un fenómeno físico que ocurre con la propagación de las ondas (aunque estas no sean audibles). Este puede propagarse a través de cualquier medio y se propaga mediante una variación de presión y desplazamiento de las partículas que forman ese medio.

La propagación del sonido, al tratarse de un fenómeno mecánico, involucra el transporte de energía en forma de ondas, sin transportar materia. Estas ondas se propagan a través de un medio, sea este sólido, líquido o gaseoso. Cabe destacar que el sonido no se propaga en el vacío.

El sonido, dependiendo del medio en el que se propague, lo hará de una forma u otra. En el caso de los sólidos las ondas pueden adoptar tres formas: longitudinal (movimiento en la dirección de propagación de la onda), transversal (perpendicular a la dirección de propagación) o una combinación de ambas. En el caso de los fluidos, se trata de ondas longitudinales, al igual que en los gases.

Antes de tratar la acústica arquitectónica, es importante tener en consideración que su estudio está directamente relacionado con la acústica fisiológica, es decir, cómo percibimos los humanos el sonido. Por ello, es importante tener una idea sobre cómo funciona el oído humano y sobre cómo afectan los sonidos sobre este. El proceso de escucha tiene tres etapas que veremos a continuación.

Cuando un sonido llega a nuestros oídos, se produce la captación mecánica de las ondas. Después, la energía mecánica se transforma en impulsos nerviosos que se envían al cerebro, para, por último, ser procesados y entendidos como sonido por el cerebro.

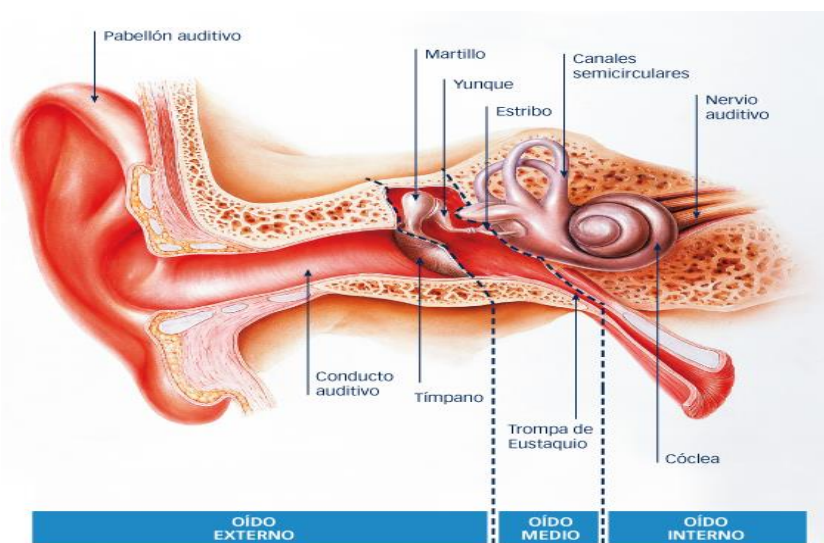
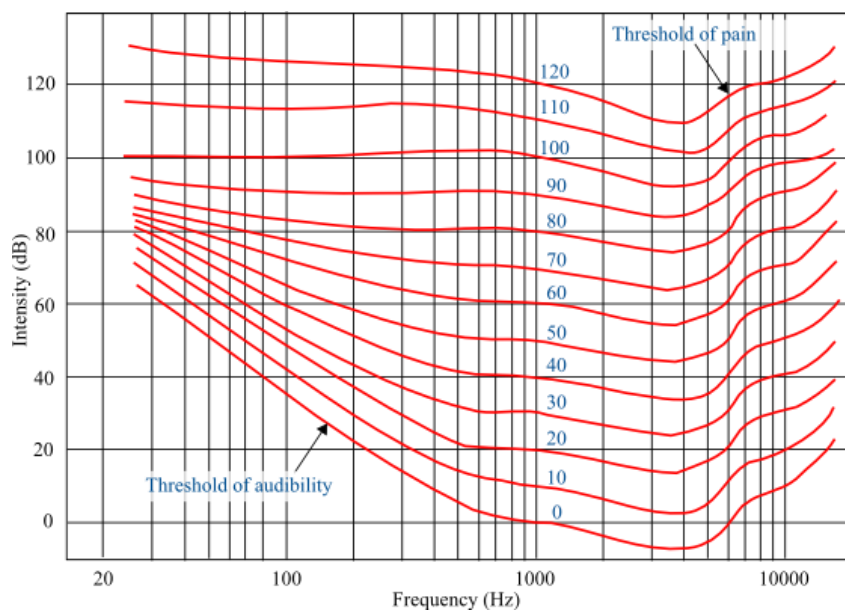


Ilustración 4. Esquema del pabellón auditivo.

El oído humano no es perfecto, y por ello, cada oído es diferente. Este hecho se debe a múltiples factores, como pueden ser el sexo o edad. Cada oído percibe de manera diferente los sonidos, en la ilustración anterior (ilustración 4) vemos detalladamente todas las partes que componen el pabellón auditivo, y podemos imaginar las variaciones, que, aunque puedan parecer pequeñas, las diferencias de dimensiones o formas de sus componentes pueden variar mucho las percepciones del sonido por diferentes personas.

No obstante, pese a estas diferencias, todos los oídos (en términos generales) actúan similar. Por ello podemos aplicar estos conocimientos a la acústica arquitectónica, sin tener en cuenta estas diferencias.

Lo más importante que podemos extraer sobre la acústica fisiológica es que, la sonoridad (medida subjetiva de percepción del sonido), además de depender en menor medida de la imperfección del oído, depende directamente de la relación entre la frecuencia y la intensidad del sonido, es decir, dependiendo de la frecuencia y la intensidad, percibiremos un sonido como más o menos fuerte. Para ello existen las curvas de sonoridad, las cuales se aplican a la acústica arquitectónica indirectamente.



*Ilustración 5. Curva isofónica.*

La percepción del nivel sonoro es subjetiva, por ello en las mediciones e informes de laboratorio utilizan datos sobre la intensidad, no sobre los fonios, unidad sobre la que se cuantifica la percepción del nivel sonoro. Las curvas isofónicas (ilustración (5)), muestran cómo, en función de la frecuencia, nuestra percepción sobre la intensidad del sonido varía. Cabe destacar la existencia del fenómeno de enmascaramiento frecuencial. Esto ocurre cuando existen varios sonidos de diferentes frecuencias, y un sonido camufla a otro, haciendo que su percepción varíe o que se camufle. Sucede debido a que la excitación de la membrana basilar (ubicada en el interior

de la cóclea (ilustración 4), varía en función de la frecuencia. La membrana basilar no es uniforme en su masa y rigidez en toda su longitud, es por ello que su frecuencia de resonancia varía en los distintos puntos. Por esto, los tonos graves son capaces de enmascarar a los tonos más agudos con facilidad.

Además del frecuencial, existe el enmascaramiento temporal, lo que significa que el sonido que escuchamos en un momento, está influenciado por lo que acabamos de escuchar.

Aunque la percepción del sonido (y de su intensidad) pueda ser subjetiva, es muy importante saber cómo cuantificamos el sonido. La intensidad del sonido se mide en decibelios (dB), esta unidad emplea la escala logarítmica, que es útil debido al espectro auditivo del ser humano. Esta unidad nos permite comparar los niveles de diferentes sonidos en el campo de la acústica.

Además de esta, se utilizan muchas otras unidades e índices de medida, tales como los Sabines, el tiempo de reverberación, los Pascales o el índice de reducción sonora, que veremos más adelante. La existencia de las diferentes unidades de medida se debe a que, dependiendo qué queramos estudiar o cuantificar, existe una forma más apropiada de expresar la cantidad de la que estamos hablando o es más fácil realizar comparaciones según la escala.

Para ponernos en situación, es necesario revisar los orígenes de la acústica, ya que, conociendo sus orígenes, podemos ver cómo ha ido evolucionando y qué hechos han dado lugar a lo que actualmente conocemos como acústica.

La acústica arquitectónica se remonta al año 1900, año en el que Wallace Clement Sabine, quien fue profesor en la universidad de Harvard, sentó las bases de acústica arquitectónica (de la que forma parte del aislamiento acústico), cuando intentaba mejorar la acústica del Fogg Lecture Hall, tarea que hasta ese momento se hacía imposible, ya que no existían métodos para ello. Sabine trató de determinar qué características hacían a las salas buenas acústicamente mediante experimentos prácticos, realizando mediciones para comprobar el tiempo que tardaban los sonidos, a las diferentes frecuencias, en llegar a ser inaudibles en función de los materiales que se colocaban en la sala.

La conclusión a la que llegó fue que, dependiendo del tamaño, las dimensiones de la sala y la cantidad y material de los elementos absorbentes que se ubican en esta, la calidad acústica de una sala variaba. Definió el tiempo de reverberación como el tiempo en segundos que tarda un sonido con un nivel de 60dB en llegar a ser inaudible. Es por ello por lo que la unidad de absorción del sonido, el Sabin, lleva su nombre <sup>(6)</sup>.

La acústica arquitectónica, no solo se limita al estudio y acondicionamiento de recintos empleados para fines acústicos, tales como salas de concierto o festivales al aire libre. Uno de los campos donde más se emplea el estudio de la acústica arquitectónica es el aislamiento sonoro y cómo

valorar el impacto acústico en los diferentes ámbitos. En la actualidad, la contaminación acústica es un grave problema. Por ello, existen diversas normativas que tratan la contaminación acústica, las cuales regulan tanto “el sonido, como las vibraciones”, tal y como indica la Ley 37/2003, donde se trata la prevención y reducción del ruido en el ámbito doméstico y laboral. La normativa, impulsada desde la Unión Europea, pretende delimitar la exposición al ruido ambiental, informar a los ciudadanos e implementar medidas que impidan que el ruido afecte a la salud de las personas.

En esta normativa también se habla de las posibles sanciones, que pueden llegar hasta los 300.000 euros en los casos más graves, pero dado que la ley indica que las sanciones (en la mayoría de los casos) corresponden a las comunidades autónomas (en otras ocasiones a la administración del estado o a los ayuntamientos), es por ello, por lo que otras normativas, como el decreto 104/2006 de la Generalitat Valenciana, tienen un mayor detalle, donde se definen casos más concretos y prácticos, además de los límites establecidos en cada uno de ellos, haciendo así de la normativa algo más tangible y menos abstracto <sup>(7), (8)</sup>.

Según la RAE, definimos el ruido como un sonido no deseado, molesto, tanto por su naturaleza como por producirse en ese momento y lugar <sup>(9)</sup>.

Si la exposición al ruido se prolonga durante el tiempo suficiente, puede provocar daños en la salud, tanto temporales como permanentes, siendo estos últimos menos frecuentes, ya que se trata de los casos más extremos, de exposición más prolongada y de ruido más fuerte.

Los trastornos más comunes debidos al ruido son la alteración del sueño, cefaleas y el estrés. Es por esto por lo que se combate mediante normativas la exposición al ruido.

Debido al ruido, existen pérdidas auditivas de dos tipos, la conductiva, la cual es reversible, y la neurosensorial, la cual es una lesión del oído interno o del nervio auditivo y no es reversible.

En el caso de que la pérdida auditiva se deba a un evento único y muy fuerte (como podría ser una explosión), se denomina trauma acústico. La pérdida es repentina y produce un fuerte dolor en la mayoría de los casos.

Las primeras normativas se remontan al imperio romano, donde existían normativas que prohibían el uso de ruedas de hierro en zonas pavimentadas, esto nos indica que el problema del ruido no es algo nuevo, pese a que en los últimos años ha habido un importante crecimiento de este.

Pese a que en la normativa no se especifica, cabe destacar que existen diversos tipos de ruido, los cuales, pese a que no se especifican ni se habla de ellos en la normativa, son muy importantes en los diferentes experimentos relacionados con la acústica, y en este caso, con el aislamiento acústico. Estos diferentes tipos de ruido tienen características únicas que los diferencia, según su

densidad espectral (distribución y potencia en función de la frecuencia). Los diferentes tipos de ruido vienen especificados por la Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), la cual está acreditada por la American National Standards Institute (ANSI), esta entidad americana estandariza todos los conceptos relacionados con las telecomunicaciones.

Los diferentes tipos de ruidos existentes, y sus correspondientes definiciones son:

- Ruido blanco: ruido cuya densidad espectral es constante, es decir tiene la misma potencia por hercio en una banda de frecuencias.
- Ruido rosa: se define por tener densidad espectral proporcional a  $1/F$ .
- Ruido azul: se caracteriza por tener una densidad espectral proporcional a  $F$ , es decir, se incrementa 3dB por octava.
- Ruido gris: es aquel que tiene una densidad espectral muy similar a la curva de ponderación sofométrica, es decir, todas las frecuencias deben ser percibidas por el oído humano con igual intensidad.

Estos ruidos vienen todos definidos en la ATIS Telecom Glossary (que sustituye al Federal Standard 1037C) <sup>(10)</sup>.

Pese a que, en la práctica, los ruidos que nos encontramos son una mezcla de los anteriores, estos son utilizados en las mediciones para realizar los estudios en lo referido a la acústica arquitectónica.

En cuanto a las mediciones, el instrumento que utilizaremos es el sonómetro, el cual se emplea en la medición del nivel de presión sonora (NPS). Existen diferentes características en los sonómetros, tales como la precisión del micrófono, filtros o tipos de medidas que pueden realizar, pero básicamente un sonómetro tiene los siguientes componentes: Micrófono, preamplificador, filtros, amplificador y circuito para representar la medida en dB.

También existen otros utensilios para dichas finalidades tales como los analizadores de Vibraciones. Es necesario saber que, en todos los instrumentos de medida, para que sus medidas sean válidas, deben estar certificados y adecuadamente calibrados (para calibrar los sonómetros existen unos dispositivos llamados calibradores, los cuales no vamos a centrarnos en explicar, pero sirven para calibrar y reajustar los sonómetros, que pueden desviar sus medidas con el paso del tiempo).



## 5. Introducción a la normativa sobre mediciones

Tal y como indicábamos, la normativa exige la calibración de los instrumentos de medición (que deben estar homologados), además de una serie de requisitos para la propia medición. Vamos a ver qué indica la normativa al respecto sobre cómo y con qué instrumentos se deben realizar las mediciones.

Con la calibración de los dispositivos de medición no es suficiente, estas medidas deben seguir la normativa correspondiente al completo para que los resultados puedan ser correctos y los datos sean fidedignos. Estas normativas son impuestas desde diferentes organismos según la región donde nos encontremos. En España, este organismo es AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). La norma que trata estos casos en concreto es la ISO 16283-1:2014 (Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción, Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo), también la ISO 26283-2, parte que trata el aislamiento a ruidos de impactos; así como la ISO 26283-3 (tercera parte que trata el aislamiento acústico de la fachada). Pero ya que vamos a hablar del aislamiento en paredes simples y dobles, nos centraremos en la primera.

Esta norma europea, aprobada por el CEN (Comité europeo de Normalización) y adoptada por AENOR en España, describe cómo deben realizarse las mediciones “in situ” para conocer el aislamiento acústico en los edificios.

Esta parte de la norma describe qué procedimientos deben realizarse para medir correctamente el aislamiento acústico a ruido aéreo entre dos salas en un edificio, utilizando para ello mediciones de presión acústica.

La norma también recoge de forma muy detallada qué parámetros relacionados con estas medidas son de interés y cómo se definen. Los más importantes son:

- Diferencia de nivel D (estandarizada):

Se define como la diferencia entre los niveles de presión acústica promediados entre la fuente y el receptor.

$$D(dB) = L_1 - L_2 \quad (1.1)$$

Donde: L1 es el nivel de presión acústica en el recinto fuente y L2 en el recinto receptor.

- Diferencia de nivel normalizada Dnt:

Se define como:

$$Dnt = D + 10 * \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (1.2)$$

Donde: T es el tiempo de reverberación en el receptor,  $T_0$  tiempo de reverberación de referencia (en viviendas  $T_0 = 0,5s$ )

- Índice de reducción sonora R:

El índice de reducción sonora se define como:

$$R = D + 10 * \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad (1.3)$$

Donde S es la superficie del cerramiento y A el área de absorción del local receptor.

- Índice de reducción acústica aparente R':

R' se define como diez veces el logaritmo del cociente de la potencia acústica ( $W_1$ , la incidente) a la potencia total radiada al recinto receptor. Con  $W_2$  la potencia radiada por el elemento de ensayo y  $W_3$  la radiada por elementos de flanco.

$$R' = 10 * \log\left(\frac{W_1}{W_2+W_3}\right) \quad (1.4)$$

También se define como:

$$R' = D + 10 * \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad (1.5)$$

Siendo S es el área de la separación común (metros cuadrados) y A es el área de absorción equivalente (metros cuadrados):

$$A = \frac{0.16 * V}{T} \quad (1.6)$$

Con V, Volumen del recinto receptor (metros cúbicos), y T, Tiempo de reverberación en el recinto receptor.

Por otra parte, también se especifica cómo se deben realizar las mediciones para adecuarse a la normativa, indicando con qué norma se deben calibrar los instrumentos (los cuales deben a su vez cumplir las especificaciones requeridas), así como en qué rango de frecuencias deben realizarse las mediciones, lo cual será en bandas de tercio de octava.

A continuación, vamos a indicar de manera resumida, las directrices básicas para realizar las mediciones según la normativa:

Las mediciones deben realizarse en dos recintos: el emisor, donde se encuentra el altavoz (o los altavoces), y el recinto receptor.

El equipo que genera el sonido debe constar de dos altavoces en diferentes posiciones o de un único altavoz, moviéndolo en dos posiciones. El sonido que genera el equipo debe ser estable y tener un espectro continuo en las bandas de frecuencia que se están midiendo. En estos casos se recomienda el ruido blanco o rosa como señal de ruido debido a su densidad espectral. Además, los altavoces deben estar separados entre sí y de las paredes con unas medidas mínimas requeridas, ya que podría alterar los resultados si los altavoces están muy cerca o si estos se encuentran muy próximos a la pared.

El micrófono situado en la sala receptora puede ser fijo o puede estar sujeto por un operario. Se deben realizar como mínimo cinco mediciones en diferentes posiciones. En cualquier caso, se deben realizar mediciones en ambas salas, tal y como vemos en la fórmula. En el caso de micrófonos movidos por el operario, se especifica qué clase de movimientos debe realizar, existiendo varias posibilidades.

También se especifica el contenido mínimo requerido en los informes de ensayo, debiendo hacer referencia a la norma, todos los datos referentes al organismo que realiza las mediciones, dónde y cuándo se han realizado, las características de la sala, así como una descripción del procedimiento y las indicaciones sobre los resultados.

Como se ha comentado, los índices definidos en las normas ISO de la serie 140 siempre lo son en función de la frecuencia. Para la evaluación de un índice global existe la norma UNE-EN ISO 717-1, que proporciona un método para calcular un “índice ponderado de reducción del ruido”, a partir del aislamiento en función de la frecuencia.

Los índices ponderados, pretenden simplificar la formulación de requisitos en las legislaciones o códigos de edificación. Estos índices, se identifican con el subíndice W, los que nos interesan son

$R_w$  (Índice de reducción sonora ponderado), y  $Dnt_w$  (Diferencia de niveles estandarizada). En estos índices, los valores obtenidos en las definiciones anteriores pasan a ser índices globales.

Los valores obtenidos conforme a las normas internacionales ISO (como ISO 140-3, 140-4 y 140-5), se comparan con valores de referencia (los cuales podemos ver en la tabla 1 a continuación), en el rango de frecuencias medido entre 100 y 3150 Hz para bandas de tercio de octava, y de 125 a 2000 Hz para bandas de octava.

Esta comparación debe de realizarse de la siguiente manera: los valores obtenidos en las mediciones, con una precisión de 0.1dB, se desplazan en la curva de referencia en saltos de 1dB hacia la curva medida, hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible, pero nunca mayor de 32dB (en el caso de mediciones en 16 bandas de tercio de octava) o 10dB en el caso de mediciones en 5 bandas de octava.

Se produce una desviación desfavorable en una determinada frecuencia, cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de referencia. Es importante tener en cuenta que solo se deben considerar las desviaciones desfavorables.

Los valores de  $R_w$  y de  $Dnt_w$ , expresados en decibelios, son los obtenidos a 500Hz tras aplicar el desplazamiento. El resto de valores se emplea únicamente para comparar con los resultados de mediciones in situ en bandas de octava <sup>(11)</sup>.

Frecuencia (Hz)	Valores de referencia (dB)	
	Bandas de tercio de octava	Bandas de octava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	55
1250	56	
1600	56	
2000	56	56
2500	56	
3150	56	

Tabla 1: Valores de referencia para el cálculo de aislamiento a ruido aéreo.

Puesto que en este trabajo nos vamos a centrar en los modelos de predicción más que en las mediciones prácticas, trataremos a continuación de manera breve, los materiales utilizados en el acondicionamiento y aislamiento acústico, para posteriormente, ver en profundidad los modelos a estudiar. Pero es importante tener en cuenta lo indicado anteriormente, de esta manera podemos ver que realmente es un trabajo costoso realizar las mediciones tal y como las normativas lo requieren, por lo que los modelos de predicción tienen una gran importancia y una razón para ser utilizados <sup>(12), (13)</sup>.

## 6. Aislamiento acústico y materiales

Cuando estudiamos el sonido, su transmisión es tratada como una propagación por ondas que al incidir sobre un material se convierte en un movimiento vibratorio.

Cuando un frente de ondas incide sobre una pared, esta se pone en movimiento vibratorio, radiando energía por el extremo opuesto. Puesto que la gran mayoría de veces existe una sala colindante, es muy importante tener en cuenta las propiedades del material con el que se construye la pared para tratar el aislamiento, así como los niveles de ruido a los que se expone.

Existen dos vías de transmisión del sonido entre salas: directas y de flanqueo. Las directas son las que se transmiten por una única pared mientras que las de flanqueo son las que se transmiten entre las paredes a través de sus uniones. Esto es muy importante, ya que la energía no se transmitirá únicamente a través de la pared donde apliquemos el aislamiento. También tenemos que tener en cuenta que la energía no se transmitirá únicamente a través de la estructura del edificio, también lo hará por el aire. Por otro lado, las fuentes de ruido dependen del origen de este <sup>(14)</sup>.

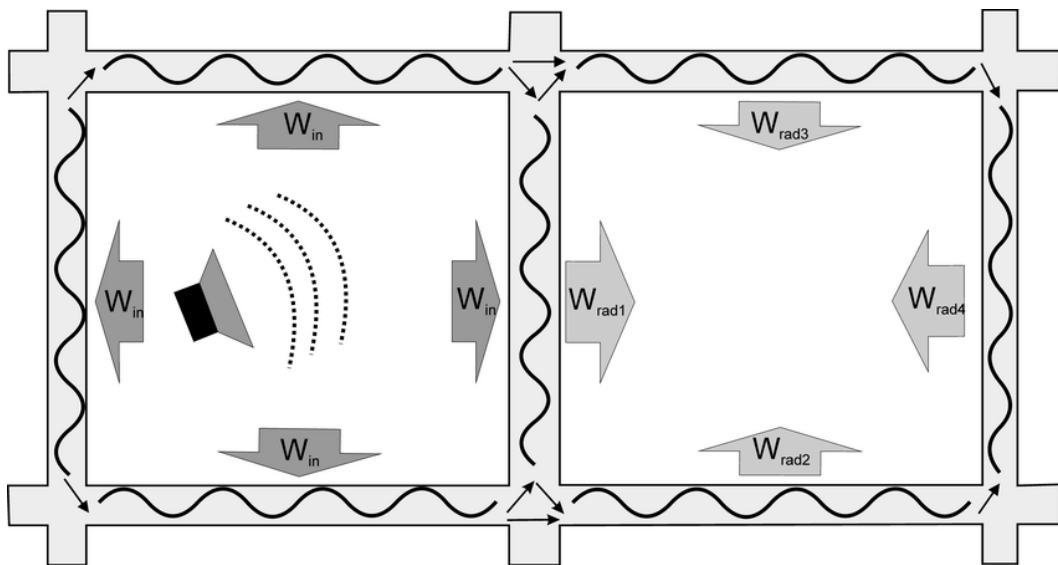
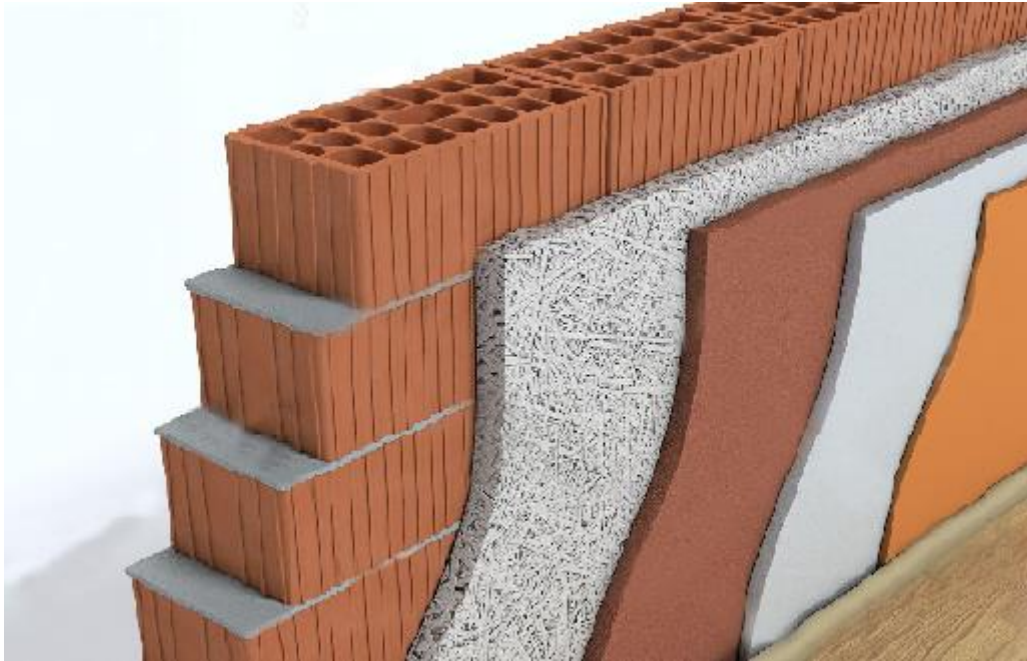


Ilustración 6. Esquema de transmisión del sonido entre salas por las diferentes vías.

Debemos tener en cuenta que la pared vibra porque se excita por una de sus caras, en el otro lado es un objeto radiante, es decir, emite ondas acústicas, por lo que la resistencia o facilidad de la pared para vibrar depende de ciertas características, como son, su masa, el material del que está hecha, la forma o las dimensiones de esta entre otros.

Sabiendo todo esto, vemos que el aislamiento acústico no solo dependerá de la propia pared en sí, si no que indirectamente la energía también se puede transmitir a la otra estancia.

En la práctica, las paredes no están hechas de un único material, además, nos encontramos con elementos tales como ventanas y puertas.



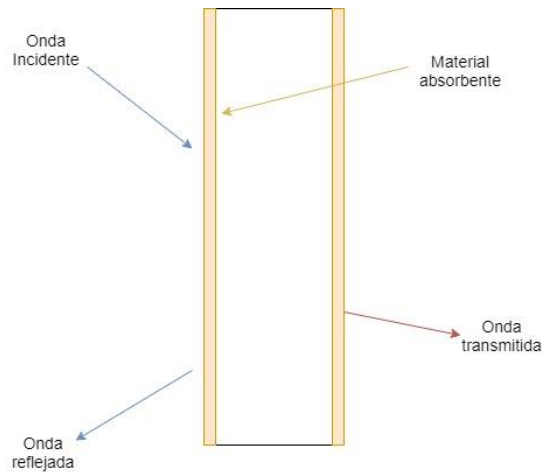
*Ilustración 7. Diferentes capas que forman una pared.*

A la hora de diseñar un aislamiento acústico en un recinto dado, el éxito dependerá sobre todo de los materiales que elijamos, por ello es importante saber las características de estos.

Antes de profundizar con el aislamiento acústico, debemos realizar una diferenciación con el acondicionamiento acústico. Mientras que el aislamiento es el conjunto de acciones aplicadas en proteger el recinto de ruidos exteriores, el acondicionamiento busca la mejora de calidad acústica de recintos ya aislados, ajustando el parámetro de reverberación.

En ambos casos, se toman medidas similares, pero enfocadas a distintos objetivos. Estas normalmente se basan en el uso de estructuras para reducir la transmisión sonora, la colocación de unidades suspendidas y el recubrimiento de paredes, suelo y techo.

Cuando una onda sonora incide contra un obstáculo, parte de la energía se transmite, otra parte se refleja y, por último, otra parte se absorbe, esta parte es a la que el Coeficiente de Absorción se refiere.



*Ilustración 8. Diagrama de incidencia, reflexión y absorción de ondas sonoras impactando contra una superficie.*

La cuantificación de la absorción de un material es algo difícil, ya que esto depende de la frecuencia de la onda incidente. Por ello buscamos una forma de cuantificar el aislamiento que sea más sencilla de poder utilizar en la práctica. En la práctica nos interesaría que fuera un único valor ya que no puede ser algo tan simple como restar ese valor al nivel de ruido emitido en la sala. A continuación, vamos a ver qué parámetros se utilizan para este fin.

Para poder identificar las características de absorción de los materiales, las cuales no es posible identificar con una simple fórmula matemática, debemos conocer los coeficientes de absorción ( $\alpha$ ), los cuales se obtienen en laboratorio siguiendo un procedimiento sometido a la norma ISO 354 (UNE-EN 20354). En la práctica, estos coeficientes los proporciona el fabricante de los materiales y son acreditados mediante un certificado que garantiza que las mediciones se han realizado bajo la normativa requerida. Estas mediciones se realizan en las llamadas cámaras reverberantes, salas revestidas con materiales reflectantes y con una serie de elementos cuyo objetivo es crear un campo sonoro difuso. La determinación de estos coeficientes se realiza mediante la medición de tiempos de reverberación y el uso de la fórmula de Sabine (comentada en el apartado anterior).

El coeficiente de absorción es la relación entre la energía absorbida y la energía incidente en la superficie. Como hemos indicado anteriormente, el método más extendido para obtener los coeficientes es el método de la sala reverberante. El tiempo de reverberación depende directamente del material absorbente y de cómo está distribuido dentro de una sala. Para conocerlo, medimos el tiempo de reverberación de una sala, primero sin el material a medir, y luego con él, normalmente ubicándolo en el suelo. La fórmula del tiempo de reverberación (la cual hemos visto anteriormente) es la siguiente:

$$T = \frac{0.16 \cdot V}{A} \quad (2.1)$$



Como vemos, la superficie (área) del recinto, es un dato influyente en el coeficiente de absorción.

En la teoría, un coeficiente de absorción debe tener un valor entre 0 y 1, pero podemos encontrar valores superiores a 1 en materiales con mucho grosor o formas que hacen que no sea plano debido a su volumen <sup>(15)</sup>.

Este valor se expresa en función de la frecuencia y del ángulo (aunque esto no lo tendremos en cuenta ya que en las tablas se muestra el valor de una incidencia aleatoria). Debemos saber también que la absorción aumenta con la frecuencia: en bajas frecuencias la absorción aumenta con el espesor, pero en altas frecuencias no depende del espesor.

Tras la explicación sobre la absorción de los materiales, y relacionándolo con el aislamiento acústico, cabe destacar, que los materiales utilizados en la construcción por lo general son rígidos y no porosos, por lo cual tienen una absorción mínima, casi nula, del sonido. Es por ello la importancia de los materiales aislantes.

Los materiales absorbentes utilizados para el revestimiento de superficies son muy diversos y su uso depende de las necesidades del recinto, ya que, dependiendo de la frecuencia, se elegirá un material u otro. Esto nos permitirá tener el mejor resultado en la banda de frecuencias de interés.

Existen diferentes tipos de materiales para el aislamiento acústico, los cuales tienen diferentes características. Los materiales porosos son buenos absorbentes, pero sus poros deben estar interconectados entre sí. También se les denomina materiales de celda abierta. Algunos de estos materiales son: moquetas o paneles de lanas minerales. Los materiales al ser porosos permiten que la onda sonora penetre por múltiples canales, haciendo que la energía se pueda disipar en forma de calor en cuanto esta entra en contacto con los canales. A más poroso sea el material, habrá un mayor número de canales y, por tanto, se producirá una mayor absorción.

Por otra parte, tenemos los llamados metamateriales, que son estructuras artificiales formadas por diferentes materiales. Mediante la mezcla de materiales, podemos crear estructuras con unas propiedades nuevas, las cuales no se encuentran en los materiales naturales <sup>(16)</sup>.

En la Tabla 2 podemos ver ejemplos de materiales y sus coeficientes de absorción en las diferentes frecuencias <sup>(17)</sup>:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Hormigón Macizo	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
Bloques de hormigón pintados	0.1	0.05	0.6	0.07	0.09	0.08
Ladrillo revestido con yeso	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04

Tabla 2: Coeficientes de absorción de los materiales más utilizados en la construcción de edificios.

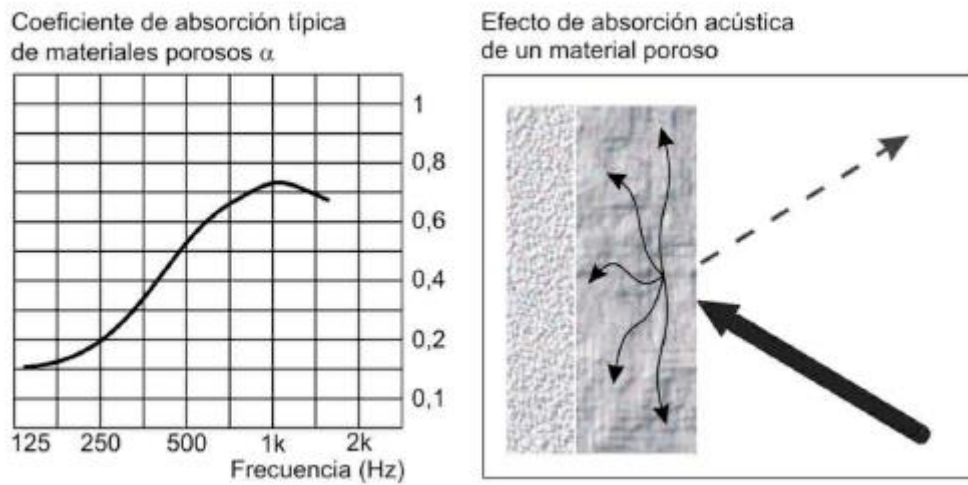


Ilustración 9. Variación del coeficiente de absorción de un material en función de la frecuencia, y efecto de absorción en un material poroso.

El uso de estos materiales tiene varios objetivos finales (dentro del acondicionamiento y el aislamiento acústico) tales como, modificar tiempos de reverberación, eliminación del eco y reducción del ruido. En este caso (aislamiento acústico), nos vamos a centrar en el último objetivo.

## 7. Modelos de predicción

Los modelos de predicción son conjuntos de fórmulas que permiten calcular cómo será la pérdida de transmisión sonora en una sala, teniendo en cuenta sus características. Existen diferentes modelos, los cuales permiten calcular cómo responderá el sistema dependiendo del tipo de estructura que vayamos a estudiar. Vamos a ver diferentes modelos, en el caso de la pared simple, el modelo de ley de masas, pero, en casos de paredes dobles, o paredes simples con otros elementos, tales como aberturas, puertas o ventanas, al existir una mayor complejidad en el sistema, se requiere utilizar modelos más avanzados.

Estos modelos se han utilizado históricamente para intentar explicar los fenómenos que se observan experimentalmente, tratando de alcanzar los resultados teóricos más próximos a los prácticos posibles.

Ya que el comportamiento del sonido es un fenómeno muy complejo, es por ello que existen un gran número de modelos que tienen en cuenta diferentes parámetros y tratan de explicar diferentes fenómenos.

El origen de los modelos relacionados con el sonido se remonta a la ecuación de onda, la cual es una ecuación con derivadas parciales que depende del tiempo, la cual responde a la fórmula de:

$$\frac{d^2u}{dt^2} = c^2 \Delta u = c^2 \left( \frac{d^2u}{dx_1^2} + \frac{d^2u}{dx_2^2} + \frac{d^2u}{dx_3^2} \right) \quad (3.1)$$

Esta ecuación es la que utiliza como base la matemática y la física (donde se le conoce cómo ecuación del calor y se emplea para modelar fenómenos físicos de disipación), posteriormente dio origen a los modelos que conocemos, los cuales son mucho más próximos en el tiempo que, por ejemplo, las primeras soluciones al problema de cuerda vibrante (en el cual se emplea la ecuación de onda para resolverlo) que datan de 1746 en adelante<sup>(18), (19)</sup>.

El primer modelo directamente relacionado con lo estudiado en este trabajo es el doctor Berger, el cual determinó en su tesis la ley de masas en el año 1911. Esta indica que, en caso de incidencia perpendicular de las ondas de sonido, el efecto de aislamiento de una pared aumentará 6dB si se duplica la masa de la pared o la frecuencia del sonido<sup>(20)</sup>.

Años más tarde, en 1948, Albert London desarrolla el Método de Onda Progresiva<sup>(21), (22)</sup>, el cual emplea estadísticas sobre la reverberación del sonido para calcular la pérdida de transmisión en incidencia normal en paredes simples homogéneas. También trata otras técnicas similares para los casos de transmisión a través de paredes dobles idénticas, con resultados muy próximos a los obtenidos en experimentos. Por otra parte, en 1950 también desarrolló el método para incidencias

oblicua y aleatoria. En 1949, Beranek & Work, presentan el Método de Impedancia Progresiva (PIM). Este trabajo está directamente relacionado con el método de London y deriva de la ecuación de onda antes nombrada. El método de Beranek & Work es únicamente válido para incidencia normal. Cabe destacar que dichos estudios, parten de experimentos realizados con motivo de la segunda guerra mundial, para tratar de reducir el sonido en aeronaves<sup>(23)</sup>.

Sin embargo, años después se desarrolla el método de impedancia progresiva para incidencia oblicua y aleatoria, esto fue en 1965 por White & Powell. Más adelante, en 1978, Ookura & Saito, implementan el método PIM de incidencia oblicua para poder utilizarlo en configuraciones multicapa con materiales absorbentes además de capas impermeables<sup>(24)</sup>. También en 1965, Lyon & Scharon, introducen un nuevo método basado en la transferencia de energía en sistemas interconectados, tomando el sistema de pared doble como si fueran varios elementos unidos, y aplicando conceptos estadísticos, utilizan el análisis estadístico de energía (SEA). Este método, también se desarrolló en un estudio cuya finalidad era mejorar el aislamiento acústico en el ámbito de la aviación, es por ello, que en este estudio se intentan simular situaciones tales como ambientes turbulentos. También explica que se tomen los sistemas de paredes doble como sistemas interconectados, al ser estos los más próximos a la estructura de las aeronaves.<sup>(25)</sup>

En el año anterior, 1964, Gomperts desarrolla una ecuación para calcular el índice de reducción sonora producida en una abertura pequeña (en forma de corte) en paredes infinitamente largas y vacías, método que se aplicó para cálculos en simulaciones de sistemas con elementos tales como puertas<sup>(26)</sup>.

En 1969 Crocker & Price amplían en el uso de conceptos estadísticos, calculando la respuesta de la estructura de los dos paneles, calculando la respuesta de cada uno por separado y superponiéndolos. De esta manera se obtiene la respuesta de todo el sistema, el cual se compone de transmisiones resonantes y no resonantes, y en esta última se aplica la Ley de Masa<sup>(27)</sup>.

El siguiente modelo que cabe destacar es el de Donato. Donato planteaba la existencia de dos posibles métodos para el cálculo de pérdidas en paredes dobles. La aproximación clásica de London (también trabajada por Beranek & Work), y la aproximación por estadística. En 1972 desarrolló un método basándose en los anteriores, donde simplifica las fórmulas e intenta compensar el comportamiento de las bajas frecuencias empleando aproximaciones del número de onda. Esto se debe a que la consideración de las paredes como infinitas llevaba a un error más alto de lo requerido, por ello, se realiza este cambio en las bajas frecuencias<sup>(21)</sup>,<sup>(28)</sup>.

Un año más tarde, en 1973, Sharp, dándose cuenta de que los modelos existentes hasta la fecha solo proporcionaban datos correctos para los ejemplos más simples, desarrolló un método que permitía obtener mejores resultados prediciendo sistemas más complejos. Sharp determinó que,

por debajo de la frecuencia crítica, la pérdida de transmisión se podía obtener aplicando la aproximación de dividir la masa del panel entre 1'9. Este método se podía utilizar para todos los ángulos de incidencia. Lo más relevante de su modelo es que mejora mucho en la transmisión cuando existen uniones entre los paneles <sup>(29)</sup>. También cabe destacar que Davy, en 1990, basándose en el modelo de Sharp, creó un modelo que permitía predecir de forma muy aproximada, sistemas con materiales absorbentes en la cavidad con materiales de los cuales no conocemos sus características <sup>(29), (30), (31)</sup>.

Otro modelo remarcable es el de Rindel (1975), este es un modelo un tanto peculiar, ya que se enfoca para la predicción de sistemas con ventanas de doble vidrio. Este modelo, se trata en su tesis doctoral, donde se estudia el aislamiento frente al ruido del tráfico <sup>(32)</sup>.

En el año 1976, Jones simplifica la Ley de Masa mediante una aproximación, haciendo más fácil de predecir el diseño de una pared doble, pero teniendo en cuenta las modificaciones realizadas por Sharp en 1973 <sup>(33)</sup>.

En 1984, Trochidis y Kalaroutis estudian las paredes dobles como si fueran un único sistema y empleando la ecuación de onda a la transmisión de sonido. También en el mismo año, Trochidis, empleando el análisis estadístico aplicado a la acústica arquitectónica, realiza estudios sobre la transmisión de sonido en grandes distancias a través de estructuras <sup>(34) (35)</sup>.

Un año después, Iwashige, Otha & Nakasako, partiendo del método SEA (análisis estadístico de la energía), y ampliándolo, desarrollan un método que permite aplicarse sobre paneles dobles con estructuras multicapa <sup>(36)</sup>.

Mechel, en el año 1986, desarrolla una ecuación sobre la reducción sonora en paredes con aperturas, expuestas a sonidos con ángulos de incidencia específicos, este modelo permitía comparar el efecto en cuanto a la reducción de sonido dependiendo de la longitud de la apertura <sup>(37)</sup>.

Posteriormente, en 1996, Novikov estudiando la pérdida de transmisión en paneles y paredes finitas en bajas frecuencias, comparando con paredes infinitas, y teniendo en cuenta que la extensión de los paneles influye de manera notable, la pérdida de transmisión podía calcularse para bajas frecuencias y paredes finitas mediante la Ley de Masa aplicando un factor de corrección <sup>(38)</sup>.

En ese mismo año, Nightingale, tras observar que en instalaciones reales con aislamiento antifuego la pérdida de transmisión era menor, desarrollan un modelo basado en SEA que tiene en cuenta la transmisión cuando existe aislante al fuego <sup>(39)</sup>.

Por último, vamos a nombrar modelos más próximos a la actualidad, ya que presentan mejores aproximaciones, pero también una mayor complejidad. Un ejemplo es el modelo de Craik & Smith, el cual publicaron en el año 2000, teniendo en cuenta el sonido transmitido por el aire y el transmitido por la estructura <sup>(40)</sup>.

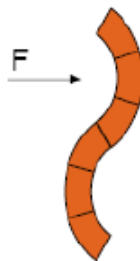
A continuación, vamos a estudiar en mayor profundidad los modelos más simples, los cuales pueden ser más fácilmente explicados, y que utilizaremos en el software de predicción.

Primero vamos a estudiar el caso más sencillo: la pared simple. Definimos pared simple como una pared homogénea en la que los puntos de su masa no varían la distancia entre ellos cuando la pared está vibrando, es decir, sin elasticidad y con espesor invariable.

Debido a que la vibración de una pared producida por una onda acústica es un fenómeno muy complejo, vamos a estudiar aproximaciones a este fenómeno.

Vamos a ver, en primer lugar, la aproximación a una pared simple, homogénea e infinita.

Una pared se compone de múltiples elementos (por ejemplo, ladrillos), los cuales no son independientes ya que, aunque son elásticos están unidos entre ellos. Al moverse uno de estos elementos, se mueven los que están en contacto con él, lo que provoca ondas que se transmiten por toda la pared. Estas ondas son las denominadas ondas de flexión, las cuales en una pared que suponemos infinita, las ondas de flexión no crearán ondas estacionarias ya que se propagarán.



*Ilustración 10. Representación de las ondas de flexión.*

En estos casos, la Ley de masas permite calcular una estimación del aislamiento acústico para una onda acústica que incide sobre una pared de forma perpendicular, esto lo calcula empleando la magnitud llamada Índice de reducción sonora (R).

Este índice se define como:

$$R = 20 * \log\left(\frac{m2\pi f}{2\rho_0 c_0}\right) = 20 * \log(mf) - 20 * \log\left(\frac{\rho_0 c_0}{\pi}\right) \quad (3.2)$$

Donde:

$m$ : Masa por unidad de superficie.

$f$ : Frecuencia de la onda incidente.

$\rho_0$ : Densidad

$c_0$ : Velocidad del sonido

Si el medio es el aire tendremos:

$$R = 20 * \log(mf) - 42 \quad (3.3)$$

Vemos que la Ley de masas nos indica que el aislamiento aumenta con la densidad del tabique, y también aumenta con la frecuencia. Si duplicamos la masa de la pared, el aislamiento aumenta en 6 dB, al igual que si duplicamos la frecuencia.

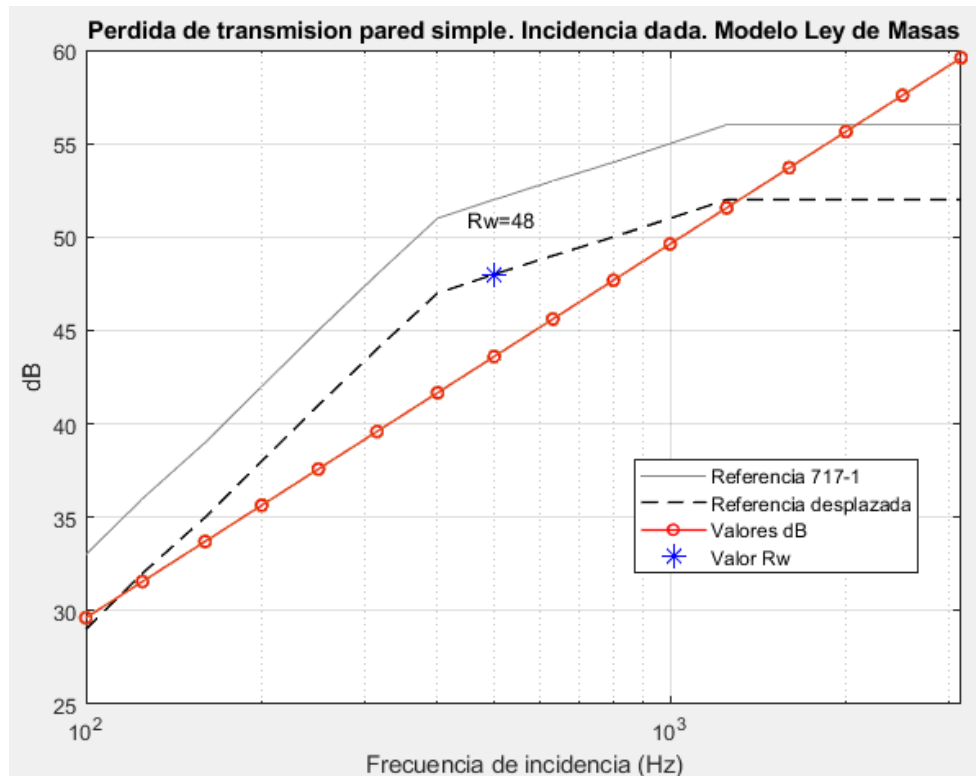


Ilustración 11. Ejemplo de aplicación de la Ley de masa utilizando el software.

En la práctica eso es algo más complejo ya que la pared presenta cierta elasticidad, por ello, podemos hacer una aproximación un poco más precisa, la cual tiene en cuenta la elasticidad de la pared, pero se sigue tomando la pared como homogénea e infinita. Al considerar la pared infinita, esas ondas no crean ondas estacionarias, ya que las ondas se propagan y no vuelven.

En estos casos consideramos el denominado fenómeno de coincidencia, el cual consiste en que la longitud de onda de la onda incidente sobre la pared es la misma que la longitud de onda de la onda de flexión que puede propagarse en ella:

$$\text{Coincidencia: } \lambda = \lambda_f * \sin \theta$$

$$\text{Teniendo en cuenta: } \lambda = c/f$$

Cuando esto ocurre, la onda acústica y la onda vibratoria están en fase. En esta situación, el aislamiento es muy inefectivo, ya que la pared vibrará. Cuánto vibrará depende de su amortiguamiento (factor de pérdidas).

Puesto que la longitud de onda depende de la frecuencia, para cada ángulo de incidencia existe una frecuencia en la cual ocurre el fenómeno de coincidencia. La frecuencia más baja a la cual ocurre el fenómeno de coincidencia sucede a los 90°.

La frecuencia crítica se define como aquella a partir de la cual un objeto rígido comienza a absorber parte de la energía de las ondas incidentes. Como vemos en la fórmula a continuación (3.4) esta frecuencia depende de varios factores, tanto de las características físicas del material, como de su espesor. Cuanto mayor sea este, la frecuencia incidente será menos capaz de penetrar el objeto.

$$\text{Coincidencia: } \lambda = \lambda_f * \sin 90 = \lambda_f$$

$$\frac{c_0}{f_c} = \frac{c_f}{f_c} \rightarrow c_0 = c_f = \sqrt{2\pi f_c} \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \quad (3.4)$$

Finalmente tenemos:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (3.5)$$

Donde:

h: espesor

m: densidad superficial

c: velocidad del sonido

B: rigidez a flexión, definida como:



$$B = \frac{E}{(1-\mu^2)} \frac{h^3}{12} \quad (3.6)$$

E: coeficiente de Young

$\mu$ : módulo de Poisson

Si tenemos en cuenta que el módulo de Poisson es pequeño en comparación a uno, lo podemos eliminar de la fórmula y llegar a:

$$f_c = \frac{c_0^2}{1.8t} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (3.7)$$

Material	Densidad ( $\frac{kg}{m^3}$ )	Frecuencia crítica (para 1cm)	Factor de amortiguamiento
Ladrillo macizo	1650	2380	$6 * 10^{-3}$
Hormigón denso	2350	2100	$3 * 10^{-3}$
Yeso	2350	3325	$3 * 10^{-3}$
Acero	7850	1000	$3 * 10^{-4}$
Aluminio	2700	1260	$3.5 * 10^{-3}$
Plomo	11300	5000	$1 * 10^{-3}$
Cartón-yeso	875	4670	$63 * 10^{-3}$
Vidrio	2500	1200	$2 * 10^{-3}$
Madera aglomerada	750	2960	$22 * 10^{-3}$
Madera contrachapada	600	2075	$2.8 * 10^{-3}$
Caucho	1000	85000	$50 * 10^{-3}$
Poliestireno	14	14000	$3 * 10^{-3}$

*Tabla 3: Ejemplos de frecuencias críticas, densidad y factores de amortiguamiento en materiales utilizados en la construcción.*

En cualquier otro espesor, la frecuencia crítica se obtendrá dividiendo la frecuencia crítica para 1cm entre el espesor (en cm) del cual queremos obtener la frecuencia crítica. Esta tabla viene implementada en el software de simulación que se ha programado, tal y como veremos más adelante.

La Ley de masas se cumple siempre que la frecuencia esté por debajo de la frecuencia crítica (de coincidencia), en el caso de que la frecuencia esté por encima de la frecuencia crítica, aplicaremos la ley de masas corregida:

Zona 1: Ley de masa ( $f < f_c$ )

$$R = 20 * \log(mf) - 47 \quad (3.8)$$

Zona 2: Ley de masa ( $f > f_c$ )

$$R = 20 * \log\left(\frac{wm}{2\rho_0 c_0}\right) - 10 * \log\left(\frac{\pi}{4\eta}\right) + 10 * \log\left(\frac{w}{wc}\right) + 10 * \log\left(1 - \frac{w}{wc}\right) - 5 \quad (3.9)$$

Con:  $\eta$  Factor de amortiguamiento del material y  $w = 2\pi f$ .

Por lo general, en la mayoría de materiales, esta frecuencia es muy alta y no suele afectar en el aislamiento acústico, por lo que no se tiene en cuenta en la mayoría de los casos. Únicamente cabe destacar que en la aproximación a la pared simple elástica, homogénea y finita sí se tiene en cuenta.

Vamos a pasar ahora a ver el modelo de Ley de masa para paredes dobles.

El índice que realmente se utiliza en la práctica y el que nos interesa es, el Índice de reducción sonora (R).

En el caso de la pared simple hemos explicado dos modelos, del cual utilizaremos el más simple, y en el caso de las paredes dobles, veremos modelos que nos permiten simularlo de manera más eficiente, ya que normalmente tenemos datos de los materiales, pero no de los niveles de potencia en las distintas salas, por lo cual necesitamos emplear otros modelos.

## 7.1. Modelos empleados en el software

### Ley de Masa de una pared doble a incidencia Normal:

En una pared doble, además de la frecuencia crítica de cada una de las hojas, tenemos las siguientes frecuencias de resonancia:

Frecuencia de resonancia masa-resorte-masa: En sistemas de pared doble, en los cuales tenemos dos hojas, cada una con una masa y una cámara (de aire o con material absorbente) que actúa como resorte, aparece el fenómeno de la resonancia a una frecuencia dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3.10)$$

Siendo:

K: Rigidez de la cavidad

M: Masa del sistema equivalente  $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$

$$M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (3.11)$$

Por lo que la frecuencia de resonancia para incidencia aleatoria resulta:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2 (m_1 + m_2)}{d m_1 m_2}} \text{ (HZ)} \quad (3.12)$$

Además de la frecuencia de resonancia masa-resorte-masa existe una frecuencia de resonancia denominada frecuencia de transición que depende del espesor de la cavidad y viene dada por la expresión:

$$f_t = \frac{2c}{\pi d} \text{ (Hz)} \quad (3.13)$$

Por lo tanto, utilizaremos tres fórmulas diferentes, la primera, en frecuencias por debajo de la frecuencia de resonancia, donde el sistema se comporta como una sola pared con una masa igual a la suma de las masas:

$$R = 10 \log \left( \frac{2m\pi f}{\rho_0 c} \right)^2 \quad (3.14)$$

Con  $m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$

La siguiente fórmula la utilizaremos entre la frecuencia de resonancia y la frecuencia de transición, donde las paredes sí que influyen:

$$R = 10 \log\left(\frac{2m\pi f}{\rho_0 c}\right)^2 + 40 \log\left(\frac{f_0}{f}\right) \text{ (dB)} \quad (3.15)$$

Por último, por encima de la frecuencia de transición, las longitudes de ondas son del orden del espesor de la cavidad, por lo que el sistema se comporta como dos paredes simples. En esta zona se encuentra la mayor atenuación y la fórmula resulta:

$$R = 10 \log\left(\frac{2m\pi f}{\rho_0 c}\right)^2 + 6 \text{ (dB)} \quad (3.16)$$

### **Ley de Masa a Incidencia Aleatoria:**

En frecuencias inferiores a la de resonancia, la ecuación utilizada corresponde con la de un panel simple con incidencia aleatoria y con una masa igual a la suma de las masas de los paneles:

$$R = 20 \log(mf) - 47.7 \text{ (dB)} \quad (3.17)$$

Con  $m = m_1 + m_2$

Cuando la frecuencia se encuentra entre la frecuencia de resonancia y la de transición, utilizamos la fórmula:

$$R = 10 \log\left[\frac{1}{4} \left(\frac{\omega m}{2\rho c}\right)^4 \left(\frac{\omega d}{c}\right)^2\right] - 28 \text{ (dB)} \quad (3.18)$$

Por último, por encima de la frecuencia de transición:

$$R = 10 \log\left(\frac{\omega m}{4\rho c}\right)^4 - 10 \text{ (dB)} \quad (3.19)$$

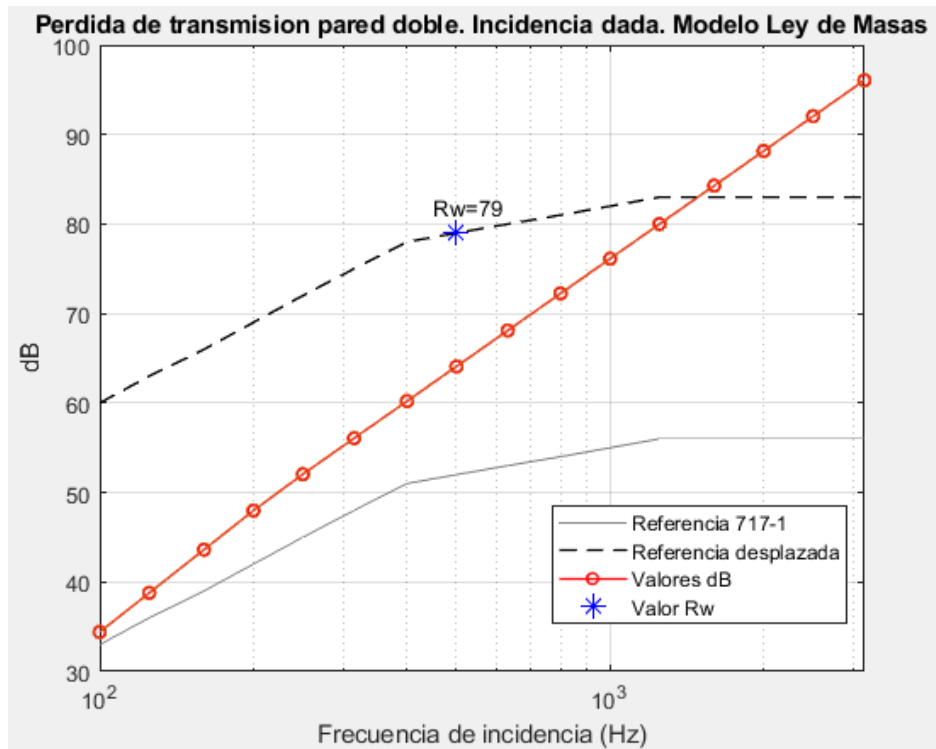


Ilustración 12. Ejemplo de aplicación de la Ley de masa en paredes dobles con incidencia aleatoria.

### Ley de Masa a Incidencia Normal intuitiva:

Cuando  $f < f_0$

$$R = 20 \log\left(\frac{(m_1 + m_2)\pi f}{\rho_0 c}\right) \quad (3.20)$$

Cuando  $f_0 < f < f_t$

$$R = \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \frac{R(f_t) - R(f_0)}{\log\left(\frac{f_t}{f_0}\right)} + R(f_0) \quad (3.21)$$

Cuando  $f > f_t$

$$R = 20 \log\left(\frac{m_1 \pi f}{\rho_0 c}\right) + 20 \log\left(\frac{m_2 \pi f}{\rho_0 c}\right) + 6 \quad (3.22)$$

### Modelo de Sharp:

Este modelo, que data de 1973, tiene varios métodos, en este caso hemos elegido el modelo con tres zonas separadas por frecuencia.

La frecuencia de resonancia menor de la cavidad ( $f_0$ ):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1.8\gamma P(m_1+m_2)}{dm_1m_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

Con:

$m_1$  y  $m_2$ : Densidades superficiales de los paneles ( $\frac{kg}{m^2}$ )

D: Distancia entre los paneles (m)

$\gamma$ : Relación de calores específicos del aire (1.41)

P: Presión aerostática ( $101.3 * 10^3$ )

La frecuencia límite es:

$$f_l = \frac{c}{2\pi d} \quad (3.24)$$

El factor R (pérdida por transmisión) separado, está dado por las siguientes ecuaciones:

Cuando  $f < f_0$

$$R = R_{SM} \quad (3.25)$$

Cuando  $f_0 < f < f_l$

$$R = R_{S1} + R_{S2} + 20 \log(fd) - 29 \quad (3.26)$$

Cuando  $f > f_l$

$$R = R_{S1} + R_{S2} + 6 \quad (3.27)$$

Donde:

$$R_S = 20 \log(mf) - 47.7 \quad (3.28)$$

Y

$$M = m_1 + m_2 \quad (3.29)$$

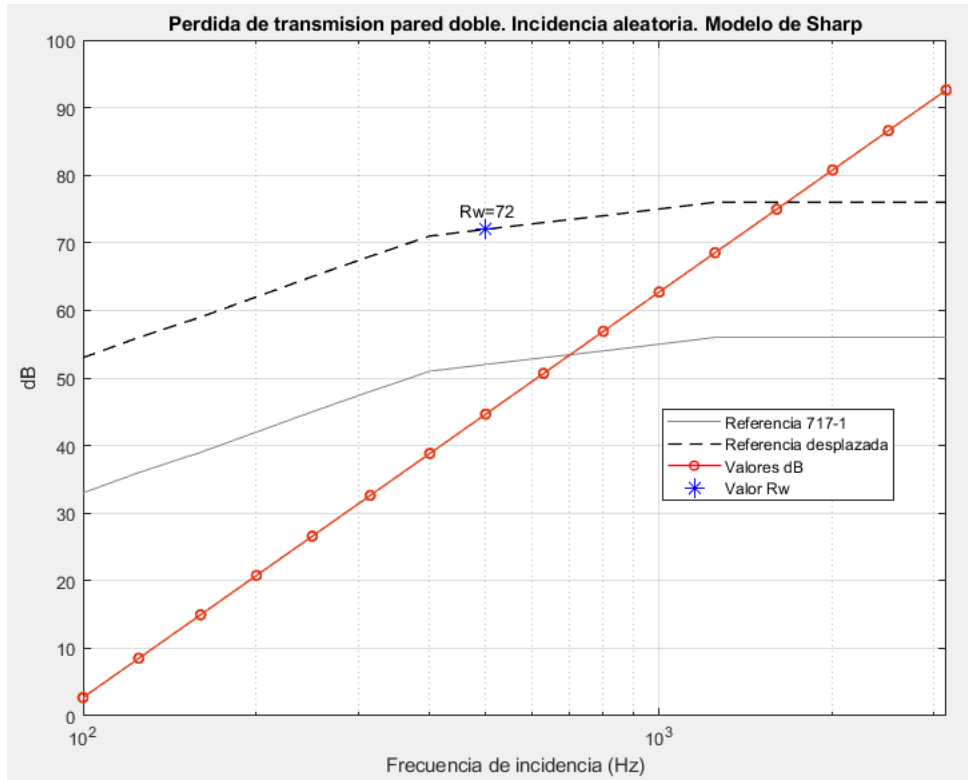


Ilustración 13. Ejemplo de aplicación del modelo de Sharp en el software.

## 8. Implementación mediante software

Utilizando Matlab, se han implementado las fórmulas anteriores. Utilizando la interfaz gráfica de Matlab, se ha enfocado de manera que obtengamos un resultado gráfico en el que podamos ver visualmente los resultados de la simulación de forma rápida e intuitiva, permitiendo así hacer comparaciones eficientemente.

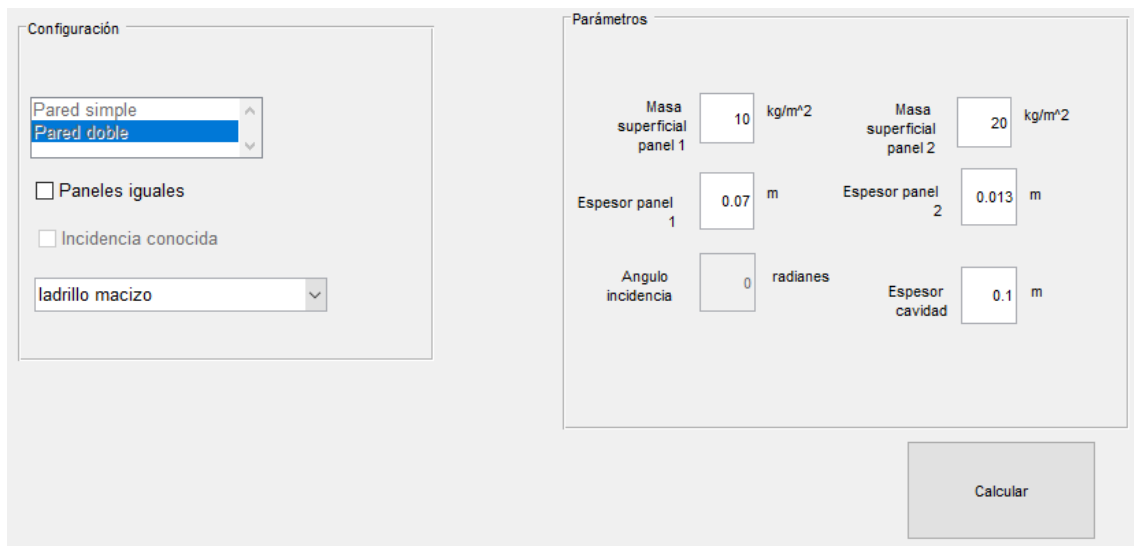
El programa consta de una pantalla principal en la que se introducen los datos de la simulación a realizar. Como vemos a continuación, el software nos pide los datos necesarios, y a raíz de los datos introducidos determina la fórmula a utilizar (tal y como veremos más adelante en el código del programa). Dependiendo de si queremos utilizar las simulaciones basadas en la ley de masas, o basadas en el modelo de Sharp, se ejecutará una función principal u otra, ya que, al requerir unos datos de entrada diferentes en cada modelo, se ha decidido separarlo en dos ejecutables, permitiendo así la personalización de las pantallas principales en cada caso.

Parámetro	Valor	Unidad
Masa superficial panel 1	10	kg/m <sup>2</sup>
Masa superficial panel 2	14	kg/m <sup>2</sup>
Espesor panel 1	0.05	m
Espesor panel 2	0.03	m
Angulo incidencia	0	radianes
Espesor cavidad	0.2	m

*Ilustración 14. Menú principal del software para modelos de predicción basados en la ley de masas en Matlab.*

Una vez introducidos los datos y pulsando el botón “Calcular” para ejecutar la simulación, nos muestra los resultados gráficamente, tal y como hemos indicado.





*Ilustración 15. Menú principal del software para modelos de predicción basados en el modelo de Sharp en Matlab.*

Como podemos observar en las gráficas del apartado anterior, el programa detecta qué método debe utilizar según los parámetros introducidos y ejecuta las operaciones, dibujando la gráfica pertinente con los puntos señalados en las diferentes frecuencias. En el caso del modelo de Sharp, se utiliza la base de datos indicada en la tabla 3, ya que en este programa se requieren la frecuencia de corte y el factor de amortiguamiento del material.

Internamente el programa funciona de la siguiente manera:

En primer lugar, se inicializa la función “perdida\_transmision\_masasGUI.m”, o “perdida\_transmision\_sharpGUI.m” las cuales recogen todos los datos a través de la interfaz gráfica de Matlab.

Si hemos ejecutado el modelo de masas, y en seleccionado la opción de pared simple, únicamente comprobará si la opción de incidencia conocida está activada o no. En ambos casos se ejecuta la función para paredes simples, tal y como vemos en el flujograma de la ilustración 17. Por otra parte, si elegimos paredes dobles, en primer lugar, comprobará si los paneles son iguales o no (comprobando la opción que tenemos a la izquierda), y a continuación (en ambos casos), si la incidencia es conocida o no. En el caso que queramos ejecutar la opción de paneles diferentes, e incidencia desconocida, deberemos ejecutar la función basada en Sharp.

En el caso de la función basada en Sharp, tal y como vemos en la ilustración 15, la opción de incidencia conocida está deshabilitada, y tendremos un desplegable donde nos permitirá elegir un material de nuestra base de datos.

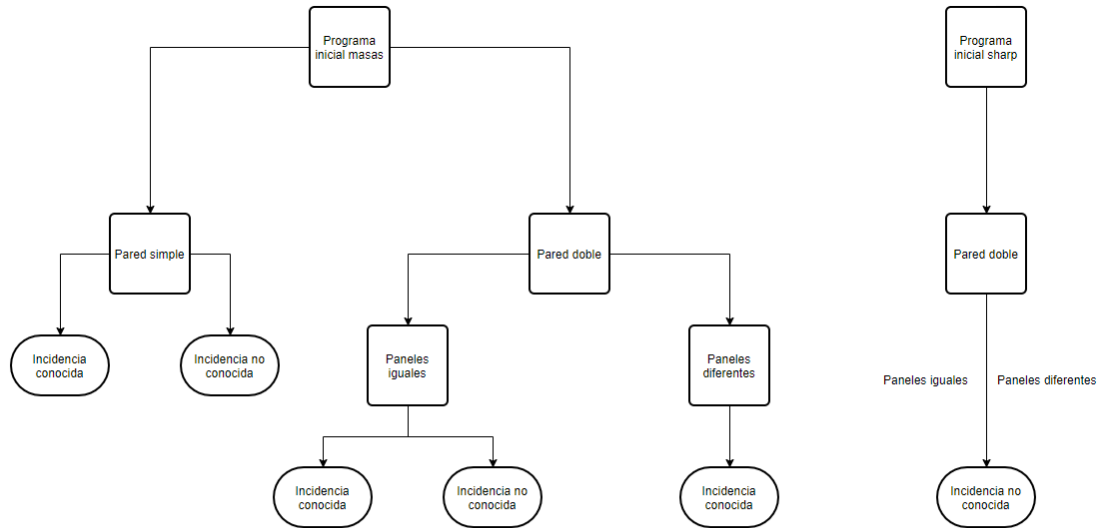


Ilustración 16. Flujo de funcionamiento del programa y sus modelos.

En todos los casos, tras ejecutar la función que corresponde (y pasándole las variables necesarias), nos devolverá la pérdida de transmisión en función de las frecuencias y dibujará el resultado, así como indicarnos el  $R_w$ , junto con la curva de referencia desplazada.

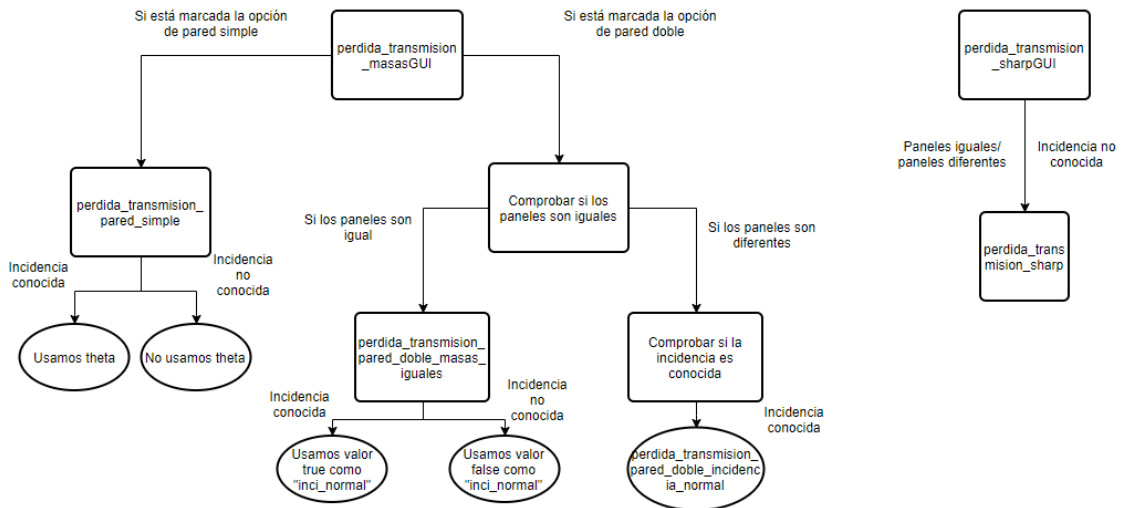


Ilustración 17. Flujo de funcionamiento del programa y sus funciones en Matlab.

Tal y como vemos en el flujo de funcionamiento, las funciones, según el modelo a utilizar, en nuestro programa corresponden con:

- Modelo ley de masa: Utiliza la función “perdida\_transmision\_pared\_simple”
- Ley de masa de una pared doble a incidencia normal: Utiliza la función "perdida\_transmision\_pared\_doble\_incidencia\_normal”
- Ley de masa a incidencia aleatoria: Emplea la fórmula "perdida\_transmision\_pared\_doble\_masas\_iguales”, igual que en incidencia normal.
- Ley de masa a incidencia normal intuitiva: Emplea la fórmula "perdida\_transmision\_pared\_doble\_masas\_iguales”, igual que en incidencia normal.
- Modelo de Sharp: se utiliza la fórmula “perdida\_transmision\_sharp”.

En cada uno de los modelos se utilizan fórmulas para calcular las frecuencias de transmisión o frecuencias de resonancia en los casos que son necesarias, tal y como podremos ver con detalle en el código del programa.

	<b>Ley de masa</b>	<b>Ley de masa pared doble incidencia normal</b>	<b>Ley de masa incidencia aleatoria</b>	<b>Ley de masa incidencia normal intuitiva</b>	<b>Modelo de Sharp</b>
<b>lista_pared</b>	1	2	2	2	2
<b>check_angulo</b>	0/1	1	0	1	0
<b>M1</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
<b>M2</b>	No	No	No	Sí	Sí
<b>h1</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
<b>h2</b>	No	No	No	Sí	Sí
<b>d</b>	No	Sí	Sí	Sí	Sí
<b>theta</b>	Sí /No	No	No	No	No

*Tabla 4: Variables utilizadas en cada modelo de predicción aplicado en Matlab.*

### 8.1 Comparación de datos de laboratorio con software

Vamos a ver una comparación entre simulaciones del modelo de Sharp, y experimentos realizados en laboratorio.

Este experimento se extrae del documento publicado por el National Research Council Canada <sup>(41)</sup>, documento en el cual se estudian diferentes materiales empleados en la construcción en situaciones diversas, del que vamos a emplear uno de los múltiples experimentos con los resultados obtenidos al aplicar el modelo de Sharp. Este estudio se realizó para comprobar la efectividad de los materiales que aparecen en el en las diferentes configuraciones. Tal y como indica el documento, se realizaron varias medidas en cada una de las configuraciones para minimizar el error y obtener unos valores fiables. En el estudio, se explica ampliamente la forma en la que se toman las medidas y las herramientas utilizadas, pero cabe destacar que las mediciones, y los instrumentos empleados, se adecúan a las normas ISO establecidas para estos casos, y es por ello por lo que se ha elegido este estudio para realizar una comparación con el software.

El primer experimento, realizado en laboratorio, numerado como TL-93-305, consta de una estructura con una pared doble, formada en ambos lados por una lámina de yeso doble de 13mm (26mm en total), donde tenemos a ambos lados de la cavidad lana de roca sobre perfilería metálica, teniendo la cavidad en total 146mm.

Se han tomado los valores anteriormente indicados, y las masas superficiales de ambos paneles (del mismo material)  $9 \frac{Kg}{m^2}$ .

El esquema del sistema es el siguiente:

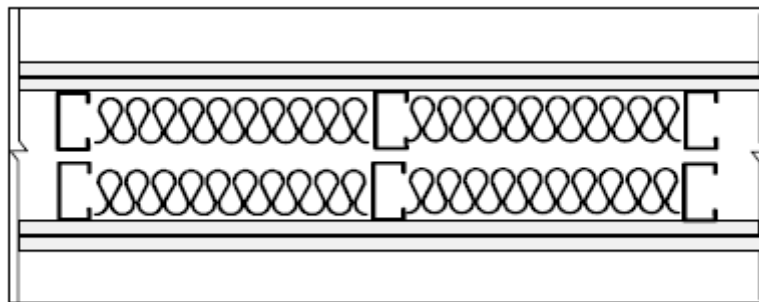


Ilustración 18. Esquema del sistema medido en laboratorio (TL-93-305).

Donde podemos observar en primer lugar, la capa doble de láminas de yeso, el interior con las perfilerías metálicas y con lana de roca, con su separación vacía, y de nuevo las dos láminas de yeso que cierran la cavidad.

El resultado de la simulación es el siguiente (en rojo los resultados de laboratorio, y en azul los obtenidos por el software):

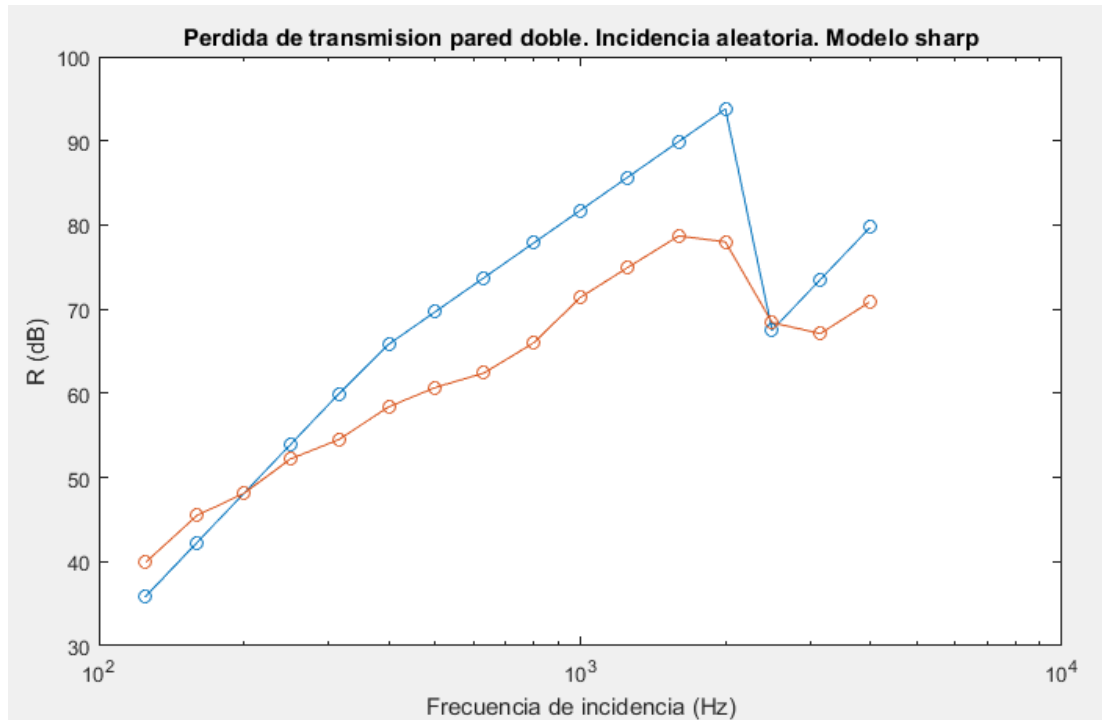


Ilustración 19. Ilustración del sistema medido en laboratorio (TL-93-305) vs resultados de la simulación en el software.

El segundo experimento realizado por la misma entidad (con código TL-93-304)<sup>(41)</sup>, consta de una estructura con una pared doble, formada en un lado por una lámina de yeso simple de 13mm, y una doble en la segunda pared (26mm en total), donde tenemos a ambos lados de la cavidad lana de roca sobre perfilera metálica, teniendo la cavidad en total 146mm.

Se han tomado los valores anteriormente indicados, y las masas superficiales de ambos paneles (del mismo material)  $9 \frac{Kg}{m^2}$ .

El esquema del sistema es el siguiente:

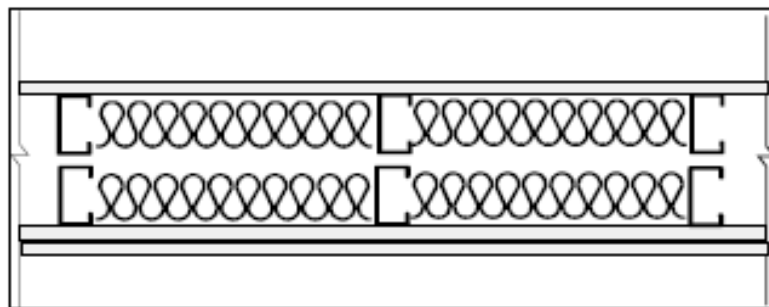


Ilustración 20. Esquema del sistema medido en laboratorio (TL-93-304).

La diferencia con el anterior es tener una capa simple en la primera pared, en vez de tenerla doble.

El resultado de la simulación es el siguiente (en rojo los resultados de laboratorio, y en azul los obtenidos por el software):

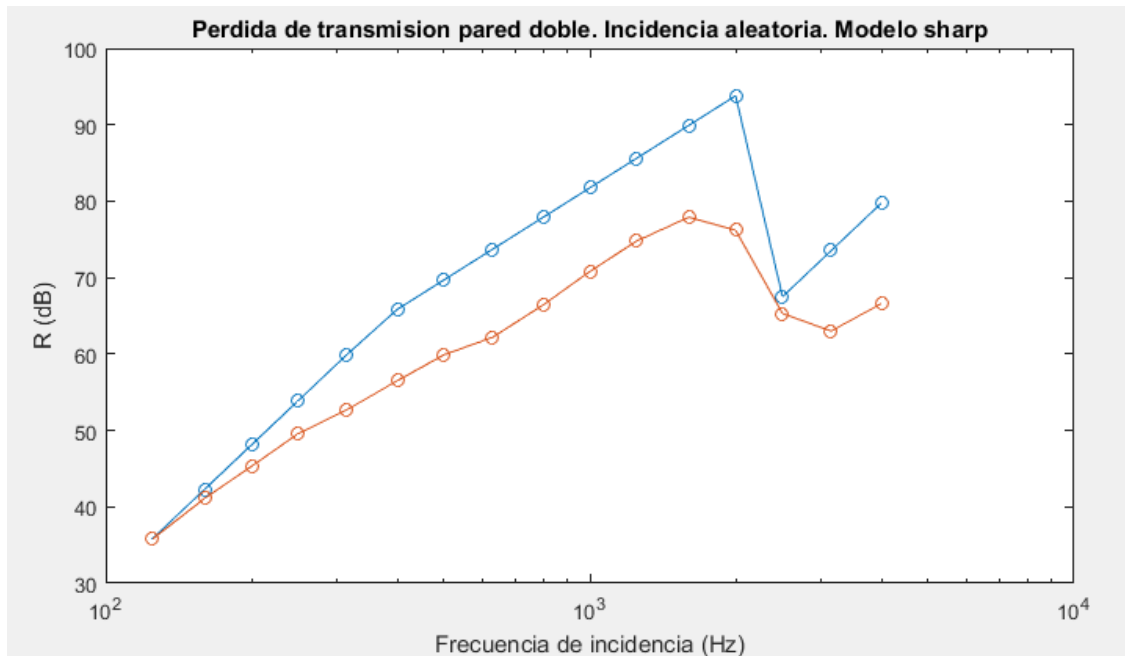
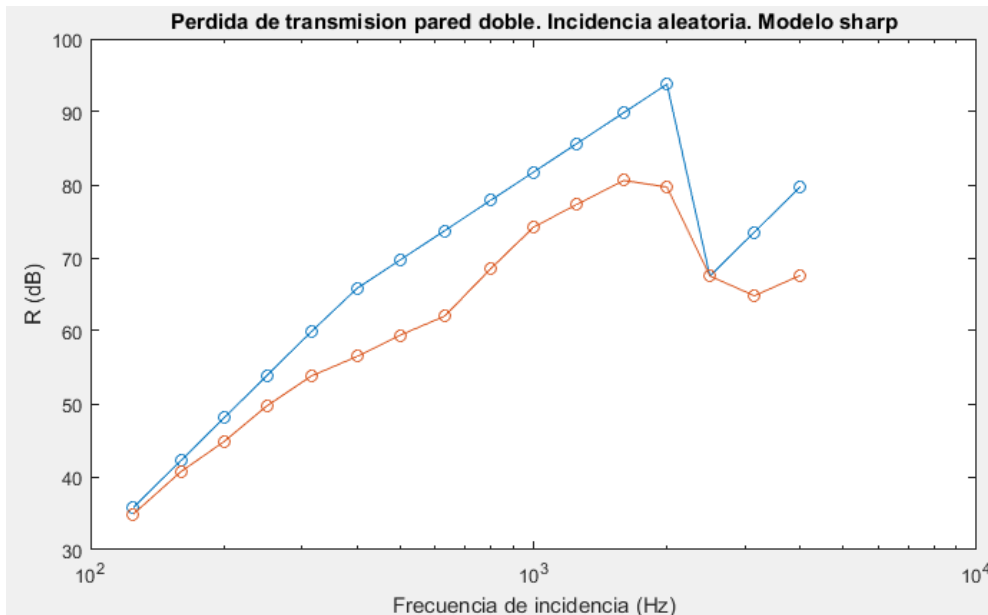


Ilustración 21. Ilustración del sistema medido en laboratorio (TL-93-304) vs resultados de la simulación en el software.

Por último, vamos a ver otro ejemplo (TL-93-307)<sup>(41)</sup>, el cual igual que el anterior, comparte el mismo esquema y materiales, salvo por el ancho de la cavidad, que es de 145mm.

El resultado de la simulación es el siguiente (en rojo los resultados de laboratorio, y en azul los obtenidos por el software):

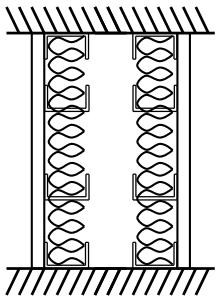
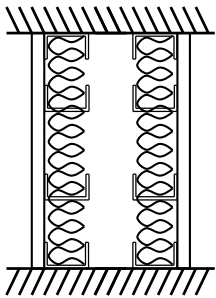
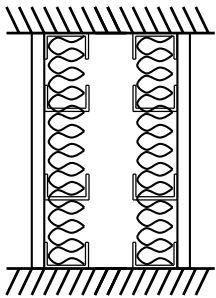
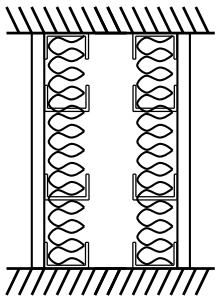


*Ilustración 22. Ilustración del sistema medido en laboratorio (TL-93-307) vs resultados de la simulación en el software.*

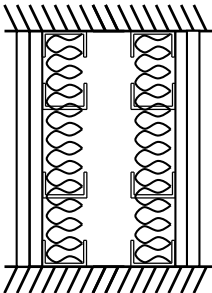
Tal y como se observa en las gráficas, las discrepancias entre los valores medidos y experimentales son menores del 10%. Las discrepancias son debidas a que el modelo de Sharp utiliza una pared de dimensiones infinitas, mientras que los resultados experimentales son de una pared finita. Por otro lado, las propiedades mecánicas y elásticas de los materiales varían ligeramente de un fabricante a otro. Como podemos observar, esta implementación del modelo nos permite ver de manera sencilla y aproximada cómo responderá el sistema. Teniendo en cuenta que es una simplificación de la realidad, a la cual se ajustará con mayor precisión en modelos sencillos, permite ver cómo se comportan los sistemas, dependiendo de la estructura y materiales que se emplea en estos. Esto permite comprender cómo funcionan las fórmulas, ver la precisión que tienen frente a sistemas reales, y, en definitiva, hacernos una idea de cómo será un sistema sin invertir el tiempo y los recursos necesarios para realizar una medición.

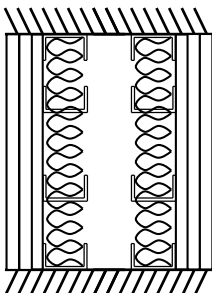
## 8.2 Caso práctico: Influencia del espesor de la cavidad y el número de placas de yeso laminado en el índice ponderado de reducción sonora, $R_w$

En este apartado vamos a ver el cálculo del índice ponderado de reducción sonora ( $R_w$ ) de una serie de particiones de doble hoja con el fin de analizar la influencia del espesor de la cavidad (distancia de separación entre las hojas de la partición) y el número de placas de yeso laminado a cada lado de la partición. Se han calculado 15 particiones distintas en las que se ha variado el número de placas a cada lado de la partición y el espesor de la cámara. A continuación, en la tabla 5 se muestran la descripción de las particiones calculadas, así como su código.

Tipo Partición	Descripción	Código
	<p>Partición compuesta por 1 hoja de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 100mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m<sup>2</sup> y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>S100</b></p>
	<p>Partición compuesta por 1 hoja de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 150mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m<sup>2</sup> y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>S150</b></p>
	<p>Partición compuesta por 1 hoja de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 200mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m<sup>2</sup> y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>S200</b></p>
	<p>Partición compuesta por 1 hoja de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 250mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m<sup>2</sup> y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>S250</b></p>



	<p>Partición compuesta por 1 hoja de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 300mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>S300</b></p>
	<p>Partición compuesta por 2 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 100mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>D100</b></p>
	<p>Partición compuesta por 2 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 150mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>D150</b></p>
	<p>Partición compuesta por 2 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 200mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>D200</b></p>
	<p>Partición compuesta por 2 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 250mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>D250</b></p>
	<p>Partición compuesta por 2 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 300mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<p><b>D300</b></p>

	<p>Partición compuesta por 3 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 100mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<b>T100</b>
	<p>Partición compuesta por 3 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 150mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<b>T150</b>
	<p>Partición compuesta por 3 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 200mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<b>T200</b>
	<p>Partición compuesta por 3 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 250mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<b>T250</b>
	<p>Partición compuesta por 3 hojas de yeso laminado (cartón yeso) en cada lado de la partición separadas 300mm con 50+50 mm de lana de roca de 40 kg/m2 y una placa de yeso laminado (cartón yeso) a cada lado.</p>	<b>T300</b>

*Tabla 5: Descripción de las particiones empleadas en el cálculo del caso práctico.*

En la siguiente tabla (6), se muestran los resultados obtenidos para cada una de las particiones:

<i>Código Partición</i>	<i>Espesor de la cavidad (mm)</i>	<i>Nº de placas de yeso laminado en cada lado</i>	<i>Índice ponderado de reducción Sonora, <math>R_w</math> (dB)</i>
S100	100	1	47
S150	150	1	51
S200	200	1	53
S250	250	1	54
S300	300	1	54
D100	100	2	59
D150	150	2	63
D200	200	2	66
D250	250	2	66
D300	300	2	67
T100	100	3	67
T150	150	3	71
T200	200	3	73
T250	250	3	73
T300	300	3	73

*Tabla 6: Resultados obtenidos empleando el software en el caso práctico.*

Como era de esperar, y de acuerdo con la ley de masas, el índice ponderado de reducción sonora ( $R_w$ ), aumenta al aumentar el número de placas, esto es, la masa de las hojas. También se observa que el incremento en  $R_w$  es menor cuando una placa adicional se añade a la partición con dos placas a cada lado.

Al observar la influencia de la separación entre hojas, se observa que al pasar de 100 mm a 150 mm hay un incremento de 4 dB en  $R_w$ . Este incremento se reduce a 2 dB cuando se pasa de 150 mm a 200 mm. A partir de una separación entre hojas de 200 mm el aumento de esta distancia no

incrementa de forma significativa el  $R_w$ , es decir, prácticamente se mantiene constante alrededor de un valor.

A la vista de estos resultados, podemos concluir que el aumento del número de placas es más significativo al pasar de 1 a 2 placas a cada lado que de 2 a 3 y que a partir de una separación entre hojas de 200 mm el aumento de esta distancia no incrementa de forma significativa el  $R_w$ , es decir, prácticamente se mantiene constante alrededor de un valor. Se podría decir que la distancia entre placas óptima en este caso es de 200 mm.

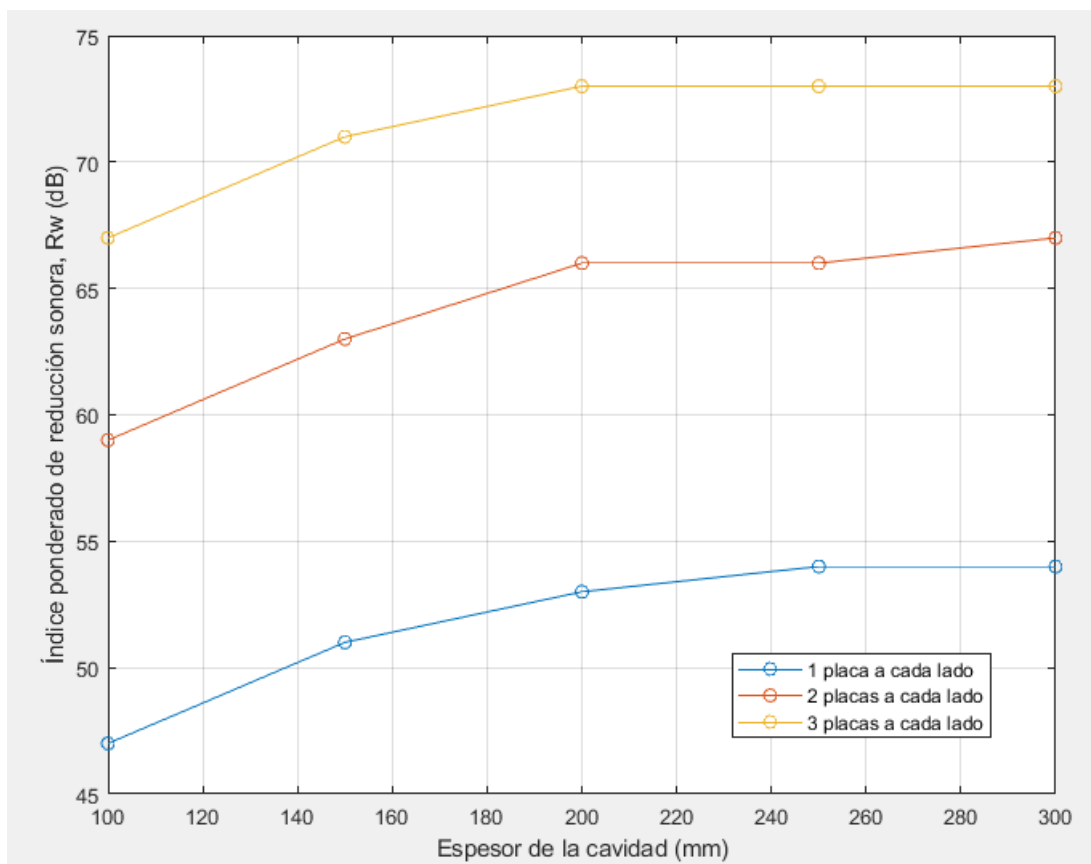


Ilustración 23. Representación de los resultados obtenidos simulando en el software.

## 9. Conclusiones

A lo largo del presente trabajo de fin de grado se ha pretendido no solo desarrollar un software para el cálculo de aislamiento acústico a ruido aéreo de particiones, si no también revisar el origen de estos modelos y su motivación. Para ello, se han estudiado los modelos más importantes, cuál es su origen, y en qué otros autores se basan. A pesar de la amplia documentación existente, esta se encuentra en su mayoría en tesis doctorales y en publicaciones de revistas, lo cual dificulta la recopilación de información, no obstante, se ha tratado de extraer los máximos datos posibles de autoridades en la materia y de estudios relevantes en la temática. Con todo ello, se ha llegado a las conclusiones que se describen a continuación.

Los modelos de aislamiento acústico nacen de la necesidad de conocer cómo reaccionará un sistema antes de ser construido, así como poder comparar las diferentes opciones disponibles para saber cuál es la más óptima antes de realizar ningún montaje ni mediciones in situ.

Tal y como hemos visto, los modelos de predicción de aislamiento acústico se han ido desarrollando y mejorando desde el siglo XX, convirtiéndose hoy en día, mediante los softwares existentes, en herramientas imprescindibles para el diseño de aislamientos en recintos donde la acústica tiene una gran importancia.

Realizando el software, y mediante los experimentos calculados con este, hemos podido ver que, aunque los modelos estudiados tienen un error bastante grande (aunque veamos que son inferiores al 10%, un error de 3 dB o incluso de 6 dB es un error muy grande), se puede observar que permiten ver la forma en la que actuará el sistema, con una curva que sí corresponde con el resultado obtenido en laboratorio, por lo que, aunque en estos modelos no ofrezcan un resultado fidedigno, permiten ver de qué manera actuará el aislamiento. Es importante tener en cuenta que para estos fines, existen softwares profesionales, los cuales emplean modelos mucho más complejos, tales como los que hemos visto en el apartado 3.

También podemos ver que el software permite realizar comparaciones entre diferentes configuraciones tal y como hemos dicho. En el apartado anterior, tenemos un caso práctico, en el cual se compara el comportamiento de diferentes configuraciones de paredes y diferentes separaciones entre ellas para poder comprobar qué configuración es más eficiente y cuál se adapta mejor a las necesidades de la situación.

Esto también nos ha servido para comprobar la variación del índice ponderado de reducción sonora en función del espesor de la pared y de la masa de esta, verificando así el comportamiento de la ley de masas, y comprobando que, a mayor grosor, mayor es el índice de reducción sonora.

Podemos destacar la aplicación didáctica del software, ya que como hemos visto sirve para estudiar diferentes casos (anteriormente nombrados), y verificar resultados de laboratorio. Por último, vamos a proponer líneas futuras de investigación relacionadas con este trabajo. Por lo que respecta al trabajo, se podría ampliar el apartado que trata las normativas con respecto al ruido, pudiendo añadir estas al software para verificar si en ciertas situaciones, el aislamiento que estamos calculando sería suficiente ante un determinado ruido. Otra opción podría ser la realización de una aplicación móvil que permita realizar los mismos cálculos que permite el software realizado en este trabajo, ya que hoy en día, los teléfonos inteligentes son capaces de ejecutar este tipo de herramientas. También se podrían añadir modelos nuevos (como algunos de los nombrados) que permiten realizar cálculos en otras situaciones, como en paredes con ventanas, o con aberturas, ampliando así las posibilidades del programa.

## Anexo

### Código del programa principal para el modelo de ley masas

```
function calculate_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to calculate (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

M1 = str2num(get(handles.edit_masa_superficial1,'String'));
M2 = str2num(get(handles.edit_masa_superficial2,'String'));
h1 = str2num(get(handles.edit_espesor1,'String'));
h2 = str2num(get(handles.edit_espesor2,'String'));
d = str2num(get(handles.edit_cavidad,'String'));
theta = str2num(get(handles.edit_angulo,'String'));

ff =
[100,125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150
];
TL = zeros(size(ff));
h = figure(99);
clf;

for i=1:length(ff)
    f = ff(i);
    if get(handles.lista_pared,'Value')==1 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==1
        [ TL(i) ] = perdida_transmision_pared_simple( M1, h1, f, theta
);
    elseif get(handles.lista_pared,'Value')==1 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==0
        [ TL(i) ] = perdida_transmision_pared_simple( M1, h1, f );
    elseif get(handles.lista_pared,'Value')==2 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==1 && M1==M2 && h1 == h2
        [ TL(i) ] = perdida_transmision_pared_doble_masas_iguales( M1,
h1, d, f, true);
    elseif get(handles.lista_pared,'Value')==2 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==0 && M1==M2 && h1 == h2
        [ TL(i) ] = perdida_transmision_pared_doble_masas_iguales( M1,
h1, d, f, false);

    elseif get(handles.lista_pared,'Value')==2 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==1
        [ TL(i) ] = perdida_transmision_pared_doble_incidencia_normal(
M1, M2, h1, h2, d, f);
    else
        error('caso desconocido');
    end
end

f= [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500
3150];

ref=[33 36 39 42 45 48 51 52 53 54 55 56 56 56 56];
ref2=ref;
TL2=TL;
desplaz=0; s=33;
```

```

while s>32

for i=1:16
    refdesp(i)=ref(i)+desplaz;
    if TL(i)-refdesp(i)>=0
        desvdesf(i)=0;
    else
        desvdesf(i)=refdesp(i)-TL(i);
    end
end

s=sum(desvdesf);
desplaz=desplaz-1;

end

desplaz2=0;

s2=33;

while s2>32

for i=1:16
    refdesp2(i)=ref2(i)+desplaz2;
    if TL2(i)-refdesp2(i)>=0
        desvdesf2(i)=TL2(i)-refdesp2(i);

    else

        desvdesf2(i)=0;

    end
end

s2=sum(desvdesf2);
desplaz2=desplaz2+1;

end

if s>s2

disp("El valor a 500 Hz es " + refdesp(8) + " y S=" + s)
semilogx(f,ref,'Color',[0.5 0.5 0.5]); hold on; grid on;
semilogx(f,refdesp,'k--','LineWidth',1)
semilogx(f,TL,'r-o','LineWidth',1,'MarkerSize',5)
semilogx(500,refdesp(8),'b*','MarkerSize',10)
legend('Referencia 717-1', 'Referencia desplazada', 'Valores
dB', 'Valor Rw')
str=("Rw=" + refdesp(8));
text(f(8)-50,refdesp(8)+3,str)
xlabel('Frecuencia')
ylabel('dB')
title('Valores de sonido frente a referencia')

```



```

else

disp("El valor a 500 Hz es " + refdesp2(8) + " y S=" + s2)
semilogx(f,ref2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); hold on; grid on;
semilogx(f,refdesp2,'k--','LineWidth',1)
semilogx(f,TL2,'r-o','LineWidth',1,'MarkerSize',5)
semilogx(500,refdesp2(8),'b*','MarkerSize',10)
legend('Referencia 717-1', 'Referencia desplazada', 'Valores
dB', 'Valor Rw')
str=("Rw=" + refdesp2(8));
text(f(8)-50,refdesp2(8)+3,str)
xlabel('Frecuencia')
ylabel('dB')
title('Valores de sonido frente a referencia')

end

plot(ff,TL,'-o');
hold on;
grid on
h.Children(2).XScale = 'log';
h.Children(2).XLabel.String = 'Frecuencia de incidencia (Hz)';
if get(handles.lista_pared,'Value')==1 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==1
    h.Children(2).Title.String = 'Perdida de transmision pared simple.
Incidencia dada. Modelo Ley de Masas';
elseif get(handles.lista_pared,'Value')==1 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==0
    h.Children(2).Title.String = 'Perdida de transmision pared simple.
Incidencia aleatoria. Modelo Ley de Masas';
elseif get(handles.lista_pared,'Value')==2 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==1 && M1==M2 && h1 == h2
    h.Children(2).Title.String = 'Perdida de transmision pared doble.
Incidencia dada. Modelo Ley de Masas';
elseif get(handles.lista_pared,'Value')==2 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==0 && M1==M2 && h1 == h2
    h.Children(2).Title.String = 'Perdida de transmision pared doble.
Incidencia aleatoria. Modelo Ley de Masas';
elseif get(handles.lista_pared,'Value')==2 &&
get(handles.check_angulo,'Value')==1
    h.Children(2).Title.String = 'Perdida de transmision pared doble.
Incidencia dada. Modelo Ley de Masas';
end
h.Children(2).Legend.String = h.Children(2).Legend.String(1:4);
h.Children(2).XLim(2) = f(end);

```

Nota: se ha eliminado la parte del código añadida por Matlab al implementar su interfaz gráfica. El resto de las funciones se encuentran presentadas en el anexo. Este es el código que se ejecuta al pulsar el botón Calcular.

## Código del programa principal para el modelo de Sharp

```
function calculate_Callback(hObject, eventdata, handles)
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

M1 = str2num(get(handles.edit_masa_superficial1, 'String'));
M2 = str2num(get(handles.edit_masa_superficial2, 'String'));
h1 = str2num(get(handles.edit_espesor1, 'String'));
h2 = str2num(get(handles.edit_espesor2, 'String'));
d = str2num(get(handles.edit_cavidad, 'String'));
theta = str2num(get(handles.edit_angulo, 'String'));

ff =
[100,125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150
]; %NOTA, CAMBIADO: AÑADO 100, QUITO 4000
TL = zeros(size(ff));
h = figure(99);
clf;

val = get(handles.popupmenu1, 'Value');
materiales = BBDD();
[fc, factam] = BBDD(materiales{val});

for i=1:length(ff)
    f = ff(i);
    [ TL(i) ] = perdida_transmision_sharp( M1, M2, h1, h2, d, f, fc,
factam );
end

f= [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500
3150];

ref=[33 36 39 42 45 48 51 52 53 54 55 56 56 56 56];
ref2=[33 36 39 42 45 48 51 52 53 54 55 56 56 56 56];
TL2=TL;

desplaz=0;

s=33;

while s>32

for i=1:16
    refdesp(i)=ref(i)+desplaz;
    if TL(i)-refdesp(i)>=0
        desvdesf(i)=0;
    else
        desvdesf(i)=refdesp(i)-TL(i);
    end
end
end
```

```

s=sum(desvdesf);
desplaz=desplaz-1;

end

desplaz2=0;

s2=33;

while s2>32

for i=1:16
    refdesp2(i)=ref2(i)+desplaz2;
    if TL2(i)-refdesp2(i)>=0
        desvdesf2(i)=TL2(i)-refdesp2(i);

        else
            desvdesf2(i)=0;

        end
    end
end

s2=sum(desvdesf2);
desplaz2=desplaz2+1;

end

if s>s2

disp("El valor a 500 Hz es " + refdesp(8) + " y S=" + s)
semilogx(f,ref,'Color',[0.5 0.5 0.5]); hold on; grid on;
semilogx(f,refdesp,'k--','LineWidth',1)
semilogx(f,TL,'r-o','LineWidth',1,'MarkerSize',5)
semilogx(500,refdesp(8),'b*','MarkerSize',10)
legend('Referencia 717-1', 'Referencia desplazada', 'Valores
dB', 'Valor Rw')
str=("Rw=" + refdesp(8));
text(f(8)-50,refdesp(8)+3,str)
xlabel('Frecuencia')
ylabel('dB')
title('Valores de sonido frente a referencia')

else

disp("El valor a 500 Hz es " + refdesp2(8) + " y S=" + s2)
semilogx(f,ref2,'Color',[0.5 0.5 0.5]); hold on; grid on;
semilogx(f,refdesp2,'k--','LineWidth',1)
semilogx(f,TL2,'r-o','LineWidth',1,'MarkerSize',5)
semilogx(500,refdesp2(8),'b*','MarkerSize',10)
legend('Referencia 717-1', 'Referencia desplazada', 'Valores
dB', 'Valor Rw')
str=("Rw=" + refdesp2(8));
text(f(8)-50,refdesp2(8)+3,str)

```

```

xlabel('Frecuencia')
ylabel('dB')
title('Valores de sonido frente a referencia')

end
TL
plot(ff,TL,'-o');
hold on;
grid on
h.Children(2).XScale = 'log';
h.Children(2).XLabel.String = 'Frecuencia de incidencia (Hz)';
h.Children(2).Title.String = 'Perdida de transmision pared doble.
Incidencia aleatoria. Modelo de Sharp';
h.Children(2).Legend.String = h.Children(2).Legend.String(1:4);
h.Children(2).XLim(2) = f(end);

```

Nota: igual que en el código anterior, se ha eliminado la parte del código añadida por Matlab al implementar su interfaz gráfica.

## perdida\_transmision\_pared\_simple.m

```
function [ t1 ] = perdida_transmision_pared_simple( M, h, f, theta
)
% Output: t1, perdida de transmisión
% Input: M, masa superficial de la pared; h, espesor de la pared;
% f, frecuencia incidente; theta (opcional), angulo incidencia

rho0 = 1.21;           % kg/m^3
c = 343;              % m/s

if nargin<4
    % incidencia aleatoria
    t10 = perdida_transmision_pared_simple( M, h, f, 0 );
    t1 = t10 - 10*log10(0.23*t10);
else
    % incidencia conocida
    omega = 2*pi*f;    % frecuencia angular
    m = M*h;          % masa pared
    t1 = 20*log10(m*omega*cos(theta)/(2*rho0*c));
end
```

## perdida\_transmision\_pared\_doble\_masas\_iguales.m

```
function [ t1 ] = perdida_transmision_pared_doble_masas_iguales( M,
h, d, f, inci_normal)
% Output: t1, perdida de transmisión
% Input: m, masa superficial de la paredes; h, espesor de las
paredes
% d, espesor de la cavidad; f, frecuencia incidente; inci_normal
(bool)
rho0 = 1.21;      % kg/m^3
c = 343;         % m/s
K = rho0*c^2/d;

m = M*h;          % masa de las paredes
omega = 2*pi*f;   % frecuencia angular
f0 = frecuencia_resonancia_mecanica(d,M,M); % frecuencia
resonancia
ft = frecuencia_transicion(c,d); % frecuencia
transicion

if inci_normal
    % incidencia conocida
    if f <= f0
        % si la frecuencia es menor que la resonancia
        t1 = 20*log10(2*m*pi*f/(rho0*c));
    elseif f <= ft
        % si la frecuencia esta entre la resonancia y la frec.
transicion
        t1 = 20*log10(2*m*pi*f/(rho0*c)) + 40*log10(f0/f);
    else
        % si la frecuencia es mayor que la frec. limite
        t1 = 20*log10(2*m*pi*f/(rho0*c)) + 6;
    end
else
    % incidencia aleatoria
    if f <= f0
        % si la frecuencia es menor que la resonancia
        t1 = 20*log10(m*f) - 47.7;
    elseif f <= ft
        % si la frecuencia esta entre la resonancia y la frec.
transicion
        t1 = 10*log10(0.25*(omega*m/(2*rho0*c))^4*(omega*d/c)^2) -
28;
    else
        % si la frecuencia es mayor que la frec. limite
        t1 = 10*log10((omega*m/(4*rho0*c))^4) - 10;
    end
end
end
```

### frecuencia\_resonancia\_mecanica.m

```
function [ f0 ] = frecuencia_resonancia_mecanica( d, m1, m2 )
% Output: f0, frecuencia de resonancia mecanica
% Input: m1, masa de la pared 1; m2, masa de la pared 1; d, espesor
de la
% cavidad
rho0 = 1.21;      % kg/m^3
c = 343;         % m/s

K = rho0*c^2/d;
M = masa_sistema_equivalente(m1,m2);
f0 = sqrt(K/M)/(2*pi);

end
```

### frecuencia\_transicion.m

```
function [ ft ] = frecuencia_transicion( c, d )
% Output: ft, frecuencia de transicion
% Input: c, velocidad del sonido del aire; d, espesor de la cavidad

ft = 2*c/(pi*d);

end
```

## perdida\_transmision\_pared\_doble\_incidencia\_normal.m

```
function [ t1 ] = perdida_transmision_pared_doble_incidencia_normal(
M1, M2, h1, h2, d, f)
% Output: t1, perdida de transmisión, incidencia normal
% Input: M1, masa superficial de la pared 1; M2, masa superficial de
la pared 1;
% h1, espesor pared 1; h2, espesor pared 2; d, espesor de la
cavidad; f, frecuencia
% incidente;

rho0 = 1.21;      % kg/m^3 a 20°C
c = 343;         % velocidad del sonido m/s
m1 = M1*h1;      % masa pared 1
m2 = M2*h2;      % masa pared 2

f0 = frecuencia_resonancia_mecanica(d,m1,m2); % frecuencia de
resonancia del sistema
ft = frecuencia_transicion(c,d);           % frecuencia de
transicion

if f <= f0
    % si la frecuencia es menor que la resonancia
    t1 = 20*log10((m1+m2)*pi*f/(rho0*c));
elseif f < ft
    % si la frecuencia esta entre la resonancia y la frec.
transicion
    t10 = perdida_transmision_pared_doble_incidencia_normal( M1, M2,
h1, h2, d, f0);
    t1t = perdida_transmision_pared_doble_incidencia_normal( M1, M2,
h1, h2, d, ft);
    t1 = log10(f/f0)/log10(ft/f0)*(t1t-t10) + t10;
else
    % si la frecuencia es mayor que la frec. transicion
    t1 = 20*log10(m1*pi*f/(rho0*c)) + 20*log10(m2*pi*f/(rho0*c)) +
6;
end
```



## perdida\_transmision\_sharp.m

```
function [ t1 ] = perdida_transmision_sharp( M1, M2, h1, h2, d, f,
fc, factam )
% Output: t1, perdida de transmisión
% Input: m1, masa superficial de la pared 1; m2, masa superficial
de la pared 1;
% h1, espesor pared 1; h2, espesor pared 2; d, espesor entre
paredes; f, frecuencia
% incidente; d, espesor de la cavidad

c = 343;           % m/s
m1 = M1*h1;       % masa pared 1
m2 = M2*h2;       % masa pared 1

fc = fc/(h1*100);

f0 = frecuencia_resonancia_sharp(d,M1,M2); % frecuencia resonancia
menor del sistema
fl = frecuencia_limite_sharp(c,d);         % frecuencia limite

if f<fc
TLm1=(20*log10(M1*f))-47.7;
TLm2=(20*log10(M2*f))-47.7;
else
TLm1=((20*log10(M1*f))-47.7)+10*log10(2*factam*f/fc);
TLm2=((20*log10(M2*f))-47.7)+10*log10(2*factam*f/fc);
end

f0
if f<=f0
    % si la frecuencia es menor que la resonancia
    t1 = TLm1;
elseif f<fl
    % si la frecuencia esta entre la resonancia y la frec. limite
    t1 = TLm1+TLm2+(20*log10(f*d))-29;
else
    % si la frecuencia es mayor que la frec. limite
    t1 = TLm1+TLm2+6;
end
```

## BBDD.m

```
function [ fc, factam ] = BBDD( nombre_material )
%BBDD Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

DB = {
    {'ladrillo macizo',2380,6e-3},
    {'hormigon denso',2100,6e-3},
    {'yeso',930,1.5e-2},
    {'acero',1000,3e-4},
    {'aluminio',1260,3.5e-3},
    {'plomo',5000,1e-3},
    {'cartonyeso',4670,6.3e-2},
    {'vidrio',1200,2e-3},
    {'maderaaglomerada',2960,2.2e-2},
    {'maderacontrachapada',2075,2.8e-3},
    {'caucho',85000,5e-2},
    {'poliestireno',14000,3e-3}
};

if nargin < 1
    fc = cell(1,length(DB));
    for i=1:length(DB)
        fc{i} = DB{i}{1};
    end
    factam = [];
else
    for i=1:length(DB)
        if strcmp(DB{i}{1}, nombre_material)
            fc = DB{i}{2};
            factam = DB{i}{3};
        end
    end
end
end
```

## Bibliografía

1. "Renkus-Heinz Inc. - Professional Audio Systems - EASE/EARS/AURA". *Renkusheinz-Sound.Ru*, 2019, [http://www.renkusheinz-sound.ru/ease/ease\\_intro/intro\\_about\\_hist.html](http://www.renkusheinz-sound.ru/ease/ease_intro/intro_about_hist.html).
2. Gerganova, D., and D. Christov. "Computer-Aided Room Acoustical Design". *Aes.Org*, 2019, <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5794>.
3. "EASE Features". *Ease-AfmG*, 2019, <https://ease.afmg.eu/index.php/features.html>.
4. "Prices & Vendors - EASE - Enhanced Acoustic Simulator For Engineers". *Ease.AfmG.Eu*, 2019, <http://ease.afmg.eu/index.php/prices-vendors.html>.
5. "Modeler Sound System Software | Bose Professional". *Pro.Bose.Com*, 2019, [https://pro.bose.com/en\\_us/products/software/acoustical\\_design/modeler\\_software.html](https://pro.bose.com/en_us/products/software/acoustical_design/modeler_software.html)
6. Hall, E. *Biographical memoir Wallace Clement Ware Sabine 1868-1919*. 19th ed., 1924, pp. 4-6.
7. Boletín Oficial del Estado, *Ley 37/2003, De 17 De Noviembre, Del Ruido*. (BOE-A-2003-20976). Vol 273, 2003.
8. Diario Oficial de la Generalidad Valenciana, *DECRETO 104/2006, de 14 de julio, del Consell, de planificación y gestión en materia de contaminación acústica*. DOGV 5305, 2006.
9. RAE. "Ruido". «*Diccionario De La Lengua Española*» - Edición Del Tricentenario, 2019, <https://dle.rae.es/?id=WoW1aWq>.
10. "Glossary – ATIS Telecom Glossary". *Glossary.Atis.Org*, 2019, <https://glossary.atis.org/>.
11. UNE-EN 717-1:2013 Acústica. AENOR, 2013.
12. UNE-EN 16283-1:2014 Acústica. AENOR, 2014.
13. UNE-EN 140-4:1999 Acústica. AENOR, 1999.
14. Mansilla, J., Accolti. E. "ACÚSTICA Y PSICOACÚSTICA II". 2011.
15. Sengpiel, E. *Absorptionsgrad Größer 1 - Blatt 1 Sound Absorption Coefficient Greater Than 1.00*. 2005, p. 1, <http://www.sengpielaudio.com/AbsorptionsgradGroesserEins.pdf>. Accessed 23 Oct 2019.
16. Sánchez-Dehesa, J., Torrent, D. "En Busca Del Control De Las Ondas Sonoras Mediante Los Metamateriales Acústicos". *Acoustics.Org*, 2010, <https://acoustics.org/pressroom/httpdocs/160th/dehesa.html>.
17. Carrión Isbert, A. *Diseño Acústico De Espacios Arquitectónicos*. 1st ed., Edicions UPC, 1998.
18. C. Lane, W. "THE WAVE EQUATION AND ITS SOLUTIONS". *Physnet.Org*, 2002, [http://www.physnet.org/modules/pdf\\_modules/m201.pdf](http://www.physnet.org/modules/pdf_modules/m201.pdf).
19. Almira, J.M. "Cuerdas Vibrantes Y Calor: La Génesis Del Análisis De Fourier". *Matematicalia.Net*, 2019, [http://www.matematicalia.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=442&Itemid=266](http://www.matematicalia.net/index.php?option=com_content&task=view&id=442&Itemid=266).
20. Möser, M., Barros, J.L. *Engineering Acoustics*. 2nd ed., Springer, 2004.
21. Fringuellino, M., Guglielmo, C. "Progressive Impedance Method For The Classical Analysis Of Acoustic Transmission Loss In Multilayered Walls". *Applied Acoustics*, vol 59, no. 3, 2000, pp. 275-285. Elsevier BV, doi:10.1016/s0003-682x(99)00024-9.
22. London, A. "Transmission Of Reverberant Sound Through Double Walls". *Journal Of Research Of The National Bureau Of Standards*, vol 44, no. 1, 1950. *National Institute Of Standards And Technology (NIST)*, doi:10.6028/jres.044.006.
23. Beranek & Work. "Sound Transmission Through Multiple Structures Containing Flexible Blankets". *The Journal Of The Acoustical Society Of America*,, 1949.
24. OOKURA, K. "Transmission Loss Of Multiple Panels Containing Sound Absorbing Materials In A Random Incidence Field". *Proc. Inter-Noise*, 1978, pp. 637-642.
25. United States Department of Defense. *Random Noise And Vibration In Space Vehicles*. Bolt Beranek And Newman Inc., 1967.

26. Gomperts, M.C. "The Sound Transmission Loss Of Circular And Slit-Shaped Apertures In Walls". *Acta Acustica United With Acustica*, 1967, pp. 144-150.
27. Crocker, M.J., and A.J. Price. "Sound Transmission Using Statistical Energy Analysis". *Journal Of Sound And Vibration*, 1969, pp. 469-486.
28. Donato, R. J. "Sound Transmission Through A Double-Leaf Wall". *The Journal Of The Acoustical Society Of America*, vol 51, no. 3A, 1972, pp. 807-815. *Acoustical Society Of America (ASA)*, doi:10.1121/1.1912915. Accessed 23 Oct 2019.
29. Sharp, Ben H. *A study of techniques to increase the sound insulation of building elements*. US Department of Commerce, National Technical Information Service (NTIS), 1973.
30. Davy, John L. "Predicting the sound insulation of stud walls." 1991.
31. Davy, John L. "Problems in the theoretical prediction of sound insulation." 1998.
32. Rindel, Jens Holger. *Transmission of Traffic Noise Through Windows: Influence of Incident Angle on Sound Insulation in Theory and Experiment*. Diss. Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, 1975.
33. Jones, R. *How to accurately predict the sound insulation of partitions*. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1976, pp. 14-25.
34. Trochidis, A., and A. Kalaroutis. "Sound transmission through double partitions with cavity absorption." *Journal of Sound and Vibration* 107.2 ,1986, pp. 321-327.
35. Trochidis, A. "Effect of sound-absorptive facings on the sound transmission through panels." *The Journal of the Acoustical Society of America* 78.3, 1985, pp. 942-945.
36. Iwashige, H. "A practical method of estimating sound transmission loss of double walls- A proposal and its application to the popular case of light panels and air gap." *Acustica* 48, 1981, pp. 79-101.
37. Mechel, F. P. "The acoustic sealing of holes and slits in walls." *Journal of Sound and Vibration* 111.2,1986, pp. 297-336.
38. Novikov, I. I. "Low-frequency sound insulation of thin plates." *Applied Acoustics* 54.1, 1998, pp. 83-90.
39. Nightingale, T. R. T. "Acoustic intensity as a tool for assessing sound isolation and flanking transmission in lightweight building constructions." *PROCEEDINGS- INSTITUTE OF ACOUSTICS* 18, 1996, pp. 2685-2690.
40. Cambridge, J. "The sound insulation of cavity walls.", 2012.
41. Halliwell, R. E., et al. "Gypsum board walls: Transmission loss data." *National Research Council of Canada, Internal Report No 761*, 1998.