

Modelización numérica y caracterización experimental de materiales absorbentes: competencias profesionales del ingeniero acústico

Numerical modeling and experimental characterization of absorbent materials: professional competencies of the acoustic engineer

Roberto Atiénzar, Rubén Picó, Romina del Rey

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

roatna@doctor.upv.es, rpico@fis.upv.es, roderey@fis.upv.es

Abstract

En este trabajo se desarrollan de forma numérica modelos empíricos que permiten conocer el comportamiento acústico de materiales utilizados en soluciones constructivas en la edificación. Este trabajo se engloba dentro del Máster Universitario en Ingeniería Acústica (MIA) de la Escuela Politécnica Superior de Gandía en la Universitat Politècnica de València. El ingeniero acústico, para conseguir todas las competencias que se exigen en la titulación, necesita conocer el comportamiento acústico de materiales, o soluciones acústicas, así como también necesita desarrollar herramientas de simulación numérica. Se propone, en este estudio, una evaluación numérica de modelos empíricos que permita al alumnado combinar competencias de asignaturas diferentes para alcanzar un objetivo común, ofreciendo así al alumnado herramientas multidisciplinares que debe utilizar en su incorporación al mundo laboral.

In this work, empirical models are developed in numerical form that allow to know the acoustic behavior of materials used in constructive solutions in the building. This work is included within the Master's Degree in Acoustic Engineering of the Higher Polytechnic School of Gandía at the Universitat Politècnica de València. The acoustic engineer, in order to achieve all the competencies required, needs to know the acoustic behavior of materials, or acoustic solutions, and it also needs to develop numerical simulation tools. In this study, it is proposed a numerical evaluation of empirical models that allow students to combine competences of different subjects to achieve a common goal, thus offering to the students multidisciplinary tools that should be used in their incorporation into the world of work.

Palabras clave: simulación numérica, técnicas experimentales, coeficiente de absorción sonora, resistividad al flujo, Método de los Elementos Finitos, modelo empírico, Máster en Ingeniería Acústica.

Keywords: numerical simulation, experimental techniques, sound absorption coefficient, air flow resistivity, Finite Element Method, empirical model, Master's Degree in Acoustic Engineering.

1. Introducción

La ingeniería acústica es un área multidisciplinar con formación específica de ámbitos muy diferentes como son la acústica arquitectónica, la electroacústica, la caracterización de materiales, las instalaciones, la seguridad e higiene en el trabajo, la acústica submarina o la acústica musical.

El Máster Universitario en Ingeniería Acústica (MIA), que se imparte en la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universitat Politècnica de València, presenta desde su creación, un perfil profesional e investigador, permitiendo a profesionales e investigadores especializarse en el análisis y gestión de la acústica, así como de sus efectos medioambientales. Este Máster se imparte en el campus de Gandía desde el curso 2008-2009.

Este Máster nació como resultado de la necesidad de especializar y profesionalizar en el ámbito específico de la acústica. La sensibilización de la sociedad por problemas de ruido empezó a incrementar, considerando el ruido como un factor medioambiental importante en el bienestar y en la salud. Prueba de ello son las normativas estatales y municipales que se han creado o mejorado en los últimos años. Como ejemplo, se cita el gran cambio en cuanto a legislación acústica en edificación en nuestro país, con la creación del Código Técnico de Protección —véase Real decreto 314/2006 en la bibliografía— y la posterior publicación del Documento Básico de Protección Frente al Ruido en edificación (DB-HR) —véase Código Técnico de la Edificación en la bibliografía— que es de aplicación obligatoria desde el 24 de abril de 2009.

Este Máster apuesta, desde su creación, por seguir siendo un referente en la formación de profesionales e investigadores en el ámbito de la ingeniería acústica, por esto, su profesorado, no solamente debe de ser experto en las materias que imparte, sino que además, debe buscar de forma continuada la calidad docente. El profesorado del Máster, relacionado en este trabajo, siempre ha apostado por la calidad docente a través de la aplicación de proyectos de innovación en sus aulas. Algunos ejemplos, que están vinculados con la colaboración entre distintas materias y con la aplicabilidad en el entorno profesional de las capacidades adquiridas en el aula, se pueden encontrar en los siguientes trabajos (Vidal et al., 2014; Vidal et al., 2013 y Banyuls et al. 2017).

Una de las acciones formativas llevadas a cabo es la cooperación y trabajo conjunto entre diferentes profesores para garantizar la transversalidad de competencias adquiridas durante el proceso de aprendizaje en el Máster. En concreto, en este trabajo se muestra un ejemplo de actividad transversal entre dos asignaturas con un objetivo temático común: la caracterización de la absorción acústica de materiales. El alumnado trabaja competencias propias de la titulación en ambas asignaturas con herramientas metodológicas diferentes.

En primer lugar, el alumnado dentro del laboratorio se familiariza con los dispositivos y métodos experimentales para caracterizar materiales que podrán ser utilizados o no, en acústica de la edificación, siguiendo lo marcado por el DB-HR —véase Código Técnico de la Edificación en la bibliografía—. Posteriormente, en el aula de informática, se aprenden las técnicas para reproducir numéricamente dichos métodos de caracterización, a partir de la simulación acústica con el método de los elementos finitos. En la etapa final del proceso, el alumnado es capaz de representar en una misma figura gráficas de distinta naturaleza (experimental y numérica) que representan el mismo fenómeno físico: el coeficiente de absorción acústica de un material. La propuesta didáctica que aquí se detalla permite trabajar competencias profesionales de ambas asignaturas de forma coordinada, reforzando así los aspectos comunes de la titulación más básicos en la formación del ingeniero acústico.

Las asignaturas implicadas en este trabajo son Técnicas de Simulación en Acústica, asignatura de 2 créditos ECTS dentro del módulo optativo del MIA y Aislamiento Acústico en la Edificación, asignatura de 4.5 créditos ECTS dentro del módulo de materias comunes del mismo Máster. Para cumplir los objetivos del Máster, el alumnado necesita realizar 60 créditos ECTS, que se distribuyen en materias comunes (38 créditos ECTS), materias optativas (10 créditos ECTS) y el Trabajo Final de Máster (12 créditos ECTS).

1.1. La asignatura Aislamiento Acústico en la Edificación

Los datos identificativos básicos de la asignatura Aislamiento Acústico en la Edificación se muestran en la Tabla 1.

Código	31787
Nombre	Aislamiento Acústico en la Edificación
Créditos	4.5
	2.0 Teoría
	2.5 Prácticas
Carácter	Obligatorio
Titulación	2157: Máster Universitario en Ingeniería Acústica
Módulo	2: Módulo Común del Máster
Materia	4: Acústica arquitectónica, medioambiental y calidad sonora
Centro	Escuela Politécnica Superior de Gandía
Departamento	Física Aplicada

Tabla 1: Datos identificativos de Aislamiento Acústico en la Edificación.

La asignatura de Aislamiento Acústico en la Edificación permite al alumnado del Máster en Ingeniería Acústica conocer y aplicar técnicas de diseño, diagnóstico, predicción y evaluación del aislamiento acústico a ruido aéreo, ruido de impacto y vibraciones. En esta asignatura se realiza un análisis detallado de la normativa vigente en aislamiento acústico. Las competencias adquiridas forman parte importante de las atribuciones de un ingeniero que dedique su actividad profesional a la ingeniería acústica. En http://www.upv.es/titulaciones/MUIA/menu_1015100c.html se describen las competencias tanto generales como específicas de esta asignatura. Las que están directamente relacionadas con este trabajo son: 1.- capacidad de análisis y síntesis, 2.- comprensión y valoración de los principales parámetros utilizados en acústica de la edificación y 3.- manejo de instrumental específico de acústica y vibraciones. En particular, la tercera competencia presenta una gran proximidad con respecto a las competencias de la segunda asignatura que se relaciona en este trabajo.

Los 4.5 créditos ECTS que consta la asignatura se distribuyen en 2.0 créditos ECTS de teoría y 2.5 créditos ECTS de prácticas de laboratorio. La distribución se plantea en 4 unidades didácticas. Dentro de estas unidades didácticas se programan 6 prácticas de laboratorio. Las cinco primeras prácticas se distribuyen en sesiones de 2.5 horas. La última práctica consiste en un trabajo grupal donde el alumnado ha de realizar un informe acústico de un edificio y le corresponden 12.5 horas. El trabajo que aquí se describe, pretende ayudar al alumnado a adquirir competencias descritas en las unidades didácticas 1 y 2 (Introducción al Aislamiento Acústico y Código Técnico de la Edificación: Documento Básico de Protección Frente al Ruido, respectivamente) a través de la primera práctica de laboratorio (P1. Productos de construcción 1. Coeficiente de absorción en incidencia normal y resistencia al flujo) y a través de competencias que corresponden a la asignatura de Técnicas de Simulación en Acústica.

1.2. La asignatura Técnicas de Simulación en Acústica

Los datos identificativos básicos de la asignatura Técnicas de Simulación en Acústica se muestran en la Tabla 2.

Código	31792
Nombre	Técnicas de Simulación en Acústica
Créditos	2
	1.0 Teoría
	1.0 Prácticas
Carácter	Optativo
Titulación	2157: Máster Universitario en Ingeniería Acústica
Módulo	Optativo
Materia	Bloque de investigación
Centro	Escuela Politécnica Superior de Gandía
Departamento	Física Aplicada

Tabla 2: Datos identificativos de Técnicas de Simulación en Acústica.

La asignatura de Técnicas de Simulación en Acústica introduce al alumnado del Máster en Ingeniería Acústica en el campo de la simulación mediante métodos de resolución numérica en el ámbito de la acústica en general, particularizando a casos concretos dentro de la acústica arquitectónica y medioambiental.

En esta asignatura se abordan conceptos generales de los métodos de simulación como son la convergencia, la estabilidad, la modelización o el postprocesado. Se trabaja de forma práctica con dos métodos de simulación, el método de elementos finitos y el método de diferencias finitas. Las competencias adquiridas en esta asignatura optativa constituyen un complemento formativo importante tanto para la consolidación de conceptos básicos del ingeniero acústico, como en el uso de herramientas de simulación en acústica. En http://www.upv.es/titulaciones/MUIA/menu_1015100c.html se describen las competencias tanto generales como específicas de esta asignatura. Las que están directamente relacionadas con el trabajo que aquí se presenta son: 1.- resolución de problemas, 2.- conocimientos informáticos relativos al ámbito de estudio y 3.- conocimiento de paquetes de software para la resolución numérica de problemas acústicos/vibratorios. En particular, la tercera competencia de esta asignatura está muy relacionada con la tercera competencia de la asignatura Aislamiento Acústico en la Edificación.

De los 2 créditos ECTS que consta la asignatura, 1.0 crédito ECTS está relacionado con los elementos finitos. De los dos métodos numéricos desarrollados en la asignatura, éste es el más adecuado para trabajar de forma coordinada las competencias de ambas asignaturas (Aislamiento Acústico en la Edificación y Técnicas de Simulación en Acústica), ya que su implementación en el aula se realiza directamente en el dominio de frecuencias. En la parte de prácticas, se implementan modelos numéricos de comportamiento acústico por medio del software COMSOL v5.4 —véase COMSOL en la bibliografía— basado en elementos finitos. En la actualidad, ambas asignaturas son impartidas por profesorado del Departamento de Física Aplicada. El Departamento dispone de una licencia académica para 30 puestos flotantes que se renueva anualmente. Habitualmente, el alumnado utiliza el software en los puestos del aula informática durante el tiempo de clase y en una estación de trabajo a la cual tienen acceso de forma remota por conexión VPN a la red UPVNET interna de la universidad.

1.3. Comportamiento acústico de los materiales de construcción

Según el Código Técnico de la Edificación —véase Real decreto 314/2006 en la bibliografía— los materiales que sean susceptibles de ser usados como materiales para la edificación deben de cumplir una serie de requisitos. En el Documento Básico de Protección Frente al Ruido (DB-HR) —véase Código Técnico de la Edificación en la bibliografía— se describen las características que deben cumplir los materiales si se desean utilizar en la edificación como solución acústica, o como parte de solución acústica. Dos de estos parámetros son la resistencia específica al flujo de aire y la absorción sonora. El objetivo de la primera práctica de laboratorio de la asignatura Aislamiento Acústico en la Edificación, que lleva por título “Productos de construcción 1. Resistencia al flujo y coeficiente de absorción en incidencia normal”, es la medida del coeficiente de absorción en incidencia normal según la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 —véase UNE EN ISO 10534-2:2002 en la bibliografía— y la medida de la resistencia al flujo de aire según el método propuesto por Ingard y Dear (Ingard y Dear, 1985).

El alumnado del MIA realiza esta práctica en el laboratorio a partir de tubos de impedancia, con las configuraciones correspondientes según normativa. Los resultados deben de ser presentados en formato de ficha técnica con toda la información que se exige en el Código Técnico de la Edificación (DB-HR) —véase Código Técnico de la Edificación en la bibliografía—. A partir de estos dos parámetros, es posible conocer el comportamiento acústico de un material como material absorbente, a través de modelos semi-empíricos. Con la simulación numérica, de la tercera práctica de laboratorio de la asignatura Técnicas de Simulación en Acústica, se pretende reproducir el modelo del tubo acústico de impedancias del laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Gandía. El modelo numérico necesita como parámetros de entrada tanto la resistividad al flujo como los coeficientes del modelado numérico desarrollado, tomando como referencia los pasos seguidos por Delany y Bazley (Delany-Bazley, 1970).

En la propuesta se analizan dos muestras diferentes (véase Figura 1), una espuma de poliuretano (PU) y un tejido textil llamado Felice, con características acústicas muy diferentes. La espuma PU presenta el comportamiento clásico de un material poroso con un máximo de absorción en altas frecuencias, mientras que la tela se comporta como una membrana permeable con una absorción reducida en todo el rango de frecuencias de análisis. El alumnado puede así comprobar la validez y concordancia de ambos métodos (experimental y numérico) con materiales muy distintos. Se trata de obtener una concordancia entre los datos experimentales y numéricos para desarrollar un modelo capaz de predecir el comportamiento acústico de materiales para la construcción como soluciones acústicas. Los datos de entrada para la simulación numérica son proporcionados por un modelo semi-empírico basado en dos variables: la constante de propagación (Γ) y la impedancia característica (Z).

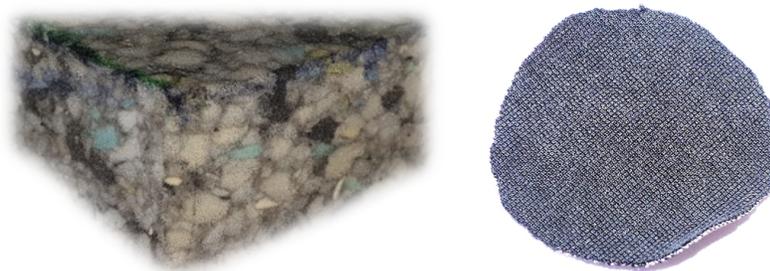


Figura 1: Muestras analizadas en este estudio. Izquierda: Espuma PU y Derecha: Tela Felice.

2. Modelización semi-empírica

En esta sección, se presenta de forma resumida el modelo semi-empírico (Ramis et al. 2010 y 2014). El alumnado analiza estos modelos con mayor profundidad en la clase de teoría. Así, la materia que se presenta aquí es la que se dispone en la memoria de prácticas a modo de recordatorio de la teoría. El modelo semi-empírico describe el comportamiento acústico de la muestra analizada según una serie de parámetros físicos no intrínsecos utilizados con el objetivo de minimizar los errores de propagación a partir de los parámetros obtenidos experimentalmente (Delany, Bazley, 1970).

Se trata de obtener los coeficientes C_i (con $i = 1, 2, \dots, 8$) que mejor se ajusten a las ecuaciones presentadas para los materiales sujetos a estudio

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0}\right) \left[C_5 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-C_6} \right], \quad (1)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0}\right) \left[1 + C_7 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-C_8} \right], \quad (2)$$

$$Z_R = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-C_2} \right], \quad (3)$$

$$Z_I = -\rho_0 c_0 \left[C_3 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-C_4} \right], \quad (4)$$

donde α y β corresponden con la parte real e imaginaria de la constante de propagación Γ , Z_R y Z_I son la parte real e imaginaria de la impedancia característica Z , σ es la resistividad al flujo de aire en la dirección de propagación de la onda ($Pa \cdot s/m^2$), ρ_0 es la densidad del aire ($\approx 1.21 kg/m^3$), f es la frecuencia (Hz) y c_0 es la velocidad del sonido en el aire ($\approx 343 m/s$).

A partir de la impedancia característica Z y la constante de propagación Γ , se obtiene la siguiente expresión para el cálculo del coeficiente de absorción sonora

$$\alpha_n = \frac{4Z_I Z_0}{|Z_I| + 2Z_0 Z_I + (Z_0)^2}, \quad (5)$$

donde $Z_0 = \rho_0 c_0 = 415$ rayls, Z_I es la impedancia de cierre definida en la Ecuación 6, y t es el espesor de la muestra:

$$Z_I = (Z_R + iZ_I) \coth(\alpha + i\beta)t. \quad (6)$$

Los datos experimentales, tanto del coeficiente de absorción sonora en incidencia normal (α), como de la resistividad al flujo de aire (σ) son necesarios para la obtención de los parámetros C_i del ajuste.

3. Configuración experimental

Para la caracterización acústica de las muestras, los métodos utilizados en este estudio son, por un lado, la norma UNE-EN ISO 10534-2: 2002 —véase Código Técnico de la Edificación en la bibliografía—, para determinar el coeficiente de absorción sonora en incidencia normal (α); por otro lado, las recomendaciones de Ingard y Dear en (Ingard, Dear, 1985) para medir la resistencia específica al flujo de aire (R_s).

La configuración experimental para la medición del coeficiente de absorción sonora en incidencia normal de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 10534-2: 2002 —véase Código Técnico de la Edificación en la bibliografía— está compuesta por un tubo de impedancia, dos posiciones fijas de micrófono (separadas una distancia s) y un sistema de análisis de señal digital, llamado Pulse LabShop version 22.2.0.197. Los micrófonos, montados en la pared del tubo, se colocan cerca de la muestra para registrar la presión acústica. En un extremo del tubo, se monta un altavoz capaz de emitir ondas planas; en el otro extremo, se coloca la muestra del material a caracterizar.

Este método tiene una gran ventaja para la investigación científica porque requiere poco espacio de trabajo en el laboratorio y solamente se necesitan muestras del mismo tamaño que el diámetro del tubo de impedancia.

La función de transferencia acústica compleja (H_{12}) de las señales registradas por ambos micrófonos se obtiene de acuerdo con el método especificado en la norma UNE-EN ISO 10534-2: 2002—véase Código Técnico de la Edificación en la bibliografía— a fin de calcular el coeficiente de reflexión complejo (r)

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2ik_0x_1}, \quad (7)$$

donde H_I es la función de transferencia de la onda incidente, H_R es la función de transferencia de la onda reflejada, k_0 es el número de onda y x_1 es la distancia entre la muestra y el micrófono más alejado de esta.

Con el fin de corregir la fase entre ambos micrófonos, los dos canales se intercambian para cada medición. Por tanto, para cada una de las muestras se realizan dos mediciones, obteniendo así la función de transferencia H_{12} y H_{21} .

El coeficiente de absorción sonora en incidencia normal (α), dado en la Ecuación 8, representa el cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra y la energía acústica incidente, para una onda plana, en incidencia normal. La Figura 2 muestra un esquema de la configuración experimental utilizada para este test.

$$\alpha = 1 - |r|^2. \quad (8)$$

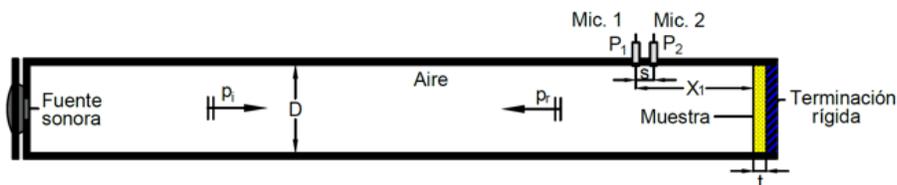


Figura 2: Esquema del tubo de impedancia utilizado para medir la absorción sonora en incidencia normal. Donde D es el diámetro interno del tubo ($D = 4\text{cm}$), s es la separación entre ambos micrófonos ($s = 3.2\text{cm}$), p_i es la presión acústica de la onda incidente y p_r es la presión acústica de la onda reflejada.

El rango de frecuencias de trabajo es $100\text{Hz} - 3150\text{Hz}$; este margen frecuencial está limitado por la distancia entre los micrófonos, por el diámetro interior del tubo de impedancia y por la precisión del equipo de procesamiento de señales. El alumbrado lo determina en el laboratorio a partir de las indicaciones de la norma. En la Figura 3 se muestra, con detalle, el extremo del tubo de impedancia con una muestra de espuma PU.

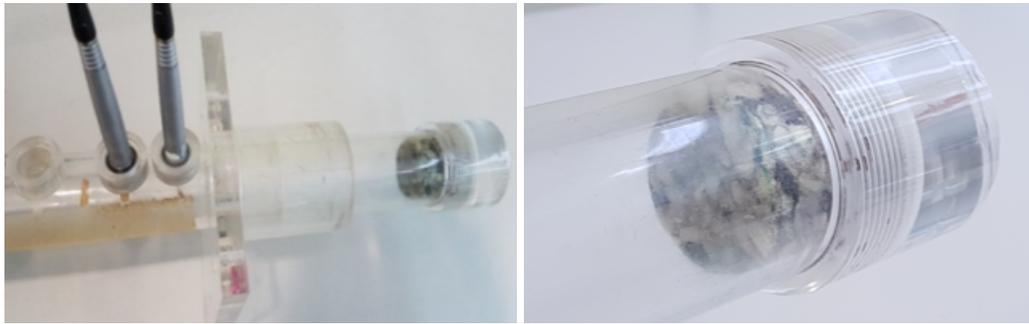


Figura 3: Parte final del tubo de impedancia. Izquierda: Muestra los micrófonos usados y la distancia con respecto a la muestra de espuma PU; Derecha: La muestra de espuma PU a caracterizar se coloca al final del tubo.

Para los modelos de predicción, se requiere el valor de la resistencia al flujo de aire, que evalúa la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor. Se presenta aquí la configuración experimental basada en el método propuesto por Ingard y Dear en (Ingard, Dear, 1985) —véase la Figuras 4 y 5—.

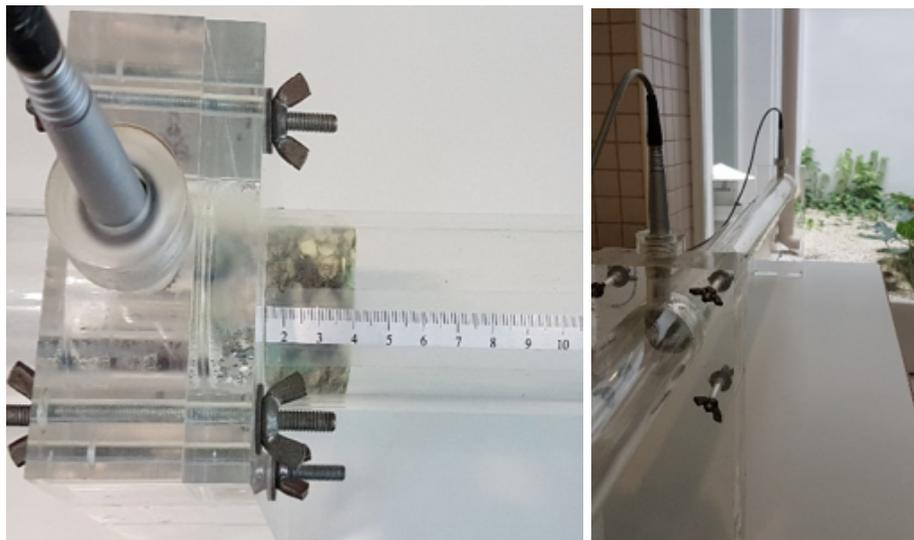


Figura 4: Dispositivo de medición experimental propuesto por Ingard y Dear (Ingard, Dear, 1985), incluyendo una muestra de espuma de poliuretano de 4cm de espesor.

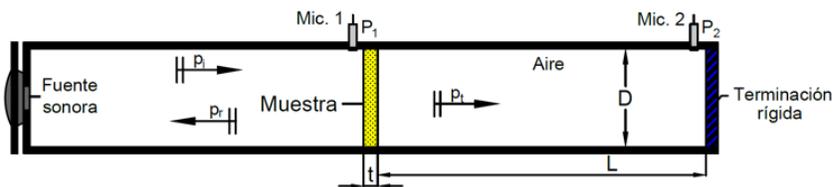


Figura 5: Esquema del tubo de impedancia utilizado para medir la resistencia al flujo de aire.

La muestra de espesor t se coloca en el centro del tubo (véase Figura 5). L es la distancia entre la cara posterior de la muestra y el extremo rígido. Se utilizan dos micrófonos para medir la diferencia de presión. Uno de ellos (Mic.1) se coloca delante de la muestra para medir directamente la presión acústica (p_1); el otro (Mic.2) está ubicado junto a la terminación rígida (p_2). Además, $\lambda \gg 1.7D$ para asegurar que las ondas planas incidentes estén presentes en la

muestra.

Bajo las condiciones especificadas en Ingard y Dear (Ingard, Dear, 1985), la resistividad al flujo se calcula como

$$\sigma = \frac{\rho c}{t} \left| \operatorname{Im} \frac{1}{H_{12}} \right|. \quad (9)$$

Para obtener los coeficientes que mejor describen el comportamiento acústico de las muestras sujetas a estudio, se ha utilizado un método iterativo basado en la reducción de la función del error cuadrático

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i})^2, \quad (10)$$

donde $\alpha_{n,i}$ corresponde con el valor del coeficiente de absorción sonora en incidencia normal y $\hat{\alpha}_{n,i}$ indica el valor previo estimado a partir de las ecuaciones propuestas en (Ecuaciones 1-4).

Para minimizar la función de error, la siguiente expresión debe igualarse a cero

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial A} = 2 \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i}) \frac{\partial \hat{\alpha}_{n,i}}{\partial A_i}, \quad 1 \leq i \leq 8. \quad (11)$$

El alumnado necesita conocimientos básicos de Computación MATLAB (asignatura que se cursa en el primer semestre del Máster). En esta práctica, ya conocen el entorno MATLAB y se propone que analicen, diseñen y desarrollen un nuevo programa capaz de resolver las ecuaciones del modelo empírico de Delany-Bazley propuesto en el lenguaje de programación MATLAB. El objetivo perseguido es que el alumnado cree sus propias funciones y programas con el fin de obtener las curvas de mejor ajuste para las muestras sujetas a estudio, además será capaz de leer ficheros Excel con MATLAB. El alumnado presentará dos gráficas 2D, una correspondiente a la curva predicha comparada con la curva experimental del coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia y otra, con la evolución del error en función del número de iteraciones.

Los valores propuestos por el modelo empírico de Delany y Bazley (Delany, Bazley, 1970) se han utilizado como valores de entrada (*inputs*). Las ecuaciones dependen de la frecuencia (f) y de la resistividad específica al flujo de aire (σ). Se presentan las expresiones de la impedancia característica compleja (Z) y de la constante de propagación compleja (Γ)

$$Z = \rho c \left(1 + 0.0571 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.754} - i 0.087 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right), \quad (\text{Rayls}) \quad (12)$$

$$\Gamma = \frac{\omega}{c} \left(1 + 0.0978 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.700} - i 0.189 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right), \quad (m^{-1}). \quad (13)$$

Para la validación de las expresiones anteriores el alumnado comprueba, tal y como requiere el método, que se debe cumplir la siguiente condición

$$10^{-2} \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1. \quad (14)$$

El alumnado pone en práctica dos métodos experimentales en el laboratorio. Cabe destacar, que en el contexto didáctico, el método para la medida de la resistencia al flujo es necesario para completar la práctica. No obstante, el dispositivo principal de caracterización de materiales es

el de medida del coeficiente de absorción sonora en incidencia normal. Por esta razón, aunque los valores de resistencia al flujo se utilizan como datos de entrada en la simulación, por razones de planificación temporal de la práctica, el único dispositivo que se propone al alumnado como modelo numérico es el de medida del coeficiente de absorción sonora.

4. Modelización numérica

En la modelización de un problema físico, el alumnado ha de tomar siempre en consideración los elementos que son significativos. De lo contrario, puede ocurrir que el modelo no represente correctamente la realidad física o que el tiempo de cálculo sea excesivo. En ambos casos, el resultado es frustrante para el alumnado y el proceso pedagógico resulta insatisfactorio. En particular, cuando el modelo de simulación es un dispositivo experimental, como es en este caso, es importante conocer los detalles del método experimental así como las limitaciones derivadas de las aproximaciones tanto numéricas como experimentales.

Debido a la simetría axial del tubo experimental, y con el objetivo de reducir el coste computacional, se propone al alumnado un modelo del tubo de impedancia axisimétrico 2D (Benito et al., 2016), que reproduce correctamente el comportamiento modal del mismo en el rango de trabajo. El alumnado cuenta con explicaciones en clase (colectiva y particular para dudas), vídeos y otros apoyos para desarrollar el modelo de simulación numérica a partir de las ecuaciones fundamentales de la acústica, con las condiciones de contorno apropiadas, la malla y el procesado en régimen armónico dentro del rango de trabajo de interés. Los resultados de las simulaciones numéricas se analizan por medio de herramientas de postprocesado del campo acústico con objeto de comparar posteriormente con los datos experimentales.

En el modelo, la propagación del sonido en el tubo se estudia resolviendo la ecuación de Helmholtz en régimen armónico ($e^{i\omega t}$)

$$\nabla^2 \hat{p}(w) + k^2 \hat{p}(w) = 0, \quad (15)$$

donde k es el vector de onda ($k = \omega/c$), ω es la frecuencia angular, c es la velocidad del sonido en el medio, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}$ representa el Laplaciano, y \hat{p} es la amplitud compleja de la presión acústica. Esta ecuación de carácter fundamental en acústica se ha explicado con detalle en la asignatura Fundamentos de Acústica del primer semestre de la titulación.

La fuente sonora utilizada en el experimento es un altavoz (modelo Beyma CP 800Ti). En este punto, el alumnado ha de ser capaz, con ayuda del profesor, de llevar a cabo el proceso de abstracción por el cual, una fuente, tan compleja como es un altavoz, se modeliza por medio de una onda plana con el objetivo de simplificar el análisis numérico. Así pues, en el modelo numérico se utiliza una onda plana con una amplitud de 1Pa. Al resolver numéricamente la Ecuación 15, se obtiene el campo de presión sonora resultante para cada frecuencia f , relacionada con la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$.

Para un tubo de impedancia perfectamente rígido, las propuestas de contorno aplicadas son las condiciones de Neumann (Ecuación 16) siendo la componente normal de la velocidad de partícula igual a cero

$$\mathbf{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right). \quad (16)$$

En este estudio numérico, se analiza el mismo rango de frecuencias que el utilizado experimentalmente, es decir de 100Hz a 3150Hz. La malla de cálculo se define de tal manera que el cálculo numérico converja. Este concepto se trabaja con detalle dada su relevancia física. Se asegura que el modelo presenta suficiente resolución espacial (Courant et al., 1967); Un tamaño de malla (Δx) de 0.014m es suficiente para obtener un cálculo preciso hasta 3.15kHz, como se puede ver en los siguientes cálculos que realiza el alumnado

$$\lambda = \frac{c}{f_{\text{máx}}} = \frac{343}{3150} \approx 0.109m, \quad (17)$$

$$\nabla x < \frac{\lambda}{8} < \frac{0.109}{8} \approx 0.014m, \quad (18)$$

donde $f_{\text{máx}}$ es la máxima frecuencia de validez de la simulación. El tiempo de cálculo utilizado para el análisis de los modelos propuestos es de 240s. Este tiempo de cálculo es razonable en el contexto de la asignatura. Sin embargo, un modelo completo 3D habría requerido un tiempo de simulación mucho mayor sin proporcionar un valor didáctico adicional significativo.

La magnitud física a analizar es el campo de presión acústica total (p_t) en el dominio frecuencial, que está determinado por la superposición del campo de presión de fondo (p_b) y el campo de presión disperso p , expresado en forma matemática: $p_t = p_b + p$, donde $p_b = p_0 e^{-i(kx)}$.

Para reproducir numéricamente, de forma adecuada, el comportamiento acústico de la muestra, además, se deben de tener en cuenta las pérdidas viscotérmicas del aire dentro del tubo de impedancia (Romero-García et al., 2016). En este punto es importante destacar la importancia de distinguir entre la absorción de la muestra y la del aire. Aunque los efectos energéticos en las ondas sonoras son similares, el objeto que produce las pérdidas así como los fenómenos, son distintos en ambos casos (muestra y aire). Por tanto, las pérdidas se modelan de forma distinta utilizando las siguientes expresiones de número de onda e impedancia

$$k_i = \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{\kappa}{s_i} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{\chi} \right) \right), \quad (19)$$

$$Z_i = \frac{\rho c}{s_i} \left(1 + \frac{\kappa}{s_i} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\chi} \right) \right), \quad (20)$$

siendo $s_i = R_i/\delta$, donde R_i es el radio interior del tubo utilizado y $\delta = \sqrt{2\mu/\rho_0\omega}$ es el espesor de la capa límite viscosa, μ es la viscosidad del aire; $\kappa = (1 + i)/\sqrt{2}$; $\gamma = 1.4$ es la capacidad calorífica del aire y $\chi = \sqrt{P_r}$ donde P_r es el número de Prandtl a presión atmosférica. Dichos modelos de absorción se han trabajado con anterioridad por parte del alumnado en la asignatura de Fundamentos de Acústica.

5. Resultados

Las mediciones experimentales y las simulaciones numéricas se comparan con las dos muestras propuestas: la espuma PU y el tejido textil Felice. La Tabla 3 muestra las propiedades físicas de la densidad y el espesor de las muestras analizadas. Además, los valores de resistividad al flujo de aire se presentan con su desviación estándar de acuerdo con el procedimiento descrito en (Ingard, Dear, 1985).

Muestras	Espesor (cm)	Densidad (g/m ²)	σ (kPa · s/m ²)
Espuma PU	4	3140	10.18–10.22
Felice	0.07	245	571–579

Tabla 3: Valores de espesor, densidad y resistividad al flujo de las muestras sujetas a estudio.

Los resultados se muestran en la Figura 6. se observa una buena correlación entre ambos métodos todo el rango de frecuencias con diferencias menores al 1%. También se distingue la presencia de barras de error determinadas en el método experimental.

Los resultados experimentales obtenidos con la muestra PU se muestran en la Figura 6 (Izquierda) junto con los resultados numéricos. El alumnado comprueba que existe una similitud razonable entre las curvas de ambos métodos. La espuma PU utilizada muestra su absorción máxima entre 1250Hz y 2000Hz. En la Figura 6 (derecha), se presentan los resultados para el tejido textil. Los datos del modelo numérico son similares a los datos experimentales y no hay diferencias significativas. Por tanto, se puede concluir que existe una buena correspondencia entre los datos obtenidos por ambos métodos: numérico y experimental. La Tabla 4 refleja el valor de los coeficientes propuestos para las dos muestras estudiadas.

Muestras	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
Espuma PU	0.4185	-0.0094	0.1775	0.5480	0.0853	1.0865	0.2296	-0.2549
Felice	0.0645	1.1163	0.0832	0.9152	0.0492	0.7360	0.1067	0.5405

Tabla 4: Valores de los ocho coeficientes para la espuma PU y la tela Felice.

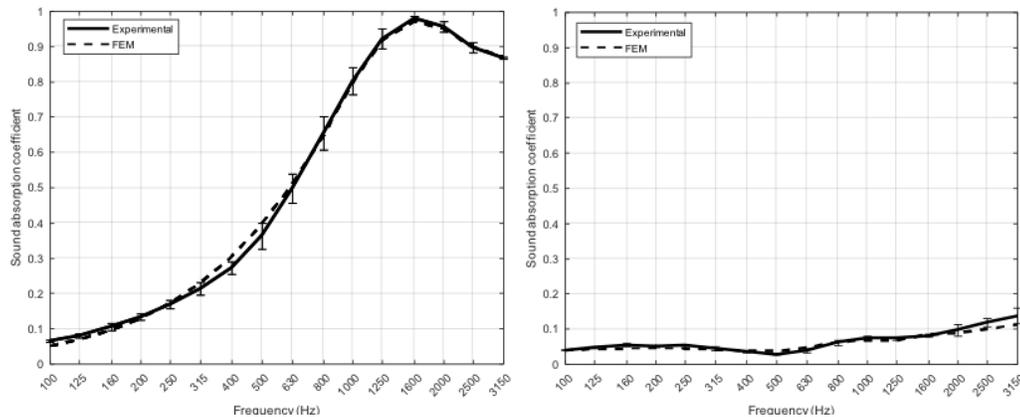


Figura 6: Coeficiente de absorción sonora en incidencia normal: Izquierda: espuma PU y Derecha: textil Felice. Comparación entre los datos experimentales (línea continua) y los datos numéricos (línea discontinua); el porcentaje de dispersión de las medidas experimentales se muestra mediante barras de error.

6. Conclusiones

Tras la realización de las prácticas de laboratorio correspondientes al Máster de Ingeniería Acústica de las dos asignaturas implicadas en el trabajo, se puede asegurar que los resultados han sido satisfactorios. Por un lado, a través de la simulación numérica se ha reproducido el modelo del tubo acústico de impedancias del laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Gandía. El alumnado ha podido utilizar técnicas de simulación basadas en el Método de los Elementos Finitos (FEM) para la validación del coeficiente de absorción sonora

en incidencia normal obtenido experimentalmente, por ellos mismos, con un tubo de impedancia. Además, han utilizado como parámetro de entrada, para el modelado numérico, otro descriptor como la resistencia al flujo medido también por el alumnado. Los resultados obtenidos, en los dos casos estudiados, muestran una gran correlación entre las mediciones experimentales y las simulaciones numéricas.

Por otro lado, el alumnado del Máster es capaz de comprender la importancia de adquirir las competencias que las técnicas de simulación le ofrecen, aplicando los conocimientos adquiridos en la asignatura de Técnicas de Simulación en Acústica a una competencia del ámbito puramente profesional del ingeniero acústico, como es la elección de materiales para solucionar problemas de aislamiento acústico.

A través de este tipo de proyectos, el profesorado pretende cumplir con los objetivos de las asignaturas, que se describen a través de competencias. En el caso que nos ocupa, gracias a este proyecto se han podido cumplir las competencias descritas en el apartado de introducción de cada una de las asignaturas: resolución de problemas, conocimientos informáticos relativos al ámbito de estudio y conocimiento de paquetes de software para la resolución numérica de problemas acústicos/vibratorios (Técnicas de Simulación en Acústica) y capacidad de análisis y síntesis, manejo de instrumental específico de acústica y comprensión y valoración de los principales parámetros utilizados en acústica de la edificación (Aislamiento Acústico en la Edificación).

Como mejora a este proyecto, queda pendiente la elaboración y análisis de una encuesta de valoración por parte del alumnado sobre la metodología utilizada, con el fin de poder seguir mejorando en calidad educativa a niveles tan específicos, como es el nivel de un máster universitario.

Agradecimientos

Este trabajo está subvencionado por el Ministerio de Economía e Innovación (MINECO) y por el Fondo Europeo (FEDER) a través del proyecto FIS2015-65998-C2-2 y por los proyectos GVA AICO/2016/060 y ACIF/2017/073 por la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana y con el apoyo del Fondo Social Europeo (ESF).

Referencias

-  [Real decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.](#)
BOE nº 74 de 28/03/2006.
-  [Código Técnico de la Edificación. Libro 11, Parte II.](#)
Documento básico DB-HR de Protección frente al ruido.
España. Boletín Oficial del estado, 2009. 3º ed.
<https://www.codigotecnico.org/>(última visita 26-12-2018).
-  [Vidal Meló, A., del Rey Tormos, R., Sapena Piera, A., Roig Sala, B., Estruch Fuster, V. D., Boigues Planes, F. J., and Alba, J. \(2014\).](#)
Utilizando las matemáticas para resolver problemas de acústica de salas.
Modelling in Science Education and Learning, vol. 7(1), ISSN 1988–3145.

-  Vidal, A., Roig, B., Estruch, V. D., Boigues, F. J., del Rey, R., Alba, J. (2013). *Modelos de mapas topográficos y acústicos: del papel al ordenador*. Modelling in Science Education and Learning, vol. 6(2), ISSN 1988-3145.
-  Banyuls-Juan, X., Atiéndzar-Navarro, R., Picó, R. (2017). *Simulación numérica de un conjunto de altavoces subwoofers utilizando Elementos Finitos*. Modelling in Science Education and Learning, vol. 10(2), pp. 203–210. <https://dx.doi.org/10.4995/mse1.2017.7653>
-  http://www.upv.es/titulaciones/MUIA/menu_1015100c.html. *Estudios de máster en la Universitat Politècnica de València*.
-  COMSOL
Multiphysics Modeling Guide. Versión Comsol 5.3a (2017).
-  UNE-EN ISO 10534-2. (2002). *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method*. Acoustics.
-  Ingard, K. U., and Dear, T. A. (1985). *Measurement Of Acoustic Flow Resistance*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 103(4), pp. 567–572. [https://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(85\)80024-9](https://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(85)80024-9)
-  Delany, M.E., Bazley, E.N. (1970). *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*. Applied Acoustics, Vol. 3(2), pp. 105–116. [https://dx.doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://dx.doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9)
-  Ramis, J., Alba, J., del Rey, R., Escuder, E., Sanchís V. J. (2010). *New absorbent material acoustic base on kenaf's fibre*. Materiales de Construcción, Vol. 60(299), pp. 133–143. <https://dx.doi.org/10.3989/mc.2010.50809>
-  Ramis, J., del Rey, R., Alba, J., Godinho, L., Carbajo, J. (2014). *A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber*. Materiales de construcción, Vol. 64(313), pp. 1–7. <https://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00513>
-  Benito Muñoz, J. J., Álvarez Cabal, R., Ureña Prieto, F., Saleté Casino, E., Aranda Ortega, E. (2016). *Introducción al método de los elementos finitos*. UNED, Madrid.