

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL COMO HERRAMIENTA DE ENSEÑANZA EN ACÚSTICA

Referencia PACS: 43.10.Sv, 43.58.Ta

Luis Gascó; César Asensio; Mariano Ruiz; Manuel Recuero
Grupo I2A2. Universidad Politécnica de Madrid
Edificio ETSI Topografía
Cta. Valencia Km. 7 ,28031
Madrid (España)
Tel. +34 913 364 696
luis.gasco@i2a2.upm.es; casensio@i2a2.upm.es;

ABSTRACT

This paper presents a virtual environment that can be used to practice training on acoustic test based on international standards. This virtual laboratory enables us to recreate façade sound insulation tests according to UNE-EN ISO 140-5. The Laboratory implements basic models that allows to recreate the sound field in front of the façade and inside the room, and simulate the variability of measurement using uncertainty propagation methods.

The Virtual Laboratory is used to provide educational support in acoustic teaching, helping the students to understand and apply the procedures described in the standards, allowing them to do individual practices.

RESUMEN

En esta ponencia se presenta un laboratorio virtual como herramienta de enseñanza en la realización de ensayos acústicos. En concreto el Laboratorio implementa un entorno virtual que permite recrear ensayos acústicos de aislamiento de fachadas según la normativa UNE-EN ISO 140-5. En él se implementan modelos básicos que permiten recrear el entorno acústico, tanto en el exterior de la fachada como en el interior del recinto, y modelizar la variabilidad de las mediciones basándose en métodos de propagación de la incertidumbre.

Este laboratorio virtual se utiliza como apoyo a la formación en acústica, permitiendo la realización de prácticas individuales en las que el estudiante encuentra situaciones similares a las acaecidas en un ensayo presencial.

INTRODUCCIÓN

Los estudiantes de acústica, tanto de formación universitaria como de cursos de formación continua, se encuentran con dificultades para poner en práctica los procedimientos de medida explicados en las clases teóricas ya que a la hora de aplicar dichos conocimientos, se opta por la realización de prácticas grupales por no disponer de equipamiento e infraestructura para la realización de ensayos individualizados.

Estas limitaciones también presentes en otras áreas de la ciencia, como la Biología o la Química, ya han sido parcialmente resueltas con el desarrollo y uso de Laboratorios Virtuales [1], [2]. En el caso de la acústica, a pesar del avance en softwares de predicción y simulación de acústica arquitectónica, y la creación de herramientas didácticas desarrolladas en universidades [3], no existe un laboratorio virtual con el que se puedan usar los conocimientos adquiridos durante las clases teóricas.

En este trabajo se propone la utilización de un Laboratorio Virtual como herramienta de apoyo al aprendizaje de los procedimientos de medida de aislamiento acústico que los estudiantes de acústica podrán utilizar para aplicar la metodología de medida en este tipo de prueba adquirido en el periodo formativo previo. Concretamente el arranque de esta experiencia se centra en los ensayos de aislamiento a ruido aéreo de fachadas según la normativa UNE-EN ISO 140-5 [4]. Adicionalmente el Laboratorio Virtual podrá ser utilizado para obtener que podrán ser empleados en otros conocimientos relacionados con la Ingeniería Acústica, como es el cálculo de la incertidumbre y su estimación mediante operadores estadísticos.

El proyecto tiene dos objetivos principales. El primero es dar comienzo a una serie de Laboratorios Virtuales implementados para ser utilizados como herramientas auxiliares de formación práctica de ensayos basados en normas internacionales y el cálculo de incertidumbre de medida. El segundo es ampliar el concepto de intercomparación virtual introducido en el 2011 [5] y sentar las bases para la realización de intercomparaciones no presenciales que supongan un coste menor para los organizadores y participantes.

METODOLOGÍA

El aislamiento acústico determina la pérdida de potencia que experimenta el sonido al atravesar un paramento. En el caso de fachadas, el aislamiento se determina mediante la diferencia de niveles sonoros entre el interior y el exterior de la fachada. Para calcular esta diferencia existen diferentes métodos, definidos en la UNE-EN ISO 140-5. Uno de ellos, el llamado *método del altavoz*, es probablemente el más usado por su practicidad, ya que en él es posible tener el control de la fuente. Como arranque en la experiencia de una serie de laboratorios virtuales, nos hemos centrado en éste ensayo porque por un lado, permite asentar más conceptos sobre el procedimiento de la medida al ser necesario colocar la fuente correctamente y verificar que el nivel emitido por ésta es suficiente, y por otro, por su poca complejidad de implementación y la posibilidad de comprobar que la metodología utilizada es la adecuada.

De forma resumida, el ensayo consiste en lo siguiente: se coloca un altavoz en el exterior de la fachada para que emita un ruido de banda ancha. Es entonces cuando se mide el nivel de presión sonora en un punto de referencia frente a la fachada, y el nivel de presión sonora promedio en el interior del recinto. En este ensayo también se realiza una medición de tiempo de reverberación que permita considerar durante el cálculo la influencia de las características acústicas de la sala.

Por lo tanto, el proceso implica realizar distintas medidas tanto en el exterior como en el interior del recinto. Uno de los posibles procedimientos a seguir está mostrado en la figura 1 en el que se realizan las siguientes operaciones:

- Generar ruido frente a la fachada mediante un altavoz que estará colocado a una distancia de la fachada y ajustar su nivel para que supere el ruido de fondo del interior del recinto.

- Medir el nivel de presión sonora en el exterior de la fachada, L_1 . Esta medida se realiza a dos metros de distancia de la fachada y colocado en el punto medio de ésta.
- Medir el nivel de presión en el interior del recinto, L_2 . Este valor se calcula a partir del nivel de presión sonora promediando en cinco posiciones de micrófono distribuidas en el interior del recinto.
- Medir el tiempo de reverberación del recinto, RT mediante el método especificado en la norma UNE-EN ISO 354 [6]
- Nivel de presión sonora del ruido de fondo, BN . Esta medida se realiza en el recinto receptor, y permite eliminar la influencia de ruidos ajenos a la medida.
- Comprobación de calibración de los instrumentos de medida.

La función del técnico en dichas tareas es ubicar la instrumentación acústica en posiciones correctas y medir en dichos puntos. Los equipos ofrecerán resultados tras unos momentos, sin que se requiera la intervención del técnico durante el periodo de medida.

Una vez realizados los anteriores registros el técnico calculará la diferencia de niveles estandarizada, cuya expresión se muestra en la ecuación 1, y estimar la incertidumbre de medida.

$$D_{2m,nT} = L_1 - L_2 + 10 * \log\left(\frac{T}{T_0}\right) dB \quad (1)$$

En este proyecto, se pretende recrear, en un entorno virtual, todo el proceso de medida descrito anteriormente, de manera que el técnico pueda ejecutar los cálculos, como los haría en un ensayo real. Para ello, el Laboratorio Virtual debe implementar modelos que permitan recrear el fenómeno físico de generación y propagación del sonido, además de constar de instrumentos virtuales que permitan registrar mediciones de los diferentes parámetros involucrados. Del mismo modo que ocurre en los ensayos reales, debido a la componente aleatoria de la instrumentación, esos datos obtenidos tendrán una incertidumbre asociada, hecho que se recogerá en el Laboratorio Virtual.

Cabe destacar además que aunque en la figura 1 se propone un posible procedimiento de medida, el usuario del Laboratorio debe tener total libertad en el orden de realización de los ensayos, al igual que puede decidir el orden de realización de las medidas cuando llega a un recinto real para determinar su aislamiento.

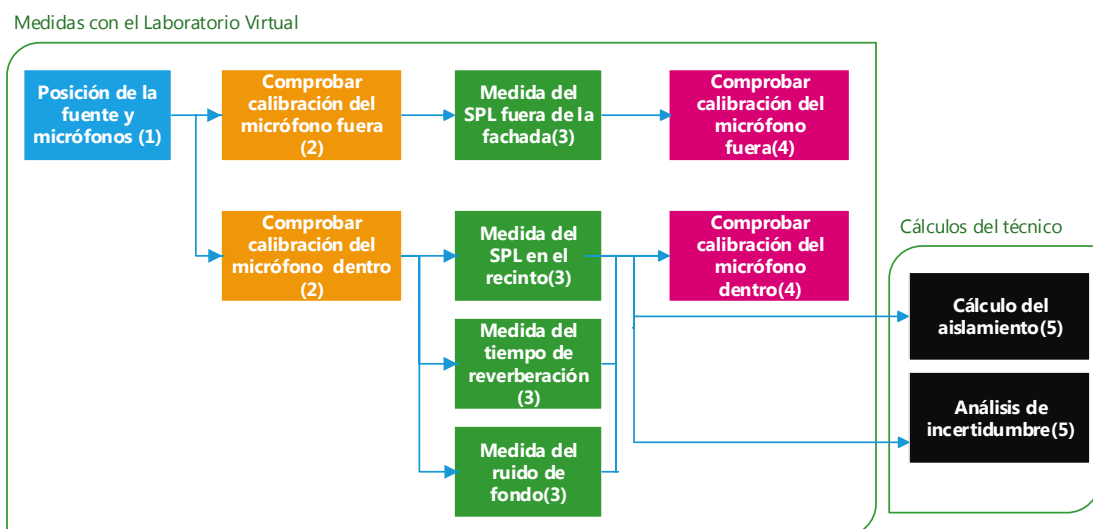


Figura 1. Diagrama de bloques con un posible procedimiento para un ensayo de aislamiento acústico de fachadas.

Para dar cumplimiento a los requisitos presentados, en los siguientes apartados, se describen los diferentes elementos que componen el Laboratorio Virtual.

Interfaz Gráfica

Con el objetivo de simplificar la interfaz de usuario del Laboratorio Virtual se ha optado por una representación en dos dimensiones del espacio en el que se realizará el ensayo, como se puede ver en la figura 2. Además debido al carácter “piloto” de éste tipo de laboratorio no presencial se ha decidido no implementar la apariencia de instrumentación real centrandose su desarrollo en los procedimientos de medida y no en el uso de la instrumentación. Por lo tanto, el usuario no realizará configuraciones de equipos, concentrándose exclusivamente en el procedimiento de medida y en la elección de las posiciones de micrófono a partir de unas coordenadas dadas en metros. Una que una vez realizada la medida se mostrarán los resultados en una tabla y en forma de gráfica.

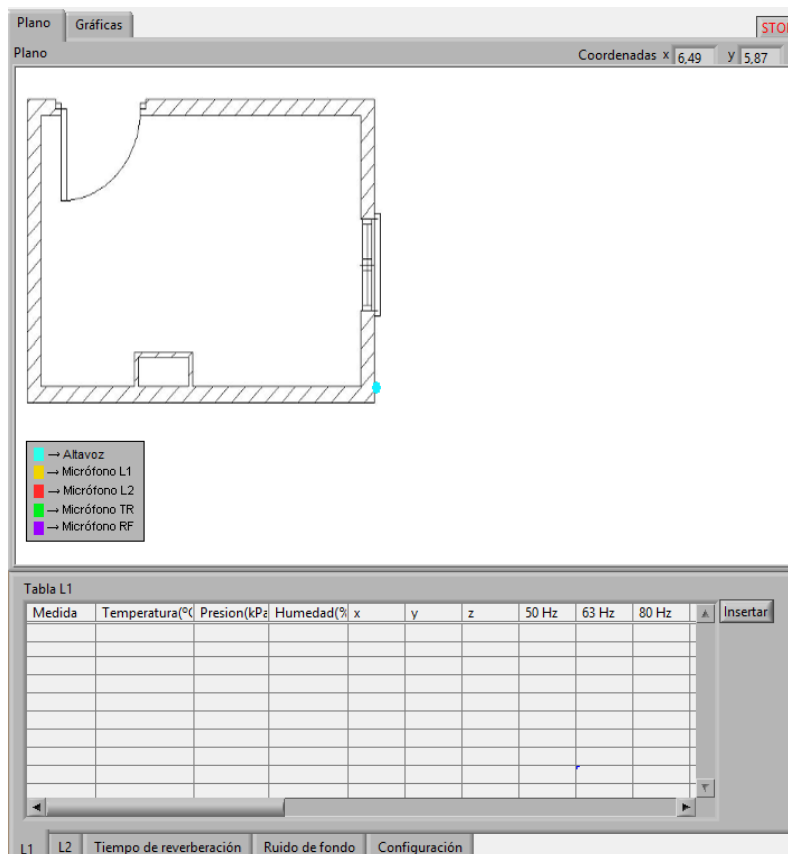


Figura 2. Interfaz gráfica del Laboratorio Virtual

Medida Exterior de Presión Sonora, L1

Como se ha mencionado anteriormente, para medir el nivel de presión sonora en el exterior debe generarse un ruido de banda ancha frente a la fachada a una distancia mínima de 5 metros desde la línea de la fachada. El sonido generado por el altavoz se propaga hasta la posición donde se ha colocado el micrófono, atenuándose por el camino. Esa atenuación se ha modelado de manera simplificada con la *Ley de Divergencia Esférica*, como se muestra en la ecuación 2. El nivel sonoro que genera el altavoz sobre el exterior de la fachada es L_{1VV} , donde r es la distancia entre altavoz y el micrófono y L_w la potencia acústica que genera el altavoz, que en el entorno virtual es constante y configurable por el usuario.

$$L_{1VV} = L_w - 20 * \log(r) + C1 \text{ dB} \quad (2)$$

Dónde r es la distancia entre altavoz y el micrófono y L_w la potencia acústica que genera altavoz, que en el entorno virtual es constante y configurable por el usuario. $C1$ es una constante que incluye el resto de influencias.

Sin embargo, tal y como ocurre en el mundo físico, el valor verdadero, L_{1VV} , no es alcanzable y es desconocido por el usuario del Laboratorio Virtual, que únicamente tendrá acceso a los registros de los instrumentos de medida virtuales. Con esta finalidad al valor mostrado al usuario, L_{1user} , se le añadirá una componente aleatoria asociada a la incertidumbre del instrumento de medida y estará afectada por las condiciones ambientales del exterior -temperatura, presión y humedad- que están siendo simulados en el exterior de la fachada con un modelo temporal específico. De este modo al valor que se muestra al usuario se le suma una corrección k_1 , que tiene en cuenta el efecto de las condiciones ambientales y el efecto aleatorio de la incertidumbre, como se puede ver en la ecuación 3.

$$L_{1usuario} = L_{1VV} + k_1 \text{ dB} \quad (3)$$

Medida Interior de Presión Sonora, L2

El sonido producido por el altavoz atraviesa la fachada y se distribuye por el interior del recinto. El técnico obtendrá el nivel de presión sonora medio de la sala a partir de medidas realizadas en diferentes puntos del recinto distribuidos por su volumen.

En el Laboratorio Virtual estas medidas se obtienen a partir del valor de nivel presión sonora existente en el exterior de la fachada, utilizando el valor verdadero de éste, L_{1VV} , al que se le resta el efecto del aislamiento de la fachada, $D_{2m,nT VV}$, tal y como se muestra en la ecuación 4. Este valor de aislamiento es una constante del Laboratorio Virtual.

Además se ha implementado un modelo de atenuación acústica en el interior del recinto, denotado por $A(x,y,z)$ en la expresión. Este modelo produce un efecto de atenuación en cada punto del espacio, como esquematiza la figura 3.

$$L_{2VV}(x, y, z) = L_{1VV,2m} - D_{2m,nT VV} + 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) + A(x, y, z) \text{ dB} \quad (4)$$

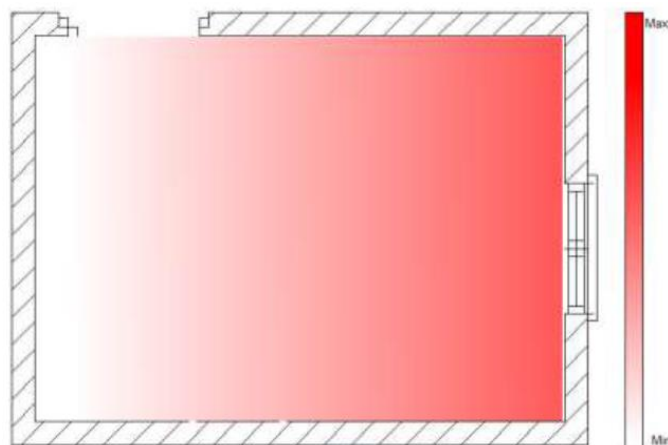


Figura 3. Distribución teórica de niveles en el recinto de ejemplo del programa

Como ocurría con el nivel de presión sonora en el exterior, cuando se muestra la medida al usuario se le suma una componente aleatoria asociada a la incertidumbre del instrumento y unas constantes asociadas a la temperatura, presión y humedad, denotadas por k_2 en la ecuación 5, por lo que el usuario no podrá acceder al valor verdadero de la medida.

Medida de Tiempo de Reverberación, TR

Una de las características importantes que el técnico debe determinar acerca del recinto receptor es el tiempo de reverberación. El tiempo de reverberación del recinto se ha modelizado como una constante que se impone por programación en el recinto virtual, sin embargo el usuario no tiene acceso a este valor, al igual que técnico debe realizar medidas para saber el tiempo de reverberación de un recinto.

En un ensayo de aislamiento el tiempo de reverberación es habitual medirlo con el método de ruido interrumpido especificado en la normativa UNE-EN ISO 354:2004 [6], aunque esa normativa también especifica otros métodos de medida como el del ruido impulsivo. Cada vez que se realiza una medida, el Laboratorio Virtual ofrece al usuario registros del TR del recinto, que se obtienen mediante una distribución gaussiana, a partir de los valores medios de la sala y de la variabilidad descrita en las investigaciones realizadas por la Universidad Politécnica de Madrid [7].

De igual manera que sucedía en las medidas de L_1 y L_2 , el valor verdadero no es mostrado al usuario, tan sólo es utilizado para cálculos internos del programa. El valor ofrecido al técnico se obtendrá a partir de la distribución estadística, de carácter aleatorio.

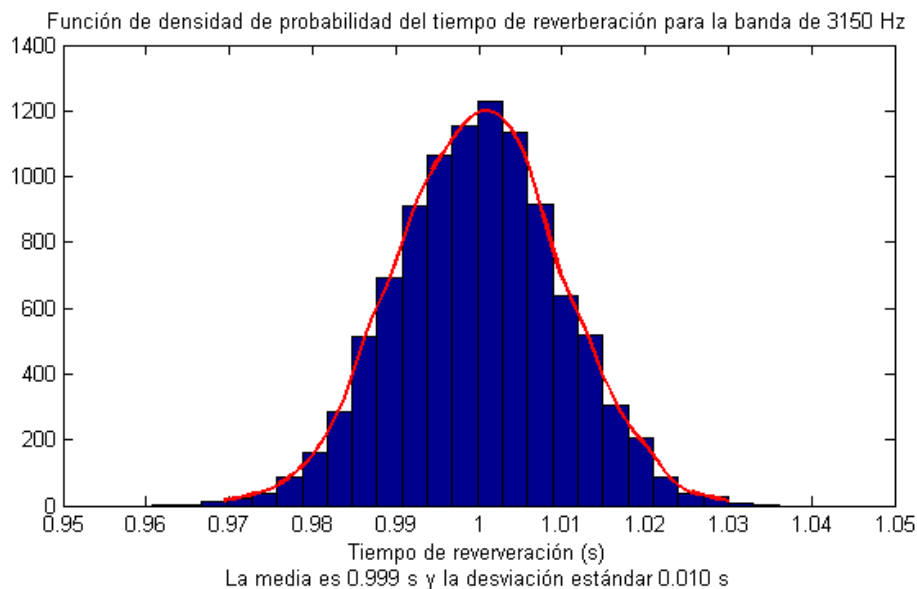


Figura 4. Distribución estadística Gaussiana de TR en la banda de 3150 Hz obtenido con el Laboratorio Virtual.

Medida de Ruido de Fondo, BN

La medida del ruido de fondo es indispensable para determinar el aislamiento correctamente, y se podría llegar a resultados erróneos de no realizar las pertinentes correcciones a las medidas del ensayo.

En el Laboratorio Virtual se ha implementado un modelo probabilístico de tal manera que algunas de las medidas de ruido de fondo tengan niveles suficientemente altos para ser consideradas no válidas o para realizar correcciones. Esto permitirá probar la pericia del usuario para identificar situaciones en las que una medida de ruido de fondo, o de L_2 , no sea representativa realmente del ruido residual en el recinto.

RESULTADOS

Se han validado los resultados obtenidos con el Laboratorio Virtual mediante una *simulación de Monte Carlo* [8]. Realizando $6 \cdot 10^5$ medidas de L1, L2 y TR, se ha calculado la diferencia de niveles estandarizada de los equivalentes ensayos, a partir de los cuales se ha calculado el intervalo de cobertura de cada una de las bandas de frecuencia de tercio de octava, obteniéndose los resultados mostrados con línea negra en la figura 4.

El intervalo de cobertura calculado tiene un nivel de significación de 0.05 lo que nos asegura que el 95% de las medidas realizadas en el laboratorio se encuentran entre los límites marcados por los extremos del intervalo, permitiendo realizar una primera verificación sobre la correcta realización del ensayo.

En la figura se ha añadido el resultado de un ensayo del Laboratorio Virtual, para mostrar que el resultado de la diferencia de niveles estandarizada, D_{nT} , se encuentra dentro del intervalo de cobertura, y si se calcula incertidumbre de medida asociada a dicho ensayo, denominada $U_{exp.ensayo}$ en la gráfica, se observa que el 95% de los valores se encuentran dentro del intervalo de cobertura calculado para el laboratorio.

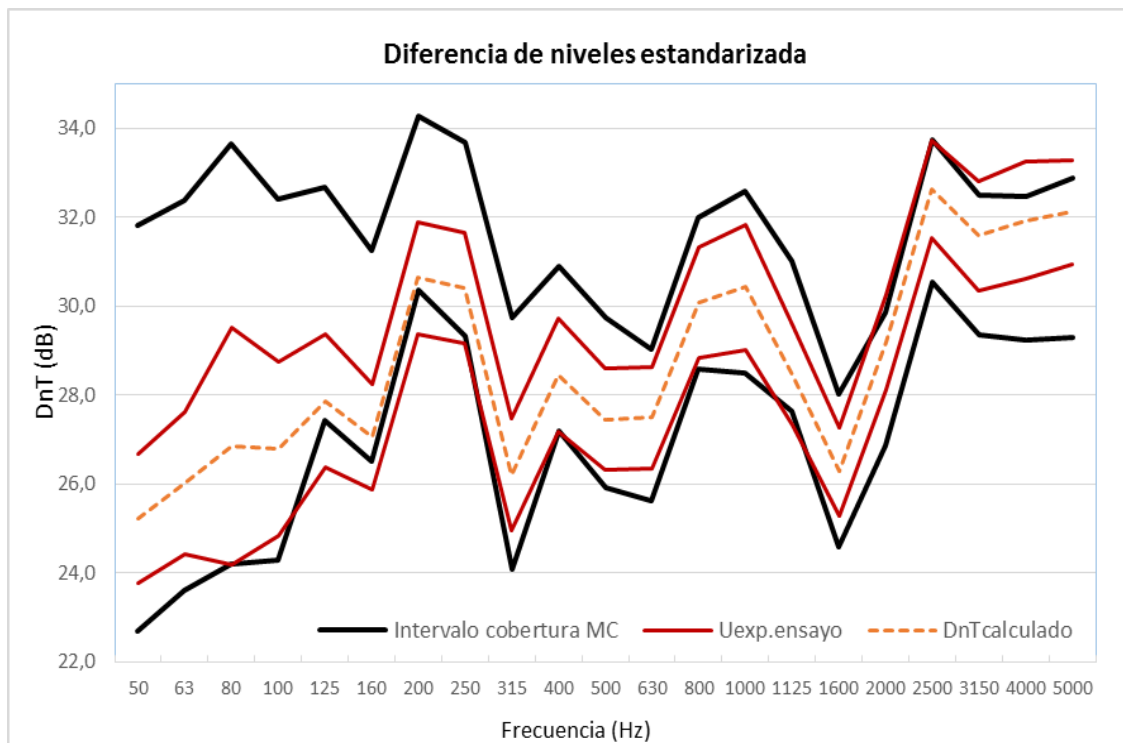


Figura 4. Gráfica comparativa de los intervalos de cobertura calculados para el Laboratorio Virtual y los resultados de un ensayo.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto se ha desarrollado un Laboratorio Virtual para la realización de ensayos de aislamiento acústico de fachadas, como herramienta auxiliar a la docencia en Ingeniería Acústica. El Laboratorio Virtual reproduce, mediante modelos matemáticos, el entorno acústico del ensayo y modeliza la variabilidad de las medidas mediante métodos de propagación de la incertidumbre. Además se ha comprobado los márgenes de variabilidad del Laboratorio Virtual realizando una simulación de MonteCarlo, comparándolo con un ensayo realizado con éste.

Para comprobar la comprensión de los conceptos teóricos y conseguir una realimentación sobre los aspectos de usabilidad mejorables en futuras versiones, se ha realizado una prueba piloto del Laboratorio Virtual por los alumnos del *Máster Universitario de Ingeniería Acústica en la Industria y en el Transporte*, de la *Universidad Politécnica de Madrid*, siendo los resultados obtenidos satisfactorios.

Teniendo en cuenta la posibilidad de incluir elementos adversos en el proceso del ensayo virtual en futuras versiones del Laboratorio Virtual se añadirán nuevos factores para comprobar la habilidad del alumno de forma más completa:

- Añadir presencia de ruido de fondo de una manera aleatoria en las medidas de nivel de presión sonora tanto en el exterior como en el interior del recinto. Esto permitirá comprobar si el alumno sabe identificar medidas incorrectas por la presencia de ruido ajeno a la medición y si sabe realizar las pertinentes correcciones de ruido de fondo.
- Rotura de micrófonos durante la medición de manera aleatoria. Para comprobar si el alumno es capaz de identificar rotura de la instrumentación.
- Añadir mobiliario en la habitación para ver cómo el usuario reacciona ante la imposibilidad de cumplir las distancias micrófono-pared mínimas marcadas por la normativa.

Además se ampliará el alcance del laboratorio para cubrir otros tipos de ensayos.

REFERENCIAS

- [1] M. Muhamad, H. B. Zaman, and A. Ahmad, "Virtual Biology Laboratory (VLab-Bio): Scenario-Based Learning Approach," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 69, no. 1, pp. 162–168, Dec. 2012.
- [2] Z. Tatli and A. Ayas, "Virtual laboratory applications in chemistry education," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 9, pp. 938–942, Jan. 2010.
- [3] S. Basturk, F. Perea Pérez, L. Álvarez-Morales, and T. Zamarreño, "Evaluación paramétrica y sensorial en la enseñanza acústica de salas," 2013, p. 9.
- [4] AENOR, "UNE-EN ISO 140-5:1999 'Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas.'" AENOR, p. 32, 1999.
- [5] C. Asensio Rivera, I. Pavón García, and R. Pagán Muñoz, "E-comparisons: A new approach to round robin tests for environmental noise assessment in transport infrastructures," *18th Int. Conf. Sound Vib.*, 2011.
- [6] AENOR, "UNE-EN ISO 354:2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante." p. 28, 2004.
- [7] C. Díaz and A. Pedrero, "The reverberation time of furnished rooms in dwellings," *Appl. Acoust.*, vol. 66, no. 8, pp. 945–956, Aug. 2005.
- [8] JCGM, "JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the ' Guide to the expression of uncertainty in measurement' - Propagation of distributions using a Monte Carlo method." 2008.