



**FIA 2018**

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

## **METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN SUBJETIVA DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE VENTANAS PARA ENTORNOS URBANOS**

PACS: 43.55.Rg

De la Prida, Daniel; Pedrero, Antonio; Navacerrada, M<sup>a</sup> Ángeles; Díaz, César  
Grupo de investigación en Acústica Arquitectónica. Universidad Politécnica de Madrid  
Avda. Juan de Herrera 4. 28040 Madrid (España)  
Tel. +34 910 674 853  
E-Mail: arquilav.arquitectura@upm.es

**Palabras Clave:** percepción, aislamiento acústico a ruido aéreo, ventanas, listening test

### **ABSTRACT**

In recent years there is a growing interest in the subjective characterization of acoustic insulation. However, there are still no standardized methodologies for this task.

The objective of this communication is to present a precise methodology for the subjective characterization of the acoustic insulation of windows, by means of listening test. To begin with, reference is made to the selection of stimuli and window insulation spectra used. Subsequently, the design and the conditions used for the performance of the listening test are described. Finally, some data are shown regarding the sample of participants and the methods of analysis used.

### **RESUMEN**

En los últimos años existe un creciente interés en la caracterización subjetiva del aislamiento acústico. Sin embargo, no existen aún metodologías normalizadas para esta tarea.

El objetivo de esta comunicación es el de presentar una metodología precisa para la caracterización subjetiva del aislamiento acústico de ventanas, mediante listening test. Para comenzar, se hace referencia a la selección de los estímulos y espectros de aislamiento de ventanas utilizados. Posteriormente, se describe el diseño y las condiciones utilizadas para el desempeño del listening test. Por último, se muestran algunos datos relativos a la muestra de participantes y a los métodos de análisis utilizados.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La caracterización del aislamiento acústico se ha llevado, de manera histórica, mediante descriptores objetivos basados mayoritariamente en correcciones o ponderaciones de la diferencia de niveles de presión sonora. Así, y tal y como se puede observar en [1] existen sólo



## FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre**

En Europa multitud de indicadores para caracterizar la eficacia del aislamiento acústico. Este hecho pone de manifiesto dos aspectos. En primer lugar, que no hay una normativa unificada a efectos de caracterizar el aislamiento acústico. En segundo lugar, que no parece existir un consenso en cuanto a qué descriptor representa mejor el aislamiento acústico.

En este sentido está tomando gran importancia, en los últimos años, la caracterización subjetiva del aislamiento acústico mediante un enfoque mixto, basado en listening test, de los que pueden ser algunos ejemplos [2]–[4]. Incluso iniciativas como el COST TU0901 [5] tratan de establecer las bases para una caracterización del aislamiento acústico enfocada en la percepción subjetiva.

Si bien la mayoría de los autores sigue una serie de pautas comunes para la caracterización subjetiva del aislamiento acústico, existen ciertos elementos que son simplificados o no considerados de manera general y que pueden ser de gran importancia para que la caracterización sea acertada.

Adicionalmente, la caracterización subjetiva del aislamiento acústico se realiza, de manera predominante, para soluciones relativas a elementos separadores como pueden ser paredes, forjados y cerramientos, pero en escasas ocasiones para los elementos de ventana, que tienden a ser los elementos más frágiles del aislamiento acústico de las fachadas.

El propósito de la presente comunicación es el de describir la metodología, con enfoque en la precisión, de la caracterización subjetiva del aislamiento acústico de ventanas utilizada en el proyecto BIA 2015-68914- R. Así, gran parte de la comunicación se destina a describir la metodología utilizada en cada una de las etapas de la investigación. Adicionalmente, se presentan ciertos resultados relacionados con los estímulos y espectros de aislamiento utilizados, así como de la muestra de participantes y su tamaño.

Para conseguir el objetivo propuesto se llevan a cabo tres etapas bien diferenciadas. Por un lado se encuentran las etapas de diseño y desarrollo del listening test y, por otro, la etapa de análisis de los resultados de la caracterización subjetiva. Ello requiere de la creación de una metodología específica para cada una de las etapas, que son descritas en el presente apartado.

En primer lugar, se presentará la metodología de diseño del listening test, destinada a minimizar al máximo el sesgo del método de consulta y a describir los elementos que componen el listening test, así como a asegurar un alto grado de precisión.

En segundo lugar, se presenta la metodología de desarrollo de listening test, enfocada en reducir, en la medida de lo posible, el sesgo de la interacción hombre – máquina y de la comunicación entre el experimentador y el participante. Además, esta metodología trata de describir todas las fuentes de información que se pueden extraer de cada participante, más allá de sus respuestas a las preguntas del listening test.

Por último se enumeran, de manera muy sucinta, los métodos de análisis de los resultados. Esta se encuentra destinada a tener en cuenta todos los factores estadísticos que se han de considerar para que los resultados del estudio puedan darse por válidos.

## **2. DISEÑO DEL LISTENING TEST**

El diseño del listening test es, con total seguridad, la etapa más importante del proceso. Un listening test mal diseñado puede acarrear, por ejemplo, que en la etapa de análisis de los resultados algunas condiciones estadísticas, que son necesarias para asegurar el correcto diseño del experimento, no se cumplan. Una duración inapropiada puede causar cansancio auditivo en los participantes así como pérdida de interés. Además, la selección óptima de

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

estímulos y elementos de aislamiento acústico pueden influir en la relevancia y significancia del estudio. En este apartado se desarrollan, de manera independiente, cada una de los elementos que se han valorado a la hora de diseñar el listening test.

### 2.1. Selección de los espectros de aislamiento.

La selección de los estímulos viene totalmente supeditada a las cuestiones que el estudio quiera evaluar y a las hipótesis que se planteen. Así, en particular, en este estudio se trata de evaluar la adecuación de los distintos índices de reducción sonora y factores correctores del aislamiento acústico con la sensación percibida por las personas. Asimismo, se plantea la posibilidad de estudiar la influencia de la persiana en la percepción del aislamiento acústico. Por último se plantea otra hipótesis relacionada con los estímulos utilizados. Esta hipótesis será planteada en el apartado "**Selección de estímulos**".

En base a estas hipótesis, y partiendo de una amplia base de datos de medición in-situ de ventanas generada durante varios años, y que son descritas en mayor profundidad en [6], [7] se han obtenido los espectros de aislamiento de ventana sobre los que serán consultados los participantes. Para ello, se han seleccionado 3 tipos habituales de ventana y, a partir de la base de datos, se han calculado los espectros promedio del índice de reducción sonora de cada uno de los tres tipos, teniendo en cuenta, para el promedio, todas las ventanas medidas de cada uno de los tres tipos. De todas las ventanas se obtiene el índice de reducción sonora espectral en condiciones de persiana subida y bajada.

Para la selección de los espectros de aislamiento acústico de ventanas, se busca obtener la máxima diferencia entre los índices de reducción sonora manteniendo, a su vez, un rango de valor global relativamente estrecho. En particular, las ventanas seleccionadas se encuentran, en términos de  $R_w$  en un rango de 7 dB, entre 32 y 39 dB. De este modo, el rango de estudio se centra en elementos de aislamiento con diferencias claras entre sí pero en un rango que no genere grandes diferencias.

Material	Practicabilidad	Capialzado	Persiana	Vidrio	$R_w$
PVC	Oscilobatiente	Poliestileno	Subida	4 / 12 / 4	36
PVC	Oscilobatiente	Poliestileno	Bajada	4 / 12 / 4	37
PVC	Corredera	Poliestileno	Subida	4 / 12 / 8	35
PVC	Corredera	Poliestileno	Bajada	4 / 12 / 8	39
PVC	Corredera	Vacío	Subida	4 / 12 / 8	32
PVC	Corredera	Vacío	Bajada	4 / 12 / 8	36

Tabla 1: Resumen de características de las ventanas utilizadas en el estudio

Como se puede apreciar, finalmente se consulta a los participantes por 6 configuraciones distintas de ventana. Si bien el estudio se podría haber extendido a mayor número de configuraciones de ventana, se ha priorizado el estudio del efecto de la persiana. El número de configuraciones a estudiar se puede considerar correcto, dado que se ha de seleccionar un número limitado de espectros y estímulos, de modo que no se genere un listening test demasiado extenso.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

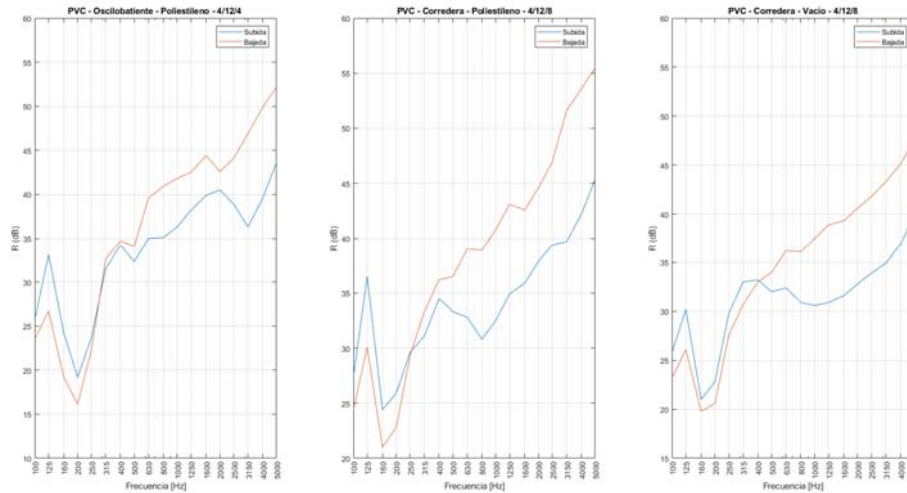


Figura 1: Índice de reducción sonora (espectro) de las 6 ventanas utilizadas, agrupadas por pares (persiana) con respecto a sus características.

## 2.2. Selección de estímulos

En este estudio, relacionado con el aislamiento acústico de ventanas, se han seleccionado diversos ruidos de exterior, que son susceptibles de ser emitidos en la proximidad de una ventana. Para ello se han buscado las fuentes más habituales de ruido en los núcleos urbanos y se ha realizado, adicionalmente, una encuesta online para recolectar las fuentes de ruido que más molestas resultan en el interior de las viviendas. La muestra de participantes en la encuesta online describió el ruido asociado a los vehículos (motos, coches, autobuses, cláxon, sirena...) como el tipo de ruido más molesto en los entornos urbanos con un 39% de las respuestas, el ruido provocado por los viandantes (gente hablando, niños en horas escolares...) con un 12%. En un porcentaje más bajo se describe el ruido provocado por otras infraestructuras como las aeronaves y el tráfico ferroviario y las actividades de ocio.

Se han seleccionado, finalmente, cinco estímulos. Dos de ellos relativos a ruido de tráfico en el entorno urbano, uno de ellos relacionado con aeronaves, otro relacionado con ruido de peatones y, para finalizar, ruido rosa.

La duración se ha fijado en 15 segundos. Se ha tratado de fijar una duración a los estímulos que sea suficiente para caracterizar el ambiente representado pero que no sea demasiado largo, para no generar duda y para no alargar el test más allá de los límites que permiten una buena concentración del participante. En el caso del ruido rosa, al ser un ruido constante tanto espectral como temporalmente, no es necesario que la duración del estímulo sea tan larga. Por ello la duración del ruido rosa es más corta, de 5 segundos.

Todos los estímulos utilizados, a excepción del ruido rosa, han sido grabados biauralmente mediante un Dummy Head B&K Type 4100, conectado a una plataforma portátil de grabación Pulse, manejada a través de un iPad con la aplicación B&K Sonoscout (figura 2). La tasa de muestreo fue 96 kHz y la tasa de bits de 32 bits.



## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

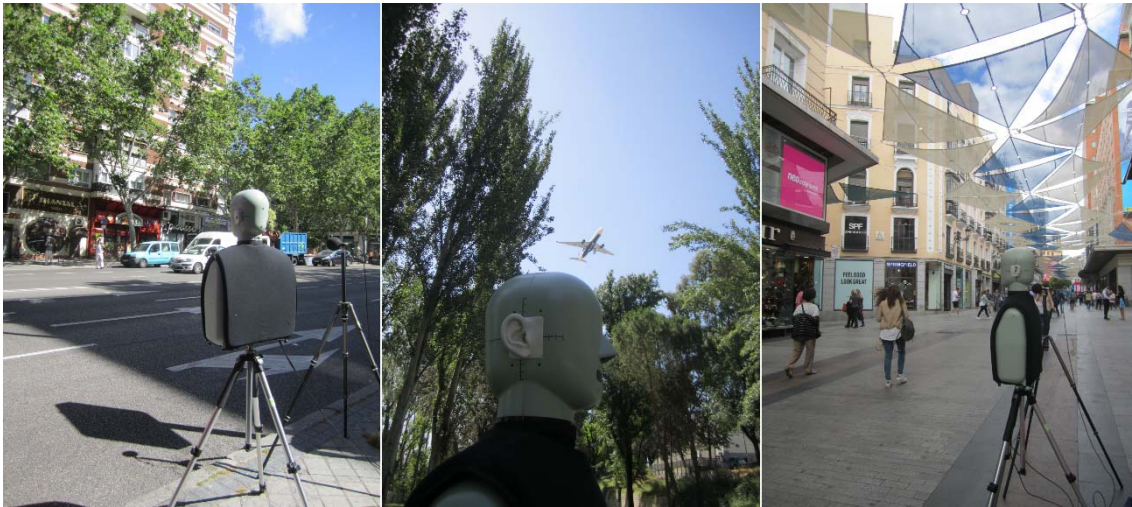


Figura 2: Dummy Head durante la grabación de los estímulos. En la izquierda, grabación de tráfico en entorno urbano. En el medio, grabaciones de aterrizaje de aeronaves. En la derecha, grabación de ruido de viandantes.

Para el ruido de tráfico se realizaron grabaciones de 15 minutos en 13 puntos del núcleo urbano de Madrid, en calles con distintas configuraciones de tráfico y distintos entornos arquitectónicos. En el estudio previo realizado con estas grabaciones [8] se obtuvieron distintas clasificaciones acústicas de la ciudad de Madrid. De las clasificaciones que mayor diferencia psicoacústica provocan, se seleccionaron los dos fragmentos de 15 segundos más representativos, en términos de sus parámetros psicoacústicos. En particular, los estímulos utilizados pertenecen a situaciones de funcionamiento habitual de la calle Blasco de Garay y de la Avenida Puerta de Hierro.

Para el ruido de aeronaves, se registraron más de 50 operaciones de despegue y aterrizaje de aeronaves, en campo libre, en las proximidades de viviendas cercanas al aeropuerto de Madrid-Bajaras. En particular, las grabaciones de los aterrizajes se registraron en Coslada y aquellas relativas a los despegues en el término municipal de Belvis de Jarama. Finalmente se seleccionó como estímulo para el test aquel estímulo que representase, en términos de parámetros psicoacústicos, la operación más cercana al promedio. Se ha seleccionado el sobrevuelo de un Airbus A320.

Para el ruido de las zonas peatonales se realizaron mediciones de 15 minutos en diferentes calles y plazas peatonales del centro urbano de Madrid y se seleccionó aquel tramo de 15 segundos más próximo al promedio de los parámetros psicoacústicos. El fragmento utilizado pertenece, en particular, a un uso habitual de la calle Preciados.

Por último, a modo de control, se utilizó ruido rosa de 84dB. Como ya se comentó con anterioridad, dadas las particularidades de este tipo de estímulos, se pudo reducir la duración del estímulo a tan sólo 5 segundos.

Como ya ha comentado, de la encuesta online se extrajo que, a parte de los estímulos utilizados en el test, también genera molestia sobre los ciudadanos el ruido provocado por las actividades de ocio. Sin embargo, no se contempla este tipo de ruido en el listening test diseñado.

### 2.3. Método de consulta

Muchos son los métodos de consulta disponibles para caracterizar la percepción subjetiva del ruido y su idoneidad depende en gran parte de la cuestión a estudiar. En la caracterización

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

subjetiva del aislamiento acústico, el uso de la consulta mediante diferencial semántico con escala de Likert y la comparación por pares son dos de los métodos más utilizados.

En esta investigación se determinó una duración máxima del listening test de 35 minutos y se decidió utilizar el método de la comparación por pares. El método de comparación por pares se puede realizar con repeticiones, donde cada consulta se realiza dos veces, con los estímulos de cada pareja presentados en orden inverso en cada una de las repeticiones, o sin repeticiones, donde cada comparación se realiza una única vez con los estímulos presentados en orden aleatorio. Cuando la muestra de participantes es baja se recomienda utilizar el método con repeticiones, para mejorar la precisión del experimento. Si la muestra utilizada es grande, no es necesario realizar la repetición y la duración del test se reduce a la mitad. En este estudio se propuso una muestra de población mínima de 100 personas, que es un valor muy elevado, con lo que se escogió el método sin repeticiones.

El número máximo de comparaciones por pares que se deben realizar, para las condiciones descritas, sigue la fórmula 1:

$$N^{\circ}comparaciones = N * (N - 1)/2$$

*Fórmula 1: Fórmula que describe el número de comparaciones necesarias en base al número de especímenes a comparar*

siendo N el número de de variantes de un sonido que va a escuchar el participante durante el test. Como se han seleccionado 6 elementos de ventana, N será 6. Ello lleva a que el número de consultas, siguiendo la fórmula descrita sea de 15, para cada uno de los estímulos. Dado que se va a realizar la prueba para 5 estímulos distintos, el número total de consultas que se va a realizar a cada participante es de 75.

Si se tiene en cuenta que la duración promedio de un estímulo son 13 segundos, se precisa de alrededor de 35 minutos para responder a las 75 consultas, lo que cumple el criterio indicado acerca de la duración del test.

Con el fin de asegurar la independencia de los resultados, que es una de las condiciones estadísticas necesarias en este tipo de estudios, las comparaciones se presentan en orden aleatorio para cada participante, de manera que se evite, en la medida de lo posible, el sesgo debido al aprendizaje y al cansancio del participante.

### 3. DESEMPEÑO DEL LISTENING TEST

En el presente apartado se presentan las condiciones y equipos utilizados para llevar a cabo el listening test y se describe el procedimiento seguido durante la prueba.

#### 3.1. Condiciones y equipos

Los listening test se llevaron a cabo, en los días y horas concertados con cada uno de los participantes, entre los meses de abril de 2017 y junio de 2018. El método para reclutar a los participantes fue mediante visita informativa, correo electrónico e información en ponencias. A los participantes no se les ofrece ningún tipo de compensación económica pero se les aporta una descripción detallada de su estado de audición.

Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones (Arquilav) de la Escuela Técnica de Superior Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Se utilizó una cabina insonorizada DEMVOX ECO100, para asegurar bajo de ruido de fondo, comodidad y condiciones propicias para la realización del test (figura 3). Dentro de la cabina sólo se instaló

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

una pantalla, un ratón, un pulsador y unos auriculares. El resto de los equipos se instalaron fuera de la cámara para evitar ruidos procedentes de los métodos de disipación de portátiles y amplificadores.

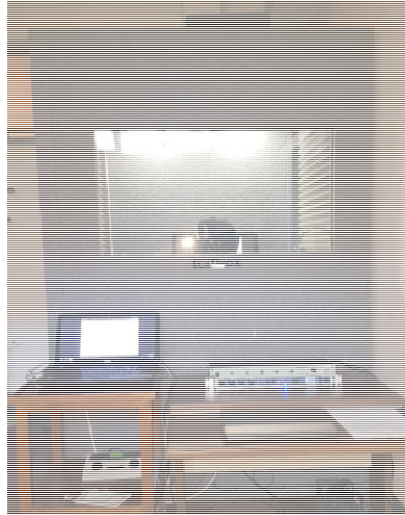


Figura 3: Persona dentro de la cabina DEMVOX ECO100 realizando el listening test

La cadena de reproducción constó de un ordenador portátil conectado a una interfaz de audio RME Fireface UFX, un amplificador de auriculares RANE HC6S y auriculares Sennheiser HD650. La cadena de reproducción fue calibrada para presentar las muestras sonoras al mismo nivel al que fueron grabadas. Adicionalmente se tuvo en cuenta la respuesta en frecuencia de los auriculares para, en la medida de lo posible, contrarrestar su efecto.

### 3.2. Procedimiento del test

Una vez recibido al participante en el día y hora especificados, se le invita a entrar en la cabina y se le pide que, en primer lugar, conteste una encuesta demográfica anónima acerca de su edad, género, nacionalidad y nivel de estudios.

Finalizado este proceso, y habiéndose familiarizado el participante con su entorno, se le aporta un documento donde aparecen los detalles de la prueba que va a realizar y el proceso que debe seguir. Finalizada su lectura, se pregunta al participante si ha comprendido todo y se le asiste con las dudas que tenga.

A continuación, se presenta al participante, en la pantalla del ordenador, el diseño de formulario que deberá contestar y se realiza un corto entrenamiento de dos comparaciones, para valorar la comprensión real de la prueba. Si el entrenamiento finaliza sin incidentes se da comienzo a la prueba.

El listening test se realiza como 5 pruebas individuales, cada una para un estímulo distinto, con un corto descanso entre cada una de ellas. Durante el descanso, de manera distendida y evitando que parezca parte de la evaluación, se entrevista al participante acerca de la prueba que acaba de realizar. Aquellos datos interesantes de la entrevista se anotan para futura consulta, por si fuesen necesarios.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Finalizadas las 5 pruebas, se realiza a todos los participantes una audiometría de screening para conocer su estado de audición. Cada participante recibe el resultado de su audiometría y se le explica en detalle.

### 4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de la prueba pueden analizarse de modos diversos. El método de comparación por pares se encuentra estandarizado en la norma UNE-EN ISO 5495 [9] y es el método de análisis que se usa de manera principal.

Sin embargo, también se utilizan otros métodos como el análisis de la varianza o la regresión lineal para extraer conclusiones adicionales y verificar la validez del diseño del experimento.

### 5. CONCLUSIONES

Se ha descrito la metodología usada para un estudio de caracterización subjetiva del aislamiento acústico de ventanas. La metodología se ha basado en tres etapas, diseño y desarrollo del listening test y análisis de resultados, y se ha descrito la metodología específica seguida para cada una de ellas. Ésta ha sido aplicada a una prueba realizada por 120 personas, de las cuales un 55% (M=65) fueron mujeres y un 45% (H=54) fueron hombres, con edades comprendidas entre los rangos de 15-19 años y >65 años, con el mayor número de participantes en el rango 20-24 años, con 34 participantes. El test ha sido realizado por personas de 13 países. El país con mayor número de participantes fue España con 100 (83.3%).

### 6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MINECO), a través del proyecto BIA 2015-68914-R "Estudio subjetivo del comportamiento acústico de las ventanas con persiana integrada para diferentes tipos de ruido ambiental".

### 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Machimbarrena, María; Fausti, "En busca de un marco común europeo en materia de aislamiento acústico en viviendas: Intercambio de ideas y dificultad de consenso," in Tecniacústica 2013 - 44º Congreso Español de Acústica, 2013, pp. 33–49.
- [2] V. Hongisto, M. Mäkilä, and M. Suokas, "Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – The effect of wall construction," *Build. Environ.*, vol. 85, pp. 309–320, Feb. 2015.
- [3] M. Rychtáriková et al., "Perceived Loudness of Neighbour Sounds Heard Through Heavy and Light-Weight Walls with Equal R<sub>w</sub>+ C 50–5000," *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 102, no. 1, pp. 58–66, 2016.
- [4] C. Monteiro, M. Machimbarrena, D. de la Prida, and M. Rychtarikova, "Subjective and objective acoustic performance ranking of heavy and light weight walls," *Appl. Acoust.*, vol. 110, pp. 268–279, Sep. 2016.
- [5] B. Rasmussen, M. Machimbarrena, P. Fausti, and C. TU0901, *Building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe.* 2014.
- [6] C. Díaz and A. Pedrero, "An experimental study on the effect of rolling shutters and





## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

- shutter boxes on the airborne sound insulation of windows," *Appl. Acoust.*, vol. 70, no. 2, pp. 369–377, 2009.
- [7] C. Díaz, A. Díaz, and M. A. Navacerrada, "An experimental study on the effect of rolling shutters on the field measurements of airborne sound insulation of façades," *Appl. Acoust.*, vol. 74, no. 1, pp. 134–140, 2013.
- [8] P. Oliveira, D. De La Prida, A. Pedrero, and C. Díaz, "Caracterización subjetiva de paisajes sonoros de Madrid," in *Tecniacústica 2017 - 48o Congreso Español de Acústica*, 2017, pp. 471–478.
- [9] UNE-EN ISO 5495:2009 - Análisis sensorial - Prueba de comparación por parejas. Asociación Española de Normalización y Certificación, 2009.