

Estudio de la molestia de sonidos auralizados en medidas de aislamiento

REFERENCIA PACS: 43.55.-+p, 43.60.-Jn,

Segura, Jaume²; Cobos, Máximo¹; Felici, Santiago¹; Navarro, Juan Miguel³; Torres, Ana⁴

1 Dpt Informàtica, ETSE, Universitat de València, Poligon de la Coma s/n, macose2@uv.es, felici@uv.es

2 IRTIC, Universitat de València, Poligon de la Coma s/n, jsegura@uv.es

3 Dpt Telecomunicación, Univ. Católica San Antonio Murcia (UCAM), jmnavarro@ucam.edu

4 Departamento IEEAC, Univ. de Castilla-La Mancha, ana.torres@uclm.es

ABSTRACT

Indoor insulation is an important issue in building and room acoustics. EN12354 norm is addressed to estimate insulation parameters. Auralization of noise insulation allows audio rendering of sources in the neighbourhood, filtering with the sound abatement parameters of the flanking walls, doors, windows, etc.

In this work, a study of the auralized sound received in different rooms has been made. The measurement of the impulse response has allowed the calculation of the noise reduction, and the synthesized response of the noise insulation has confirmed the results of the measured auralization. Finally, a comparison of the nuisance of the measured and simulated signals has been made by using the Zwicker model.

RESUMEN

El aislamiento de interiores es un tema importante en acústica de salas y de construcción. La norma EN12354 se orienta a estimar los parámetros de aislamiento. La auralización de ruido de aislamiento permite la representación aural de fuentes en el vecindario, filtrando con los parámetros de aislamiento sonoro de las paredes colindantes, puertas, ventanas, etc.

En este trabajo se ha hecho un estudio del sonido auralizado recibido en diferentes habitaciones. La medida de la respuesta impulsiva ha permitido el cálculo de los parámetros de aislamiento y la respuesta sintetizada del aislamiento al ruido ha confirmado el resultado de la auralización medida. Finalmente, se ha realizado una comparación de la molestia de las señales medidas y sintetizadas a partir del modelo de Zwicker.

1. INTRODUCCIÓN

La auralización es una técnica de procesamiento de audio que permite muchas aplicaciones en diversos campos, incluyendo la acústica y las telecomunicaciones. Se basa en el filtrado de una señal anecoica, sin tratamiento, con una respuesta impulsiva medida o simulada en cualquier entorno [1]. La aplicación de esta técnica en acústica arquitectónica ha permitido mejorar la construcción de edificios y salas mediante la inclusión de consideraciones perceptivas en su proceso de diseño. En este contexto, la auralización de aislamiento permite estimar cómo se oye un sonido en un entorno determinado tomando en consideración las diferentes contribuciones acústicas resultantes del proceso de transmisión a través de las paredes. Para ello, las respuestas impulsivas adquiridas deben ser convenientemente tratadas

mediante la aplicación de métodos de simulación específicos, tales como el método de fuentes imagen, el de trazado de rayos/conos u otros basados en la solución de la ecuación de onda (métodos de onda completa).

En este trabajo, se ha realizado una comparación de las respuestas impulsivas obtenidas a partir de medidas de aislamiento y otras obtenidas mediante síntesis. Los valores de aislamiento obtenidos en las medidas se usan para calibrar las respuestas simuladas. Además las respuestas medidas se comparan con las sintetizadas mediante procesos generados con ruido blanco gaussiano con atenuación exponencial. Todos estos procesos han sido procesados para la obtención de parámetros psicoacústicos con el modelo de molestia de Zwicker [2].

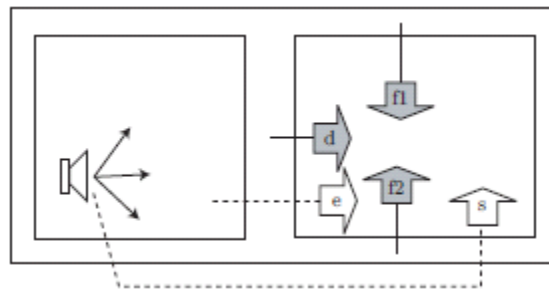


Figura 1: Contribuciones a la transmisión acústica total entre dos recintos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Cálculo del aislamiento y auralización

Consideremos el caso de dos habitaciones contiguas, donde se dispone de una fuente de ruido dentro de una de ellas que contribuye al conjunto de la energía acústica total en la otra sala. La energía sonora en la segunda sala puede ser modelada como la suma de las contribuciones provenientes de las diferentes paredes y los elementos estructurales. La Figura 1 ilustra esta situación. De acuerdo con esta figura, las contribuciones vienen dadas por el ruido directamente transmitido por el elemento separador (d) y por los flancos laterales (f1 y f2). Además, hay otras posibles contribuciones (e) debidas a los elementos instalados en las paredes separadoras con diferente nivel de aislamiento (como puertas o ventanas) y por otros elementos que producen transmisión indirecta a través de los laterales (s).

Teniendo en cuenta todas las contribuciones anteriores, es importante tener un modelo de aislamiento más realista. Por ejemplo, el reglamento español anterior de medida del aislamiento tan solo consideraba la transmisión acústica a través de la pared principal entre ambas salas (d en la Figura 1). Sin embargo, el considerar las contribuciones correspondientes a todas las paredes colindantes, permite un cálculo más preciso de la energía sonora en cada banda de frecuencia de octava (o tercio de octava) dentro del recinto receptor. Para ello, se usan los parámetros definidos por la norma europea EN12354 [3, 4, 5] (la diferencia de nivel normalizado D_n , la diferencia de nivel estandarizado D_{nT} , el índice de reducción sonora R, el índice de reducción acústica aparente R_0 y el índice de reducción acústica aparente ponderado R_{0w}).

Como se explica en [3, 4, 5], el sonido radiado a la segunda sala puede considerarse como la suma de las diferentes transmisiones a través de los diferentes caminos. En una primera aproximación, podrían suponerse que estas contribuciones están constituidas por muchas fuentes puntuales localizadas en las diferentes paredes. Sin embargo, algunos autores se muestran partidarios a que es suficiente con considerar únicamente una fuente puntual situada en el medio de cada pared limitante que modela la contribución de la pared específica [1, 7, 8]. Por tanto, es razonable suponer la existencia de 6 fuentes sonoras radiando al receptor dentro de la sala cerrada, como se muestra en la Figura 3.

Para propósitos de medida y auralización, es posible suponer el modelo anterior, donde sabiendo la geometría de la sala y la posición del receptor, es posible calcular las localizaciones de las fuentes y determinar la energía total mediante la suma de sus contribuciones. Como resultado, la señal recibida en la habitación receptora tiene contribuciones de todas estas fuentes, pero también de su propio tiempo de reverberación. Consecuentemente, la diferencia de nivel estandarizada se calcula como:

$$D_{nT} = L_S - L_R + 10 \cdot \log\left(\frac{T}{0,5}\right) \quad (1)$$

donde L_S es el nivel sonoro en el recinto emisor, L_R es el nivel sonoro en el recinto receptor y T es el tiempo de reverberación en la habitación receptora. En una forma más elaborada, la ec. (1) puede expresarse como una función del coeficiente de transmisión estandarizado τ_{nT} , de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\tau_{nT}} = 10^{\frac{D_{nT}}{10}} = \frac{p_S^2 T}{p_R^2 0,5} \quad (2)$$

y por tanto:

$$p_R^2 = p_S^2 \cdot \tau_{nT} \cdot \frac{T}{0,5} \quad (3)$$

Para realizar la auralización del recinto receptor, es conveniente expresar la ecuación anterior en el dominio de la frecuencia. La transformada de Fourier aplicada a la ec. (2) permite expresar la señal receptora como suma de la señal original transmitida filtrada con algunas funciones de transmisión y reverberación ligadas a las paredes que conforman la habitación:

$$p_R(\omega) = p_S(\omega) \cdot \sum_{i=1}^6 f_{\tau,i}(\omega) \cdot f_{rev,i}(\omega) \quad (4)$$

donde $f_{\tau,i}(\omega)$ con $i=1, \dots, 6$ son las funciones relacionadas con los coeficientes de transmisión entre la fuente y el recinto receptor, y $f_{rev,i}(\omega)$ son las funciones de transferencia debidas a la reverberación entre las paredes radiantes y el receptor. Por tanto, estos filtros se podrían identificar como los correspondientes coeficientes de transmisión $f_{\tau,i}(\omega)$ en espectro de 1/3 de octava (o el espectro de octava, de acuerdo con el caso) y para los $f_{rev,i}(\omega)$ como una función de los caminos acústicos entre la pared i y el receptor.

Este hecho nos permite realizar la auralización de una fuente en la primera y la segunda habitación simplemente multiplicado la energía obtenida en cada sala (para un receptor dentro de la habitación emisora y un receptor dentro de la receptora) por la señal fuente anecoica en el dominio de la frecuencia.

Cuando se trate con fachadas, entonces no es posible trabajar con los parámetros anteriores (D_{nT} no está definido para este caso). Por tanto, se podrán usar otros parámetros como R_0 o $D_{2m,nT}$ [5], donde:

$$D_{2m,nT} = L_{S,2m} - L_R + 10 \cdot \log\left(\frac{T}{0,5}\right) \quad (5)$$

es la diferencia de nivel estandarizada alejada 2 metros de la fachada y $L_{S,2m}$ es el correspondiente promedio de nivel de presión sonora a 2 metros. Esto es útil para auralizar aislamiento de ruido de tráfico urbano u otras fuentes de ruido exterior. Las medidas con fuentes de ruido de tráfico o altavoces tienden a dar resultados similares con una desviación sistemática muy baja [10], de manera que:

$$D_{tr,2m,nT} \approx D_{ls,2m,nT} \quad (6)$$

donde la notación de subíndices tr y ls significan fuentes de tráfico y fuentes altavoz respectivamente.

Como en la Ec. (3), es posible expresar la energía de la señal recibida como función del coeficiente de transmisión:

$$p_R^2 = p_{S,2m}^2 \cdot \tau_{2m,nT} \cdot \frac{T}{0,5} \quad (7)$$

3. EXPERIMENTOS DE AURALIZACIÓN

3.1 Medidas y Síntesis

Teniendo en cuenta la metodología para la medida del aislamiento, establecida por la ISO 140-4 [6], se han realizado diversas medidas en dos habitaciones contiguas. Para estas medidas, se han usado dos micrófonos GRASS omnidireccionales que presentan una respuesta en frecuencia quasi-plana en el intervalo entre 20 a 16000 Hz. Se usó una fuente sonora omnidireccional B&K y un dispositivo Symphonie para la medida del aislamiento y el tiempo de reverberación. Además se usó un software propio para la captura y procesado de las respuestas impulsivas, utilizando una señal sweep como excitador. Uno de los micrófonos fue situado en la habitación fuente y el otro en la habitación contigua. Los micrófonos se colocaron en seis diferentes posiciones en cada sala, midiendo además las correspondientes respuestas impulsivas entre la fuente (en 2 posiciones) y cada una de las posiciones del micrófono receptor. Midiendo en las diferentes posiciones es posible obtener el índice de reducción y el tiempo de reverberación promedios en ambas salas. Se ha aplicado un filtrado pasabanda a las respuestas impulsivas medidas para calcular las diferencias de nivel normalizadas D_{nT} .

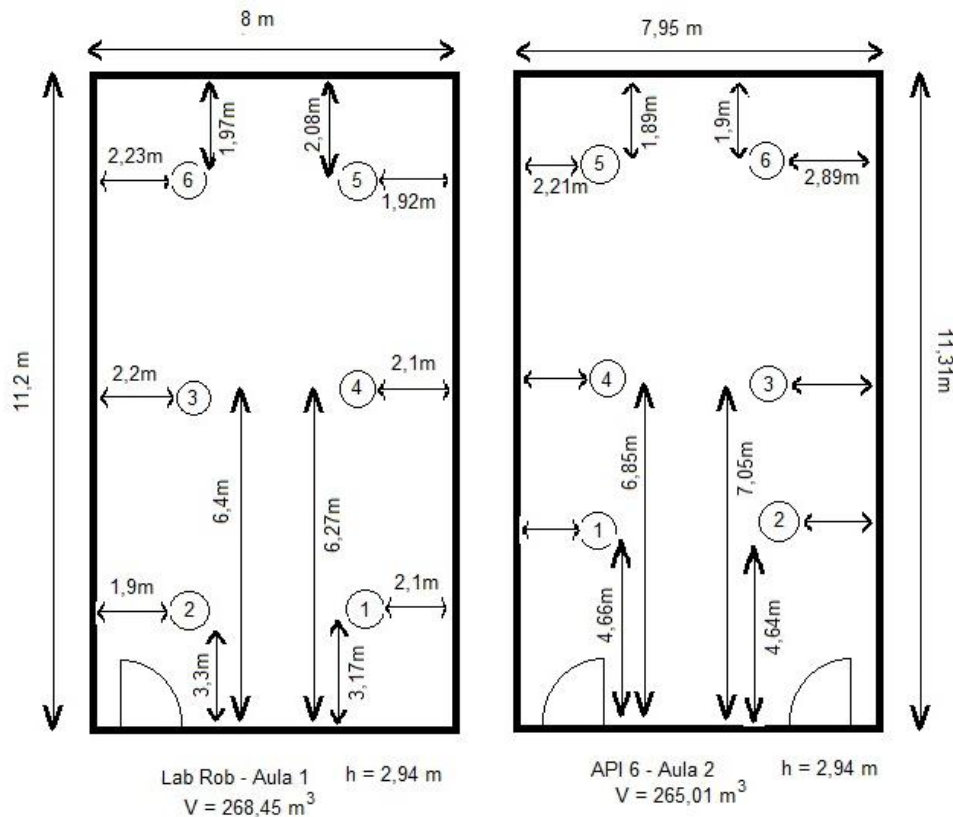


Figura 2: Recinto emisor y receptor.

3.2. Respuestas Impulsivas Sintetizadas

También se ha considerado un modelo simple de respuesta impulsiva que consiste en un proceso de ruido blanco gaussiano amortiguado con fines comparativos. Como constante temporal de caída en la exponencial se han considerado los tiempos de reverberación en

bandas de octava aplicados a una señal de ruido blanco. Para modelar la señal de respuesta impulsiva en el recinto receptor, se han usado los coeficientes de reducción acústica R:

$$R = 10 \cdot \log\left(\frac{p_S^2}{p_R^2}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad (8)$$

donde S es la superficie del elemento separador y A=10 m².

Por otra parte, las respuestas impulsivas sintetizadas han sido obtenidas mediante el filtrado de un ruido blanco gaussiano x(t) en bandas de octava usando filtros Butterworth pasabanda de 3er orden siguiendo la caída exponencial medida de RT en cada banda de frecuencia. Por tanto, la respuesta resultante y(t) en la habitación emisora se puede expresar como:

$$y_S(t) = \sum_{\omega} x_{\omega}(t) \cdot e^{-\frac{t}{T_S(\omega)}} \quad (9)$$

donde x_ω(t) es la componente pasabanda del ruido blanco x(t) en la banda de octava centrada en la frecuencia ω y T_S(ω) es el tiempo de reverberación en la habitación receptora en esta banda.

Además, la potencia emitida ha sido reducida en la habitación receptora mediante la aplicación de los coeficientes de aislamiento, sintetizando la respuesta en esta sala como:

$$y_R(t) = \sum_{\omega} x_{\omega}(t) \cdot \frac{e^{-\frac{t}{T_R(\omega)}}}{10^{R(\omega)/20}} \quad (10)$$

donde R(ω) es el coeficiente de reducción entre las dos habitaciones a la frecuencia ω y T_R(ω) es el tiempo de reverberación de la sala receptora en esta banda.

Así, cuando se aplican los valores de tiempo de reverberación T(ω) y el aislamiento tabulado R(ω) en cada habitación, los valores del aislamiento se aproximan a las medidas obteniendo respuestas impulsivas comparables.

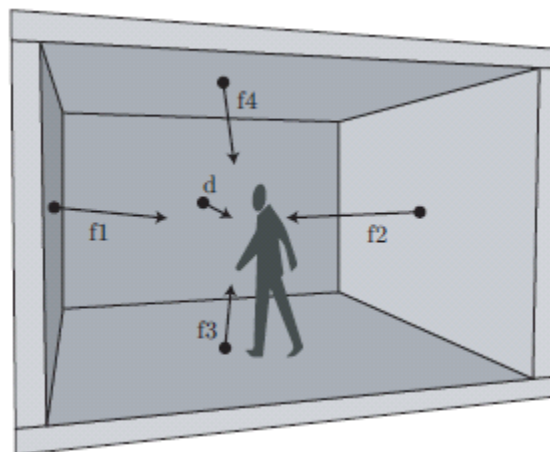


Figura 3: Recinto receptor con fuentes virtuales en el medio de las paredes.

La tabla 1 resume las medidas de aislamiento en la sala emisora y receptora. En ambas salas es necesario capturar la respuesta impulsiva para calcular las auralizaciones correspondientes. Los valores promedio serán utilizados para calcular la respuesta impulsiva promedio.

Frec [Hz]	Le (prom) [dB]	Rte (prom) [s]	Lr (prom) [dB]	RTr (prom) [s]	D [dB]	DnT [dB]	R [dB]
100	75,2	1,04	41,7	1,10	34,4	37,7	39,6
125	77,8	1,20	45,6	1,22	32,3	36,2	37,5
160	81,5	1,04	50,3	0,98	31,1	34,2	36,3
200	86,0	1,10	53,9	1,17	32,1	35,7	37,3
250	85,1	1,06	51,9	1,08	33,4	36,7	38,6
315	83,2	0,97	49,8	0,96	33,5	36,4	38,7
400	84,1	1,00	47,5	1,04	36,6	39,7	41,8
500	83,6	1,20	46,1	1,08	37,5	41,1	42,7
630	81,2	1,00	41,4	1,04	39,9	43	45,1
800	82,2	1,02	39,7	1,02	42,5	45,6	47,7
1 k	81,4	1,06	38,2	1,06	43,2	46,4	48,4
1.25 k	80,2	1,05	35,2	1,10	45	48,4	50,2
1.6 k	80,5	1,09	35,9	1,09	44,6	48	49,8
2 k	79,9	1,07	35,0	1,08	45	48,3	50,2
2.5 k	79,3	1,06	32,8	1,06	46,5	49,8	51,7
3.15 k	77,9	1,04	29,2	1,06	48,7	51,9	53,9

Tabla 1: Valores de niveles, RT en la sala emisora y receptora y aislamiento entre ambas

El valor de nivel estandarizado resulta $D_{n,T,w} (C; C_{tr}) \text{ (dB)} = 45 (0; -3)$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las auralizaciones obtenidas mediante el procedimiento anterior permiten calcular diversos parámetros psicoacústicos, que están relacionados con la evaluación de la molestia para cada señal considerada por medio del modelo de molestia de Zwicker [2]. Este modelo necesita del cálculo de los parámetros *Loudness*, *Roughness*, *Sharpness* y *Fluctuation Strength* de cada señal. El modelo de molestia viene representado por:

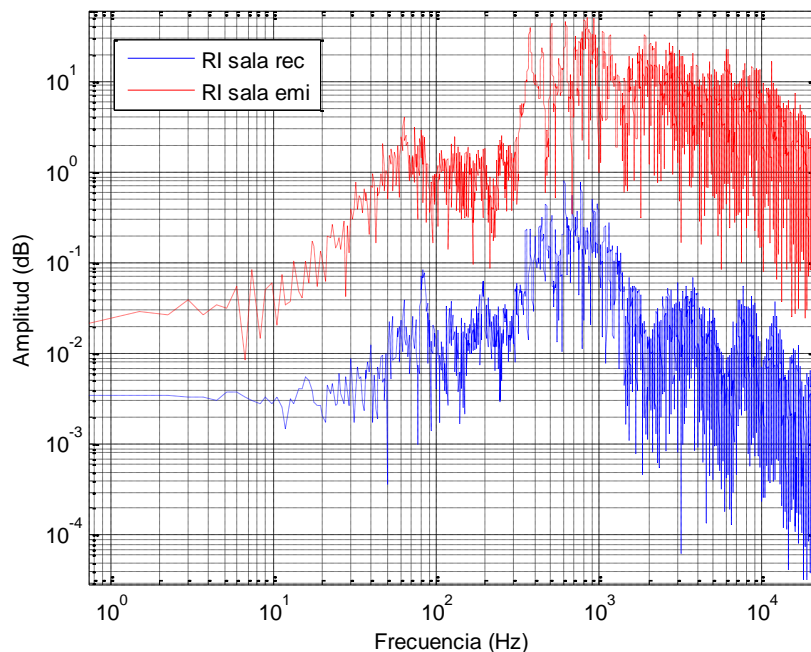
$$Molestia = N \cdot \left(1 + \sqrt{w_S^2 + w_{FR}^2} \right) \quad (11)$$

$$w_{FR} = \frac{2,18}{N^{0,4}} \cdot (0,4 \cdot F + 0,6 \cdot RO) \quad (12)$$

$$w_S = (SH - 1,75) \cdot 0,25 \cdot \log(N + 10) \quad (13)$$

donde N es el *Loudness*, SH es el *Sharpness*, RO es el *Roughness* y F es la *Fluctuation Strength*. La expresión de la molestia puede ser comprobada mediante *listening tests*, evaluando la molestia subjetiva en cada auralización. A partir de las medidas de aislamiento registradas entre las dos salas y la caída promedio entre las respuestas impulsivas obtenidas, la caída de energía mostradas en la Figura 3(a). Por otra parte, las respuestas impulsivas sintetizadas obtenidas a partir del ruido blanco filtrado Gaussiano se muestran en la Figura 3(b). También se han obtenido las auralizaciones a partir de las respuestas impulsivas medidas y sintetizadas. La señal anecoica usada fue un sonido de sierra mecánica, calculando las auralizaciones mediante la convolución de esta señal con cada respuesta impulsiva.

Las señales auralizadas fueron procesadas usando el software ARTEMIS de HeadAcoustics [12] para calcular los parámetros psicoacústicos previamente descritos. Los resultados obtenidos fueron usados para calcular el modelo de molestia subjetiva de Zwicker. La Tabla 2 resume una comparación de los valores estadísticos para los tipos de auralización considerados. De acuerdo con estos valores, se muestra que en todos los casos la molestia en la habitación fuente es mayor que en la receptora, como cabe esperar. Sin embargo, hay diferencias que pueden ser debidas a las diferentes metodologías usadas en el proceso de obtención de las auralizaciones. Las diferencias numéricas son debidas a un proceso de calibración burdo en los métodos de obtención de auralizaciones sintetizadas. En cualquier caso, es necesario un análisis más profundo de estos procesos de auralización, que se deja para un trabajo posterior. Por otra parte, las auralizaciones que usan respuestas impulsivas medidas, muestra una diferencia relativa mayor entre ambas salas que la obtenida mediante la síntesis. En este caso, se observa una diferencia relativa promedio entre medidas y síntesis (promedio de las diferencias logarítmicas entre los espectros de la sala emisora y la receptora) de aproximadamente 1% para el canal izquierdo y 9,8% para el derecho, lo cual significa que hay una falta de información en las bandas superiores (como muestra la Figura 3).



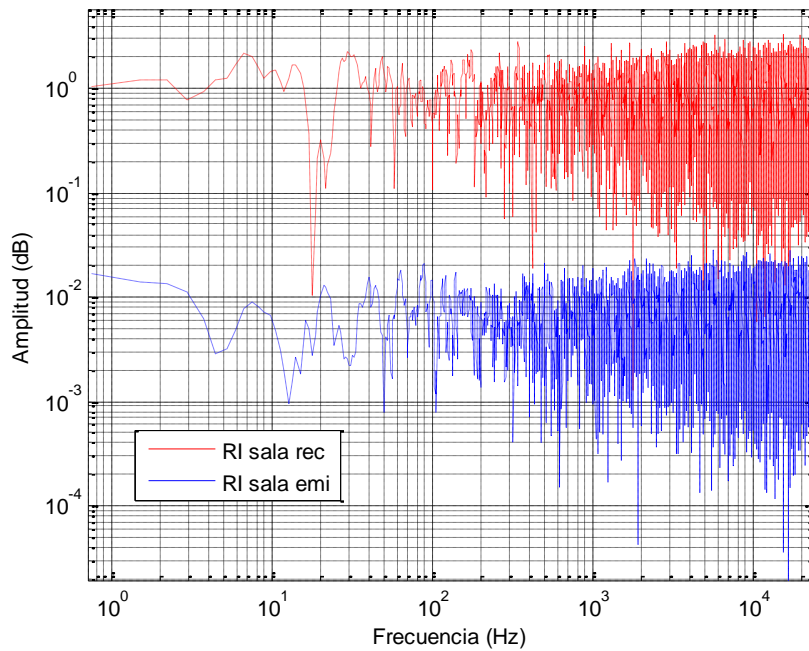


Figura 3: Respuesta impulsiva medida (P1) y sintetizada de las salas estudiadas.

	Avg		Std		p10		p50		p90	
	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R
Molest_Med_RECF2P1	2,35	2,43	1,31	1,34	5,35	5,61	3,52	3,63	0,00	0,00
Molest_Med_RECF2P2	1,97	2,08	1,16	1,21	4,43	4,73	2,91	3,15	0,00	0,00
Molest_Med_RECF2P3	2,16	2,26	1,33	1,34	5,28	5,28	3,15	3,35	0,00	0,00
Molest_Med_RECF2P4	2,09	2,35	1,15	1,29	4,64	5,30	3,12	3,57	0,00	0,00
Molest_Med_RECF2P5	2,05	2,24	1,15	1,25	4,62	5,18	2,93	3,20	0,00	0,00
Molest_Med_RECF2P6	1,92	2,00	1,13	1,16	4,34	4,51	2,91	3,07	0,00	0,00
Molest_Med_EMIF2P2	1393,08	1.347,34	505,94	490,23	3433,99	3278,04	2514,50	2.436,81	0,03	0,03
Molest_Med_EMIF2P3	1283,11	1.344,12	472,67	499,84	3243,09	3404,08	2253,03	2.376,48	0,06	0,03
Molest_Med_EMIF2P4	1158,67	1.186,66	420,30	430,35	2853,43	2875,48	2082,30	2.121,35	0,02	0,03
Molest_Med_EMIF2P5	1129,55	1.121,31	429,97	422,71	2959,87	2880,11	2033,34	2.031,42	0,12	0,06
Molest_Med_EMIF2P6	1338,11	1.335,97	484,89	484,70	3291,26	3370,26	2391,82	2.378,65	0,06	0,02
Molest_Med_RECF1P2	11,76	12,57	5,54	5,90	29,20	30,87	19,81	21,44	0,03	0,00
Molest_Med_RECF1P4	11,68	12,18	4,94	5,09	27,09	28,87	19,25	19,62	0,01	0,03
Molest_Med_RECF1P6	10,35	11,19	4,82	5,07	28,07	29,16	15,61	17,86	0,01	0,01
Molest_Med_EMIF1P1	1351,87	1.287,29	501,92	468,98	3333,40	3227,85	2454,34	2.317,84	0,10	0,06
Molest_Med_EMIF1P2	1381,41	1.252,69	519,23	471,85	3440,61	3163,41	2486,10	2.251,24	0,08	0,05
Molest_Med_EMIF1P3	1007,56	982,20	391,55	383,33	2563,21	2520,70	1826,06	1.763,85	0,03	0,03
Molest_Med_EMIF1P4	1031,69	987,45	394,78	374,00	2780,34	2602,04	1870,23	1.807,65	0,05	0,06
Molest_Med_EMIF1P5	1186,25	1.159,51	435,07	421,57	2924,96	2826,86	2143,58	2.099,78	0,12	0,10
Molest_Sint_ROB	939,95	1.274,19	206,45	291,93	1965,14	2695,26	1361,23	1.858,87	186,10	240,53
Molest_Sint_API6	3,77	5,75	2,15	3,02	9,70	14,55	5,83	8,71	0,13	0,24

Tabla 2: Estadísticas de molestia en la sala emisora y receptora

5. CONCLUSIÓN

En este artículo presentamos un procedimiento para obtener la molestia subjetiva a partir de auralizaciones de aislamiento por medio del modelo psicoacústico de Zwicker. Se han obtenido los resultados mediante dos métodos de auralización diferentes: medida y síntesis de respuestas impulsivas en aislamiento. Estos dos métodos fueron ajustados a partir de los valores de la medida del aislamiento y procesados posteriormente para obtener las auralizaciones de una señal anecoica. Las auralizaciones han sido procesadas para calcular la variación temporal del *Loudness*, *Roughness*, *Sharpness* y *Fluctuation Strength* en cada señal con el propósito de aplicar el modelo de molestia de Zwicker. A partir de los resultados temporales, se han calculado el valor medio, la desviación estándar y los percentiles 10, 50 y 90. De acuerdo con estos estadísticos, se puede observar que los valores en la habitación fuente eran, como se esperaba, más molestos que en la habitación receptora. De este estudio, podemos concluir que las variaciones relativas de molestia son dependientes de las metodologías utilizadas para obtener que cada tipo de auralización y de su calibración, pero a pesar de ello, se observa un comportamiento similar. Para tratar de mejorar los resultados del método de síntesis en términos de la molestia subjetiva, podría aplicarse un proceso de calibración más preciso a partir de las medidas.

Se puede combinar estudio realizado con 'listening tests' que permitan corroborar la respuesta subjetiva a las valoraciones realizadas por el modelo de Zwicker.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación TEC2012-37945-C02-02. Los autores también quieren agradecer a la Universitat de València la beca UVINV-EPDI12-67818, para una estancia de investigación en el Institut für Technische Akustik de la RWTH Aachen (Alemania)

7. REFERENCIAS

- [1] Vorländer, M.: Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. RWTH Edition, Springer, 2008
- [2] Zwicker, E; Fastl, H: Psychoacoustics: facts and models. Springer Series in Information Sciences, 2nd Ed, 1999.
- [3] EN 12354-1:2000; Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms.
- [4] EN 12354-2:2000; Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms.
- [5] EN 12354-3:2000; Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.
- [6] ISO 140-4:1998; Acoustics- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 4: Field Measurements of Airborne Sound Insulation Between Rooms.
- [7] J. Holländer, Improvements on an algorithm for insulation of airborne sound insulation (in German), Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University, 2002.
- [8] Vorländer, M.; Thaden, R: Auralization of airborne sound insulation in buildings. Acta Acustica united with Acustica 86 (2000), 70.
- [9] Craik, R.J.M.: Sound transmission through buildings using statistical energy analysis. Gower Publishing Limited, England, 1996.
- [10] Thaden, R.: Auralisation in Building Acoustics. Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University. Logos Verlag Berlin, 2005.
- [11] Reference to the ITA Toolbox (visited on 07/01/2013). URL: <http://www.ita-toolbox.org/http://www.datakustik.com/en/products/bastian>
- [12] Reference to ARTEMIS (visited on 07/01/2013). URL: http://www.head-acoustics.de/eng/nvh_artemis_suite.htm