

ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS VÍAS DE TRANSMISIÓN DEL RUIDO Y VIBRACIONES EN EDIFICACIÓN. PROYECTO VITRASO

PACS: 43.40. At

Pere Artís¹; Carlos García¹; Oriol Guasch¹; Marcel Janer²; Pere V. Rodríguez³; Francesc X. Magrans³; Xavier Roviralta⁴; Xavier Costa⁴ y Javier P. Ainchil⁵

¹ GTM - Grup de Tecnologies Mèdia, La Salle, Universitat Ramon Llull. C/Quatre Camins 2, 08022 Barcelona. Tel: 932 902 427. Fax: 932 902 470.

E-mail: pereag@salle.url.edu, carlosg@salle.url.edu, oguasch@salle.url.edu

² iMat - Centre Tecnològic de la Construcció. C/ de Wellington 23, 08018 Barcelona.

Tel: 935 539 795. Fax: 935 539 796. E-mail: mjaner@imat.cat

³ ICR Ingeniería para el Control del Ruido. C/ Berruete 52, 08035 Barcelona.

Tel/Fax: 934 286 339. E-mail: pvrodriguez@icrsl.com, fxmagrans@icrsl.com

⁴ Applus⁺ LGAI. Carretera Campus UAB, Apartat de Correus 18, 08193 Bellaterra, Barcelona.

Tel: 935 672 000. Fax: 935 672 001.

E-mail: xroviralta@appluscorp.com, xcosta@appluscorp.com

⁵ FCC Fomento de Construcciones y Contratas. C/ Balmes 36, 08007 Barcelona.

Tel: 933 634 562. Fax: 934 102 087. E-mail: JAinchil@fcc.es

ABSTRACT

Experimental as well as numerical methods are usually required to solve noise and vibration transmission path problems between sources and receivers in buildings. In this piece of research new experimental methods have been developed based on the direct transmissibility concept. These have been correlated with finite element (FEM), hybrid and statistical energy analysis (SEA) models. All work has been performed in the framework of the VITRASO project, led by FCC and with participation of Applus, ICR, IMAT and La Salle.

RESUMEN

La resolución de problemas de ruido y vibraciones en edificación requiere de métodos experimentales para determinar las vías de transmisión entre fuentes y receptores, así como de métodos numéricos para una correcta predicción de las mismas. En esta investigación se desarrollan nuevos métodos experimentales basados en el concepto de transmisibilidad directa, y los resultados se correlacionan con modelos de elementos finitos (FEM), híbridos y de análisis estadístico energético (SEA). Los estudios realizados se enmarcan dentro del proyecto VITRASO solicitado por FCC, con participación de Applus, ICR, IMAT y La Salle.

INTRODUCCIÓN

El cumplimiento de los requerimientos de aislamiento acústico establecidos en la legislación actual, dB-HR del CTE [1], se debe lograr a partir de las predicciones que fija la normativa internacional ISO 12354 [2] y de la correcta ejecución en obra. El modelo de predicción establecido en la normativa que fue desarrollado en los años 80 por Gerretsen [3,4] y estandarizado en los años 90 [5], presenta limitaciones bien conocidas [6]. Asimismo, en Cataluña, estudios de Applus+ [7] cuantifican en un 30% el incumplimiento del CTE sobre una población de 200 viviendas; mientras que en el País Valenciano, sobre una muestra de 250 viviendas de 26 edificios distintos, indican un incumplimiento del 20% [8]. Teniendo en cuenta informes del ITEC, en el estado se han construido un total de 6 millones de viviendas desde el

1997 al 2007; una extrapolación indicaría que podría haber entre 1,2 y 1,8 millones de viviendas incumpliendo el dB-HR.

El análisis de problemas genéricos de transmisión del ruido y vibraciones en una estructura mecánica, se puede abordar de forma experimental a partir de los métodos TPA (Transmission Path Analysis), siendo los más conocidos los basados en el método de fuerzas, cuyos fundamentos fueron desarrollados a principios de los años 80-90 (ver e.g., [9, 10] cf. [11]). Para reducir el nivel de presión sonora en una sala interesa factorizarlo en función de las distintas vías de transmisión del ruido y vibraciones entre emisor y receptor, y reducir aquella más perjudicial. El modelo clásico del TPA, el TPA de fuerzas, basado en la medida de funciones de transferencia con el sistema estacionario y en la medida de fuerzas operacionales, permite factorizar la respuesta en un subsistema en función de las contribuciones de las diferentes fuerzas que actúan sobre el sistema. Sin embargo, son bien conocidas las dificultades asociadas a la medición de fuerzas operacionales. Además, en el caso de viviendas, el tipo de soluciones suele involucrar la modificación de los elementos estructurales (dobles paredes, suelos flotantes, etc.), no pudiéndose modificar las fuerzas operacionales, con lo que resulta más adecuado intentar factorizar la presión sonora en un recinto en términos de las contribuciones de las vibraciones de las distintas paredes que la componen, en lugar de en términos de las fuerzas operacionales. Una opción para conseguirlo sería recurrir al bloqueo físico [12] de las mismas. Esto requiere aplacar cada subsistema (paredes, suelo, techo) y a continuación destaparlos de uno en uno para obtener la transmisibilidad directa aceleración / presión acústica entre cada subsistema y la presión sonora en el recinto. Obviamente, esta opción supone costes de ejecución inaceptables en la mayoría de casos. Una alternativa posible la constituye el método GTDT (Global Transfer Direct Transfer) propuesto en los 80 [13]. Este plantea una solución a los problemas anteriores proponiendo una relación entre las transmisibilidades medibles (globales) sin realizar ningún tipo de bloqueo, y las transmisibilidades directas, correspondientes al caso con subsistemas bloqueados. En cierta forma lo que hace el método es bloquear los subsistemas matemáticamente en lugar de físicamente y obtener las transmisibilidades directas a partir de las globales. Cabe señalar que el método GTDT ha sido testeado analíticamente en diversos estudios [14,15,16,17] y en algunas aplicaciones industriales [18,19] pero no ha sido validado/examinado experimentalmente en un entorno controlado. También se ha establecido su relación con el SEA (Statistical Energy Analysis) [20] y recientemente se ha propuesto un método ESEA (Experimental Statistical Energy Analysis) [21] basado en el concepto de transmisibilidades directas que no requiere medir potencias, como alternativa al método PIM (Power Injection Method) [22].

El proyecto VITRASO nace con el objetivo de desarrollar y poner a punto métodos experimentales y numéricos para la detección y cuantificación de las vías de transmisión del ruido y vibraciones en edificios. Por un lado, estos métodos permitirán identificar problemas existentes en edificios ya construidos, y por el otro se utilizarán para mejorar las predicciones vibro acústicas en la fase de diseño de los futuros edificios. El proyecto está subvencionado por la Generalitat de Catalunya, liderado por FCC, y se realiza con la participación de las empresas Applus e ICR, el centro tecnológico IMAT, y La Salle de la Universitat Ramon Llull.

En las secciones siguientes del presente artículo se introduce brevemente el método GTDT, y se exponen algunos resultados experimentales y numéricos de un TPA que involucra subsistemas aceleración y niveles de presión sonora; finalmente se exponen las conclusiones.

RESUMEN DEL MÉTODO GTDT

Se considera un sistema mecánico sobre el cual actúan fuerzas externas operacionales. El principal objetivo del método es factorizar la respuesta (e.g., aceleración o presión acústica) en un subsistema en función de las respuestas del resto de subsistemas. De este modo, se podrá reducir por ejemplo, un exceso de nivel de vibración o de presión sonora en un subsistema

modificando las propiedades mecánicas de aquellos subsistemas que tengan una mayor contribución a dichos niveles. Se pueden exponer las bases del funcionamiento del método mediante el ejemplo sencillo de la Figura 1, dónde se muestra un sistema de 3 placas conectadas entre sí. La respuesta (desplazamiento, velocidad o aceleración) en la segunda placa, subsistema #2, se puede factorizar como:

$$x_2 = \alpha x_1 + \beta x_3 + \gamma x_2^{ext\ op}, \quad (1)$$

siendo x_1 y x_3 las respuestas en las placas #1 y #3 respectivamente con todas las fuerzas operacionales f_{op} que actúan sobre el sistema activas, y $x_2^{ext\ op}$ es la respuesta en el subsistema #2 cuando únicamente actúa la fuerza operacional f_{op2} en #2. Por lo que se refiere a los factores α, β y γ , $\alpha = x_2/x_1$ representa la respuesta en el subsistema #2 en excitar únicamente la placa #1 y $x_3 = 0$; nótese que lógicamente $x_2^{ext\ op} = 0$ puesto que sólo actúa fuerza operacional en #1. $\beta = x_2/x_3$ indica la respuesta en #2 en excitar únicamente la placa #3 y $x_1=0$ (nuevamente $x_2^{ext\ op} = 0$). El tercer factor de proporcionalidad, $\gamma = x_2/x_2^{ext\ op}$, relaciona la respuesta en el subsistema #2 en excitar la placa #2 permaneciendo las otras bloqueadas, y la respuesta en #2 en excitar #2 sin restricción sobre los otros subsistemas.

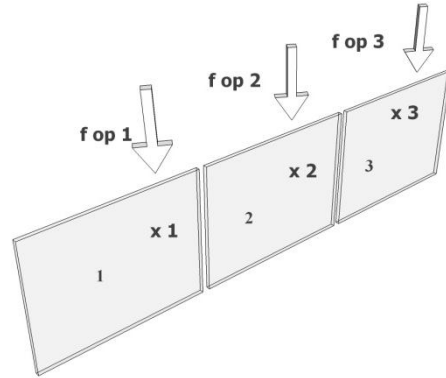


Figura 1: Ejemplo 3 placas

Los coeficientes α y β corresponden a las denominadas transmisibilidades directas, T_{12}^D, T_{32}^D respectivamente, en el método GTDT. Las funciones de transferencia directas T_{ij}^D entre dos subsistemas no son medibles directamente, como ya se ha detallado en la Introducción, puesto que hay que forzar que la respuesta en el resto de subsistemas sea nula. Sin embargo, pueden calcularse a partir de la medida estándar de transmisibilidades T_{ij}^G (también denominadas transmisibilidades globales). A modo de ejemplo, T_{12}^G corresponde al cociente entre la respuesta en el subsistema #2 cuando se excita únicamente el subsistema #1 y no existe restricción alguna sobre los otros subsistemas, es decir es la función de transmisibilidad clásica entre dos subsistemas.

En un modelo de N subsistemas, las transferencias directas se obtienen a partir de las globales mediante las relaciones [13,15],

$$-\mathbf{T}^{DE} \mathbf{\Lambda}_{TD}^{-1} |_{ii} = 1/T_{ii}^D, \quad (2)$$

$$-\mathbf{T}^{DE} \mathbf{\Lambda}_{TD}^{-1} |_{ij} = -T_{ij}^D/T_{ii}^D \quad \forall i \neq j,$$

siendo $T_{ij}^{DE} = T_{ij}^D - \delta_{ij}(T_{ij}^D + 1)$ y $\Lambda_{TD}|_{ij} = T_{ij}^D \delta_{ij}$. El vector de respuestas del sistema se puede factorizar según [13,15]

$$\mathbf{x} = (\text{dev } \mathbf{T}^D)^T \mathbf{x} + \mathbf{\Lambda}_{TD} \mathbf{x}^{ext\ op}, \quad (3)$$

con $(\text{dev } \mathbf{T}^D)|_{ij} = T_{ij}^D(1 - \delta_{ij})$ y $\mathbf{x}^{ext\ op} = (\mathbf{T}^{GT})^{-1} \mathbf{x}$. En el rango de media y alta frecuencia la reconstrucción es energética y viene dada por [17]

$$|x_k|^2 = \sum_{i=1, i \neq k}^n |x_i|^2 |T_{ik}^D|^2 + |x_k^{ext\ op}|^2 |T_{kk}^D|^2. \quad (4)$$

A partir de las expresiones anteriores, resulta por lo tanto posible factorizar la respuesta en cualquier subsistema a partir de la medida de transmisibilidades globales y de la medida de respuestas operacionales del sistema. La ventaja de esta aproximación es que no requiere medir fuerzas operacionales y que además no resulta intrusiva, realizándose el bloqueo de los subsistemas mediante formulación matemática. Finalmente, cabe señalar que es posible relacionar las transferencias directas con los factores de pérdidas por acoplamiento η_{ij} y totales η_i en SEA mediante la relación [20,21]

$$T_{ij}^D = \eta_{ij}/\eta_j. \quad (5)$$

DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LAS VÍAS DE TRANSMISIÓN

En una primera fase del proyecto se ha procedido al estudio de distintas configuraciones en las salas de transmisión del laboratorio de acústica Applus, para las que se ha aplicado el método experimental GTDT, y se han realizado simulaciones numéricas mediante métodos híbridos FEM-SEA y modelos SEA. Las salas de transmisión del laboratorio, ver la vista en la Figura 2a y la correspondiente instrumentación en la Figura 2b, cumplen con la normativa ISO 140-1. La pared separadora entre ambas está construida sobre un marco portamuestras tal que la transmisión de ruido entre las salas emisora y receptora se realiza únicamente a través de la vibración de la pared separadora, la única vía de transmisión entre ambas salas (ver Figura 2a). A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con una pared separadora de ladrillo hueco simple cerámico de dimensiones 500x195x40 mm (longitud x altura x espesor), enyesada 5 mm en ambas caras y de densidad superficial 42 Kg/m². Con el objetivo de testear el método GTDT, se han forzado más vías de transmisión entre las salas construyendo una pared secundaria, del mismo tipo que la pared separadora, que divide la sala receptora en dos recintos (ver Figura 3a).

El primer paso del método GTDT consiste en medir las funciones de transmisibilidad globales entre todos los subsistemas pertenecientes al recinto derecho de la sala receptora (aceleraciones transversales de paredes, techo, suelo y puerta, y nivel de presión acústica del recinto –ver Figura 3a-). Se instrumenta el sistema mediante acelerómetros DYTRAN 3185D, B&K 4154 y Visong Test 14100, y micrófonos de medida CESVA P-05. La adquisición de datos se realiza con el analizador multicanal OR38 en el rango frecuencial 0-5 KHz. La excitación se realiza considerando la aproximación energética; el recinto se excita con la fuente de ruido blanco CESVA BP012, y las superficies mediante 5 impactos repartidos aleatoriamente sobre su área. Los resultados se limitan en el rango frecuencial de medias y altas frecuencias. En una primera aproximación se considera únicamente un sensor por subsistema. Una visión general de la instrumentación de las salas se muestra en la Figura 2b.

Para la obtención de las funciones de transmisibilidad directa entre todos los subsistemas correspondientes a paredes, techo, suelo y puerta, y el nivel de presión sonora en el recinto de la derecha de la sala receptora se aplica la fórmula (2) con la T^G medida. La resolución de la ecuación (2) se plantea como un problema con restricción $T_{ij}^D \geq 0$, ya que una $T_{ij}^D < 0$ carece de significado. Aún así, el algoritmo puede asignar valores nulos a las T_{ij}^D ; para eliminarlos, se realiza una simulación de Monte Carlo [21]. Consiste en perturbar las T_{ij}^G 's medidas con errores aleatorios, recalcular las T_{ij}^D 's para cada realización, y promediarlas, de modo que los valores de las transmisibilidades directas obtenidos sean más realistas. Se han realizado 1000 iteraciones, y en cada una ella se ha aplicado una perturbación de distribución normal de media nula y desviación estándar $\sigma = 1$ dB.

En el segundo paso del método GTDT se considera el sistema en presencia de fuerzas externas. El método permite reconstruir la señal operacional en un subsistema a partir de las contribuciones de los otros subsistemas y las señales operacionales medidas en dichos

subsistemas, aplicando la ecuación (4). Se excita la sala emisora con una fuente omnidireccional de naturaleza estacionaria, y se adquieren todas las señales en los subsistemas bajo estudio. Se reconstruye energéticamente el nivel de presión sonora en el recinto derecho de la sala receptora en función de las contribuciones de la vibración las distintas paredes que la constituyen. La comparación entre estos resultados y la señal medida en el recinto se muestran en la Figura 4a, donde se puede comprobar que el nivel de presión acústica en el recinto receptor se debe principalmente a la contribución de la pared separadora entre las salas emisora y receptora, y en menor grado a la contribución de la pared que separa en dos la sala receptora. Las contribuciones del resto de subsistemas (suelo, techo y demás paredes) son prácticamente despreciables en todo el rango frecuencial. Durante la prueba, el ruido de fondo se sitúa 10 dB por debajo de la señal en los tercios de octavas de frecuencia central de 125 Hz a 5000 Hz; y no se tiene en cuenta la puerta, ya que en ser excitada, la respuesta en los otros subsistemas no es aceptable.



Figura 2a: Salas de transmisión del laboratorio de Applus vistas desde el exterior

Figura 2b: Instrumentación del recinto receptor

En la Figura 3b se muestra una segunda configuración en la que se pretende anular la contribución de la pared separadora entre salas, de modo que la contribución al ruido en el recinto derecho de la sala receptora se deba únicamente a la vibración de la pared que divide dicha sala en dos. A tal efecto se ha construido un doblaje (ver Figura 3b) compuesto por un trasdosado desvinculado perimetralmente, de doble placa de yeso laminado de 13 mm de espesor cada placa, sobre estructura auto portante formando una cavidad de 46 mm rellena de lana mineral de 40 mm de espesor y densidad 20 Kg/m³. La separación entre la pared base y la estructura auto portante es de 3,5 cm. Tal y como puede comprobarse en la Figura 4b, el resultado muestra que, efectivamente, la contribución de la pared separadora pasa a ser ahora despreciable, de modo que el nivel de presión sonora se debe básicamente al ruido generado por la pared que separa la sala receptora en dos recintos. Es decir el ruido emitido desde la sala emisora se transmite a la sala receptora ya que induce la vibración de la pared separadora entre salas, que a su vez transmite la vibración a la pared divisoria de la sala receptora, que finalmente radia el ruido percibido en el recinto derecho. Cabe decir que en esta configuración el rango frecuencial libre de ruido de fondo – de 100 Hz a 800 Hz –, no es tan ancho como en el escenario original. Esto se debe al hecho que no se puede excitar el trasdosado doble de la pared separadora desvinculado perimetralmente (ver Figura 2b) con impulsos lo suficientemente elevados para obtener una correcta relación señal-ruido en los otros subsistemas.

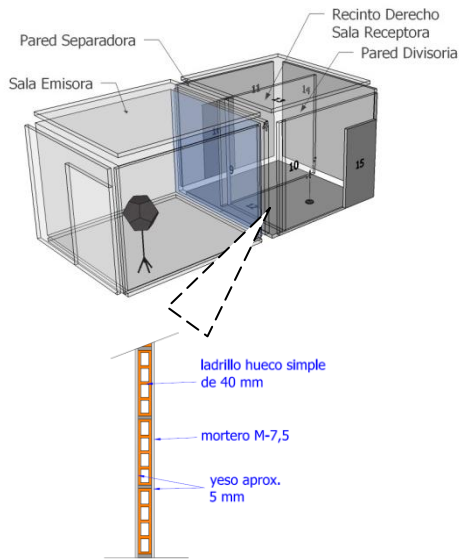


Figura 3a: Configuración 1

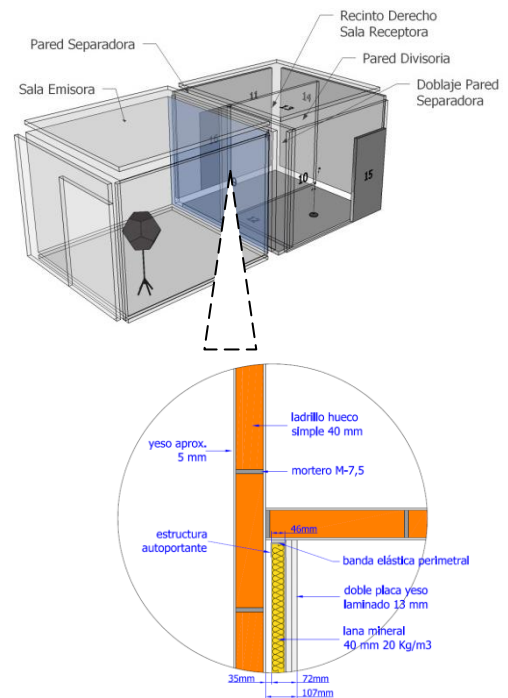


Figura 3b: Configuración 2

Por otra parte, se ha procedido a la elaboración de modelos numéricos a contrastar con los resultados experimentales. En la Figura 5a se representa un modelo SEA correspondiente a la configuración 1 de la Figura 3a realizado con el software VA-ONE, donde se aprecian los distintos subsistemas estructurales SEA, así como los recintos acústicos. En este modelo se incluyen los datos experimentales de los factores de pérdidas internos de las paredes y de los tiempos de reverberación de los recintos, mientras que los factores de acoplamiento entre los distintos subsistemas se obtienen de la formulación teórica. Para calcular la T^G numérica se simula el procedimiento realizado en la parte experimental aplicando una fuerza puntual a uno de los subsistemas y obteniendo la relación de energías entre este subsistema y el resto; se repite este proceso para todos los subsistemas del modelo. En este procedimiento la T^G obtenida relaciona energías, no respuestas. La T^D numérica se puede obtener a partir de la T^G experimental convertida a relaciones entre energías aplicando la fórmula (5) considerando los η_{ij} teóricos y los η_i experimentales [20,21]. De esta manera es posible comparar directamente los resultados experimentales y numéricos, y estudiar el grado de correlación entre ambos.

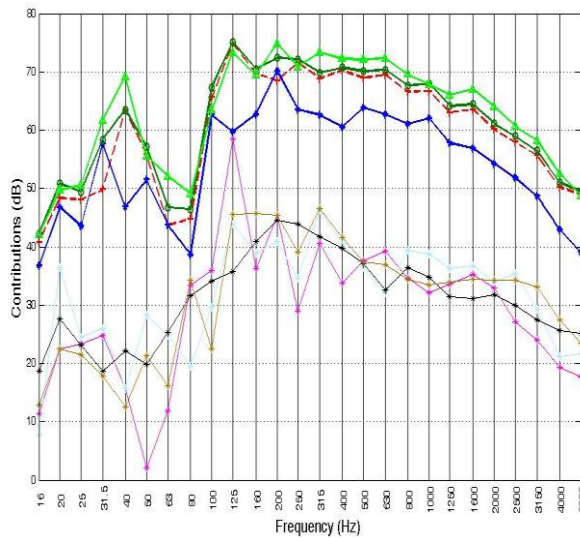


Figura 4a: Reconstrucción para la configuración 1

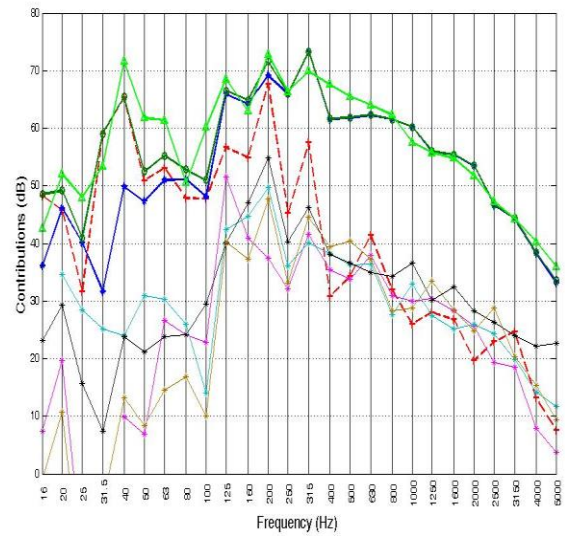


Figura 4b: Reconstrucción para la configuración 2

Nivel de presión sonora medido en el recinto receptor (verde Δ), contribuciones globales (verde oscuro \circ), contribuciones de: pared separadora (rojo \rightarrow), divisoria (azul $*$), derecha (rosa $*$), posterior (marrón $*$), del suelo (azul claro $*$) y del techo (negro $*$).

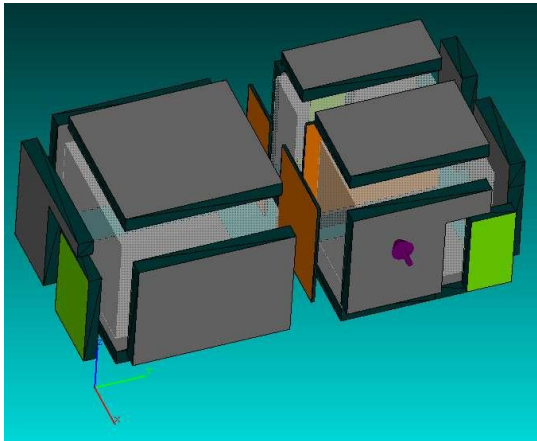


Figura 5a: Modelo numérico SEA para la configuración 1

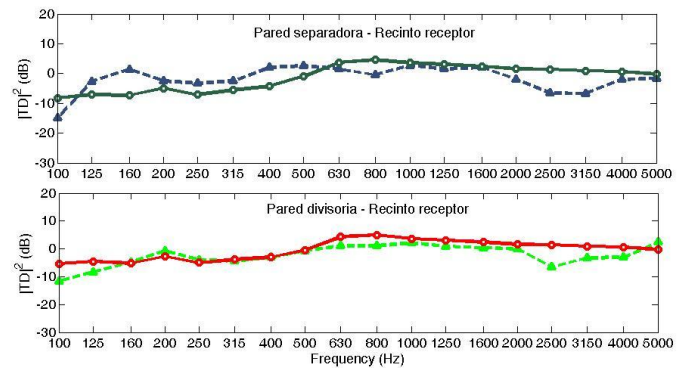


Figura 5b: Comparación TD_{num} (verde oscuro \circ) y TD_{exp} (azul Δ) entre pared separadora y recinto receptor, y TD_{num} (rojo \circ) y TD_{exp} (verde claro Δ) entre pared divisoria y recinto receptor.

En la Figura 5b se presenta, a modo de ejemplo, la comparación entre las transmisibilidades directas experimentales (energía-energía) y numéricas (energía-energía) calculadas aplicando la fórmula (5) entre: la pared separadora y el recinto derecho de la sala receptora y entre la pared divisoria y el recinto derecho de la sala receptora. Tal y como puede apreciarse en las gráficas, la simulación numérica se ajusta correctamente a los resultados experimentales.

CONCLUSIONES

En el marco del proyecto VITRASO se están validando y desarrollando métodos experimentales y numéricos de análisis de vías de transmisión (TPA), basados en el concepto de transmisibilidad directa (GTDT). A tal efecto se han realizado varios TPA's en las salas de transmisión del laboratorio forzando un caso con dos vías dominantes. Se han realizado

pruebas también bloqueando una de las vías y en todos los casos el método testado (GTDT) ha determinado correctamente la contribución de las distintas vías de transmisión al ruido total en la sala receptora. Los resultados presentan una muy buena correlación con los métodos híbridos FEM-SEA que se han realizado de las salas. En fases posteriores del proyecto se aplicarán los desarrollos obtenidos a viviendas reales.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha llevado a cabo en el marco del proyecto VITRASO, RD09-1-0006, financiado por ACC1Ó y FEDER, de la Generalitat de Catalunya y de la Unión Europea.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Documento Básico HR. Protección contra el ruido. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda, 2009.
- [2] ISO 12354. Building Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements, 2000-2009.
- [3] E. Gerretsen. Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures. Applied Acoustics, 12(413-33), 1979.
- [4] E. Gerretsen. Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings. Applied Acoustics, 19, 1985.
- [5] E. Gerretsen. European developments in predictions models for building acoustics. Acta Acustica, 2:205-14, 1994.
- [6] A. Esteban et al. Modelo de predicción de transmisión de ruido en edificios. UNE-EN12354: Precisión, limitaciones e investigaciones en el ámbito de las viviendas en España. Tecniacústica 2005.
- [7] E. Puig. Diferencias NBE-CTE. Cumplimiento de los actuales requerimientos. En Ponencia CTE Noviembre 2007.
- [8] J. Ramis y J. Alba. Medidas in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo: Muestreo en viviendas de la comunidad valenciana. En los Proceedings del Tecniacústica 2006.
- [9] W. Stahel et al. Measuring methods to obtain the transmission paths and simultaneous real force contributions in a mechanical linear system. Technical report 80.21, Lab. Acústico Italiana Keller, 1980.
- [10] H. Tschudi. The force transmission path method: an interesting alternative concerning demounting tests. In Unikeller conference, volumen 91, 1991.
- [11] O. Guasch y F.X. Magrans. A compact formulation for conditioned spectral density function analysis by means of the LDL^H matrix factorization. Journal of Sound and Vibration, 277(4-5):1082-1092, 2004.
- [12] J.S. Mixson y J.F. Wilby. Interior Noise. En: H.H. Hubbard (Ed), Aeroacoustics of flight vehicles. Theory and practice. Volume II: Noise Control. Acoustical Society of America, 1995.
- [13] F.X. Magrans. Method of measuring transmission paths. Journal of Sound and Vibration, 74 (3):311-330, 1981.

- [14] F.X. Magrans. Direct transference applied to the study of room acoustics. *Journal of Sound and Vibration*, 96 (1):13-21, 1984.
- [15] O. Guasch y F.X. Magrans. The Global Transfer Direct Transfer method applied to a finite simple supported elastic beam. *Journal of Sound and Vibration*, 276 (1-2):335-359, 2004.
- [16] F.X. Magrans y O. Guasch. The role of the direct transfer matrix as a connectivity matrix and application to the Helmholtz equation 2D: relation to numerical method and free field radiation example. *Journal of Computational Acoustics*, 13 (2): 341-363, 2005.
- [17] O. Guasch. Direct transfer functions and path blocking in a discrete mechanical system. *Journal of Sound and Vibration*, 321 (3-5): 854-873, 2009.
- [18] F.X. Magrans, P.V. Rodríguez y C. Cousin. Low and mid-high frequency advanced transmission path analysis. In *Proceedings of the Twelfth International Congress on Sound and Vibration ICSV 12*, 2005.
- [19] J. Jové, F. Guerville y A. Vallespín. Study of the aerodynamic contribution to the high-speed train cabin internal noise by means of hybrid FE-SEA modelling. *InterNoise 2010, Noise and Sustainability*, Junio 13-16, Lisboa (Portugal).
- [20] F.X. Magrans. Definition and calculation of transmission paths within a SEA framework. *Journal of Sound and Vibration*, 165 (2):277-283, 1993.
- [21] O. Guasch. A direct transmissibility formulation for experimental statistical energy analysis with no input power measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 330(25):6223-6236, 2011.
- [22] D. Bies y S. Hamid. In situ determination of loss and coupling loss factor by the power injection method *Journal of Sound and Vibration*, 70 (2):187-204, 1980.