

PROPUESTA DE NUEVOS DESCRIPTORES PARA DIRECTIVIDAD DE FUENTES SONORAS

PACS: 43.20.Bi

San Martín, Ricardo; Arana, Miguel
Universidad Pública de Navarra. Departamento de Física.
Campus de Arrosadia
31006 Pamplona. Spain
Tel:+34 948 169 568
Fax:+34 948 169 565
E-Mail: ricardo.sanmartin@unavarra.es; marana@unavarra.es

ABSTRACT

Some studies show that the ISO 3382 standard probably relax in excess omnidirectionality requirements for the high frequencies. It should consider choices to describe directivity of the sources, since the classification method proposed by the standard may lead to misleading conclusions about their behavior due to its implementation by means of arcs (gliding averages) on a single plane. Two new descriptors are proposed in this paper, the first one based on a study by T.W. Leishman and the second one based in the classic definition of directivity. Both have in common to consider the sound radiation from a three-dimensional point of view. From several measurements carried out, the correlation provided by these descriptors improves that found with the ISO 3382 standard descriptor.

RESUMEN

Diversos estudios muestran que el estándar ISO 3382 probablemente relaje en exceso los requisitos de omnidireccionalidad para las altas frecuencias. Se debieran considerar alternativas para describir la directividad de las fuentes, puesto que el método de clasificación propuesto por el estándar puede dar lugar a conclusiones erróneas sobre su comportamiento debido a su implementación por medio de arcos de medida en un único plano. En el presente trabajo se proponen dos nuevos descriptores, el primero de ellos basado en un estudio realizado por T.W. Leishman y el segundo en la definición clásica de *directividad*. Ambos tienen en común considerar la radiación sonora en un marco tridimensional. La correlación aportada por estos descriptores en múltiples medidas realizadas mejora la encontrada con el descriptor del estándar ISO 3382.

INTRODUCCIÓN

La evaluación acústica en una posición de un recinto se realiza mediante la medida de los diferentes parámetros acústicos derivados de la respuesta al impulso de la sala (*RIR*). La

definición de estos parámetros, así como sus procedimientos de medida, se describen en la norma ISO 3382 [1]. Como en todo proceso experimental, existen diversas *fuentes de incertidumbre* en la cadena de medida. Podemos citar, como más importantes para este estándar, las siguientes: *técnica de medida*, *posición del receptor* y *directividad de micrófono y fuente*. La valoración de la incertidumbre suele caracterizarse con relación al *jnd* (*just noticeable difference*) asociado a cada parámetro [2,3,4]. Respecto de las técnicas y señales de excitación (ruido interrumpido, fuentes pseudo-impulsivas, secuencias MLS y barridos sinusoidales) se ha optado por esta última debido a su mayor inmunidad frente a la distorsión y a su capacidad para incrementar la relación señal-ruido (*SNR*). No obstante, los resultados obtenidos con fuentes pseudo-impulsivas (*petardos*) son ciertamente satisfactorios ya que, a pesar de que la desviación asociada a la propia técnica es mayor, evitan posteriores dispersiones motivadas por los subsiguientes dispositivos de amplificación y emisión que las otras técnicas requieren [5]. La incertidumbre asociada a la *orientación del micrófono* es del orden de la asociada a la propia técnica (desviación estándar experimental, STD_{exp}), por lo que puede considerarse insignificante. En cambio, la desviación relacionada con la *posición del receptor* la supera notablemente, aunque es inferior al *jnd* para casi todos los parámetros evaluados [6].

En el presente trabajo, centraremos la atención en la variable *orientación de la fuente*. La mayoría de los altavoces dodecaédricos comerciales cumplen con las especificaciones de directividad establecidas en la norma ISO 3382. Si bien estos requisitos pueden ser adecuados para la obtención de tiempos de reverberación, varios parámetros – como D_{50} , C_{80} , G e $IACC_E$ – muestran dispersiones a altas frecuencias, provocadas por la *orientación de la fuente*, superiores a su *jnd* asociado. Incluso los resultados obtenidos con dos fuentes diferentes pueden diferir hasta el punto de dar lugar a diferentes valoraciones de los atributos acústicos en una misma posición fuente-receptor. Diferentes altavoces analizados presentan resultados satisfactorios hasta 1 kHz. Por debajo de esa banda de frecuencias, la influencia de la *orientación de la fuente* es insignificante para todos los parámetros acústicos evaluados y las desviaciones obtenidas son similares a la STD_{exp} de la propia técnica bajo condiciones de repetibilidad [7]. Sin embargo, conforme se incrementa la frecuencia, la radiación sonora se vuelve más direccional y el efecto sobre los parámetros no puede descartarse. La principal diferencia se origina al comienzo de la respuesta al impulso con la llegada del sonido directo. Depende de la forma de los lóbulos de directividad de los altavoces dodecaédricos y de si éstos están o no orientados hacia el receptor [8].

Por otra parte, la creciente potencia de cálculo de las actuales herramientas de simulación posibilita el análisis eficiente de una amplia gama de variables, permitiendo configuraciones que serían inviables utilizando únicamente procedimientos de medida. Las peculiaridades del fenómeno estudiado, que se manifiesta a altas frecuencias, nos llevan a considerar que los programas de simulación – cuya principal limitación se encuentra a bajas frecuencias – pueden ser una herramienta adecuada para estudiarlo. Por medio de simulaciones se puede analizar la influencia de la variable espacialmente en toda una sala y en tiempo limitado, en contraste con la tediosa tarea de realizarlo a través de mediciones.

En este trabajo, se propone un nuevo método –consecuente con la observación de los diagramas de directividad de las fuentes– para caracterizar su directividad. El método de clasificación ISO 3382 puede llevar a conclusiones inexactas sobre su rendimiento debido a su implementación por medio de arcos de medida en un único plano. El nuevo descriptor muestra una mejor correlación ($R^2 = 0.98$) entre desviación direccional y afección.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como salas objeto del estudio se seleccionaron los teatros y auditorios mostrados en la tabla 1. Los locales de diferentes características, en los que se midieron exhaustivamente sus parámetros acústicos, fueron seleccionados con la pretensión de recrear las condiciones

típicas en recintos destinados tanto a la música como al mensaje oral. Con volúmenes entre 4,000 m³ y 25,800 m³, poseen tiempos de reverberación a frecuencias medias en el rango de 1.0 a 2.9 segundos y tres formas diferentes: rectangular, en abanico y semicircular. Tales auditorios fueron modelizados para la evaluación de los parámetros acústicos mediante métodos computacionales. Los parámetros de cálculo se seleccionaron teniendo en cuenta estudios realizados previamente [9] y recomendaciones del programa de simulación [10] (ODEON).

Tabla 1. Información básica de las salas simuladas.

Sala, Localización	Volumen (m ³)	Asientos	T _{30mid} ⁽¹⁾ (s)	Forma
Teatro Sarasate, Pamplona (Spain)	4,000	480	1.0	Rectangular
Teatro Bretón, Logroño (Spain)	6,300	988	1.3	Rectangular
Elmia Hall, Jönköping ⁽²⁾ (Sweden)	11,000	1,100	2.2	Abanico
Auditorio Baluarte, Pamplona (Spain)	20,000	1,568	1.9	Rectangular
Auditorio Mozart, Zaragoza (Spain)	25,800	1,992	2.9	Semicircular

⁽¹⁾ De acuerdo a la Norma ISO 3382 bajo "cobertura normal"

⁽²⁾ Referencia [4] (*Bork, 2000*).

Para el estudio se utilizaron cuatro fuentes omnidireccionales diferentes (Figura 1), todas cumpliendo los requisitos de la ISO 3382. Tres de ellas – a partir de ahora S1, S2 y S3 – fueron fuentes dodecaédricas comerciales mientras que una cuarta, S4, consistió en la fuente desarrollada en el Institute of Technical Acoustics (ITA) en Aachen, Alemania [11]. Consiste en un altavoz de medida de 3 vías en el que un subwoofer es empleado para lograr la potencia sonora requerida a bajas frecuencias y dos altavoces dodecaédricos especialmente diseñados con diferentes diámetros son utilizados para mejorar la omnidireccionalidad de la radiación sonora en comparación con aquella obtenida a través de dispositivos de medida dodecaédricos convencionales.



Fig.1 Fuentes utilizadas en el estudio

Para conocer completamente el patrón direccional de las cuatro fuentes, se midieron sus campos radiados en la cámara anecoica del ITA. Una representación gráfica de los diagramas de directividad medidos para S3 en las bandas de 1, 2, 4 y 8 kHz junto con el diagrama de directividad a 8 kHz para todas las fuentes puede verse en la figura 2.

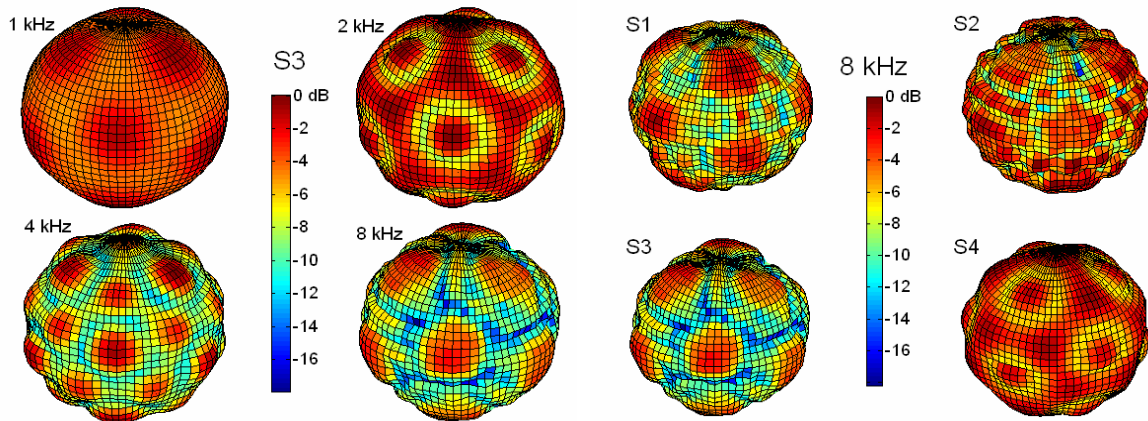


Fig.2 Diagramas de directividad de S3 en las bandas de 1, 2, 4 y 8 kHz (izda) y S1, S2, S3 y S4 en la banda de 8 kHz. Valores normalizados a 0 dB con el máximo de cada fuente y banda de frecuencia como referencia.

Tras validar las modelizaciones mediante el parámetro T_{30} , se realizaron 72 simulaciones con las cuatro fuentes cubriendo una rotación completa de 360° en incrementos de 5° . Más de 3,000 receptores fueron analizados – un receptor por m^2 – dando lugar a más de 50 millones de datos evaluados por medio de MATLAB. Los resultados obtenidos pueden verse en la bibliografía [12].

PROPUESTA DE NUEVO DESCRIPTOR PARA LA FUENTE SONORA

Se proponen dos nuevos descriptores, el primero de ellos basado en un estudio realizado por T.W. Leishman [13] y el segundo en la definición clásica de *directividad*. Ambos tienen en común considerar la radiación sonora en un marco tridimensional, en contraste con el método tradicional que únicamente tiene en cuenta las diferencias encontradas en un único plano de medida, habitualmente aquél que divide la esfera por su ecuador y que por la particular simetría de la fuente dodecaédrica no cruza ninguno de los centros geométricos de los doce altavoces que la forman.

El procedimiento habitual para medir el campo radiado de una fuente sonora en una cámara anecoica suele incluir montar la fuente sobre una plataforma giratoria y tomar datos bien mediante un array de micrófonos formando un cuarto de círculo o con un micrófono móvil según el esquema representado en la figura 3.

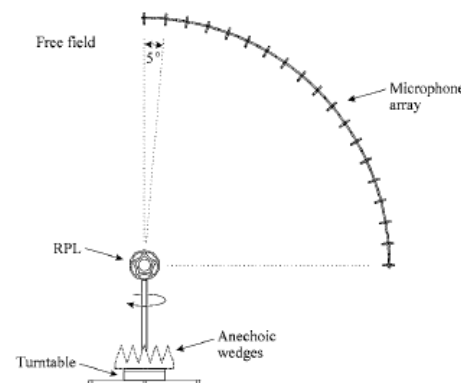


Fig.3 Esquema de la configuración típica para medir diagramas de directividad de fuentes sonoras en cámara anecoica [13].

Si el incremento angular tanto para el giro de la plataforma como para cada posición de micrófono es de $\Delta\Phi = \Delta\theta = 5^\circ$, se obtienen un conjunto de 2,664 niveles sonoros $L_{m,n}(f)$ – para cada posición m del micrófono y n de la fuente, y para cada rango de frecuencias f medido.

A la hora de hallar un promedio energético, se ponderan los niveles $L_{m,n}(f)$ por un factor $w_{m,n}$ determinado por la integración superficial de cada sección (m,n) muestreada por una posición de micrófono y normalizado con respecto al área de la esfera completa.

$$w_{m,n} = \frac{1}{4\pi r^2} \int_{\phi_n - \Delta\phi/2}^{\phi_n + \Delta\phi/2} \int_{\theta_m - \Delta\theta/2}^{\theta_m + \Delta\theta/2} r^2 \sin(\theta) d\theta d\phi = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \sin\theta_m \quad \text{para } 0 < m < \pi$$

Esta definición es consistente para todos los valores de n . Sin embargo, la peculiaridad de las áreas muestreadas en ambos polos nos lleva a cambiar los límites de integración para la primera de las integrales de 0 a $\Delta\theta/2$ y $(\pi - \Delta\theta/2)$ a π respectivamente, quedando de la siguiente manera:

$$w_{0,n} = w_{\pi,n} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{4}\right)$$

De esta manera, el promedio energético de niveles ponderados por área $\overline{L_w(f)}$ – viene dado por:

$$\overline{L_w(f)} = 10 \log \left(\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_{m,n} 10^{L_{m,n}(f)/10} \right)$$

Los dos nuevos descriptores propuestos, que llamaremos STD_{L_w} – desviación estándar de niveles ponderados – y $DI_{L_{\max}}$ – índice de directividad en la dirección de nivel máximo (dirección que coincidirá generalmente con el centro geométrico de uno de los doce altavoces que forman la fuente dodecaédrica) se expresan en dB y se definen, para cada banda de frecuencia f , como:

$$STD_{L_w}(f) = \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_{m,n} [L_{m,n}(f) - \overline{L_w(f)}]^2}$$

$$DI_{L_{\max}}(f) = \max[L_{m,n}(f)] - \overline{L_w(f)}$$

La figura 4 representa los dos nuevos descriptores definidos junto con el basado en los requisitos que establece la ISO 3382 y que recordemos se calcula promediando sobre arcos deslizantes de 30° .

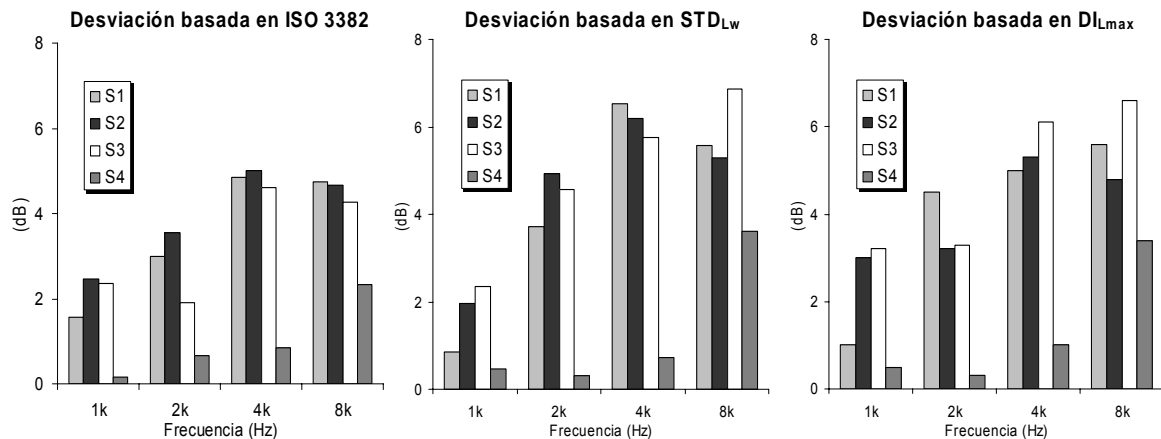


Fig. 4 Desviaciones direccionales (dB) para las bandas de frecuencia de 1 a 8 kHz basadas en los tres descriptores: ISO 3382, STD_{Lw} y DI_{Lmax}.

Pese a que las tendencias son similares, una inspección detallada revela diferencias para las desviaciones obtenidas mediante cada uno de los descriptores. Así por ejemplo, si nos fijamos en la banda de 8 kHz, en una clasificación que ordenara las cuatro fuentes de mejor a peor comportamiento en cuanto a radiación omnidireccional, el mejor puesto sería ocupado siempre por S4. Sin embargo, la ordenación del resto de fuentes sería diferente según el criterio empleado: S3-S2-S1 si utilizamos la definición ISO por S2-S1-S3 aplicando cualquiera de las otras dos. Similares conclusiones, con respecto a la posible diferente ordenación de las fuentes, pueden extraerse si se analizan el resto de las bandas.

El objetivo de los descriptores debiera ser reflejar fielmente, en los parámetros acústicos medidos, la afección que producen las desviaciones direccionales que éstos representan. Podemos identificar la desviación estándar de los resultados incluyendo el efecto de la orientación de la fuente – STD_S – como el parámetro que caracteriza la dispersión de los resultados observados en cada receptor cuando se realizan las 72 simulaciones correspondientes a cada fuente. Asimismo, la incertidumbre de una medición debería ser menor que el cambio mínimo subjetivamente perceptible en el parámetro medido correspondiente. Si, como es habitual, se desea expresar los resultados de la medición con un nivel de confianza de al menos el 95%, STD_S debiera ser inferior a 0.5jnd.

La representación de la afección que cada tipo de fuente provocaría en los parámetros D₅₀ y C₈₀, por ejemplo, puede observarse en la figura 5. Estas gráficas debieran ser similares a alguna de las obtenidas en la figura 4.

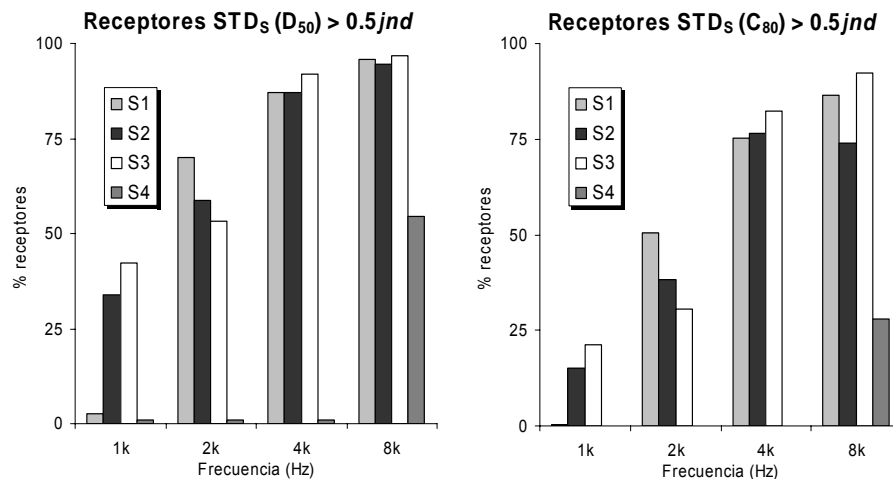


Fig. 5 Porcentaje de receptores con STD_S para C₈₀ (izda) y D₅₀ (dcha) > 0.5jnd según el tipo de fuente empleada

Mientras a simple vista no resulta evidente qué descriptor es el que mejor refleja la influencia que la falta de omnidireccionalidad de las fuentes produce en la medida de los parámetros acústicos derivados de la respuesta al impulso en salas, la representación de la figura 6 es más clarificadora.

Las líneas de tendencia muestran una correlación de 0.92 entre desviación direccional y afección para el caso del descriptor ISO 3382. Para el caso del descriptor basado en STD_{Lw} esta correlación mejora para el parámetro D_{50} pero es peor para C_{80} . Por último, el índice de directividad en la dirección de nivel máximo DI_{Lmax} es el descriptor con el que se obtienen mejores correlaciones, alcanzando valores de 0.98 en ambos casos.

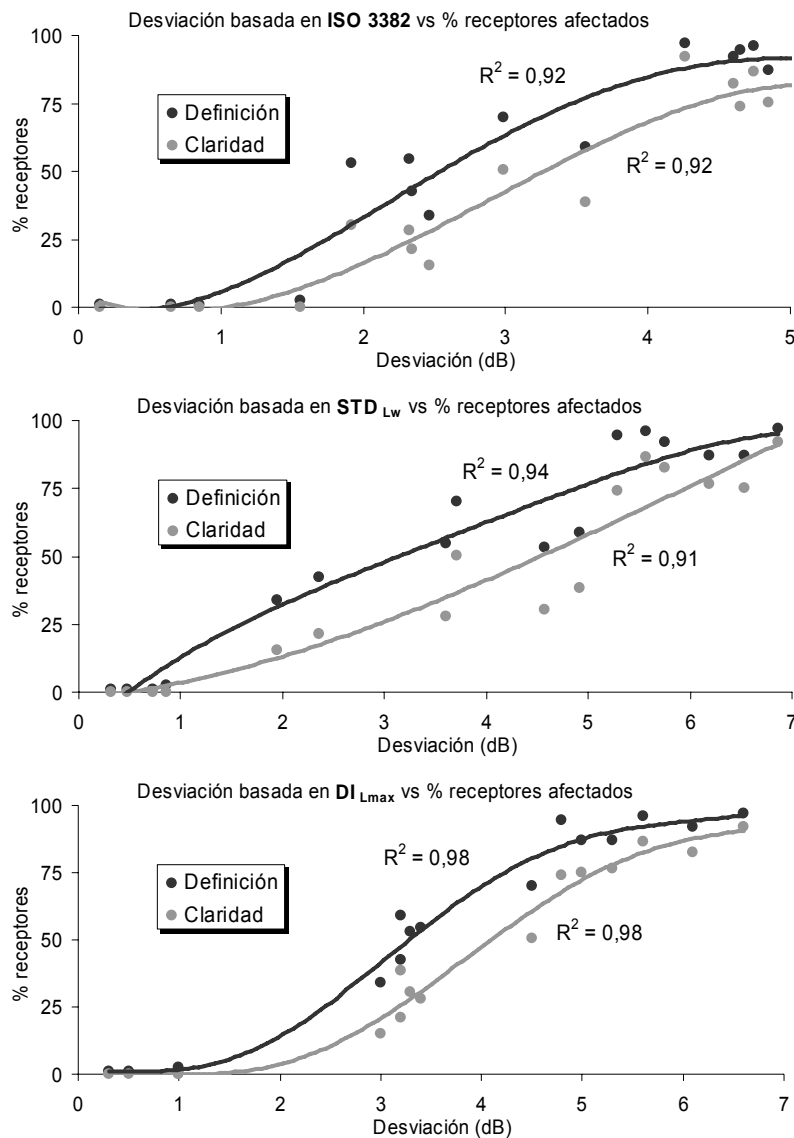


Fig. 6 Porcentaje de receptores con STD_S para C_{80} y $D_{50} > 0.5jnd$ frente a las desviaciones basadas en los descriptores: ISO 3382, STD_{Lw} y DI_{Lmax}

CONCLUSIONES

El método de clasificación propuesto por la ISO 3382 para describir la directividad de las fuentes – desviaciones en decibelios de los niveles promediados en arcos deslizantes de 30° referenciados sobre el promedio energético en el plano de medida - puede dar lugar a conclusiones erróneas sobre su comportamiento. Se propone un nuevo descriptor basado en un enfoque tridimensional. El denominado índice de directividad en la dirección de nivel máximo ($DI_{L_{max}}$) muestra una correlación de 0.98 entre desviación direccional y afección, mejorando notablemente el valor de 0.92 obtenido para el caso del descriptor ISO 3382.

REFERENCIAS

- [1] ISO 3382-1:2009, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces.
- [2] Cox T.J., Davies W.J., Lam Y.W., "The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria", *Acustica* 79, 27-41, 1993.
- [3] Bradley J.S., Reich R., Norcross S.G., "A just noticeable difference in C50 for speech", *Applied Acoustics* 58(2), 99-108, 1999.
- [4] Bork I., "A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation", *Acta Acustica united with Acustica* 86, 943-956, 2000.
- [5] Arana M., Vela A., San Martín M.L., "Calculating the impulse response in rooms using pseudo-impulsive acoustic sources", *Acta Acustica united with Acustica* 89(2), 377-380, 2003.
- [6] Ganuza I., San Martín R., Arana M., Influencia de la orientación del micrófono en la medida de parámetros acústicos. Proc. 36th TecniAcústica, Terrassa, Spain, 2005.
- [7] San Martín R., Precisión en la medida de parámetros derivados de la respuesta al impulso en acústica de salas. Tesis doctoral, Universidad Pública de Navarra, 2008.
- [8] San Martín R., Witew I.B., Arana M., Voriänder M., "Influence of the source orientation on the measurement of acoustic parameters," *Acta Acustica united with Acustica* 93, 387-397, 2007.
- [9] San Martín R., Arana M., "Predicted and Experimental Results of Acoustic Parameters in the New Symphony Hall in Pamplona, Spain", *Applied Acoustics* 67, 1-14, ISSN: 0003-682X, 2006.
- [10] ©ODEON Room Acoustic Program, version 9.0, user manual by C.L. Christensen, Technical University of Denmark (DK), www.odeon.dk, 2007.
- [11] Behler G.K., Müller S., "Technique for the derivation of wide band room impulse response", Proceedings of EAA Symposium on Architectural Acoustics, Madrid (ES), 2000.
- [12] San Martín R., Arana M., "Uncertainties caused by source directivity in room-acoustic investigations", *Journal of the Acoustical Society of America* 123, EL133-138, ISSN: 0001-4966, 2008.
- [13] Leishman T.W., Rollins S., Smith H.M., "An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound", *Journal of the Acoustical Society of America* 120, 1411-1422, 2006.