

Comparación de los parámetros acústicos obtenidos mediante dos programas de simulación con modelos geométricos de diferente complejidad de una sala



Radu Lacatis¹, Salvador Cerdá², Alicia Giménez¹
y José Romero¹.

¹Departamento de Física Aplicada. Universidad Politécnica de Valencia.

²Departamento de Matemática Aplicada.

Universidad Politécnica de Valencia.

E-mail: rala1@doctor.upv.es

PACS: 43.55-n; 43.55-Ka

Resumen

En este trabajo presentamos la comparación de los parámetros obtenidos en la simulación de una sala de audición (Paraninfo de la Universidad Politécnica de Valencia), al utilizar varios modelos geométricos de diferente complejidad. Esta comparación se ha realizado para dos programas de simulación: CATT-Acoustics y ODEON. El procedimiento seguido ha sido utilizar el modelo geométrico de mayor complejidad para el ajuste de las características de los materiales. A partir de éste, observamos las variaciones en los parámetros al simplificar el modelo geométrico. Como conclusión obtenemos que para CATT-Acoustics, no se aprecian variaciones en los parámetros superiores a 1 jnd en ningún caso, mientras que ODEON sí que las presenta para el RT y algunos parámetros en la banda de frecuencias de 125 Hz.

Abstract

In this paper we compare the parameters obtained in a listening room simulation (Auditorium of the Polytechnic University of Valencia), using several geometric models with different complexity. This comparison was done for two simulation programs: ODEON and CATT-Acoustics. The followed procedure has been use the more complex geometric model to adjust the used materials characteristics, From this model, we observe the changes in the parameters, when we simplify the geometric model. In conclusion we obtain that for CATT-Acoustics, there no were changes in the parameters above 1 jnd in any case, while it does ODE-

ON presents for the RT and some parameters in 125 Hz frequency band.

1. Introducción

La aplicación de técnicas numéricas al diseño acústico de salas de conciertos y de conferencias ha supuesto un ahorro notable en la ejecución de este tipo de proyectos. Entre los métodos más usados para la modelización acústica se encuentran el de trazado de rayos/conos/pirámides, el método de las imágenes o técnicas combinadas, aunque también se suele usar el método de los elementos de contorno (BEM) para la evaluación de elementos radiantes, el método de los elementos finitos (FEM), diferencias finitas en dominio del tiempo (FDTD), etc. Las técnicas numéricas híbridas que aplican trazado de rayos con esquemas de fuentes imagen permiten una mejora notable en los tiempos de cálculo en los modelos predictivos, ya que permiten una mayor eficiencia global en los cálculos donde alguna de las dos técnicas no es tan eficiente, es decir que las deficiencias de una, las suple la otra [1], [2].

En todo caso, la técnica aplicada parte de un modelo geométrico de la sala a estudiar o diseñada. En los manuales de los programas de modelización acústica se recalca que el objetivo de los mismos es la modelización acústica. Haciendo referencia a la posible contrariedad que supone utilizar modelos geométricos excesivamente complejos. El uso de estos modelos complejos supone dos posibles problemas: el excesivo tiempo para lograr que el modelo pueda ser tratado por el programa; el aumento de los errores que las limitaciones

del programa tiene al tratarse siempre de técnicas aproximadas [3], [4].

La simplificación de modelos geométricos es un área importante dada su aplicación a la simulación acústica. Aunque algunos trabajos consideran la simplificación como un factor importante desde el punto de vista computacional [5], en este trabajo planteamos el estudio del efecto de algunos elementos acústico-geométricos en el modelizado de una sala. Hemos utilizado como sala el Paraninfo de la Universidad Politécnica de Valencia [6]. Partiendo de un modelo geométrico elaborado y de medidas experimentales, hemos eliminado los reflectores laterales, la pendiente y simplificado los bancos mediante una caja de audiencia. El modelo ha sido ajustado con el RT en bandas (por debajo del 5% de diferencia con las medidas) para el caso no simplificado. Se han estudiado la variación de los parámetros por bandas de frecuencia así como los errores relativos a los jnd de los parámetros y las medidas experimentales.

2. Metodología

2.1 Dispositivo experimental (medidas)

La metodología experimental empleada ha seguido los requerimientos de la ISO-3382 [7] e IEC 60268 [8]. El sistema de adquisición consta de un PC portátil con una tarjeta de sonido profesional (Vxpocket v2) en el que se ha instalado el sistema de adquisición y análisis Winmls. Como micrófonos hemos utilizado dos micrófonos G.R.A.S. Tipo 40 AK (Sensibilidad a 250Hz, 50 mV/ Pa, Respuesta en frecuencias: 3.15 Hz-20 kHz, Límite superior del rango dinámico (3% Distorsion): 164 dB re. 20µ Pa, Límite inferior del rango dinámico: 14 dB, re. 20µ Pa). Y sus correspondientes fuentes de alimentación GRAS 12AA y preamplificadores G.R.A.S Tipo 26AK (Rango de frecuencias: 2Hz-20 kHz). Para la determinación de los parámetros de espacialidad hemos utilizado el micrófono multipatrón de condensador AT4050/CM5 (respuesta en frecuencia: 20-20.000Hz, sensibilidad: 15.8 mV, diagrama polar: cardioide , omni-direccional, figura-en-ocho) y la correspondiente fuente de alimentación "phantom". Finalmente las medidas binaurales se han llevado a cabo mediante Cabeza binaural HMS III.0 (Rango de frecuencia: 3 Hz-20 kHz, -3dB/+0.1 dB; rango dinámico: tipo. >118 dB, máximo SPL 145 dB).

El sistema de amplificación y emisión consta de: Amplificador de potencia M-1000 (Potencia de salida RL=4Ω: 520W+520W). Y la fuente dodecaédrica DO12 (Potencia

acústica >120dB, Rango de frecuencias: 80 Hz-6.3 kHz, directividad omni).

Como software de medida y análisis se han utilizado WinMLS [9]. Todas las medidas se han realizado en sala vacía y la fuente se ha situado en el centro del escenario. Se ha medido en 24 puntos, (número muy superior a los mínimos sugeridos por la norma [7]), con objeto de poder realizar un buen ajuste en la simulación.

2.2 Modelos geométricos utilizados

La sala modelizada ha sido el Paraninfo de la Universidad Politécnica de Valencia (veáse Figura 1). El Paraninfo de la UPV, tiene una forma rectangular. El escenario tiene como pavimento parket de madera de haya. El techo del escenario consta de superficies reflectantes suspendidas, los falsos techos y las paredes son de tablero DM chapado. El



Figura 1. Vista de la audiencia del Paraninfo de la Universidad Politécnica de Valencia.



Figura 2. Ficha técnica de la sala [6].

Tabla 1. Características principales del Paraninfo UPV								
Sala	Tipo	Uso	Año	Asientos	Puntos de medida	V(m³)	TR(s)	V/asiento
Paraninfo UPV	Rectangular	Conferencias, congresos, musica solista, concierto de cámara y coro	1978	385	24	2700	1.3	7

fondo de la sala está hecho con listones de madera. El pavimento de la sala es de linóleo [6]. Para obtener el modelo acústico se han utilizado dos programas de simulación comerciales: CATT-acoustic y ODEON.

2.2.1 Modelo completo inicial

En el modelo completo inicial se ha tenido en cuenta que la sala cuenta con unos reflectores laterales, el suelo inclinado y se han modelizado los bancos.

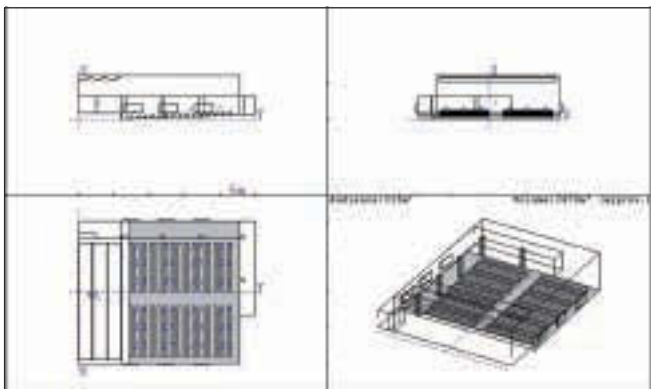


Figura 3. Modelo completo de la sala.

2.2.2 Simplificaciones

Se han utilizado varios modelos simplificados. La primera simplificación ha sido eliminar los reflectores laterales. A continuación, hemos eliminado la inclinación de la sala y finalmente hemos sustituido los bancos por una caja que simula la audiencia. La siguiente figura muestra el modelo geométrico virtual más simplificado.

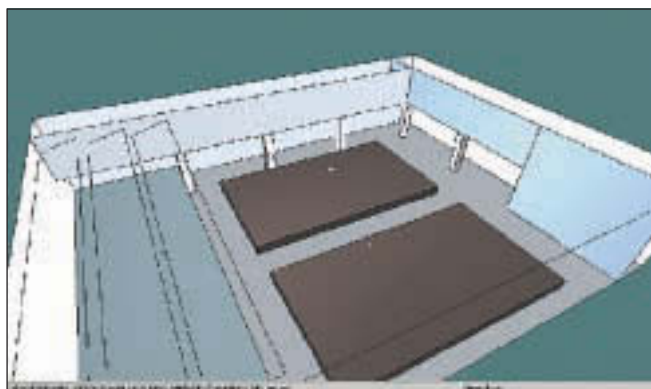


Figura 4. Modelo simplificado de la sala.

3. Resultados

A continuación presentamos los resultados obtenidos para los diferentes parámetros obtenidos en cada programa de simulación. Los parámetros estudiados han sido [6, 9], el RT30, EDT, G, C50, C80 y LF. También se han determinado las figuras de mérito que se derivan de ellos:

- Parámetros de reverberación: TR_{mid} , EDT_{mid} .
- Parámetros energéticos: G_{mid} , $C50_{avg}$, $C80_{avg}$ y T_s .
- Parámetros de espacialidad: LF_{E4} .

$$G_{mid} = \frac{1}{2} (G^{500 Hz} + G^{1 kHz})$$

$$C_{50} = 0.15 \cdot C_{50}^{500 Hz} + 0.25 \cdot C_{50}^{1 kHz} + 0.35 \cdot C_{50}^{2 kHz} + 0.25 \cdot C_{50}^{4 kHz}$$

$$C_{80} = \frac{1}{3} (C_{80}^{500 Hz} + C_{80}^{1 kHz} + C_{80}^{2 kHz})$$

$$T_s = T_{1 kHz}$$

$$TR_{mid} = \frac{1}{2} (TR^{500 Hz} + TR^{1 kHz})$$

$$EDT_{mid} = \frac{1}{2} (EDT^{500 Hz} + EDT^{1 kHz})$$

$$LF_{E4} = \frac{1}{4} (LF^{125 Hz} + LF^{250 Hz} + LF^{500 Hz} + LF^{1 kHz})$$

La variación en los valores de los diferentes parámetros acústicos, (precisión en la medida y cálculo), será tanto más aceptada cuanto más se aproxime a la mínima diferencia en una sensación perceptible por el oyente, en psicofísica llamado “just noticeable difference”, (jnd) [10]. El estudio de la sensibilidad del oyente a cambios en el campo sonoro, ha sido tema importante en las investigaciones de los últimos 50 años [11], dando lugar al establecimiento de estos indicadores (jnd) mayoritariamente aceptados por la comunidad científica (Tabla 2). Estos valores, que se determinaron en primer lugar para la frecuencia de 1000 KHz [12], se corroboraron con posterioridad para diferentes rangos de frecuencia [13, 14]. Establecen la precisión con la que deberían medirse los parámetros y la precisión en su cálculo, mediante los modelos computacionales. Los valores de los errores relativos de parámetros para cada técnica de medida-simulación entre los límites de los jnd asociados, son una buena aproximación para el estudio de la calidad acústica en recintos.

En este trabajo se han determinado para todas las frecuencias centrales (125 Hz - 4 KHz), los errores relativos, para

Tabla 2. JND para los parámetros estudiados		
Parámetro	Rango de frecuencias	jnd
T30 (s)	125–4,000 Hz	5 %
EDT (s)	125–2,000 Hz	5 %
C ₅₀ , C ₈₀ (dB)	500–2,000 Hz	1 dB
LF	125–1,000 Hz	5
T _s (ms)	500, 100 Hz	10
G	125–2,000 Hz	1 dB

valores promedio de cada parámetro estudiado por frecuencias y error relativo promedio de las “figuras de mérito”.

El cálculo de este error relativo comparado con el jnd del parámetro, se obtiene a partir de las expresiones (1), para los parámetros de reverberación, y (2) para parámetros energéticos y de inteligibilidad [15].

$$Error = \sum \frac{|P_{medida} - P_{simulada}| \cdot 100}{N_{pos} \cdot P_{medida} \cdot jnd} \quad (1)$$

$$Error = \sum \frac{|P_{medida} - P_{simulada}|}{N_{pos} \cdot jnd} \quad (2)$$

Siendo: P_{medida} el valor del parámetro medido, $P_{simulada}$ el valor del parámetro simulado, N_{pos} el número de posiciones de medida y jnd es la mínima diferencia para el parámetro apreciable por el receptor.

Estos errores se determinan para valores promedios de los parámetros por frecuencias en los 24 puntos receptores (Presentados en las Figuras 5-18 como las dos líneas R+ y R-) y para los valores de las denominadas “figuras de mérito” (Figuras 19-20).

Como nuestro interés no es comparar las predicciones de los dos programas, mostramos los resultados obtenidos en gráficas diferentes.

3.1 RT30

Este parámetro es el que se ha utilizado en la calibración del modelo geométrico de mayor complejidad. Se ha determinado el RT30 en los puntos medidos y se han ajustado los materiales para que la diferencia entre los valores obtenidos con los programas de simulación y las medidas no fueran superiores al 5 % (jnd) en el modelo completo. En las Figuras 5 y 6, se muestra el promedio por bandas de frecuencia en ambos casos.

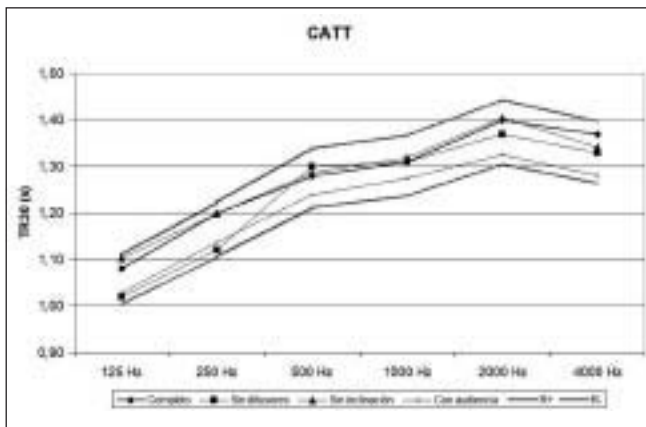


Figura 5. TR30 para los distintos modelos estudiados en CATT.

Como se observa en la gráfica de CATT, las variaciones al eliminar los reflectores laterales, al eliminar la inclinación y al substituir los bancos por la audiencia (de forma acumulada), tienden a disminuir el TR30 pero dicha disminución no supera el 5% (correspondiente al jnd del TR30).

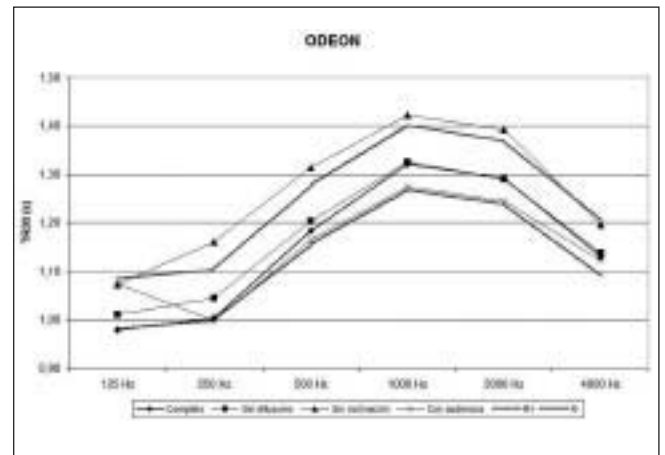


Figura 6. TR30 para los distintos modelos estudiados en ODEON.

En el caso de ODEON, el efecto de eliminar la inclinación sí que produce una variación superior al 5 %. Pero se da un fenómeno curioso al cambiar los bancos por una audiencia, produciendo valores que se alejan menos del 5 %.

3.2 EDT

Algo similar ocurre con el EDT. Como se aprecia en las figuras (7 y 8), en el caso de CATT, la variación del parámetro en los 4 modelos está dentro del rango del jnd (5 %).

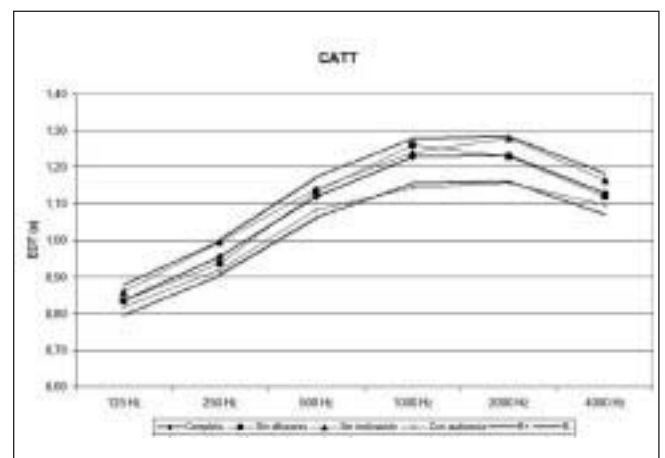


Figura 7. EDT para los distintos modelos estudiados en CATT.

Para ODEON, sólo en la banda de 125 Hz, se aprecia una gran diferencia para el modelo con audiencia.

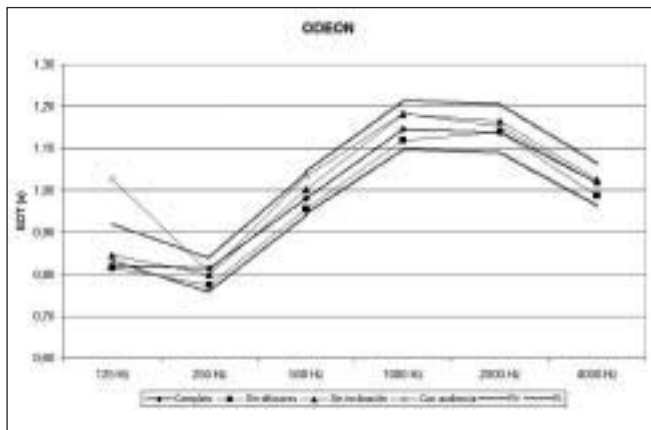


Figura 8. EDT para los distintos modelos estudiados en ODEON.

3.3. C80

Para la claridad musical (C80), podemos observar que la variación es bastante inferior al jnd (1 dB) tanto para CATT como para ODEON. De nuevo se aprecia que en 125 Hz, ODEON, muestra gran diferencia para el modelo con audiencia.

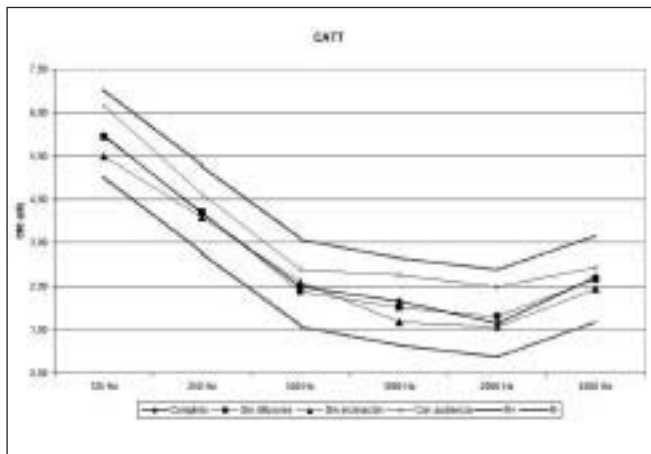


Figura 9. C80 para los distintos modelos estudiados en CATT.

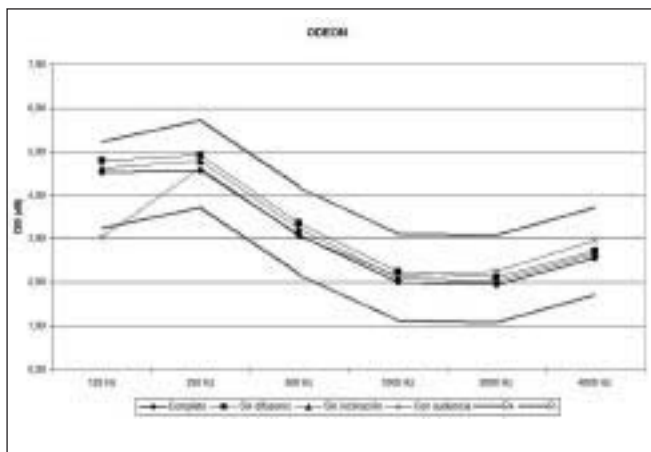


Figura 10. C80 para los distintos modelos estudiados en ODEON.

3.4. C50

Para la claridad de habla, se observa lo mismo que para la claridad musical. ODEON muestra muy poca variación, salvo en 125 Hz para el modelo con audiencia. Aunque la variación de CATT es mayor que la de ODEON, no supera 1 jnd (1 dB).

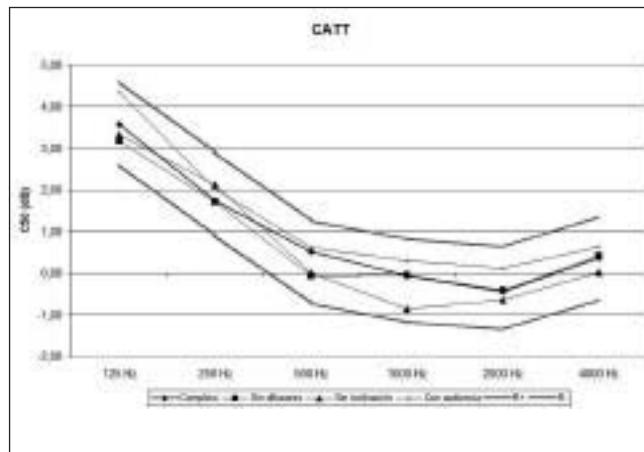


Figura 11. C50 para los distintos modelos estudiados en CATT.

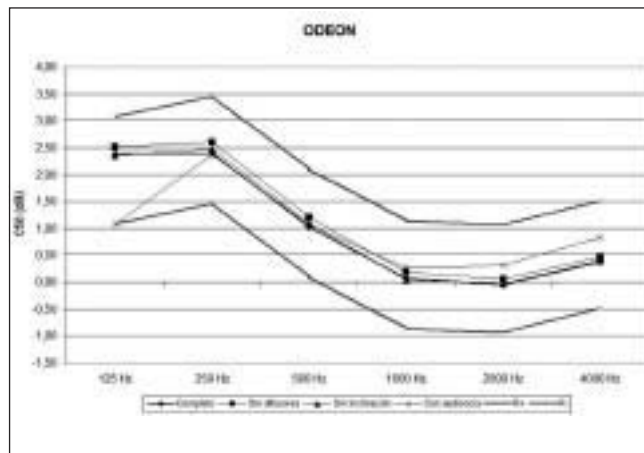


Figura 12. C50 para los distintos modelos estudiados en ODEON.

3.5. Ts

Para el tiempo central, las variaciones en CATT y en ODEON siguen el mismo comportamiento que en los parámetros de claridad. Solo para 125 Hz, en el modelo con audiencia hay una variación importante en ODEON.



CESVA

Instrumentación acústica

la medida del ruido



www.cesva.com

Maracaibo, 6 • 08030 BARCELONA (ESPAÑA) Tel. (+34) 934 335 240

NOVEDADES

investigar para seguir avanzando

VIBRÓMETRO TRIAXIAL VC431

Visual, intuitivo y sin configuración previa. Mide simultáneamente en los tres ejes todas las funciones con un rango único de medición. Descarga a través de puerto USB las mediciones y la evolución temporal de cada eje.

- Sistema Mano-Brazo (HA) RD 286/2006 e ISO 5349-2
- Cuerpo entero (WB) RD 286/2006 e ISO 2631-1
- Edificación (WBB) Ley del Ruido e ISO 2631-2



SC101 Y SC102 CON PROTOCOLOS DE MEDICIÓN

Sonómetro Integrador Clase 1 y Clase 2. Guía al usuario paso a paso en la realización de las mediciones:

- Realizan automáticamente las comprobaciones y cálculos indicados en las normas, hasta la obtención del resultado final.
- Protocolos específicos para mediciones de: vehículos a motor, actividades y vecindad, ruido laboral, ruido de máquinas, potencia acústica, ...



CESVA RISK MANAGER (CRM)

Software para la gestión integral de la protección y prevención de los riesgos relacionados con la exposición de los trabajadores al ruido:

- Evaluación por estrategias: TAREAS, TRABAJO y JORNADAS y cálculo automático de INCERTIDUMBRES.
- Guía paso a paso para cumplir con la Directiva 2003/10/CE y los Decretos de España, Francia y Portugal. Además de la norma ISO 9612: 2009.



NOISE SURVEILLANCE NETWORK (NSN)

NSN es una red de terminales de monitorización de ruido ambiental TA024 para la vigilancia del ruido de ciudades, infraestructuras o actividades:

- Metrología legal, 1/3 octava cada 125 ms, grabación de audio, transmisión de datos 3G sin desplazamientos, e-mail de alerta para analizar solo los intervalos ruidosos, terminales programables.

NSN es la solución completa para cuantificar objetivamente planes de acción y líneas de actuación para la mejora del confort acústico.



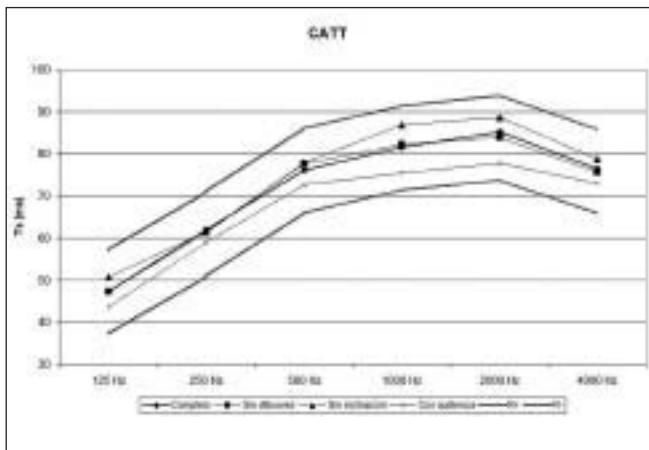


Figura13. Ts para los distintos modelos estudiados en CATT.

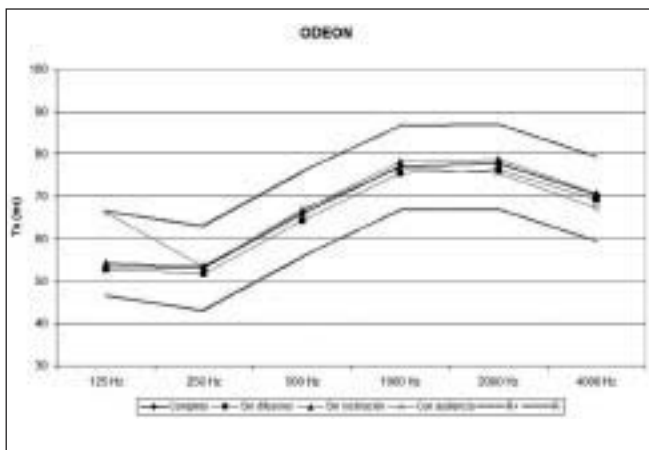


Figura14. Ts para los distintos modelos estudiados en ODEON.

3.6 LF

Para la fracción de energía lateral, se observa que la variación es muy baja. Especialmente en el caso de ODEON, que en esta ocasión no presenta ninguna anomalía. Cabe destacar que ODEON proporciona valores casi independientes

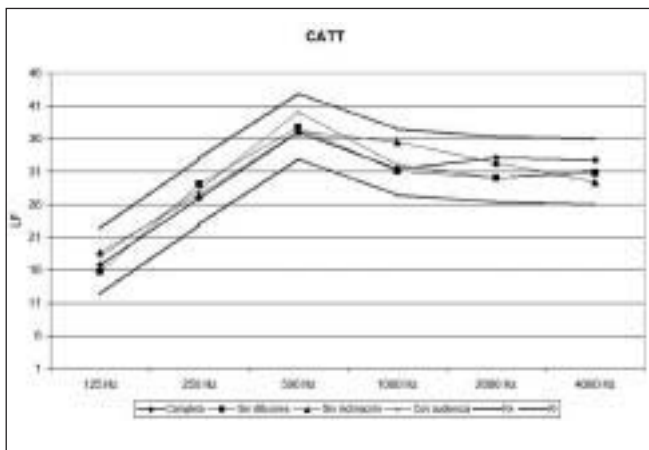


Figura15. LF para los distintos modelos estudiados en CATT.

de la frecuencia, mientras que CATT sí que muestra dicha dependencia.

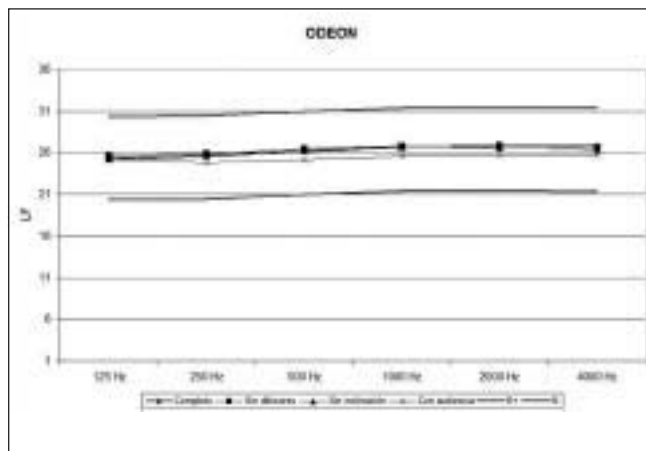


Figura16. LF para los distintos modelos estudiados en ODEON.

El hecho de que LF no muestre variaciones importantes es desconcertante, pues se deduce que los reflectores (laterales) no producen ningún efecto. Sin embargo, existe una explicación sencilla para esto. Como los reflectores son huecos en la pared, el frente de rayos que utilizan los programas, no interactúa para las primeras reflexiones (en la difusión no se ha incluido la difracción por aristas).

3.7. G

De nuevo para la fuerza G, observamos que solo para 125 Hz en ODEON, hay alguna variación importante para el modelo con audiencia. En el caso de CATT no se aprecian variaciones significativas.

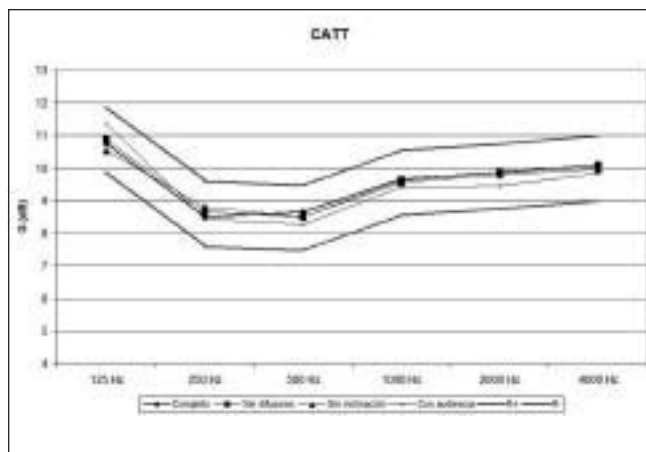


Figura17. G para los distintos modelos estudiados en CATT.

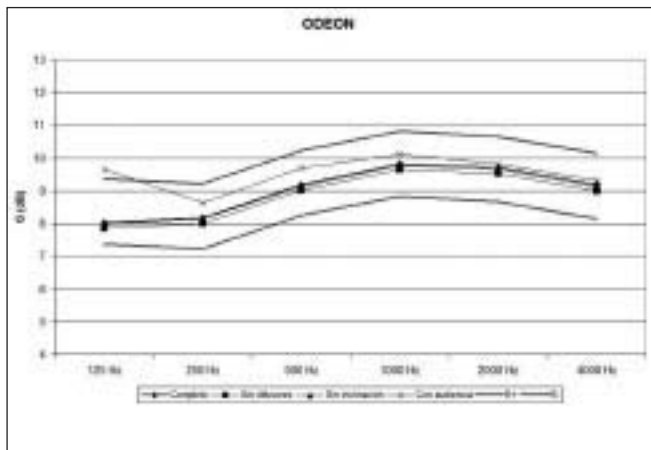


Figura 18. G para los distintos modelos estudiados en ODEON.

3.8 Errores en las figuras de mérito respecto a los jnds

En las dos figuras siguientes (Figura 19 y 20), presentamos los errores relativos a los jnd, entre los valores obtenidos por los programas y las medidas.

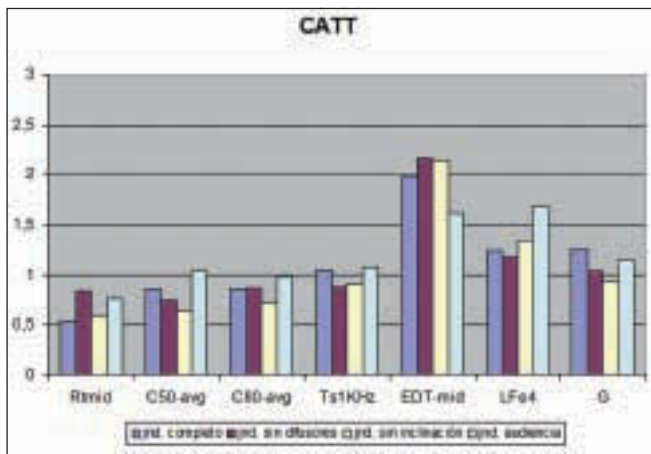


Figura 19. Errores relativos al jnd entre los parámetros simulados y los valores medidos (CATT).

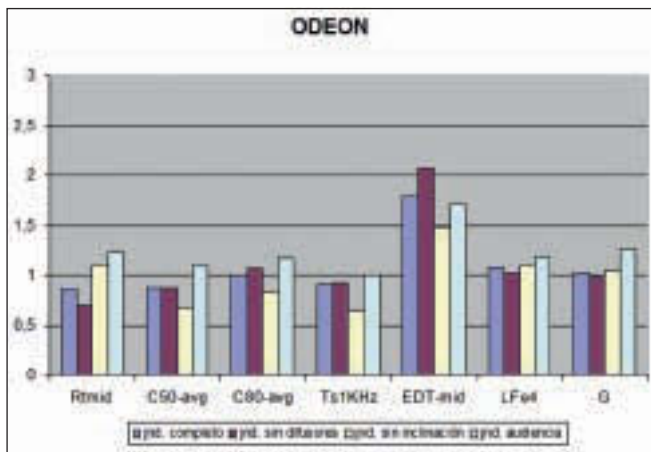


Figura 20. Errores relativos al jnd entre los parámetros simulados y los valores medidos (ODEON).

Lo primero que apreciamos es que en CATT el RTmid siempre está por debajo de 1 jnd. No ocurre lo mismo para ODEON, que en el modelo sin reflectores laterales y sin pendiente, y en el modelo sin reflectores laterales, sin pendiente y con caja como audiencia, proporciona valores por encima de 1 jnd.

Para la claridad musical, de habla y Ts1KHz, podemos decir que ambos programas se comportan de manera similar, produciendo resultados que están alrededor de 1 jnd.

Para el EDTmid, parámetro que muestra mayor error relativo con respecto al jnd de todos los estudiados, podemos decir que ocurre un efecto curioso: las sala más simplificadas, proporcionan menor valor del error relativo al jnd.

En cuanto a LF y G, ODEON muestra muy poca variación (aproximadamente 1 jnd) y CATT muestra una tendencia a aumentar el error relativo al jnd para los modelos más simplificados para el LF; en el caso de G, con las dos primeras simplificaciones el error disminuye, volviendo a aumentar con la última simplificación utilizada, casi hasta el valor inicial.

4. Conclusiones

Hemos presentado en este trabajo las comparaciones entre los parámetros obtenidos por simulación para varios modelos geométricos de una misma sala con CATT-Acoustics y ODEON. Los modelos geométricos se han realizado con una modelización completa de la sala y sucesivas simplificaciones de elementos acústico-geométricos. Estas simplificaciones han consistido en la eliminación de elementos aparentemente importantes. Se han eliminado reflectores laterales, pendiente de la sala y hemos substituido un modelo de bancos por una caja (procedimiento habitual).

La principal conclusión es que las variaciones producidas en las predicciones no son muy grandes, a pesar de que los elementos acústico-geométricos sean aparentemente tan importantes como en nuestro modelo. Esto se cumple sin excepciones en el caso de CATT-Acoustics, programa para el cual nunca se ha superado una variación superior a 1 jnd para ningún parámetro, ni por bandas, ni para las figuras de mérito.

En el caso de ODEON, sí que se han producido variaciones superiores a 1 jnd para el RT por bandas al eliminar la pendiente. Además, para la banda de 125 Hz, EDT, C80, C50 y G muestran variaciones iguales o superiores a 1 jnd.

El resultado obtenido para el LF pone de manifiesto que se ha de ajustar el tratamiento de la difusión y/o de la dispersión en los programas cuidadosamente. En la opción por defecto, es decir utilizando la aproximación de Lambert, algunas estructuras como los reflectores laterales se comportan de una manera especial, no afectando apreciablemente su presencia en los resultados.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto de investigación BIA2008-05485. Por otro lado, queremos agradecer a Tapio Lokki el trato que nos brindó durante la estancia que parte de los autores realizamos en 2010 en la Helsinki University of Technology, Telecommunications Software and Multimedia Laboratory.

6. Bibliografía

- [1] Rindel JH. "Modelling in auditorium acoustics- from ripple tank and scale models to computer simulations". N° Especial de la Revista de Acústica (CD-Rom), 32 keynote lecture, Forum Acusticum Sevilla 2002.
- [2] Rindel JH. The use of computer modeling in room acoustics. *J Vibro Eng*, Vol. 3(4), 2000.
- [3] CATT-Acoustics. V8g. User's manual. 2007.
- [4] Odeon Room Acoustics program. User manual. V 10.1. 2009.
- [5] Siltanen et al. Geometry reduction in room acoustics modelling. *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*. 94, (2008) 410-418.
- [6] Lacatis, R. Análisis de un conjunto de salas de la Universidad Politécnica de Valencia en su adecuación a diferentes usos, para el establecimiento de una metodología de medida de los parámetros de calidad acústica. Diploma de Estudios Avanzados. UPV. 2009
- [7] ISO 3382-1:2009 Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces.
- [8] IEC 60268-1 Sound System Equipment Part 1: General.
- [9] WINMLS: Morset Sound Development., Winmls 2004. reference manual., 2004.
- [10] T.J. Cox et al, The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria. , *Acustica* , 79 , 1993, 27-41.
- [11] San Martín, R. Accuracy in the measurement of parameters derived from impulse response in room acoustics. Doctoral thesis, University of Navarre, (2008).
- [12] M. Vorländer, International Round Robin on room acoustical computer simulation. Proceedings of 15th International Congress on Acoustics. II Trondheim, Norway, 1995 , 689-692.
- [13] I. Bork.: A comparison of room simulation software - the 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acustica united with Acustica* 86 (2000) 943-956.
- [14] M. Barron. Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. *Acoust. Sci. & Tech.* 26, 2 (2005)
- [15] H. Shiokawa, J.H. Rindel, Comparisons between computer simulations of room acoustical parameters and those measured in concert halls. 89 , Institute of Industrial Technology , Nihon University , 2007.