

INFLUENCIA DEL GRADO DE DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN ACÚSTICA EN LA CONVERGENCIA ENTRE REALIDAD Y SIMULACIÓN. ESTUDIO DE UN CASO.

Ignacio Enrique Guillén Guillamón

Vicente Gómez Lozano

Francisco José Sanchis Mullor

Universidad Politécnica de Valencia

Abstract

This study presents the level of detail required for modelling a room which is used to the speech, so that this level will allow knowing the acoustic behaviour by means of simulation in the first stages of a project. The present study does not question the reproduction of the geometric characteristics of the room, which are necessary, however it analyzes the importance that some elements such as the furniture, the lamps, the extraction device or the ejector device of conditioning air may have when the acoustic behaviour of a room is studied. Obtaining an optimum level of detail, by which the acoustic behaviour of a simulated room does not present significant variations, will allow improving the simulation process. This factor is a priority due to this study takes part in a more ambitious investigation which has the purpose to characterize architecturally and acoustically the teaching spaces at UPV. As shown in previous studies an acoustic characterization of these classrooms is particularly interesting in the field of building projects. As well as, the prioritization of investments which have the aim of improving the use conditions within rehabilitation proceedings.

Keywords

Classroom acoustics; simulation models; objective measures

Resumen

En el presente estudio se analiza el nivel de detalle necesario en la modelización de un recinto destinado a la palabra, de forma que sea posible conocer el comportamiento acústico de éste, mediante simulación en fases iniciales del proyecto. Este trabajo no cuestiona la reproducción de las características geométricas de la sala, las cuales resultan necesarias, sin embargo si analiza la importancia que pueden tener elementos como el mobiliario, las luminarias o los dispositivos de extracción/impulsión de aire acondicionado, cuando se pretende estudiar el comportamiento acústico de un recinto. Obtener un óptimo nivel de detalle, a partir del cual el comportamiento acústico de un recinto simulado no presenta variaciones significativas, permitirá agilizar el proceso de simulación. Este factor, resulta prioritario ya que este trabajo forma parte de una investigación más ambiciosa que pretende caracterizar acústica y arquitectónicamente los espacios docentes de la UPV. Como se demuestra en estudios anteriores la caracterización acústica de estos recintos resulta especialmente interesante en el ámbito de los proyectos de edificación así como en la priorización de inversiones de cara a la mejora de sus condiciones de utilización en procesos de rehabilitación.

Palabras Clave

Acústica de aula; modelos de simulación; medidas objetivas

1 Introducción:

Desde finales de la última década del siglo XX, el interés de la comunidad científica por la caracterización acústica de los espacios docentes ha ido en aumento tal y como se demuestra en diferentes estudios (Hodgson, 1999 y Nelson, 1999). Dentro de este ámbito, encontrar niveles óptimos de tiempos de reverberación (Bistafa y Bradley, 2000) así como demostrar la relación existente entre los diferentes parámetros acústicos y la inteligibilidad de la palabra (Hodgson y Nosal, 2002; Bradley, Sato y Picard, 2003 y Tang, 2008) han sido cuestiones que han generado la realización de numerosas investigaciones

Dentro de un contexto universitario estas investigaciones también han sido aplicadas a espacios docentes, con el fin de conseguir que éstos posean unas características acústicas apropiadas a su naturaleza (Zannin y Ferreira, 2009 y Hodgson, 2004). En este sentido, resulta de gran interés la utilización de programas de simulación que nos permitan predecir el comportamiento acústico de un sala previamente a su construcción (Hodgson, 2009) así como conocer la relación existente entre los valores de cálculo y los obtenidos mediante simulación (Astolfi, Corrado y Griginis, 2009).

Atendiendo a estas investigaciones y basándonos en el método de predicción de Ray Tracing, el presente trabajo profundiza en la influencia que los modelos de simulación pueden tener con respecto a la predicción del comportamiento acústico de una sala. A continuación, desarrollaremos el análisis comparativo entre una serie de valores obtenidos mediante la medición experimental de un aula, y aquellos obtenidos mediante la simulación del mismo recinto con distintos niveles de detalle geométrico.

2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el grado de definición geométrica que resulta necesario utilizar en la modelización de un recinto destinado a la palabra, y en consecuencia, conocer si es posible considerar un nivel de detalle óptimo; a partir del cual, sea posible desestimar la construcción de modelos de simulación más realistas, puesto que éstos no aporten información significativa a cerca de su comportamiento acústico.

Llegar a conocer este nivel de detalle permitiría por un lado, disminuir el tiempo invertido en la construcción de los modelos de simulación y por otro, conocer cuáles son los principales aspectos de todo recinto que sí deben quedar definidos en la fase inicial de proyecto, puesto que su inclusión o no en el modelo de simulación; afecta directamente a los resultados de su previsible comportamiento acústico.

3 Metodología

La metodología aplicada ha sido un análisis comparativo entre los resultados experimentales obtenidos en la medición acústica de un aula universitaria y los obtenidos tras la simulación acústica de este mismo recinto con la ayuda del software Odeon 10.1. Para la simulación acústica del aula se han utilizado 4 modelos distintos, de forma que en cada uno de ellos se ha aumentado progresivamente el grado de definición geométrica.

Para la toma y recogida de datos se ha escogido de manera aleatoria el aula JA-1, perteneciente a la ETSIE del Campus de la UPV. Atendiendo a lo descrito en la norma UNE EN ISO 3382 y mediante el método de la respuesta impulsiva, se han obtenido los valores experimentales necesarios para poder definir acústicamente el comportamiento del aula.

3.1 Mediciones acústicas

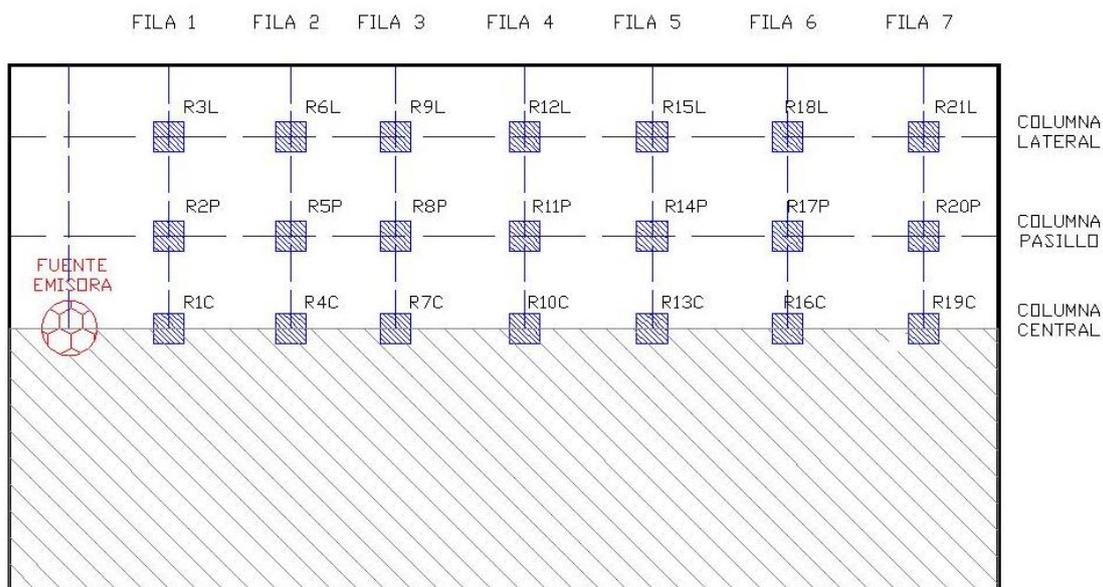
Las mediciones acústicas se han realizado con el programa DIRAC 7841 de Brüel & Kjær, que utiliza el método de la respuesta impulsiva con la emisión de MLS para el cálculo de los parámetros acústicos. Los parámetros analizados en el presente trabajo atendiendo a criterios temporales, energéticos y de inteligibilidad son:

- Tiempo de reverberación (T30)
- Definición (D50)
- SPL
- STI

En la tabla 1 se adjuntan los datos geométricos del aula. Con respecto al emplazamiento de la fuente emisora y los receptores, se ha escogido la ubicación de la fuente emisora, de forma que su posición sea asimilable a la de un orador situado en el centro del aula y a una distancia de 1 metro con respecto a la pared del fondo. La distribución de los receptores, tal y como se observa en la figura 1, se ha realizado atendiendo a la simetría longitudinal del aula, de forma que éstos se han ubicado a lo largo de 7 filas con 3 receptores en cada una de ellas. Conviene señalar que las mediciones acústicas se han llevado a cabo con las aulas completamente vacías y con los sistemas de aire acondicionado funcionando en el régimen normal de acuerdo a un día de clase lectivo.

Tabla1: Datos geométricos del aula JA-1:

Altura	Anchura	Longitud	Superficie	Volumen	Nº de Mesas
3,35m	8,85 m	16,5m	146,11m ²	489,48 ³	36



3.2 Simulaciones acústicas

Para llevar a cabo la simulación acústica del aula, se han recopilado las características principales de ésta (dimensiones, forma, materiales y coordenadas de posición de la fuente emisora y los receptores). Una vez construido el modelo en 3D, este se ha exportado al software de simulación Odeon 10.1 el cual mediante el método de Ray-Tracing nos ha permitido obtener una serie de valores. Posteriormente se han comparado con los valores de cálculo obtenidos en la medición. Con respecto a los distintos grados de definición del modelo, se han elaborado 4 modelos distintos, cuyas principales características son:

Modelo 1: Se han considerado las superficies envolventes del aula, pero se ha obviado la presencia del mobiliario interior. Por otro lado se ha simulado el falso techo del aula como una superficie formada por un único material, prescindiendo también de las luminarias y los dispositivos de impulsión y extracción de aire acondicionado.

Modelo 2: Se han considerado las superficies envolventes del aula, obviando la presencia del mobiliario interior y los dispositivos de impulsión y extracción de aire acondicionado del falso techo. Las luminarias que inicialmente no se habían tenido en cuenta sí han sido incluidas en este modelo.

Modelo 3: Se han considerado las superficies envolventes del aula, obviando únicamente la presencia del mobiliario interior, de forma que la presencia de las luminarias y los dispositivos de impulsión y extracción de aire acondicionado del techo si han sido incluidos en este modelo.

Modelo 4: Se han considerado las superficies envolventes del aula, incluyendo todos los elementos del techo y las 36 mesas del aula.

En la Tabla 2 se adjuntan las superficies y coeficientes de absorción de los distintos materiales utilizados en el cálculo de los modelos de simulación. En la Figura 2 se observan claramente las principales diferencias entre el modelo 1, que reproduce únicamente la envolvente del aula y el modelo 4 que contiene mayor grado de definición.

Tabla2: Coeficientes de absorción de los materiales utilizados en las simulaciones

Tipo de Superficie	Superficie Total (m2)	Coeficiente de Absorción α						
		65 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Suelo	128,39	0,010	0,010	0,010	0,015	0,020	0,020	0,020
Tarima	19,78	0,400	0,400	0,300	0,200	0,170	0,150	0,100
Paredes	158,71	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020
Luminarias	15,66	0,280	0,280	0,220	0,170	0,090	0,100	0,110
Rejillas de ventilación	5,92	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600
Falso Techo	124,54	0,480	0,480	0,490	0,700	0,780	0,940	0,930
Puerta	2,35	0,350	0,350	0,250	0,180	0,120	0,070	0,040
Cristalera	8,85	0,140	0,140	0,100	0,060	0,080	0,100	0,100
Mesas	61,60	0,010	0,050	0,050	0,050	0,040	0,040	0,040

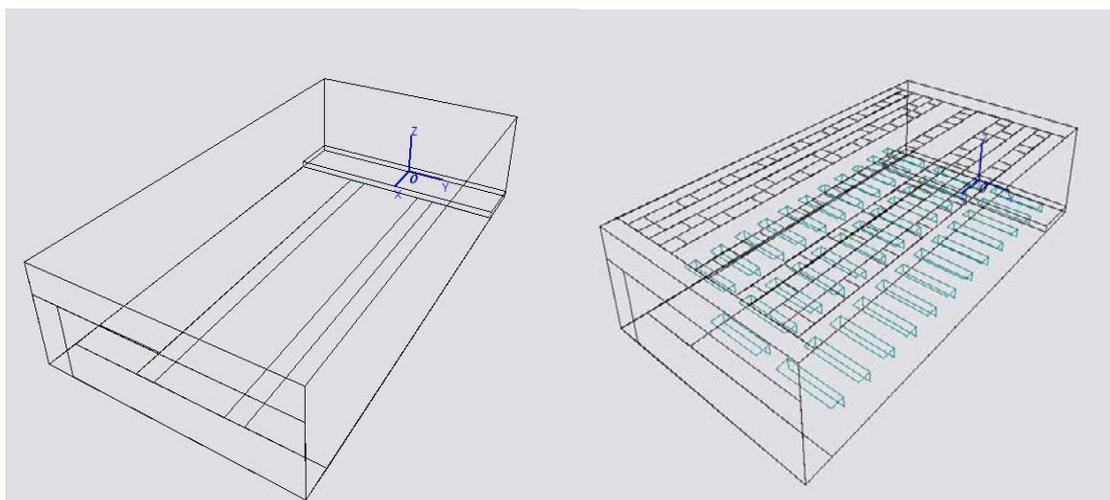


Figura 2: Recreaciones del aula JA-1 empleada en los modelos de simulación 1 y 4.

4 Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los parámetros T30, D 50, SPL y STI obtenidos experimentalmente y mediante los distintos modelos de simulación. Tras comparar numérica y gráficamente los valores medidos y los obtenidos a partir de los distintos modelos de simulación, analizaremos las conclusiones que podemos extraer mediante el estudio individualizado de cada parámetro.

4.1 T30

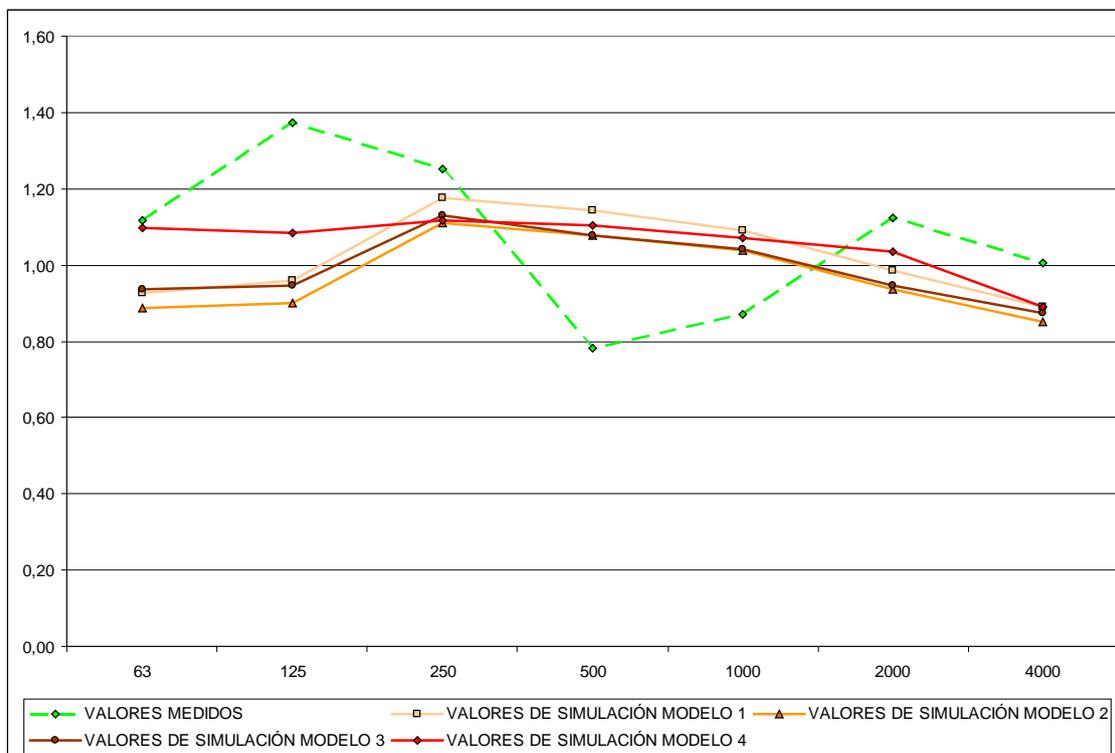
Tal y como puede observarse en la tabla 3 y en la representación gráfica de la figura 3, la inclusión de elementos como las luminarias o los dispositivos de impulsión / expulsión de aire situados en el falso techo del aula, no provoca variaciones sustanciales en lo que al tiempo medio de reverberación del aula se refiere.

Tabla 3: Valores Medios del Tiempo de Reverberación del Aula JA-1

T30(s)	Frecuencia (Hz)						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Valores Medidos	1,12	1,37	1,25	0,78	0,87	1,13	1,01
Valores de Simulación Modelo 1	0,93	0,96	1,18	1,14	1,09	0,98	0,89
Valores de Simulación Modelo 2	0,89	0,90	1,11	1,08	1,04	0,94	0,85
Valores de Simulación Modelo 3	0,94	0,95	1,13	1,08	1,04	0,95	0,87
Valores de Simulación Modelo 4	1,10	1,08	1,12	1,10	1,07	1,04	0,89

Los valores obtenidos en las distintas simulaciones no presentan diferencias superiores a los 0,1s, a excepción del modelo 4 en el que se ha introducido el mobiliario del aula, y que en este caso sí provoca que haya una menor absorción a bajas frecuencias.

Figura 3: Gráfico de los TR de los valores medidos y de simulación del Aula JA-1



Sin embargo, un aspecto que resulta de mayor relevancia es la gran diferencia que existe entre el comportamiento real del aula con respecto al TR y el comportamiento que debería tener ésta atendiendo a los modelos de simulación. Tal y como puede verse en el gráfico de la figura 3, en las frecuencias de 500 y 1000Hz, la absorción real del aula es mucho mayor que la proporcionada por los modelos de simulación. En contrapartida, a frecuencias bajas (63 y 125 Hz) la absorción del aula es mucho menor que la proporcionada por los modelos. Este comportamiento no detectado por los modelos de simulación, posiblemente tiene su origen en la gran amplitud de la cámara de aire existente por encima del falso techo. El plenum de aproximadamente 1,55 m. que separa el forjado de cubierta del falso techo del aula, provoca que el comportamiento de éste se asemeje al de una membrana, y en consecuencia actúe como un buen absorbente a frecuencias bajas.

Por otro lado, la absorción de una superficie porosa de estas características está directamente relacionada con la distancia de separación entre el material y el cerramiento rígido sobre el que se coloca, encontrando los valores máximos de absorción del material en las regiones donde la velocidad de sus partículas es mayor. Así pues, teniendo en cuenta la onda de velocidades del campo acústico, la máxima velocidad la encontraremos a distancias coincidentes con los valores de $\lambda/4$, $3\lambda/4$, $5\lambda/4$, etc. Para las frecuencias de 500 y 1000Hz obtenemos valores de 1,53m. y 1,61m. respectivamente. Estas distancias se encuentran muy próximas al 1,55m existente en el aula estudiada, y contribuyen aún más a reforzar la explicación sobre la gran absorción presente en frecuencias medias.

4.2 D50

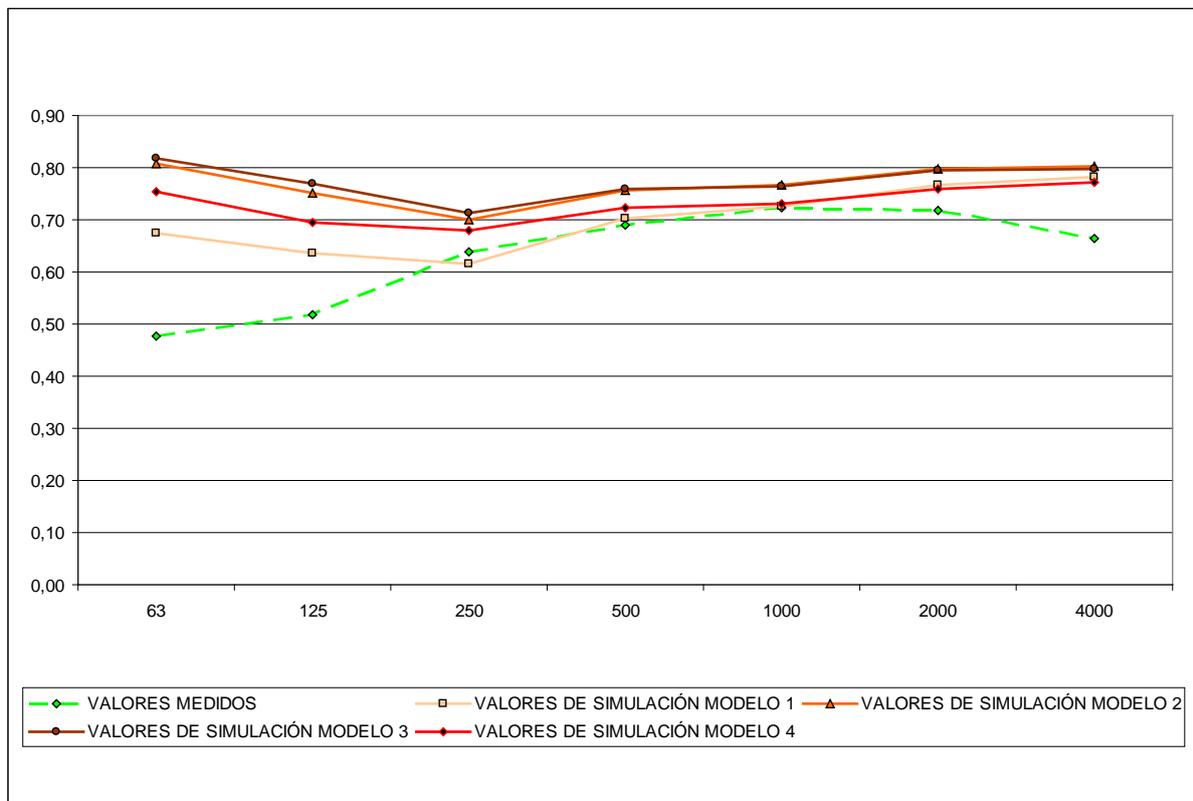
Al estudiar el comportamiento de este parámetro resulta deseable que la proporción de energía que llega durante los primeros 50 ms. desde la llegada del sonido directo (éste incluido) respecto a la energía total recibida, sea superior a 0,5 dB en todas las bandas de frecuencia. Partiendo de esta premisa, podemos afirmar que el aula estudiada presenta niveles de definición superiores a este mínimo, a excepción de la frecuencia de 63 Hz. en la que el valor experimental obtenido es de 0,49dB. No obstante, tras comparar la serie de valores utilizados, observamos que el comportamiento proporcionado por los modelos de simulación presenta diferencias considerables con respecto al obtenido en la medición experimental. Por una parte el mayor grado de definición de los modelos, no acerca los valores de simulación a los valores medidos y por otra, los 4 modelos presentan valores de D50 más elevados en frecuencias bajas (63 y 125 Hz) que en la frecuencia de 250 Hz, contrariamente a lo que ocurre con los valores medidos.

Tabla 4: Valores Medios de Definición del Aula JA-1

D 50	Frecuencia (Hz)						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Valores medidos	0,48	0,52	0,64	0,69	0,72	0,72	0,67
Valores de Simulación Modelo 1	0,67	0,63	0,62	0,70	0,73	0,77	0,78
Valores de Simulación Modelo 2	0,81	0,75	0,70	0,76	0,77	0,80	0,80
Valores de Simulación Modelo 3	0,82	0,77	0,71	0,76	0,76	0,79	0,80
Valores de Simulación Modelo 4	0,75	0,69	0,68	0,72	0,73	0,76	0,77

En lo referente a los distintos modelos utilizados, tal y como puede observarse en la tabla 4 y en la representación gráfica de la figura 4, el modelo 1 (dotado de menor grado de definición geométrica) es el que proporciona valores más similares a los valores medidos, ya que los modelos 2 y 3 a pesar de tener comportamientos similares, presentan valores superiores, que oscilan entre un 10 y un 20% de diferencia. Por lo que respecta al modelo 4, este presenta un comportamiento similar a los dos anteriores, sin embargo porcentualmente presenta diferencias menores con respecto al modelo 1. Los modelos 1 y 4, son los que más diferencias presentan en cuanto al grado de definición, sin embargo contrariamente a lo que podría esperarse de estos, presentan valores que difieren tan solo en una centésima para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz.

Figura 4: Gráfico de los valores medidos y de simulación del parámetro D 50 del Aula JA-1



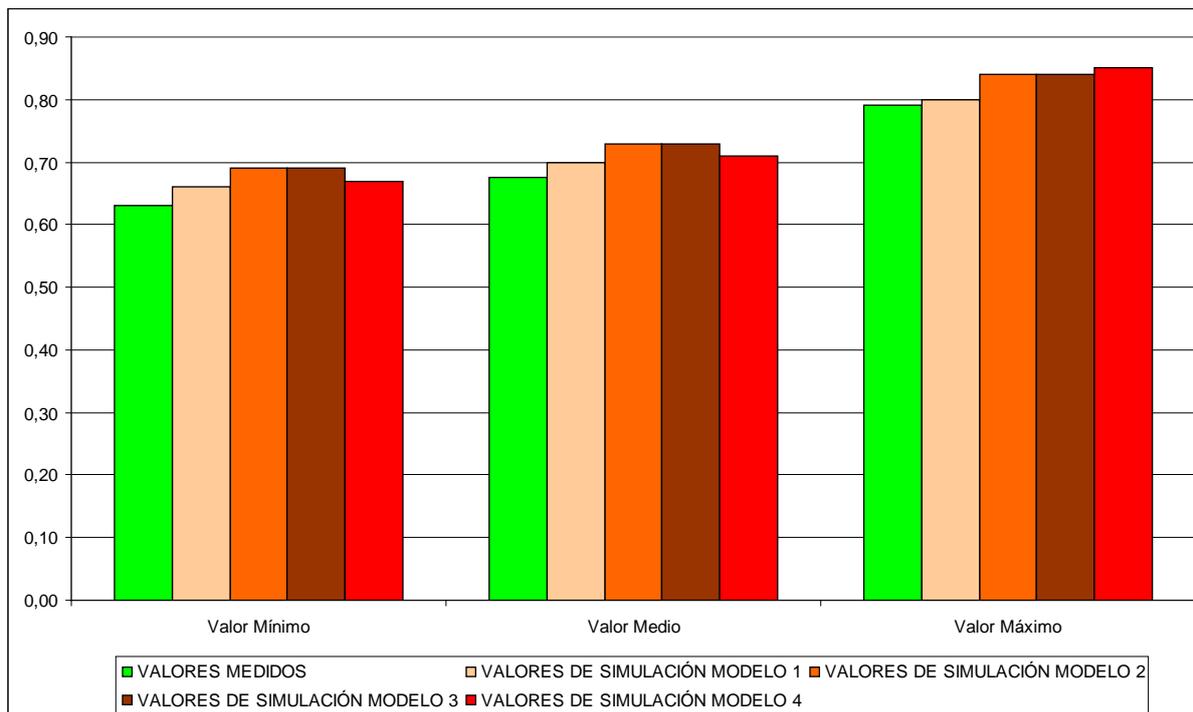
4.3 STI

Al igual que ocurre con el parámetro D50, un mayor grado de definición geométrica en los modelos, no proporciona valores de STI cercanos a los valores medidos. Tal y como puede observarse en la tabla 5 y en la representación gráfica de la figura 5, el modelo 1 (dotado de menor grado de definición) es el que proporciona valores más próximos a los obtenidos en la medición experimental, ya que los modelos 2 y 3 a pesar de tener comportamientos similares entre si presentan valores superiores. Con respecto al modelo 4, aunque su comportamiento es similar a los dos anteriores, las diferencias con respecto al modelo 1, son menores que los en otros dos modelos utilizados.

Tabla 5: Valores del STI del Aula JA-1

STI	Valores Medidos	Valores de Simulación Modelo 1	Valores de Simulación Modelo 2	Valores de Simulación Modelo 3	Valores de Simulación Modelo 4
Valor Mínimo	0,63	0,66	0,69	0,69	0,67
Valor Medio	0,68	0,7	0,73	0,73	0,71
Valor Máximo	0,79	0,8	0,84	0,84	0,85

Figura 5: Gráfico de los valores medidos y de simulación del parámetro STI del Aula JA-1



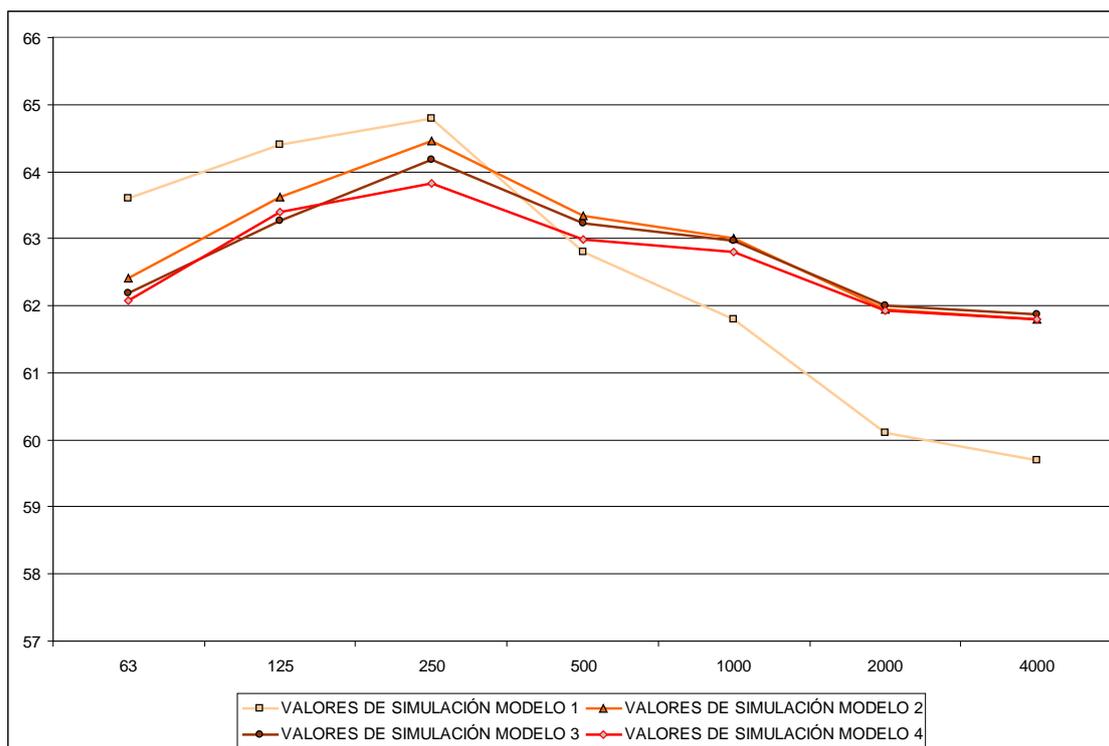
4.4 SPL

Con respecto a este parámetro, tal y como puede observarse en la tabla 6 y en la correspondiente representación gráfica de la figura 6, un mayor grado de definición geométrica de los modelos no proporciona cambios significativos con respecto a los niveles de presión sonora obtenidos. Únicamente a la frecuencia de 4000Hz encontramos una diferencia superior a 2dB entre los valores proporcionados por los distintos modelos de simulación. Diferencia que se encuentra por debajo de los 3dB que pueden resultar perceptibles (Larsen et al., 2008 y Bradley, Reich y Norcross, 1999).

Tabla 6: Valores de Nivel de Presión Sonora del Aula JA-1

SPL	Frecuencia (Hz)						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Valores de Simulación Modelo 1	63,6	64,4	64,8	62,8	61,8	60,1	59,7
Valores de Simulación Modelo 2	62,42	63,61	64,45	63,34	63,01	61,94	61,79
Valores de Simulación Modelo 3	62,19	63,27	64,17	63,22	62,98	62,01	61,88
Valores de Simulación Modelo 4	62,09	63,40	63,82	62,99	62,81	61,93	61,80

Figura 6: Gráfico de los valores de simulación del parámetro SPL del Aula JA-1



5 Conclusiones

Una vez analizados de forma individualizada los diferentes parámetros, detallaremos a continuación las diversas conclusiones que es posible extraer.

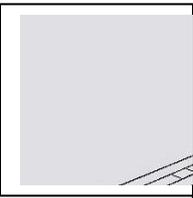
En primer lugar, podemos concluir que los tiempos de reverberación obtenidos en los modelos de simulación geoméricamente más definidos, no proporcionan valores similares a los medidos en el aula. Las grandes diferencias que existen en frecuencias bajas y medias, se debe muy probablemente a la distancia de colocación del falso techo con respecto al forjado de techo y al gran volumen que a su vez se genera por encima del aula objeto de estudio. Con respecto a los parámetros D50 y STI, una mayor definición del modelo proporciona valores más alejados de los obtenidos en la medición. En lo referente al SPL, los niveles de presión sonora obtenidos en los distintos modelos de simulación no presentan diferencias de audición perceptibles.

Por otro lado, resulta importante reseñar que el hecho de aumentar el grado de definición geométrica de los modelos de simulación, no conlleva la obtención de resultados más ajustados a los parámetros medidos, puesto que éstos no sólo dependen de la definición geométrica del modelo, sino que además es necesario considerar el comportamiento absorbente de los materiales en función de su posición.

Así pues, de cara a futuros trabajos de investigación resulta interesante plantear distintas líneas de actuación, tales como:

Simular el aula no como un único recinto, sino como la superposición de 2 volúmenes separados entre si por una membrana, que en nuestro caso sería la formada por el falso techo del aula.

Obtener la absorción real del techo del aula con la ayuda de programas de medición de la respuesta impulsiva. Este cálculo podría llevarse a cabo a partir de una metodología iterativa



o deduciendo a la absorción total del aula obtenida en la medición, las absorciones de todos los otros materiales presentes en el aula, los cuales por su naturaleza y posición no generan ningún tipo de duda a cerca de su comportamiento.

Por último, también sería interesante plantear la posibilidad de utilizar motores de cálculo alternativos a Odeon. La existencia de programas de simulación que tratan los valores de la cola reverberada de manera diferente, plantea la posibilidad de simular el recinto utilizando ambos programas, con el fin de comparar posteriormente los resultados obtenidos.

6 Referencias

Astolfi, A., Corrado, V. & Griginis, A. (2009). Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms. *Applied Acoustics*, 69, 966-976.

Bistafa, S.R. & Bradley, J.S. (2000). Predicting reverberation times in a simulated classroom *Journal of the Acoustic Society of America*, 108, 1721-1731.

Bradley, J.S., Sato, H. & Picard M. (2003). On the importance of early reflections for speech in rooms *Journal of the Acoustic Society of America*, 113, 3233 -3244.

Bradley, J.S., Reich, R. & Norcross, S.G. (1999). A just noticeable difference in C50 for speech. *Applied Acoustics*, 58, 99-108.

Hodgson, M. (1999). Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms. *Journal of the Acoustic Society of America*, 106, 1810-1819.

Hodgson, M., Rempel, R., & Kennedy, S. (1999) Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105, 226-233.

Hodgson, M. & Nosal, E.M. (2002). Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. *Journal of the Acoustic Society of America*, 111, 931-939.

Hodgson, M. (2006). Case-study evaluations of the acoustical designs of renovated university classrooms. *Applied Acoustics*, 65, 69-89.

Hodgson, M. (2009). Ray-tracing prediction of optimal conditions for speech in realistic classrooms. *Applied Acoustics*, 70, 915-920.

Larsen et al. (2008) On the minimum audible difference in direct-to-reverberant energy ratio. *Journal of the Acoustic Society of America*, 124, 450-461.

Nelson, P. (1999) The changing demand for improved acoustics in our schools. *The Volta review*, 101, 23 -31.

Tang, S.K. (2008). Speech related acoustical parameters in classrooms and their relationships. *Applied acoustics*, 69, 1318 -1331.

Zannin, P.H.C. & Coelho, A.M. (2009). Field measurements of acoustic quality in university classrooms. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 68, 1053-1057.

Correspondencia (para más información contacte con):

Ignacio Guillén Guillamón. iguillen@fis.upv.es

Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Departamento de Física Aplicada.

Universidad Politécnica de Valencia (Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, SPAIN).