



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS**

**SIMULACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL FACTOR DE MERITO GLOBAL EN
AULAS UNIVERSITARIAS EN FUNCIÓN DE SU GRADO DE OCUPACIÓN**

REFERENCIA PACS:43.55

Autores: Sanchis Mullor Francisco; Llopis Reyna Ana; Guillén Guillamón Ignacio; Gómez Lozano Vicente

Institución: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Camino de Vera s/n. CP:46020.VALENCIA.963877522. frasanm1@arqt.upv.es

ABSTRACT

The acoustic conditioning is one of the main requirements for all rooms used for speeches and conferences. For example, recently researches focus on the study and improvement for both reverberation and speech intelligibility inside classrooms. This paper proposes the usefulness of applying the Global Merit Factor (FMG) to the acoustic characterization of university classrooms. Through its application it is possible to study not only the parameters of decay, energy, space and intelligibility; but also the changes caused by the students according to their degree of occupation inside the classroom.

RESUMEN

El acondicionamiento acústico es uno de los principales requerimientos de todo recinto destinado al uso de la palabra. Sirvan como ejemplo investigaciones recientes centradas en el estudio y mejora de la reverberación o la inteligibilidad del habla en el interior de las aulas. En este sentido, el presente trabajo propone la utilidad de aplicar el Factor de Mérito Global (FMG) en la caracterización acústica de aulas universitarias. Mediante su aplicación se pretende estudiar no sólo los parámetros de decaimiento, energéticos, espaciales o de inteligibilidad; sino también las modificaciones introducidas por los estudiantes en función del grado de ocupación del aula.

1 INTRODUCCIÓN:

El estudio pormenorizado de diversos parámetros acústicos que caracterizan el comportamiento de un aula, permite obtener conclusiones en base a distintos criterios tales como de decaimiento del sonido, energéticos, de inteligibilidad, etc. Sin embargo, un análisis global de estos parámetros resulta también de gran utilidad, puesto que además de proporcionar un valor global, permite identificar cuáles son aquellos parámetros susceptibles de mejorar acústicamente el comportamiento del aula. Para tal fin, el presente trabajo ha utilizado el Factor de Mérito Global (FMG) introducido por Higini Arau.¹ con el fin de evaluar el comportamiento acústico de un recinto. Recientes trabajos, reafirman no sólo la conveniencia de reducir los niveles de reverberación en el interior de aulas universitarias, sino también la necesidad de tener en cuenta otros parámetros como el STI o la Definición (D_{50}) y de obtener un punto intermedio en el que además de controlar la reverberación se obtengan altos niveles del habla.^{3,6}

Así pues, si bien la utilidad del FMG resulta obvia para estudiar globalmente el comportamiento acústico de un aula, conviene reseñar que este factor no es aplicado a salas en vacío, puesto que analiza el comportamiento del recinto teniendo en cuenta la audiencia para la que ha sido diseñado. En este sentido la incidencia de la ocupación y más concretamente la presencia de alumnado en el interior de las aulas ha sido estudiada en investigaciones previas, las cuales recogen variaciones de un 50% en términos de reverberación, en función de que el aula se encuentre vacía u ocupada.¹⁰ Sin embargo, tal y como apuntan los primeros estudios en torno a espacios universitarios, el efecto del alumnado sobre el comportamiento acústico de un aula no puede ser considerado homogéneo; sus efectos dependen no sólo de la geometría, sino también del nivel de ruido y del tratamiento absorbente de la propia aula.^{7,8}

No obstante, a pesar de las diferencias contrastadas en diversas publicaciones, a nivel normativo es posible encontrar recomendaciones y criterios acústicos, tanto en el propio CTE como a nivel internacional, que no tienen en cuenta el nivel de ocupación del recinto. Tal y como muestra la tabla 1, el TR se define en función de la tipología o el volumen del aula, pero no se contempla ninguna variación en función del grado de ocupación del aula.

NORMATIVA	TIPOLOGIA DE AULAS	TR (s)*
Building Bulletin BB93	Escuelas de Enseñanzas medias	<0.8
	Salas de conferencias (>50 personas)	<1
ANSI S12.60	Aulas de Volumen < 283 m ³	<0.6
	Aulas de 283 m ³ < Volumen ≤566 m ³	<0.7
(CTE-DBHR)	Aulas y salas de conferencias vacías (V < 350M ³)	<0.7
	Aulas y salas de conferencias vacías, pero con butacas fijas (V < 350M ³)	<0.5

Tabla 1: Valores máximos del Tiempo de Reverberación (*TR promedio de 500Hz, 1000Hz y 200Hz)

Así pues atendiendo a la necesidad y la conveniencia de tener en cuenta la presencia del alumnado, se ha optado por utilizar las simulaciones acústicas con el fin de prever el comportamiento de un aula, sin necesidad de postergar su estudio hasta que ésta se encuentre ocupada. En consecuencia, se pretende reproducir en un modelo virtual las aulas estudiadas, de modo que sea posible incorporar en éste la audiencia para la cual se ha diseñado la sala. De este modo, la posibilidad de simular un aula en vacío o en estado de total ocupación permitirá no sólo evaluar los cambios asociados a la presencia del alumnado, sino también la posibilidad de plantear en fase de proyecto las mejoras acústicas que resulten necesarias.

2 OBJETIVOS:

- Estudiar el comportamiento acústico de las aulas universitarias aplicando el FMG.
- Construir y ajustar los modelos de simulación acústica de manera que sea posible implementar en éstos la presencia del alumnado previsto en cada caso.
- Analizar las variaciones introducidas en cada aula por la presencia del alumnado.
- Obtener un factor de mérito experimental ($*FMG_{exp}$) que permita evaluar el comportamiento previsto para el aula ocupada sin necesidad de utilizar las simulaciones acústicas.

3 METODOLOGÍA:

La metodología empleada en el presente trabajo puede subdividirse en 3 fases claramente diferenciadas. Primeramente se ha llevado a cabo la medición de los principales parámetros acústicos de las aulas estudiadas, así como la toma de datos relativa a las características geométricas y los materiales de acabado que configuran la envolvente interior de las salas.

3.1 Medición y recogida de datos

Las mediciones acústicas se han llevado a cabo utilizando el programa DIRAC 7841 de Brüel & Kjær. Por su mayor precisión e independencia del ruido de fondo en comparación con otras técnicas el método escogido ha sido el de barrido sinusoidal, también conocido como "Sweep"⁹. En lo referente al emplazamiento de la fuente y los receptores, se ha escogido la ubicación de la fuente emisora, de forma que su posición fuera asimilable a la de un orador situado en el centro de la parte delantera del aula, a una distancia mínima de 1 metro con respecto al cerramiento posterior y a 1,50m. de altura. Con respecto a la distribución de los receptores, ésta se ha realizado atendiendo a la simetría longitudinal de las aulas estudiadas; suponiendo por tanto que el comportamiento acústico del área estudiada se corresponderá con el que obtendríamos al estudiar la otra mitad de la sala. De este modo, en el lugar destinado a un oyente sentado se ha emplazado un micrófono a 1.20m. de altura sobre el nivel del pavimento. Con respecto a las condiciones de ocupación y ruidos de fondo, todas las mediciones se han llevado a cabo con las aulas completamente vacías aunque en periodos lectivos, de modo que ambas escuelas se encontraban ocupadas en todo momento por el alumnado correspondiente.

Una vez terminada la fase de medición, el proceso de análisis se ha completado con la exportación y tratamiento de los datos obtenidos in situ. Los parámetros analizados en el presente trabajo atendiendo a criterios de decaimiento han sido el EDT y el TR. Con respecto a los criterios energéticos y de inteligibilidad, el estudio de las aulas se ha llevado a cabo mediante la utilización de los parámetros D_{50} y STI, respectivamente.

3.2 Simulación acústica de las aulas

En una segunda fase, mediante la utilización del programa Autocad se han construido los modelos geométricos en 3D correspondientes a las aulas estudiadas. Dimensiones, formas, materiales y coordenadas de posición tanto de la fuente emisora, como de cada uno de los receptores medidos durante la toma de datos han sido tenidos en cuenta para confeccionar estos modelos. La tabla 2 muestra las principales características geométricas de las 2 aulas estudiadas.

Parámetro	Unidad	Aula Master ETSIE	Aula 521 ETSA
Anchura	m	7.65	8.80
Longitud	m	14.95	35.75
Altura	m	2.85	4.70
Volumen	m ³	325.9	1478.6
Superficie para el alumnado	m ²	68	196

Tabla 2: Datos geométricos de las aulas estudiadas

Una vez construidos los modelos, éstos han sido exportados al programa de simulación acústica Odeon 10·1, mediante el cual se ha reproducido el comportamiento del aula, tanto en condiciones de ausencia de alumnado, como en condiciones de ocupación. Con respecto a la simulación del grado de ocupación, siguiendo las pautas seguidas en investigaciones previas², se ha optado por modificar los coeficientes de absorción y difusión del área ocupada por el alumnado en función de que el aula se haya simulado en vacío o con presencia de alumnado. La tabla 3 recoge los diferentes coeficientes de absorción utilizados en cada caso.

Coeficientes Absorc. Área ocupada (Mobiliario+Público)	Coeficientes de Difusión (125Hz-4000Hz)	Frecuencia					
		125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Aula en vacío	0.3	0.07	0.06	0.07	0.07	0.04	0.01
Aula ocupada	0.5	0.15	0.24	0.42	0.67	0.82	0.88

Tabla 3: Coeficientes de Absorción del área ocupada por el alumnado

Con respecto a la modelización del área ocupada por el alumnado, si bien encontramos distintos criterios a la hora de introducir ésta en los modelos de simulación,^{2,5} en nuestro caso esta superficie se ha simulado mediante la superposición de ésta sobre el área del suelo del aula. En último término, ha sido necesario asignar los coeficientes de absorción y difusión de a cada una de los materiales que conforman la envolvente interior del aula. En el presente trabajo, los coeficientes de absorción asignados a los distintos materiales provienen de la base de datos proporcionada por el programa Odeon, la cual hemos complementado con datos publicados por profesionales de prestigio contrastados como Beranek, Marshall o Arau^{1,4,11}

3.3 Cálculo y análisis de la variación del FMG

Finalmente, tras analizar los datos procedentes de las mediciones in situ y las simulaciones acústicas, se ha calculado el FMG mediante el cálculo del valor promedio de los 4 parámetros estudiados. Del mismo modo se ha llevado a cabo el cálculo del *FMG_{vacío} calculado a partir de los datos del aula medida en vacío. La comparación de estas series de valores permitirá no solo analizar la variación experimentada por el FMG, sino también encontrar un FMG experimental (*FMG_{exp}) calculado a partir de los datos del aula medida en vacío, mediante el cual sea posible evaluar el comportamiento previsto para el aula ocupada por el alumnado.

4 RESULTADOS

En este apartado se incluyen los resultados obtenidos atendiendo a la metodología descrita. Así pues, tal y como muestran los gráficos 1 y 2 tras llevar a cabo las simulaciones se observa el ajuste entre las 2 curvas tonales, de modo que las diferencias del TR entre ambas series de valores (medidos y simulados) son inferiores a un 10% de los valores de la medición "in situ".

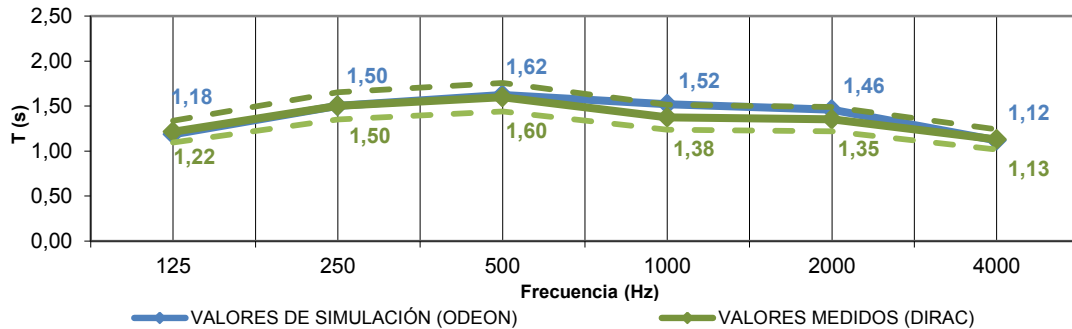


Gráfico 1: Comparativa de la curva tonal del aula Master de Tecnología (ETSIE)

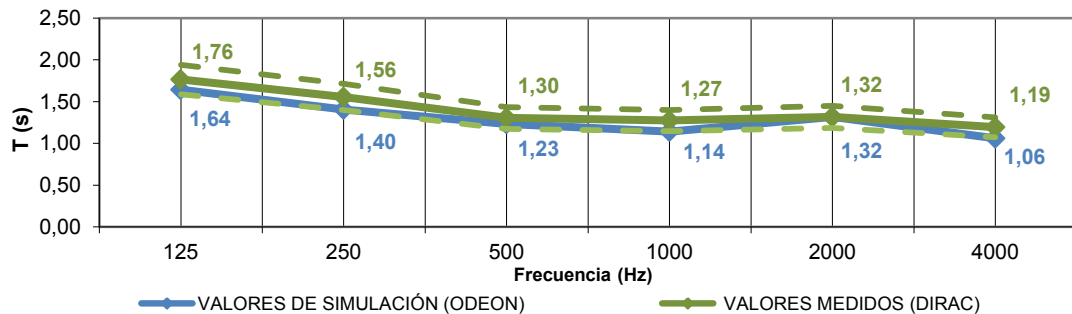


Gráfico 2: Comparativa de la curva tonal del aula 521 (ETSA)

Tras ajustar los modelos de modo que la gráfica del TR procedente de la simulación se corresponde con la curva tonal medida en el aula, se decide modificar el material del área de mobiliario, generando de este modo un modelo nuevo de simulación en el cual, a diferencia del anterior, se considera que el mobiliario del aula está ocupado por los alumnos. Los gráficos 3 y 4 muestran las curvas tonales de ambas aulas en condiciones de ocupación.

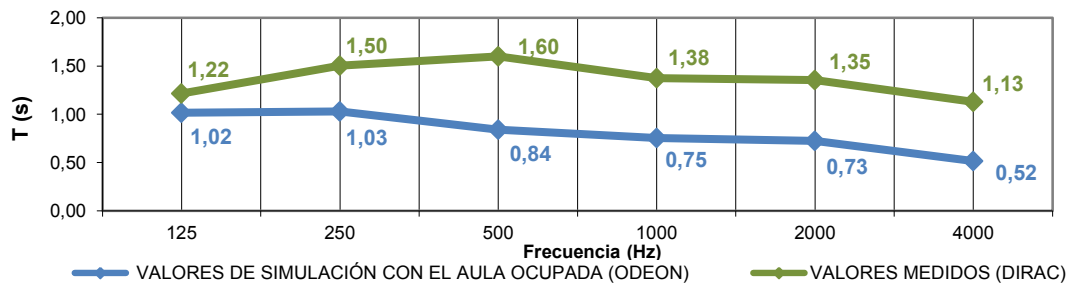


Gráfico 3: Comparativa del aula Master Tecnología (ETSIE) en condiciones de vacío y de ocupación

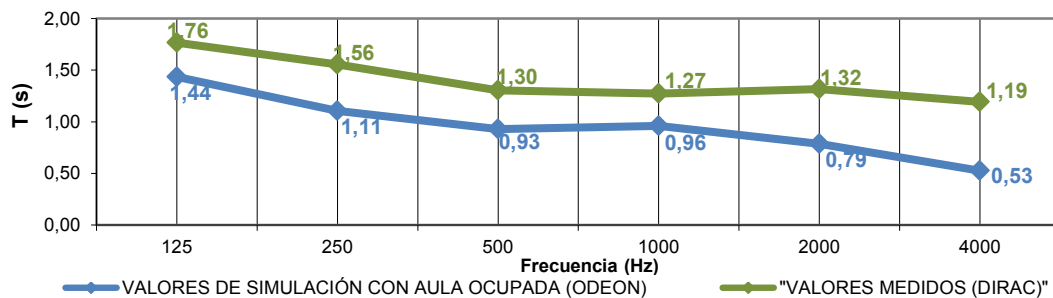


Gráfico 4: Comparativa del aula 521 (ETSA) en condiciones de vacío y de ocupación

Tal y como se observa en la tabla 4 tras finalizar el proceso de simulación, los parámetros acústicos derivados de éste son utilizados para el cálculo del FMG de ambos espacios. Del mismo modo, los valores procedentes de la medición de las aulas en vacío son utilizados para calcular el *FMG_{vacío} que correspondería a estas aulas.

		EDT	TR	D50	STI	
Aula Máster Tecnología (ETSIE)	Valores de Simulación Aula ocupada	0.76	0.80	0.60	0.68	FMG 0.82
	Factor de Mérito asociado	0.80	0.89	0.76	0.83	
Aula 521 (ETSIA)	Valores de Simulación Aula ocupada	0.78	0.95	0.73	0.69	FMG 0.94
	Factor de Mérito asociado	0.93	0.95	1	0.87	
		EDT	TR	D50	STI	
Aula Máster Tecnología (ETSIE)	Valores medios en Aula <i>en vacío</i>	1,47	1,48	0.38	0.55	*FMG_{vacío} 0.33
	Factor de Mérito asociado	0.76	0	0	0.56	
Aula 521 (ETSIA)	Valores medios Aula <i>en vacío</i>	0.78	0.95	0.73	0.69	*FMG_{vacío} 0.69
	Factor de Mérito asociado	0.97	0.26	0.88	0.65	

Tabla 4: Cálculo del FMG y del *FMG_{vacío} asociado a las aulas estudiadas

Los gráficos 5 y 6 recogen las variación experimentada por el factor de mérito asociado a los parámetros D₅₀ y STI respectivamente, en condiciones de vacío y ocupación. Atendiendo a los resultados obtenidos tanto en el caso del parámetro D₅₀ como en el del STI, los intervalos propuestos por Arau para el cálculo del factor de mérito guardan una relación con los valores obtenidos en las mismas salas en condiciones de vacío.

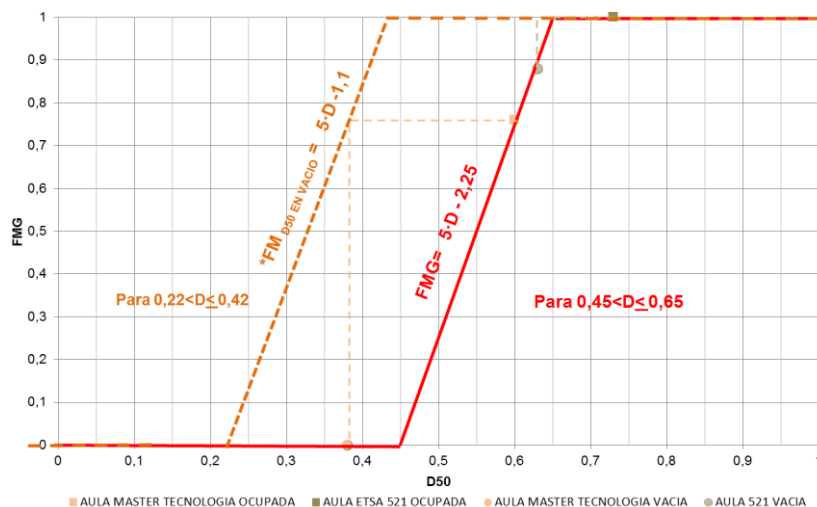


Gráfico 5: Comparativa del Factor de mérito asociado al parámetro D₅₀ en condiciones de vacío y ocupación.

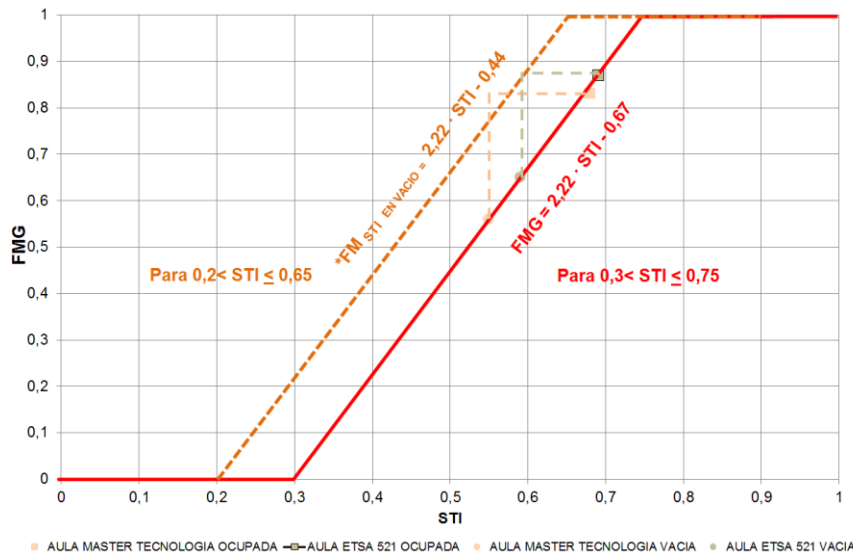


Gráfico 6: Comparativa del Factor de mérito asociado al parámetro STI en condiciones de vacío y ocupación.

Del mismo modo, en el caso del factor de mérito asociado al TR del aula, éste puede ser calculado aplicando la Fórmula de la reverberación de Sabine y el incremento de absorción introducido por el alumnado

	V (m3)	TR mid medido	Absorción (Medida)	Área Alumnado (m2)	Absorción Alumnado (500-1000Hz)	Incremento o Absorción Alumnado	TR mid Aula ocupada (SABINE)	TR mid Aula ocupada (ODEON)
Aula ETSIE M. Tecno.	349,3	1,48 s	38,47	68,40	0,55	37,28 Sabines	0,80 s	0,80 s
Aula ETSA 521	1518,2	1,29 s	191,84	196,60	0,55	107,15 Sabines	0,87 s	0,95 s

Finalmente, tras analizar las correlaciones existentes entre el factor de mérito en condiciones de vacío y ocupación, tanto para el TR como para los parámetros D50 y STI, se propone la utilización de los nuevos intervalos (Incluidos en las gráficas 5 y 6) mediante los cuales se calculará el *FMG_{exp}. La tabla 5 muestra el valor de este factor experimental, obtenido para cada parámetro, a partir de los datos medios en sala vacía. Mediante su aplicación y sin necesidad de simular las aulas, es posible correlacionar los valores medidos en sala vacía con los correspondientes valores esperados con el aula ocupada.

		Aula ETSIE M. Tecnología			Aula ETSA 521			
		*FMG	FMG	Variación	*FMG _{exp}	FMG	Variación	
D₅₀	0	D ₅₀ ≤ 0,22	0.80	0.76	0.04	1	1	0
	5 · D - 1,1	0,22 < D ₅₀ ≤ 0,42						
	1	D ₅₀ > 0,42						

		Aula ETSIE M. Tecnología			Aula ETSA 521			
		*FMG	FMG	Variación	*FMG _{exp}	FMG	Variación	
STI	0	STI ≤ 0,2	0.78	0.83	0.05	0.87	0.87	0
	2,22 · STI - 0,44	0,2 < STI ≤ 0,65						
	1	STI > 0,65						

Aula ETSIE Master Tecnología						
TR	TR _{mid} calculado Aula ocupada	TR _{mid} simulado Aula ocupada	Variación	*FMG _{exp}	FMG	Variación
	0.80	0.80	0	0.88	0.89	0.01

Aula ETSA 521						
TR	TR _{mid} calculado Aula ocupada	TR _{mid} simulado Aula ocupada	Variación	*FMG _{exp}	FMG	Variación
	0.87	0.95	0.04	1	0.95	0.05

Tabla 5: Comparativa del FMG y del *FMG_{exp} asociado a las aulas estudiadas

5 CONCLUSIONES

* El comportamiento acústico de las aulas en vacío, desde el punto de vista de la inteligibilidad de la palabra y de la reverberación está por debajo de los estándares recomendados para aulas docentes, especialmente en el caso del aula Master de Tecnología.

* La presencia de alumnado en las aulas mejora el comportamiento de éstas, aunque su incidencia resulta mayor en el aula de la ETSIE, más reverberante y de pequeño volumen.

* La aplicación del *FMG_{exp} permite relacionar los valores medidos en sala vacía con los valores esperados en sala ocupada sin necesidad de recurrir a las simulaciones acústicas, previendo así el comportamiento acústico para estos espacios en condiciones de ocupación.

Las conclusiones obtenidas en el presente trabajo deben ser ampliadas en futuras líneas de investigación. Así pues, estudiar la aplicabilidad del *FMG_{exp} en un mayor número de aulas, y utilizar distintos grados de ocupación de las aulas resultar una labor de gran interés científico.

6 BIBLIOGRAFIA

- (1) Arau H. ABC de la Acústica Arquitectónica. CEAC (Barcelona) 1999:268.
- (2) Astolfi A, Corrado V, Griginis A. Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms. Appl Acoust 2008;69(11):966-976.
- (3) Awad HS, Farag HH, Taha DS, Hanafi MA. Architectural acoustics in educational facilities: An empirical study on university classrooms in Egypt. J Acoust Soc Am 2012 2012-Sep;132(3).
- (4) Beranek LL. How they sound concert and opera halls. Acoust.Soc.Am. 1996.
- (5) Bradley JS. Computer Studies of Optimum Classroom Acoustics. Can Acoustics 1998;26(3):16-18.
- (6) Escobar VG, Morillas JMB. Analysis of Acoustical Characteristics and Some Recommendations for Different Educational Rooms. Archives of Acoustics 2011 2011;36(4).
- (7) Hodgson M. Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms. J Acoust Soc Am 1999 OCT 1999;106(4).
- (8) Hodgson M, Rempel R, Kennedy S. Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. J Acoust Soc Am 1999 JAN 1999;105(1).
- (9) Passero CRM, Zannin PHT. Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades' formulas. Appl Acoust 2010;71(12):1204-1210.
- (10) Trombetta Zannin PH, Coelho Ferreira AM. Field measurements of acoustic quality in university classrooms. Journal of Scientific & Industrial Research 2009 DEC 2009;68(12).(11)
- (11) Sanchis Mullor F; Llopis A; Guillen I; Gomez, V. 45º Congreso Español de Acústica ISBN: 978-84-87985-25-6. ISSN: 2340-7441 (Versión Digital). Murcia. España. Octubre, 2014