

## ESTUDIO PRELIMINAR DE LA CÁMARA REVERBERANTE DEL LABORATORIO DE ACÚSTICA DE LA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

PACS 43.55.Nd

Barrigón Morillas, Juan Miguel<sup>1</sup>; Ortiz Caraballo, Carmen<sup>2</sup>; Vílchez Gómez, Rosendo<sup>1</sup>; Carmona del Río, Francisco Javier<sup>1</sup>; Sánchez Domínguez, Agustín<sup>1</sup>; Cerrillo Cuenca, Carlos<sup>1</sup>; Méndez Sierra, Juan Antonio<sup>1</sup>; Gómez Escobar, Valentín<sup>1</sup>; Rey Gozalo, Guillermo<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Física Aplicada, Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Avda. de la Universidad s/n, Cáceres 10071. Tfno.: (+34) 927 25 71 95, Fax.: (+34) 927 25 72 03, correo-e: barrigon@unex.es

<sup>2</sup>Departamento de Matemáticas, Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Avda. de la Universidad s/n, Cáceres 10071. Tfno.: (+34) 927 25 71 95, Fax.: (+34) 927 25 72 03, correo-e: carortiz@unex.es

### ABSTRACT

After a construction period of more than two years, the reverberating chamber of the Acoustics Laboratory building was delivered in late 2009, on the campus of the University of Extremadura in Cáceres.

We present in this communication the results and conclusions of the characterization of the camera. Different parameters were measured: reverberation time, sound field distribution, etc.

We present also the results of the simulation, using finite elements, for the sound field in the chamber.

### RESUMEN

Tras un período de más de dos años de construcción, la cámara reverberante del edificio del laboratorio de Acústica fue entregada a finales del 2009, en el campus de la Universidad de Extremadura en Cáceres.

Presentamos en esta comunicación los resultados y conclusiones del trabajo de caracterización de la cámara. Para ello han sido medidos diferentes parámetros: tiempo de reverberación y distribución del campo sonoro, etc.

Se presentan, también, los resultados de la simulación, mediante elementos finitos, del campo sonoro en la cámara.

### INTRODUCCIÓN

Últimamente ha crecido la preocupación por la calidad acústica en la edificación. Como resultado de esta preocupación se ha producido un incremento de las exigencias legislativas

para proteger la salud del usuario frente a las molestias o enfermedades que el ruido puede producir, tal y como establece el Documento Básico (DB) HR – Protección frente al ruido.

Dentro de las novedades del mencionado documento básico, está la exigencia, para algunos tipos de recintos o de espacios, de unas condiciones mínimas de acondicionamiento acústico. Así, junto al resto de requerimientos del DB-HR, se ha producido un aumento en las necesidades de caracterizar y desarrollar acústicamente nuevos materiales y soluciones constructivas. Para contribuir al desarrollo tecnológico de la región en este aspecto, la Universidad de Extremadura (UEx) ha construido una cámara reverberante y otra de transmisión horizontal para el Laboratorio de Acústica del Departamento de Física Aplicada, situado en el campus universitario de Cáceres de la Escuela Politécnica.

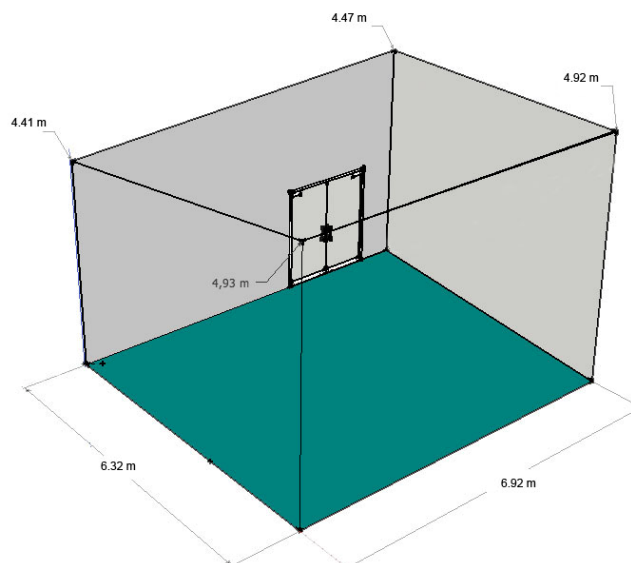
En este artículo, presentamos el primer estudio realizado para caracterizar la cámara reverberante y establecer si cumple las exigencias normativas actuales. En caso contrario, se realizarán las mejoras necesarias para alcanzar dichas exigencias. En otro de los artículos presentados en este congreso, realizamos el estudio de la cámara de transmisión horizontal.

### **CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS**

A la hora de realizar el proyecto constructivo se tuvieron en cuenta las exigencias dadas por las normas UNE-EN ISO 354:2004, UNE-EN ISO 3740:2001 y UNE-EN ISO 3741:2000.

La primera consideración que tuvo que tenerse en cuenta a la hora de diseñar la cámara fue evitar que ésta fuese paralelepípedica. Es decir, se pretendía construir una sala asimétrica, donde ninguno de sus paramentos fuese paralelo. Para ello, se levantaron paredes con alturas desiguales y formando ángulos distintos a 90°. En el caso de nuestra cámara reverberante, tenemos paredes que forman ángulos de aproximadamente 5° en dos de sus esquinas. Únicamente hay un ángulo recto en toda la sala. La figuras 1 y 2 muestran las dimensiones de la cámara.

La cámara reverberante del Laboratorio de Acústica está construida en su totalidad por hormigón visto, excepto el suelo que está recubierto con una pintura plástica para darle una mayor resistencia al uso. A la cámara se accede mediante una puerta acústica simple, como se puede ver en las figuras 1 y 2.



**Figura 1.-** Representación tridimensional de la cámara reverberante.

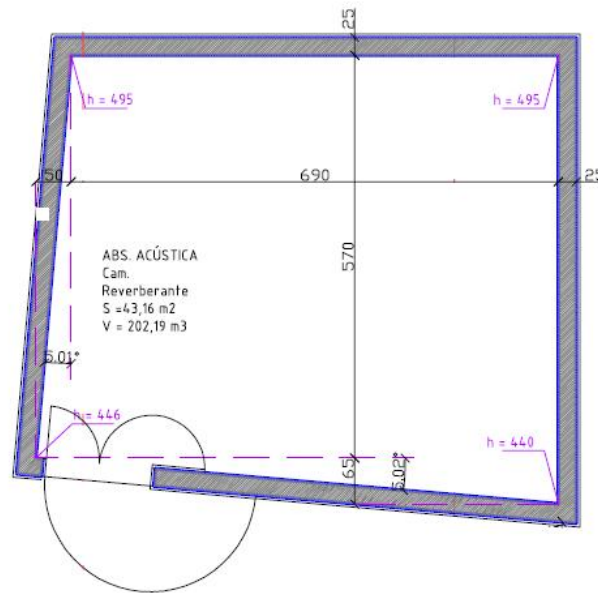


Figura 2.- Diseño de la planta de la cámara.

El volumen final de la cámara es de  $202,0 \text{ m}^3$ , con lo que cumple las exigencias de las normas antes indicadas, al ser mayor que  $200 \text{ m}^3$ . La superficie total es de  $209,9 \text{ m}^2$ .

En cuanto a las proporciones lineales, ambas normas presentan exigencias. En la tabla 1 se muestran las proporciones recomendadas por la norma UNE-EN ISO 3741: 2000, en caso de cámara rectangulares. Dado que nuestra cámara no lo es, la tabla 2 muestra los resultados para los valores máximos, mínimos y medios, comprobándose el cumplimiento de esta exigencia dentro de un estrecho margen.

Tabla 1.- Proporciones recomendadas por la norma UNE-EN ISO 3741: 2000.

$L_Y / L_X$	$L_Z / L_X$
0,83	0,47
0,83	0,65
0,79	0,63
0,68	0,42
0,7	0,59

Tabla 2.- Valores obtenidos en la cámara reverberante de la UEx.

$\frac{L_{y_{max}}}{L_{x_{max}}} = 0,85$	$\frac{L_{y_{min}}}{L_{x_{min}}} = 0,83$	$\frac{L_{y_{medio}}}{L_{x_{medio}}} = 0,84$
$\frac{L_{z_{max}}}{L_{x_{max}}} = 0,66$	$\frac{L_{z_{min}}}{L_{x_{min}}} = 0,64$	$\frac{L_{z_{medio}}}{L_{x_{medio}}} = 0,65$

Por otro lado, la norma UNE-EN ISO 354:2004 establece que se debe cumplir en una cámara reverberante, la condición  $l_{max} < 1,9 \cdot V^{1/3}$ , siendo  $l_{max}$ , la longitud del mayor segmento de recta inscrito en la cámara en metros y  $V$ , el volumen de la cámara en metros cúbicos. Dentro de una cámara reverberante el mayor segmento inscrito es la diagonal mayor. Debido al no paralelismo de los paramentos, se han medido las cuatro diagonales de la sala. La mayor diagonal en la cámara mide  $10,49 \text{ m}$ . Por tanto, como el volumen es de  $202,0 \text{ m}^3$ , se cumple esta condición:  $10,49 \text{ m} < 11,15 \text{ m}$ .

## ABSORCIÓN SONORA

Según la norma UNE-EN ISO 3741:2000, el tiempo de reverberación en cada frecuencia debe ser numéricamente mayor que el cociente entre el volumen y la superficie de la cámara. En nuestro caso, el tiempo de reverberación debe ser mayor que 0,96 s. El tiempo de reverberación se ha medido siguiendo las indicaciones de la UNE-EN ISO 354:2004. La tabla 3 muestra el tiempo de reverberación obtenido. Se comprueba que en todas las frecuencias está por encima de este valor.

**Tabla 3.-** Tiempo de reverberación en la cámara reverberante de la UEx.

Frecuencia (Hz)	T <sub>REV</sub> (s)
100	21,1
125	18,3
160	13,2
200	13,1
250	12,2
315	12,0
400	10,7
500	9,7
630	8,3
800	6,8
1000	6,2
1250	5,6
1600	4,8
2000	4,2
2500	3,6
3150	3,0
4000	2,5
5000	2,0

Además, esta norma, en su anexo D, establece que el coeficiente de absorción acústica de las superficies de la cámara reverberante debería ser lo suficientemente pequeño como para asegurar un campo reverberante adecuado, y lo suficientemente grande como para minimizar el efecto de los modos de la cámara sobre la potencia acústica producida por la fuente por debajo de una determinada frecuencia que depende del volumen. En nuestro caso esta frecuencia es de 341 Hz. En este mismo anexo, se establece que el coeficiente de absorción acústica medio de todas las superficies no debería sobrepasar 0,16 y para frecuencias superiores a  $f=341$  Hz, anteriormente calculada, el coeficiente de absorción acústica medio no debería sobrepasar 0,06. La tabla 4 muestra los valores de absorción acústica obtenidos en nuestra cámara. Como puede comprobarse, esta segunda condición no se cumple para las frecuencias de 4000 Hz y 5000 Hz, siendo un 8,3 % y 33,3 % superiores, respectivamente, al valor establecido en la norma.

Por otro lado, en la tabla 1 de la norma UNE-EN ISO 354:2004 se establecen los valores del área de absorción que no se deben superar en la cámara. Además, la gráfica del área de absorción sonora equivalente de la cámara, en función de la frecuencia, debe mostrar una curva lisa y no presentar baches ni picos que difieran más del 15% de la media de los valores de los dos tercios de octava contiguos. Los valores obtenidos en nuestro caso se muestran en la tabla 5. La figura 3 muestra el área de absorción sonora.

**Tabla 4.-** Valores del coeficiente de absorción sonora de la cámara reverberante de la UEx.

Frecuencia (Hz)	Coeficiente de absorción ( $\alpha$ )
100	0,007
125	0,009
160	0,012
200	0,012
250	0,013
315	0,013
400	0,015
500	0,016
630	0,019
800	0,023
1000	0,026
1250	0,028
1600	0,033
2000	0,038
2500	0,044
3150	0,053
4000	0,065
5000	0,080

La condición de suavidad en la curva se cumple en todos los casos. No obstante, la condición de área de absorción máxima no se cumple de nuevo para las frecuencias de 4000 Hz y 5000 Hz. Los valores máximos permitidos (después de la corrección para un volumen superior a 200 m<sup>3</sup>) son de 13,1 m<sup>2</sup> y 14,1 m<sup>2</sup>, respectivamente. Como se muestra en la tabla 5, los valores obtenidos en nuestro caso son de 13,2 m<sup>2</sup> y 16,2 m<sup>2</sup>, respectivamente: un 0,8 % superior en el primer caso y un 14,9 % en el segundo.

**Tabla 5.-** Áreas máximas de absorción sonora en la cámara reverberante de la UEx.

Frecuencia (Hz)	A (m <sup>2</sup> )
100	1,5
125	1,8
160	2,5
200	2,5
250	2,7
315	2,7
400	3,1
500	3,4
630	3,9
800	4,8
1000	5,3
1250	5,9
1600	6,8
2000	7,8
2500	9,1
3150	10,8
4000	13,2
5000	16,2

### NIVEL DE PRESIÓN SONORA

Con el objeto de conocer cómo se distribuye la señal sonora en la cámara reverberante, se han realizado medidas del nivel de presión sonora (NPS) en planos paralelos al suelo a distintas alturas. Para ello se ha dibujado en el suelo una cuadrícula con una separación de 1 metro para indicar en qué puntos hacer las medidas, también se ha dejado 1 metro de separación con las paredes para evitar el efecto de éstas en las medidas.

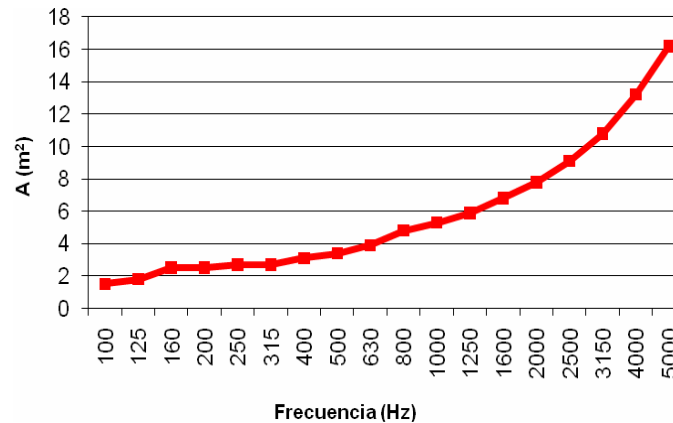
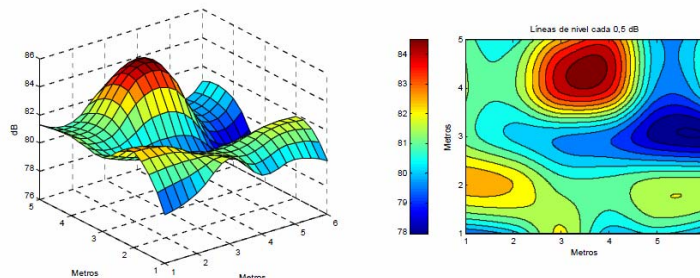


Figura 3.- Absorción sonora en la cámara reverberante de la UEx.

Las medidas se han realizado a tres alturas distintas, 1,0 m, 1,5 m y 2,0 m, de esta forma se puede ver cómo se distribuye el nivel de presión sonora en las tres dimensiones. La fuente de ruido utilizada ha sido una fuente omnidireccional con ruido rosa. Ésta siempre ha estado situada en una de las esquinas de la cámara (respectándose las distancias a las paredes antes indicado) a 2,5 metros de altura para todas las medidas realizadas. Las medidas han sido realizadas en tercios de octava, desde la banda de 25 Hz hasta la de 20.000 Hz. La duración de la medida ha sido de 1 minuto para cada punto de medición.

Las figuras 4, 5 y 6 son un ejemplo de los resultados obtenidos. La representación se ha realizado mediante una interpolación bicúbica para una mejor visualización. En las mismas figuras, junto con la representación gráfica aparece una tabla con los valores medidos en cada punto de la cuadrícula, así como el valor máximo, mínimo, diferencia entre máximo y mínimo, mediana, media y desviación estándar.



5	81.3	80.8	82.7	83.6	80.1	80.9
4	81.6	81.4	84.2	84.0	79.9	80.8
3	81.3	80.4	80.0	79.6	78.3	78.0
2	82.8	82.5	81.3	81.2	81.8	81.8
1	79.5	80.3	82.1	80.2	80.6	79.8
Metros	1	2	3	4	5	6

	Máximo	Mínimo	Diferencia	Mediana	Media	Desv. Est.
[ dB ]	84.2	78.0	6.2	81.05	81.1	1.49



Figura 4.- NPS a 1,5 m de altura. Frecuencia 100 Hz.

Se ha encontrado que a muy baja frecuencia, entre 25 y 80 Hz, aparecen máximos y mínimos, con una gran diferencia de nivel entre ellos. En estas bandas también se pueden apreciar claramente los primeros modos de vibración. En la banda de 25 Hz aparece el modo (1,0,0), en 31,5 Hz aparece el (0,1,0), en 40 Hz el (1,1,0) y en 50 Hz el (2,0,0). Al aumentar la frecuencia, el ancho de banda del análisis en tercios de octava también aumenta, por lo que, dentro de una misma banda van apareciendo más de un modo simultáneamente siendo más difícil encontrarlos gráficamente.

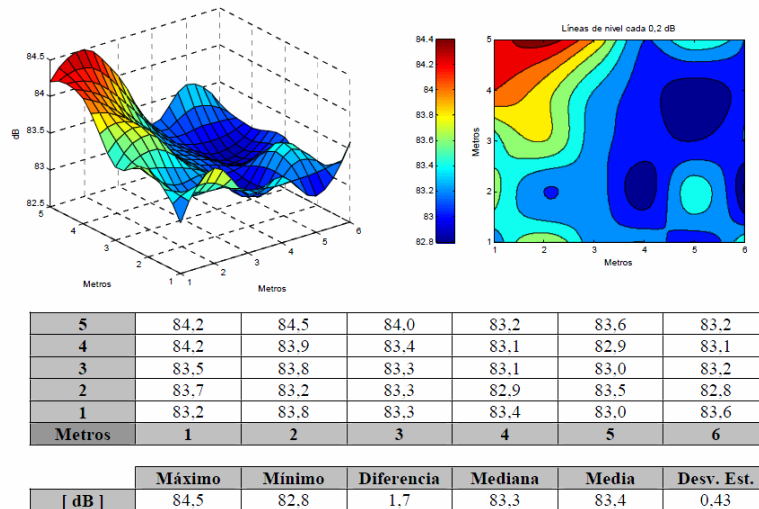


Figura 5.- NPS a 1,5 m de altura. Frecuencia 3.150 Hz.

Entre 80 y 200 Hz, las diferencias entre los niveles máximos y mínimos, baja considerablemente, estando entre 9 y 6 dB. Si seguimos aumentando la frecuencia, entre 250 y 315 Hz, estas diferencias varían entre 6 y 3 dB. A partir de 400 Hz hasta 6.300 Hz, las diferencias entre niveles de presión sonora máximos y mínimos se hace menor de 3 dB, pudiendo considerar que la cámara tiene una buena respuesta. Dentro de este rango, encontramos bandas en la que la diferencia no supera 1,5 dB, de 1.250 a 2.500 Hz y a 4.000 Hz. Incluso a 2.000 Hz la diferencia que tenemos es menor de 1 dB.

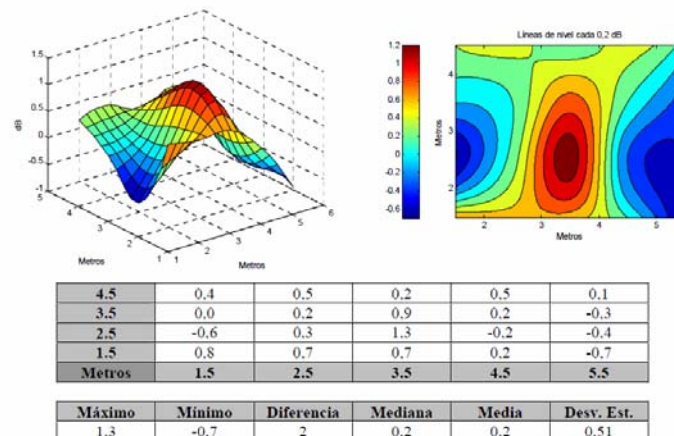


Figura 6.- Diferencia de NPS entre 1 y 2 m. Frecuencia 1.000 Hz.

Desde 8.000 hasta 20.000 Hz, las diferencias entre máximos y mínimos, suben de 3 dB. Esto es debido a que se han realizado medidas muy cerca de la fuente sonora, y para esas frecuencias y en esas posiciones, predomina el campo directo. Si no tenemos en cuenta las

medidas realizadas a menos de 2 metros de la fuente, vuelve a predominar el campo reverberante, y la diferencia entre los niveles máximos y mínimos medidos, vuelve a ser inferior a 3 dB.

## **RUIDO DE FONDO**

Las medidas de ruido de fondo se tomarán en días distintos y en horarios diferentes. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6.-** Ruido de fondo en la cámara reverberante de la UEx

Frecuencia (Hz)	RF(dB)
100	22,8
125	21,3
160	19,7
200	13,3
250	14,0
315	13,3
400	7,2
500	3,8
630	3,5
800	3,7
1000	3,8
1250	5,1
1600	5,2
2000	5,0
2500	5,8
3150	6,0
4000	6,1
5000	6,4

## **CONCLUSIONES**

Tras este estudio preliminar podemos concluir que la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica la Universidad de Extremadura cumple en general con las especificaciones exigidas en la normativa sobre los laboratorios acústicos, salvo pequeñas correcciones en frecuencias concretas.

Como se ha visto, a frecuencias inferiores a 400 Hz, la distribución del nivel de presión sonora generado por una fuente omnidireccional no es uniforme, presentando grandes valles y picos en los niveles obtenidos. Este fenómeno se agrava en las frecuencias inferiores a 80 Hz. No obstante, esto no supone un gran problema dado que tanto los ensayos para la determinación de la potencia emitida por una fuente, como los ensayos para la medición de la absorción acústica, suelen realizarse a frecuencias superiores a 100 Hz.

Por otro lado, la absorción sonora a altas frecuencias de las superficies de la cámara es mayor que la especificada en las normas para la realización de los ensayos anteriores, por lo que habría que intentar corregirla.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta cámara se ha construido con los fondos FEDER asociados al proyecto "Centro de Investigación en nuevas tecnologías aplicadas a la Ingeniería de Comunicaciones y Sociedad de la Información" del Ministerio de Educación y Ciencia (UNEX 05-25-016).



#### BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. UNE-EN ISO 354 (2004) Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante, Madrid.
- AENOR. UNE-EN ISO 3740 (2001) Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido. Guía para la utilización de las normas básicas, Madrid.
- AENOR. UNE-EN ISO 3741 (2000) Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes, Madrid.