

Condiciones acústicas de la cámara anecoica electromagnética de la Universitat de València

Jaume Segura^{*}; Raül Sanchis^{*}; Jay Amarshi^{*}; Enrique A. Navarro^{*};
Miguel Regalado^{*}; Joaquín Navasquillo^{*}; y Amando García^{*}

^{*}Laboratori d'Acústica-G.E.O.

Dpt. Física Aplicada - Universitat de València
C/ Dr. Moliner, 50 – 46100 BURJASSOT (València)
Telf: 96 386 43 45 - Fax: 96 398 31 46

^{*}Imperial College
London SW7 2BZ, Reino Unido
e-mail: Jaume.Segura@uv.es; Enrique.Navarro@uv.es

PACS 43.55.Br, 43.55.Ti

Resumen

En este artículo presentamos parte de los resultados obtenidos en un estudio sobre las características acústicas de una cámara anecoica electromagnética, con frecuencia de trabajo por encima de 1 GHz. El objetivo de dicho estudio fue evaluar las posibilidades de la cámara para su uso en medidas acústicas, es decir como cámara semianecoica acústica. Se presentan medidas de la absorción acústica de su material absorbente, medidas del tiempo de reverberación, y se analiza teóricamente con un modelo que hemos generado mediante el método de trazado de rayos. Los resultados de las medidas se comparan con los del modelo, observándose una buena concordancia.

Abstract

In this paper we present some of the results obtained in a study about the acoustic characteristics of an electromagnetic anechoic chamber, with working frequency greater than 1 GHz. The objective of the study was the evaluation of the acoustical performances of the chamber, i.e. its behavior as an acoustical semi-anechoic chamber. Measured results are presented for the absorption of the electromagnetic absorbing material, the reverberation time, and results from a model of ray tracing. A good agreement is observed between measurements and results from the ray-tracing model.

1. Introducción

Una cámara anecoica es, por definición, aquel recinto que absorbe toda la energía (según la banda energética que consideremos) que incide sobre sus paredes, por lo tanto cualquier fuente energética situada en su interior debería responder como si estuviera en el espacio libre. En el caso acústico, correspondería a una cámara con una frecuencia de corte baja, del orden de decenas de Hz, para ondas de presión. No es este nuestro caso, ya que nuestra cámara anecoica ha sido diseñada y construida para absorber ondas electromagnéticas por encima de 1 GHz. Sin embargo, dada la similitud de las placas de material absorbente, así como las existentes entre las ondas de tipo acústico y electromagnético, es interesante analizar las prestaciones acústicas de nuestra cámara, que nos permitiría realizar medidas acústicas en su interior, a parte de las electromagnéticas para las cuales ha sido construida.

Básicamente, hay dos tipos de cámaras anecoicas: las cámaras completamente anecoicas, con material absorbente en todas sus superficies (techo, paredes laterales y suelo) y las cámaras semianecoicas en las que el material absorbente recubre las paredes laterales y el techo. Para poder transitar y realizar medidas acústicas en su interior, se ha desmantelado el material absorbente que recubre el suelo, convirtiendo nuestra cámara en una cámara semianecoica.

Entre otras cosas, se ha medido el tiempo de reverberación (experimental), y a partir de él deducimos el coeficiente de absorción a distintas frecuencias, calculados utilizando

las fórmulas de Sabine y Millington-Sette (1). También se ha evaluado el aislamiento de la cámara, estimando la transmisión de potencia acústica a través de sus paredes. Por otro lado, se ha medido el coeficiente de absorción acústica del material absorbente (material absorbente de microondas). Con las medidas de los coeficientes de absorción para distintas bandas de frecuencia hemos generado un modelo de la cámara para su estudio mediante el método de trazado de rayos; en este caso utilizamos el programa EPIDAURE®(2). El modelo teórico, construido con los coeficientes de absorción experimentales, nos permite predecir el tiempo de reverberación en el interior de la sala, que posteriormente hemos comparado con medidas directas. La comparación de ambos resultados da una buena concordancia y nos permite garantizar la bondad de las medidas y del modelo realizado.

2. Método experimental

2.1. La cámara semianecoica electromagnética del G.E.O.

La cámara anecoica electromagnética del Grup de Electromagnetisme i Ones (G.E.O.) de la Universitat de València está diseñada para ser usada entre 1 y 20 GHz (i.e. para microondas), estando la frecuencia superior limitada por las prestaciones del analizador de redes vectorial HP-8510C (45MHz-20GHz). Sus dimensiones reales son 7.20x5.50x4.85 m³ y la superficie recubierta por material absorbente es de 179.28 m². Este material absorbente está constituido por una esponja de poliuretano tratada con un recubrimiento de ferrita. El coeficiente de absorción acústica de este material nos es desconocido y tampoco lo encontramos en la bibliografía (hemos tenido que calcularlo por un método que expondremos más tarde). Por otro lado, el suelo carece de material absorbente, para permitir nuestros movimientos y las medidas dentro de la cámara. Por esa razón la cámara es semi-anecoica en lo que respecta a las medidas y modelos realizados, aunque puede recuperar su carácter anecoico cuando se considere oportuno para hacer medidas con elementos estáticos.

Nuestro interés radica en comprobar si su carácter semi-anecoico puede ser extendido a las ondas de presión acústicas. Para ello nos planteamos el estudio de algunas características acústicas de la sala.

Las características acústicas y la respuesta de una cámara anecoica acústica han sido objeto de estudio en diversas ocasiones (3),(4),(5). Aquí hemos considerado la cámara semi-anecoica electromagnética como una sala normal, en la que analizamos su tiempo de reverberación, considerando éste como un parámetro que caracteriza acústicamente una sala (6).

Para ello, con el método de ruido continuo, hemos utilizado una fuente de potencia sonora BK tipo 4205, con la que podemos seleccionar bandas de ruido emitido, y una fuente sonora HP 1001 que contiene dos altavoces. Para el registro hemos utilizado el micrófono de un sonómetro BK tipo 2231 con salida directa al registrador portátil de niveles BK tipo 2317. Las medidas realizadas de la caída de 30 dB en cinco puntos de la sala nos han permitido obtener los promedios de tiempo de reverberación (T_{60dB}) para cada banda de frecuencia, que se muestran en la Tabla I, en la que se indica la frecuencia central del intervalo. Estos tiempos de reverberación medidos de forma directa, y sobre los que se realiza un pequeño tratamiento estadístico, son comparados con los tiempos de reverberación obtenidos mediante un modelo sencillo de trazado de rayos creado con EPIDAURE®. Este modelo sencillo considera la cámara como un volumen paralelepípedo, en que las paredes laterales y el techo están recubiertos de un determinado tipo de material absorbente (el material absorbente blando), estando el suelo constituido por un material duro como el mármol (terrazo). El modelo de trazado de rayos será objeto del apartado 3, y la obtención de los coeficientes de absorción utilizados se explica en 2.2.

Tabla I: Tiempo de reverberación procedente de la media de la medida en cinco puntos de la cámara, con su desviación estándar, y resultados por trazado de rayos. La frecuencia indicada es la frecuencia central de la banda de medida.

Frecuencia	T_{60dB} , (s) Experiment	Std Desviación	T_{60dB} , (s) EPIDAURE Sabine*	T_{60dB} , (s) EPIDAURE M-S*
125	0.31	0.03	0.25	0.35
250	0.26	0.02	0.20	0.3
500	0.24	0.01	0.18	0.29
1000	0.25	0.02	0.19	0.29
2000	0.25	0.03	0.19	0.29
4000	0.26	0.01	0.19	0.29
8000	0.26	0.04	—	—
Wide Band	0.27	0.03	—	—

*Hemos calculado los tiempos de reverberación mediante el método de trazado de rayos para los materiales cuyos coeficientes de absorción han sido calculados mediante las fórmulas de Sabine y Millington-Sette respectivamente.

2.2. Cálculo de los coeficientes de absorción del material absorbente

El material absorbente, presente en las paredes de nuestra cámara, es una espuma de poliuretano tratada con una capa de ferrita, que permite disipar por efecto Joule la energía de microondas incidente. Este está dispuesto en forma de pirámides sobre una placa base cuadrada, de manera que un frente de ondas electromagnéticas que incida sobre el material, será di-

vidido en las puntas de las pirámides y será absorbido paulatinamente por el volumen progresivamente en aumento de las pirámides hasta acabar sobre la superficie plana cuadrada donde se acaba de absorber (40dB de absorción en incidencia normal). El distinto tratamiento del material absorbente nos permite clasificarlo en dos tipos: absorbente duro (la capa de ferrita tiene un tratamiento que hace que su superficie sea más rígida -situado en el techo de la cámara, el carrusel, el escáner y los raíles) y absorbente blando (el tratamiento de la capa de ferrita le da una textura blanda, por lo tanto se presenta menos rígido -situado en las paredes laterales).

El método utilizado para la medida de los coeficientes de absorción del material ha sido una variación del método del tubo de impedancias. En nuestro caso hemos utilizado un tubo de PVC de 0.2 m de diámetro por 1.5 m de longitud con una tapa fija y una móvil. En él hemos medido el T_{60dB} registrando, con un pequeño micrófono omnidireccional (situado en la tapa móvil del tubo), una grabadora AKAY® y calculando con un PC y un programa realizado con MATLAB®, la caída de 60 dB de un ruido a distintas bandas de frecuencia emitido por un pequeño altavoz situado en el interior del tubo. Midiendo el T_{60dB} con el tubo sin material absorbente hemos podido obtener un ‘ajuste de cero’ para el cálculo del coeficiente de absorción del polímero. Seguidamente hemos realizado las mismas medidas para cada uno de los tipos de material absorbente obteniendo los tiempos de reverberación para cada una de las bandas de frecuencias consideradas anteriormente (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 8000 Hz). Con ellos hemos aplicado las fórmulas de Sabine (ec.1) y de Millington-Sette (ec.2) aislando y calculando el coeficiente de absorción del material (para distintas frecuencias).

$$T_{60dB} = \frac{0.161 \cdot V}{\sum_i S_i \alpha_i} \quad (\text{ec.1})$$

$$T_{60dB} = \frac{0.161 \cdot V}{\sum_i -S_i \cdot \log(1 - \alpha_i)} \quad (\text{ec.2})$$

Tabla II: Coeficientes de absorción α_i , para los materiales absorbentes de microondas (duro y blando).

	α_i (mat.absorb.duro)			α_i (mat.absorb.blando)		
	Sabine	Millington-Sette	Promedio	Sabine	Millington-Sette	Promedio
125 Hz	0.63	0.36	0.55	0.69	0.41	0.55
250 Hz	0.52	0.28	0.46	1.23	0.66	0.95
500 Hz	0.49	0.27	0.47	0.49	0.42	0.45
1000 Hz	0.77	0.47	0.27	0.53	0.31	0.42
2000 Hz	0.86	0.46	0.28	0.66	0.40	0.53
4000 Hz	0.91	0.55	0.36	1.09	0.60	0.85

Los resultados obtenidos para ambos materiales, los T_{60dB} (para el material duro y el blando), permiten deducir sus coeficientes de absorción α_i que se muestran en la Tabla II.

3. Modelo de la cámara por trazado de rayos

Para la modelización del recinto mediante el método de trazado de rayos hemos utilizado un modelo paralelepípedo sobre las dimensiones efectivas (i.e. teniendo en cuenta las dimensiones de las pirámides absorbentes y asociándolas a superficies bidimensionales eficaces) del recinto en cuestión. El modelo inicial, cuyos resultados se muestran en la Tabla I, es un modelo sencillo en que las paredes laterales y techo están constituidos por material blando, y el suelo de terrazo. Un modelo más realista también considera las partes de la pared en que existe material absorbente duro, el carro sobre el que están montados los raíles (sobre los que se mueven las antenas), el escáner (de barrido de campo próximo) y el carrusel (sobre el que se engancha la antena y sobre el cual gira), cada elemento es modelizado por una superficie 2D.

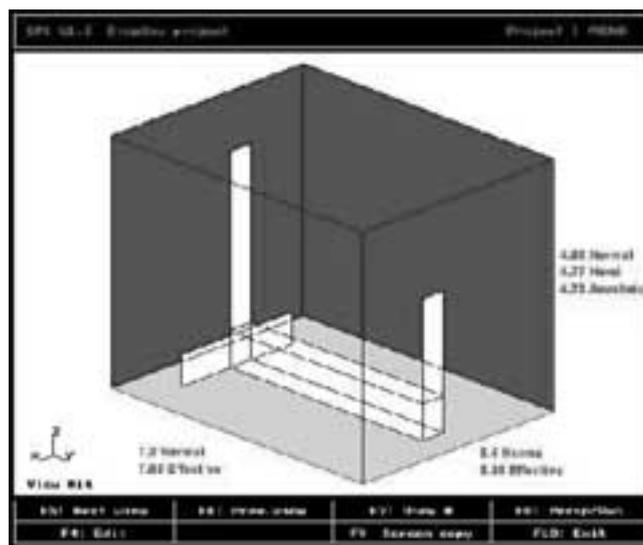


Fig.1: Modelización de la cámara utilizada para el cálculo

Hemos aplicado sobre cada superficie los coeficientes de absorción asociados al material correspondiente, es decir en el techo y el carro (raíles, escáner, carrusel) se aplican los valores del absorbente duro, para las paredes laterales los del absorbente blando y para el suelo (constituido por losetas cerámicas recubiertas por papel de aluminio -a fin de aislar electromagnéticamente el recinto-) hemos seleccionado un material con coeficiente de absorción bastante bajo (para producir una reflexión importante) como es el pavimento de terrazo, (Tabla III).

Tabla III: Absorción en pavimento de terrazo.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
α_i	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	—

Con este modelo mas realista hemos obtenido los siguientes resultados para el tiempo de reverberación dentro de la cámara semianecoica electromagnética, (ver Tabla IV).

Tabla IV: Tiempo de reverberación dentro de la cámara semianecoica electromagnética.

	T_{60dB} , Sabine (s)	T_{60dB} , Eyring* (s)	T_{60dB} , Trazado Rayos-estadístico (s)
125 Hz	0.43	0.36	0.41
250 Hz	0.32	0.24	0.29
500 Hz	0.44	0.37	0.42
1000 Hz	0.48	0.41	0.46
2000 Hz	0.39	0.33	0.37
4000 Hz	0.26	0.20	0.24

La fórmula de Eyring se obtiene a partir de la ec. 2 tomando el promedio del coeficiente de absorción, obtenemos así la siguiente expresión:

$$T_{60dB} = \frac{0.161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_E)}$$

Observamos, de la Tabla I y de la IV que la fórmula de Sabine (ec.1) sobreestima el valor del T_{60dB} , mientras que la fórmula de Millington-Sette (ec.2) lo infravalora (el de un coeficiente efectivo da lugar a la fórmula de Eyring). El valor obtenido por trazado de rayos estadístico (facilidad del EPIDAURE®) es un valor intermedio entre estos dos.

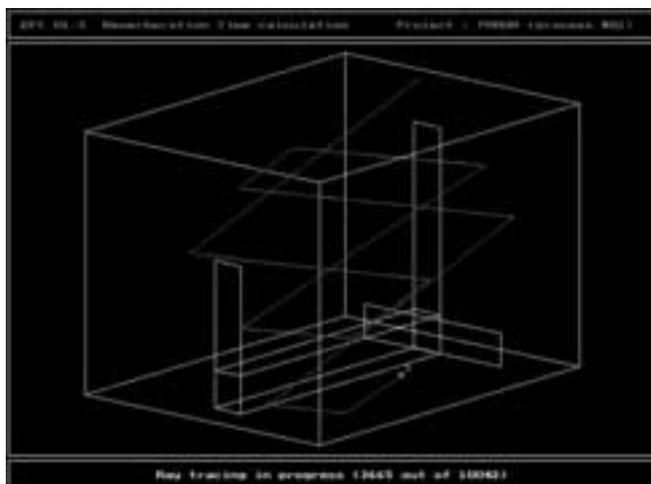


Fig.2: Modelo en funcionamiento (utilizamos 10000 rayos)

4. Discusión de resultados

El análisis de los resultados obtenidos a partir del modelo semi-analítico por trazado de rayos y los resultados experimentales nos indica una buena concordancia a fre-

cuencias bajas (para las bandas de 125, 250 Hz) y para las altas (para la banda de 4000 Hz). Para frecuencias medias (1000, 2000 Hz) los resultados divergen ligeramente, ya que para el trazado de rayos se consideran valores promediados sobre los diferentes tipos de material (material absorbente duro y blando). Pese a todo, con este modelo, más complejo que con el que trabajamos en el apartado 2.1, ya que consideramos dos tipos de absorbente –uno blando y otro menos blando -, (lo cual afecta a las condiciones de contorno del problema a la hora de considerar el modelo matemático) obtenemos errores relativos mayores que con el modelo más sencillo del apartado 2.1.

5. Aislamiento de la cámara

Seguidamente hacemos un estudio de la transmisión a través de las paredes de la cámara, para estimar su aislamiento. Basándonos en modelos energéticos, medimos la potencia sonora por unidad de superficie (intensidad) en el interior de la cámara con un micrófono de condensador omnidireccional BK 4165 y registrando con un grabador DAT de AKAY™. A continuación realizamos la misma operación en el exterior, en ambos casos utilizamos una fuente de potencia sonora BK 4205.

Volcamos ambas grabaciones digitales, de 30'' cada una, en un ordenador con el fin de convertir el fichero wave a formato ASCII. Seguidamente enviamos ambos ficheros a un Cray-Origin 2000, ya que la cantidad de datos a analizar era bastante grande (recordemos que la frecuencia de muestreo de la DAT ronda los 48000 Hz) y ejecutamos un programa MATLAB® realizado por nosotros para el cálculo del coeficiente de transmisión. Tras el cálculo, obtuvimos los resultados para el coeficiente de transmisión que se muestran en la Fig.3.

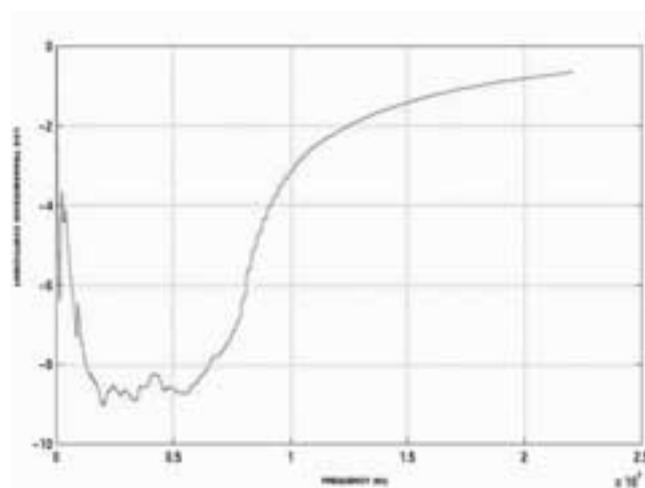


Fig.3: Logaritmo del promedio del coeficiente de transmisión a través de las paredes de la cámara

Observamos que para frecuencias superiores a 10000 Hz la transmisión de sonido es superior al 50 %. También vemos que para las frecuencias inferiores a 1000 Hz tenemos un coeficiente que llega a un 45 % en transmisión. Finalmente observamos que entre estas dos frecuencias el coeficiente de transmisión se mantiene casi constante, es decir, se transmite entre un 12 y un 14 % de la energía.

6. Conclusiones

En este trabajo hemos analizado las características acústicas de la cámara anecoica de microondas del G.E.O del Departamento de Física Aplicada de la Universitat de València. Se han medido tiempos de reverberación para caracterizar la absorción de los paneles electromagnéticos. Con el fin de verificar las medidas hemos realizado un modelo matemático con el método de trazado de rayos usando el programa EPIDAURE®. Este modelo se ha construido a partir de la determinación de los coeficientes de absorción del material absorbente, existiendo una buena concordancia entre las medidas directas realizadas y los resultados obtenidos mediante la modelización. Finalmente hemos medido el aislamiento de la cámara, obteniendo que para frecuencias inferiores a 10000 Hz el coeficiente de transmisión se mantiene por debajo del 45% y que entre las frecuencias 1000 y 10000 Hz el coeficiente de transmisión se mantiene aproximadamente constante (entre 0,12 i 0,14).

7. Agradecimientos

Este trabajo ha estado financiado en parte por la Generalitat Valenciana, proyecto GV-98-14-126.

Referencias

- (1) Kinsler, L. E, Frey, A.R. et al. (1995).- Fundamentos de Acústica. Editorial Limusa. México.
- (2) C.S.T.B. 1994 .- “Epidaure. Prediction of auditorium acoustics”.- User’s manual. Version 1.0. 0’1 dB. Villeurbanne. France.
- (3) Moreland, J.B. (1989); “Performance of Hemi-anechoic rooms for industrial applications”. Noise Control Engineering Journal. 32(1), pgs. 7-14.
- (4) Moreland, J.B. (1980); “Performance of hemi-anechoic rooms”, J. Acoust. Soc. Am., 68, S1, S26(A).
- (5) Duda, J. (1977); “Basic design considerations of anechoic chambers”. Noise Control Engineering Journal, 9, pgs. 60-67.
- (6) Recuero, M., Gil González, C. (1991).- Acústica Arquitectónica. Ed UPM. Madrid. Cap.6.
- (7) Ginn, K.B. (1978); Application of Brüel&Kjaer equipment to architectural acoustics. Brüel&Kjaer. Dinamarca.