

Reacondicionamiento y Caracterización Acústica de la Cámara de Reverberación del CIAL-UNC

C.C. Herrán, A.R. Maristany & D.A. Moyano

Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas - CIAL, Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Córdoba, CP5000, Argentina, arturo.maristany@gmail.com

RESUMEN: La cámara de reverberación del Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas de la Universidad Nacional de Córdoba, es una sala construida a principios de la década de 1960, con un volumen total de 204 m³ destinada a la medición de la absorción acústica. En los últimos tiempos se han realizado intervenciones a la misma destinadas principalmente a mejorar las condiciones de difusión del campo sonoro y corregir la presencia de modos normales en BF. Se presenta en esta ponencia los resultados del trabajo de caracterización acústica de la Cámara, la metodología utilizada y las conclusiones alcanzadas. Asimismo se exponen las intervenciones realizadas y los resultados obtenidos en la etapa final. Para la evaluación han sido medidos los Tiempos de Reverberación, la uniformidad y la distribución del Campo Sonoro. Se han incorporado y evaluado nuevos elementos difusores complementarios al difusor rotativo original de la cámara, siguiendo los criterios fijados por la ISO 354.

KEYWORDS: absorción acústica, modos normales, reverberación

1. INTRODUCCIÓN

La principal aplicación y destino práctico de una cámara de reverberación es la medición, mediante técnicas experimentales simples, del *coeficiente de absorción acústica* de materiales bajo condiciones de incidencia aleatoria (ISO 354), la evaluación de la *potencia acústica* de fuentes sonoras (ISO 3741) y el *análisis de vibraciones en sólidos* por vía aérea. Existen a nivel internacional una gran variedad de cámaras de reverberación con diferentes resoluciones formales, dimensionales, de establecimiento y difusión del campo sonoro, pero todas responden a los lineamientos básicos dados por la ISO 354:2003 [1] que permite estandarizar y validar los resultados obtenidos en los ensayos respectivos.

Diversas publicaciones a nivel internacional muestran los resultados obtenidos en la evaluación y caracterización de cámaras acústicas y las estrategias para alcanzar los objetivos de normas. En todos los casos se indican y caracterizan parámetros como: forma, volumen, superficie útil, superficie total, longitud de segmento mayor, tiempo de reverberación de cámara en vacío, suavidad y maximización de curva de absorción e identificación de modos propios [2] [3] [4] [5].

2. ANTECEDENTES DE LA CAMARA DEL CIAL

La cámara de reverberación del CIAL fue construida a fines de los años 50 en el marco de un proyecto de desarrollo de un “laboratorio de investigaciones acústicas”. La cámara original sufrió con el tiempo sucesivas modificaciones, siempre orientadas a su adaptación a nuevas normas como así también motivadas por nuevas técnicas de instrumentación que posibilitaban su análisis más detallado y requerimientos más estrictos del campo sonoro. La cámara poseía un volumen de 194 m³. En la figura 1 se muestran la conformación original, el sistema de difusión sonora estaba basado en difusor estáticos prismáticos sobre los laterales y un difusor rotativo basado en palas planas (imagen “a” de la figura 2).

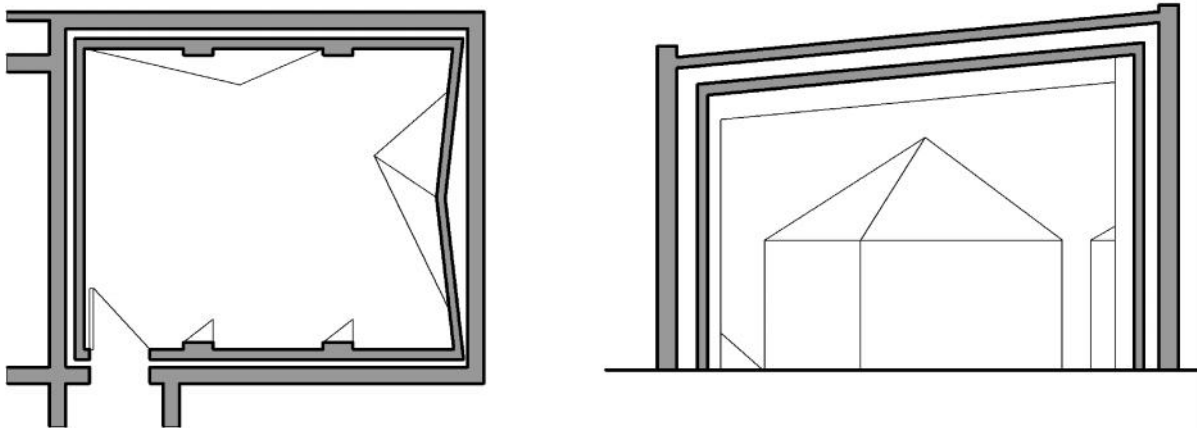
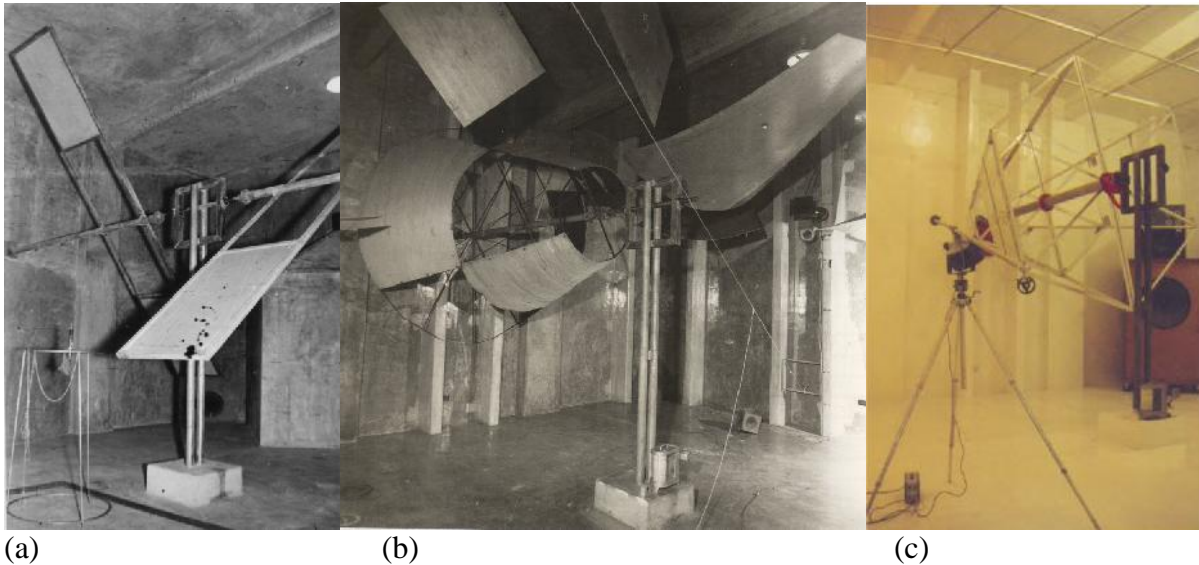


Figura 1: *Planta y corte original de la cámara – c.1960*

En los informes de evaluación realizados a la cámara en el año 1964 se observa que fue necesario realizar modificaciones estructurales que aumentarían su volumen por encima de los 200 m³ a los efectos de adecuar a las recomendaciones ISO R.477. Se informa que las irregularidades superficiales no son suficientes para dar difusión por debajo de los 500 Hz y que se complementan con el montaje de un difusor rotativo simple (elemental) y difusores estáticos. En aquel momento se observa que la cámara absorbe excesivamente en bajas

frecuencias por la falta de masa en los muros, lo cual fue corregido en una intervención realizada posteriormente.

En el año 1984 se informa de una nueva evaluación según la cual la cámara posee tiempos de reverberación por debajo de las recomendaciones de ISO 354 en las frecuencias de 125 y 250 Hz. Se procede al desmantelamiento progresivo de difusores estáticos y rotativos y de un absorbedor de bajas frecuencias instalado en años anteriores destinado a controlar modos normales. Se advierte que la tendencia es el aumento de los tiempos de reverberación a medida que son menores los elementos dejados en la cámara, pero aumentando los modos normales a bajas frecuencias. En esta oportunidad se decide suavizar la curva en bajas frecuencias reemplazando las placas del difusor rotativo original de madera terciada por placas vidrio.



(a) (b) (c)
 Figura 2: Imágenes cámara de reverberación del CIAL – (a) original, (b) modificaciones 1964, (c) modificaciones 1984

3. ESTADO PREVIO A LA INTERVENCION

Al momento de la intervención actual la cámara posee un volumen de $206,23 \text{ m}^3$, superficie de piso $46,72 \text{ m}^2$ y una superficie total de envolvente de $214,85 \text{ m}^2$. Su volumen y proporciones cumplen con lo establecido en la ISO 354:2003, la diagonal mayor ($I_{\text{max}}=10,8 \text{ m}$) es menor a $1,9V^{1/3} = 11,23 \text{ m}$. En la figura 3 se muestran las dimensiones en planta y corte de la cámara. El sistema de difusión del campo sonoro está basado, de acuerdo a las modificaciones del año 1984, en un difusor rotativo compuesto de 4 placas de vidrio de 6 mm con una superficie total de $3,34 \text{ m}^2$. El eje de la estructura está montado sobre un sistema de doble rodamiento y se acopla con un manchón al sistema motorreductor. El motorreductor está formado por un motor asíncrono trifásico de $\frac{1}{2} \text{ cv} - 1360 \text{ rpm}$ y un reductor 33:1 acoplado a un sistema de polea con relación 5,5:1 acoplado al eje del difusor, de esta forma el difusor gira a una velocidad de $7,5 \text{ rpm}$ (completa una vuelta en 8 segundos). Las paredes, piso y techo están cubiertas con pintura epoxi con muy alta capacidad de reflexión.

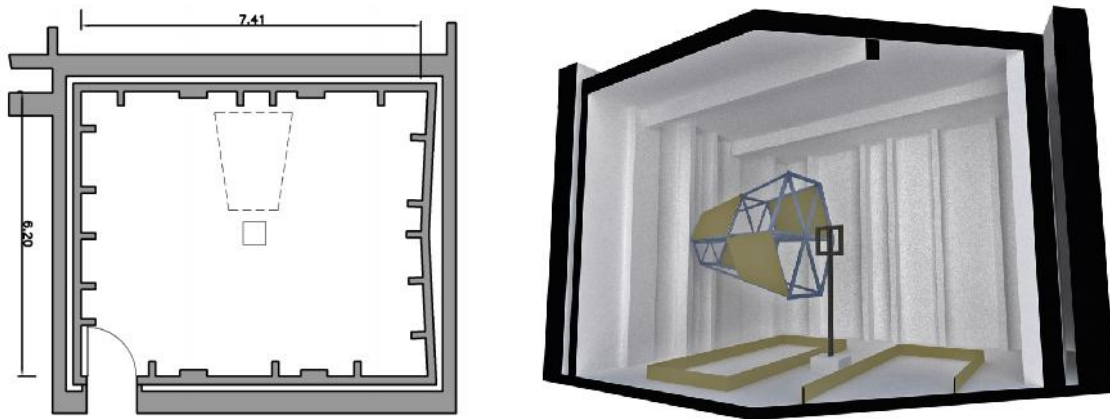


Figura 3: cámara de reverberación del CIAL – previo al reacondicionamiento

3.1 Tiempos de Reverberación – estado previo

Se midieron los tiempos de reverberación por tercio de octava de la cámara antes de los tratamientos. Los valores obtenidos se muestran en la gráfica de la figura 4. Se observa que los tiempos de reverberación en las frecuencias de 630 a 1000 Hz están por debajo o muy ajustados a la curva de referencia de la ISO 354. Asimismo se observa una diferencia muy pronunciada entre bandas adyacentes en la zona de bajas frecuencias, por encima de límite máximo dado por la ISO (15%) y con desvíos muy importantes.

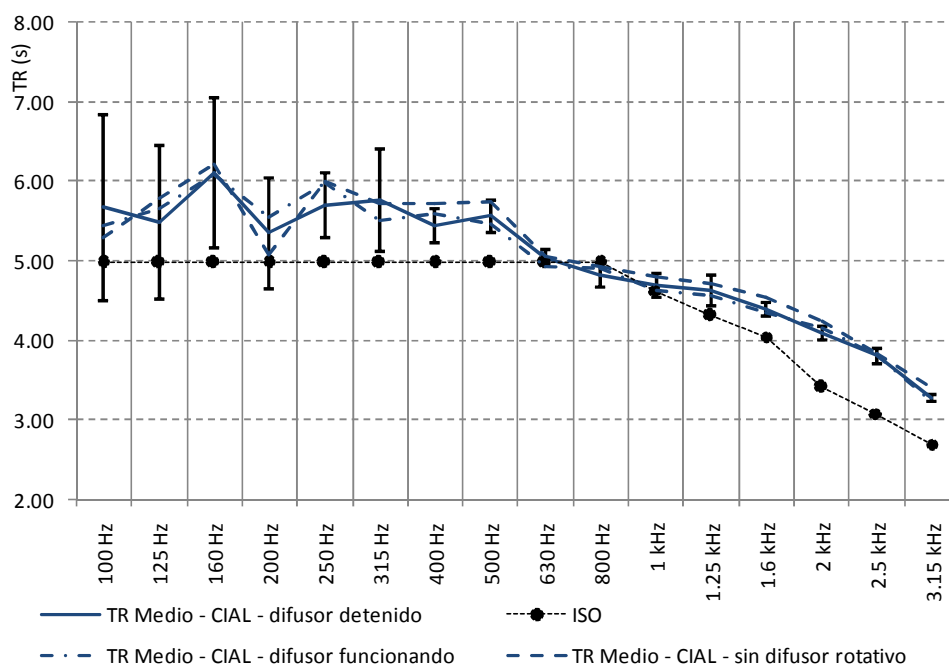


Figura 4: Tiempos de reverberación de la cámara – previo al reacondicionamiento

3.2 Modos Normales – estado previo

Es conocido que los Modos Normales presentes en un recinto se concentran en los ángulos de un local [6] [7]. Bajo este principio se realizó un análisis teórico de los modos normales en el

rango de frecuencias de 20 a 435 Hz, utilizando como herramientas una PC y hojas de cálculo con base de Excel. La figura 5 muestra el espectro de frecuencias esperado, considerando solamente modos axiales y tangenciales y los modos de propagación previstos.

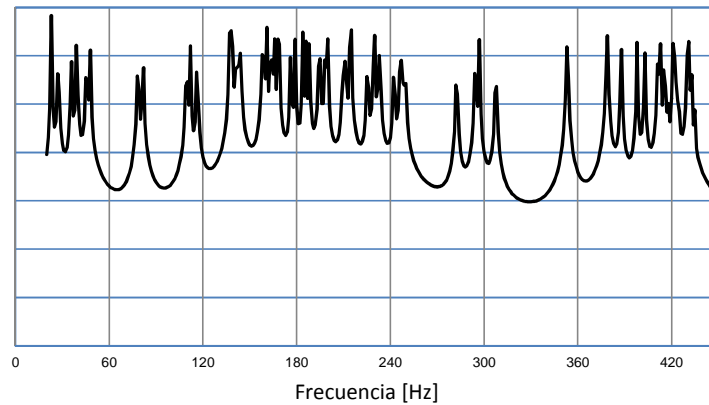


Figura 5: *Modos Normales teóricos – 20 a 435 Hz*

Para la evaluación práctica se realizaron mediciones excitando la cámara desde uno de los ángulos triedros inferiores, con un barrido de tonos senoidales de 50 a 400 Hz y una duración de 5 minutos. Durante este proceso se grabó la respuesta de la sala con un micrófono de medición con respuesta tipo omnidireccional colocado en el ángulo opuesto de la Cámara. Los resultados obtenidos mediante el análisis espectral de este barrido fueron los indicados en la gráfica de la figura 6.

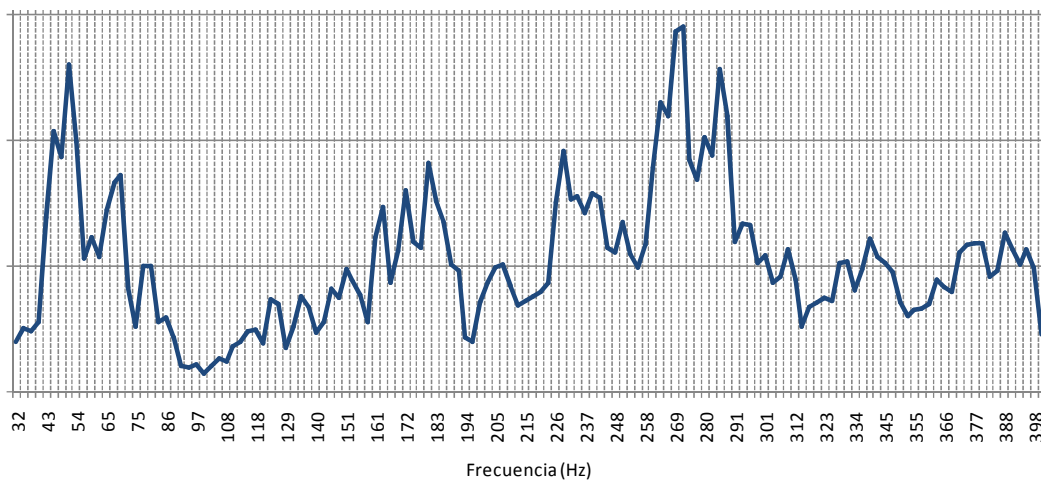


Figura 6: *Representación gráfica Modos Normales en el rango de 50 a 400 Hz*

Con el fin de explorar la distribución de campo en distintas frecuencias, se realizaron mediciones en un plano a 1,2 m del nivel del piso. En este caso la cámara fue excitada con ruido rosa. En la Figura 7, se puede observar una imagen típica, de las muchas obtenidas, de los modos normales a la frecuencia de 112 Hz (tangencial en xy) y 138 Hz axial en x (pero puede observarse la influencia en y debida a la proximidad de la frecuencia 137 Hz, que es axial en y). Las herramientas utilizadas fueron una PC y un software de aplicación especial desarrollado con este fin.

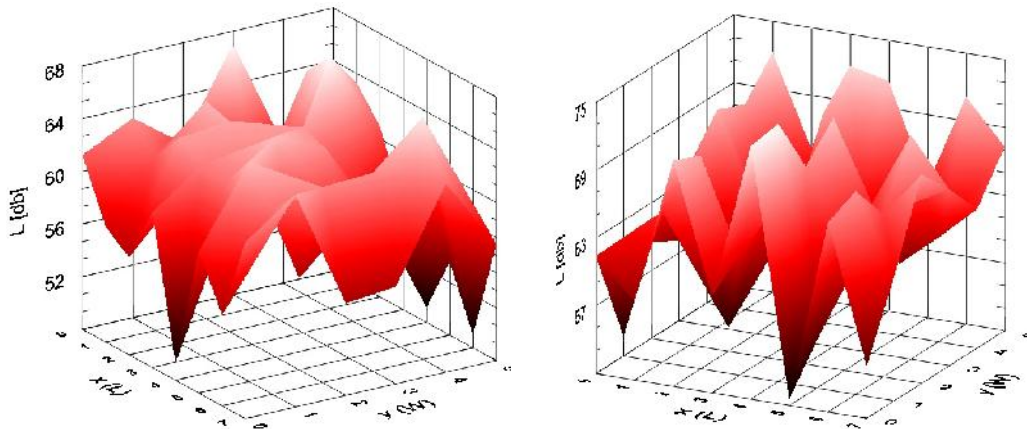


Figura 7: Modos normales 112 Hz y 138 Hz

4. MODIFICACIONES Y ADAPTACIONES REALIZADAS

Para el reacondicionamiento y ajuste de la Cámara de Reverberación del CIAL, en pos de su mejoramiento, se han seguido los criterios y recomendaciones de la ISO 354:2003. Para ajustarla a las prescripciones de esta norma, se definió un programa de dos etapas, en base a las técnicas de corrección a usar, ellas son:

- ajuste mediante la utilización de paneles difusores estáticos
- ajuste mediante la utilización del difusor rotativo provisto con nuevos paneles rígidos, con elevado amortiguamiento interno.

Para el ajuste con paneles difusores estáticos se utilizaron paneles rígidos confeccionados con placas de madera compensada fenólica de 18 mm de espesor terminado con film plastificado de ambas caras, con las siguientes medidas:

- a) Panel tipo “A” - 1.00 x 2.00 m – cantidad 2 (dos)
- b) Panel tipo “B” - 1.00 x 1.20 m – cantidad 3 (tres)
- c) Panel tipo “C” - 0.80 x 1.20 m – cantidad 3 (tres)

Estos se montaron suspendidos desde una grilla de tensores de alambres ubicada a una altura de 3,65 m. Las sucesivas mediciones del campo sonoro generado se efectuaron en 12 localizaciones determinadas dentro de la Cámara, con alturas definidas para cada una de ellas, haciendo tres rondas sucesivas del Nivel Sonoro y determinando el Tiempo de Reverberación (T20) por bandas de 1/3 de octava, con señal de excitación constituida por Ruido Rosado (Ruido de Banda Ancha).

El instrumental que se utilizó es:

- Medidor de Niveles Sonoros Brüel & Kjær 2250.
- Software para el Tiempo de Reverberación Brüel & Kjær BZ5503.
- Amplificador de Potencia Peavey CS 800.
- 2 gabinetes acústicos de 200 W

La adquisición de los datos, su procesamiento y la graficación, se efectuó con computadora y software ad hoc, con base en Excel. Las diferentes y sucesivas mediciones se llevaron a cabo adoptando distintas topologías en la distribución de los elementos mediante: cambios de posición de las fuentes sonoras y variación en la cantidad, ubicación y posición de los paneles difusores estáticos.

Para ordenar el trabajo y las mediciones se utilizaron los siguientes parámetros de guía y comparación:

- información de los Modos Normales (obtenida en el estudio previo)
- corrección de los Tiempos de Reverberación con Cámara Vacía (en especial en bajas frecuencias)
- optimización de la curva del Coeficiente de Absorción de una muestra estándar (manto de lana de vidrio, con los bordes perimetrales protegidos) según los criterios que figuran en la Norma.

En cada localización y para cada situación de estudio se efectuaron tres mediciones sucesivas con las cuales se analizaron y se graficaron los siguientes parámetros acústicos:

- Curva del Tiempo de Reverberación con Cámara vacía analizada por bandas de 1/3 octava
- Curva del Tiempo de Reverberación con Cámara con muestra estándar, analizada por bandas de 1/3 octava
- Curva del Coeficiente de Absorción con incidencia aleatoria de la muestra estándar, analizada por bandas de 1/3 octava.

En la Tabla 1 y en las figuras 8 y 9, se pueden observar las curvas finales del Tiempo de Reverberación y del Coeficiente de Absorción de la “muestra estándar”, adoptadas como parámetros base para la calibración a futuro de la Cámara de Reverberación del CIAL.

Tabla 1: *Tiempo de Reverberación Cámara Vacía - Prueba t, confianza 90% (dispersión de Student)*

	Frecuencias (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Media	7,05	6,99	7,25	7,08	7,40	7,62	7,12	6,60	5,62	5,17	4,94	4,84	4,65	4,49	4,11	3,49	2,86	2,31
DE	1,33	0,87	0,76	0,48	0,32	0,32	0,18	0,23	0,19	0,13	0,16	0,09	0,09	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04
LI(90)	6,59	6,69	6,98	6,91	7,29	7,51	7,06	6,52	5,55	5,13	4,89	4,81	4,61	4,46	4,09	3,47	2,84	2,30
LS(90)	7,52	7,29	7,51	7,25	7,52	7,73	7,18	6,68	5,68	5,22	5,00	4,87	4,68	4,52	4,14	3,51	2,88	2,33

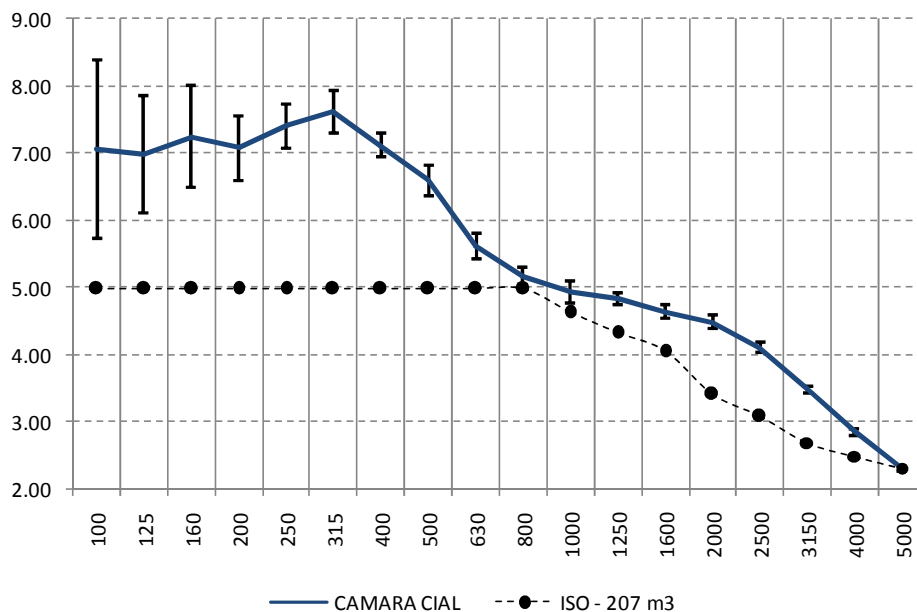


Figura 8: *Tiempo de Reverberación Cámara Vacía con indicación de desvíos y en referencia a la curva ISO*

Una vez que se obtuvieron dos situaciones acústicas con disposiciones de fuentes y paneles difusores que se acercaban a los requerimientos planteados, se procedió a realizar sendas mediciones de “definición”. El objetivo de las mismas era consolidar los resultados estadísticos mediante la ejecución de tres rondas (no sucesivas) de tres mediciones sucesivas en cada localización; esto permitió contar con una batería de 36 mediciones para cada caso, obteniéndose los valores medios y los desvíos estándar mediante la utilización de las ecuaciones pertinentes.

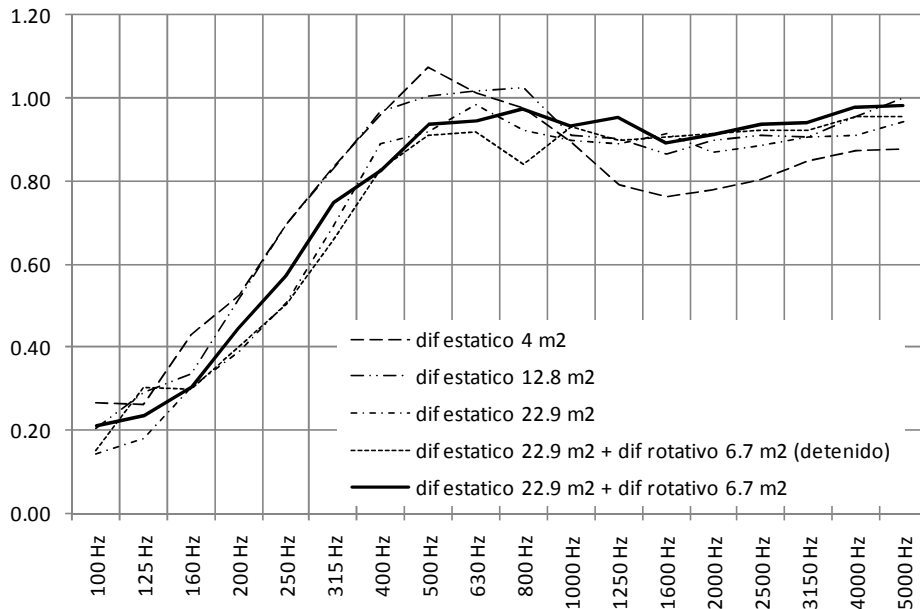


Figura 9: Coeficiente de Absorción de la “muestra estándar”

Se realizó la evaluación práctica de modos normales con la misma técnica utilizada para la evaluación inicial, en la figura 10 se muestra el resultado de esta evaluación en comparación con la condición original (sin acondicionar).

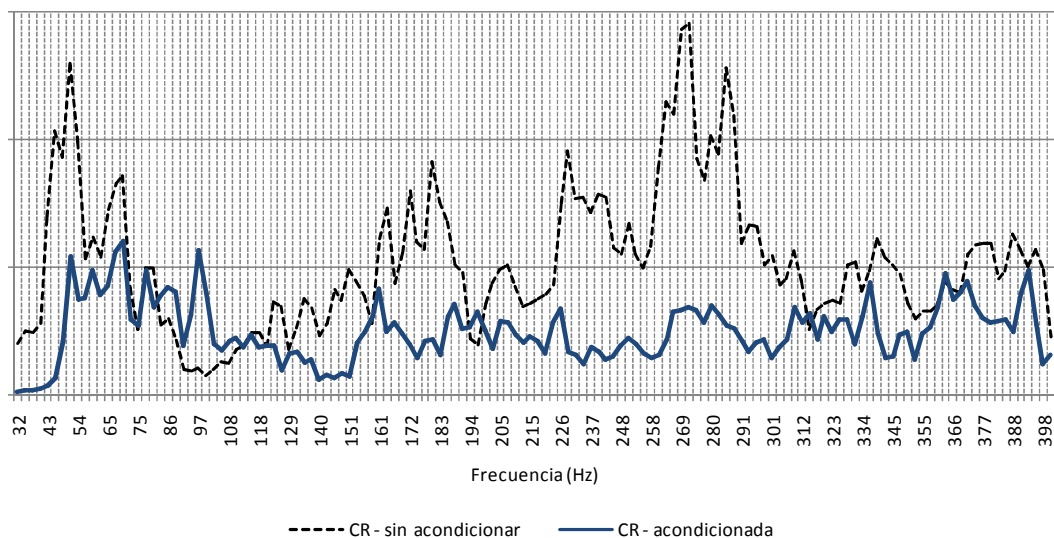


Figura 10: Representación gráfica Modos Normales en el rango de 50 a 400 Hz

Como complemento se efectuaron varias mediciones (a distintas horas y días), de los valores del Ruido Ambiente y se determinó el rango dinámico existente entre el Nivel Sonoro de Ensayo (con señal de excitación) y el valor promedio del ruido ambiente. Ellos se pueden observar en la figura 11. En la figura 12 se presentan imágenes de la cámara reacondicionada.

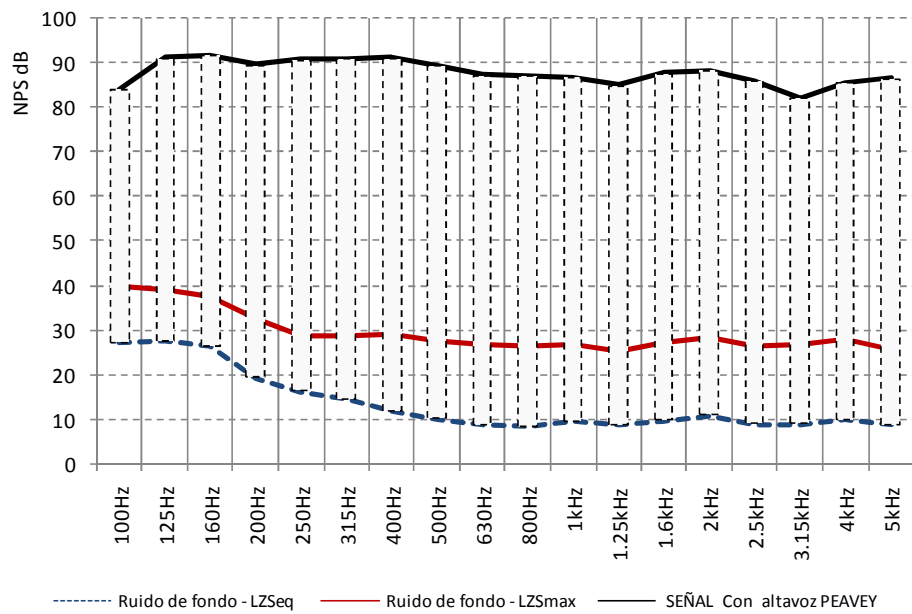


Figura 11: *Ruido de fondo y relación señal - ruido*

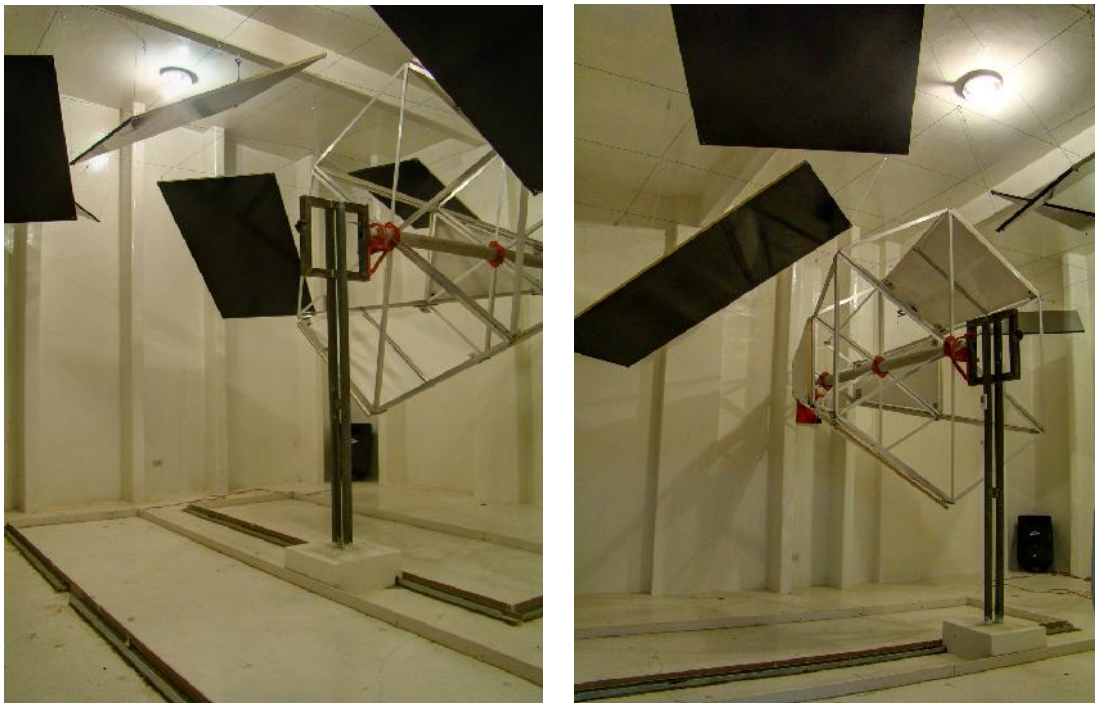


Figura 12: *Vistas de la cámara al final de los nuevos tratamientos*

5. CONCLUSIONES

En base a los trabajos realizados, se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- Se comprobó una buena correlación entre los estudios teóricos de los Modos Normales y su relevamiento físico mediante mediciones.
- Se obtuvieron variaciones muy importantes del Tiempo de Reverberación en bajas frecuencias, mediante cambios de las posiciones físicas de las fuentes sonoras.
- Los mejores resultados en la distribución del Campo Sonoro se obtuvieron con las fuentes sonoras ubicadas en sendos ángulos triedros y con la mayor separación física entre ellas.
- La cantidad de los difusores estáticos utilizados está limitada por la eventual alteración de la curva de absorción acústica de la muestra estándar, debido a la absorción propia de los mismos.
- La ubicación y posición de los paneles difusores estáticos ejerce una marcada influencia en el control de los Modos Normales y en la difusión del Campo Sonoro, en especial en el rango comprendido entre los 200 y 800 Hz.
- El Difusor Rotativo modificado, ejerció una fuerte y determinante acción correctora del Tiempo de Reverberación y en la curva de Absorción, en el rango de los 100 a 200 Hz.
- Se obtuvo un aumento importante en el valor de los Tiempos de Reverberación de Cámara Vacía en el rango de los 100 a 500 Hz

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ISO, ISO 354: 2003. Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- [2] Prieto Gajardo, C.; Barrigón Morillas, J.M.; Vílchez-Gómez, R.; Gómez Escobar, V.; Rey Gozalo, G.; Méndez Sierra, J.A. & Carmona del Río, F.J. Acondicionamiento de la cámara reverberante de la Universidad de Extremadura. VIII Congreso Ibero-americano de Acustica, Evora, Portugal (2012).
- [3] Giuliano, H.G.; Velis, A.G. & Méndez A.M. The reverberation chamber at the Laboratorio de Acústica y Luminotecnia of the Comisión de Investigaciones Científicas. Applied Acoustics, vol. 49, N°1, pp 71-83 (1996).
- [4] Lautenbach, M.R. & Vercammen, M.L.S. Volume Diffusers in the Reverberation Room. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA August 2010, Sydney, Australia (2010).
- [5] De la Colina, C.; Rodríguez, R.M.; Simón, F.; Pfretzschner, J. & Moreno, A. Caracterización actualizada de la cámara reverberante del Instituto de Acústica. TecniAcustica, Madrid (2000).
- [6] Everest, A. Master handbook of acoustics. McGraw Hill, New York, USA. (2001).
- [7] Recuero López M. Acondicionamiento Acústico. Thomson Learning. Paraninfo SA. Madrid, España. (2001).