

ESTUDIOS SOBRE EL FENÓMENO DE ANECOICIDAD EN ESPACIO REVERBERANTE

PACS: 43.55.Br

Magret Domingo, Ferran; Rossell Turull, Ivana; Arau Puchades, Higni
Enginyeria i Arquitectura La Salle, Departamento de Acústica
Paseo Bonanova, 8
08022 Barcelona. España
Tel: 932 902 476
Fax: 932 901 470
E-Mail: ivana@salleurl.edu; fmagret@appluscorp.com

ABSTRACT

This paper studies the phenomenon of anecoicity in reverberant rooms. This study is based on the theories that treat the reverberant sound field as a function of distance. After a theoretical review some measurements at different conditions are presented.

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio sobre el fenómeno de anecoicidad en salas vivas a partir de las teorías que tratan el campo reverberante como una función dependiente de la distancia. Después de una revisión teórica se presentan unas medidas y sus resultados a partir de la variación de diferentes parámetros.

INTRODUCCION

Según la teoría clásica el campo reverberante no disminuye con la distancia a la fuente y es, por lo tanto, una constante. Este hecho nos permite calcular el radio de reverberación (o distancia crítica) definido como la distancia en la que el campo directo se encuentra con el reverberante. Las teorías de M. Barron en campo difuso [2] y de H. Arau en campo no difuso [6] suponen que el campo reverberante disminuye de forma exponencial con la distancia y que en casos específicos puede suceder que el campo directo no se corte nunca con el reverberante provocando así el denominado fenómeno de anecoicidad.

A partir de estas teorías, en situaciones donde se admite que ambos campos no se cortan, se puede llegar a obtener un valor mínimo para la distancia crítica, (asociado a una directividad mínima), a partir de la cual se produce el citado fenómeno. Para distancias superiores a dicho valor, o Q superiores a la mínima asociada, la curva de campo directo no interceptará nunca la del reverberante, creándose un comportamiento de campo libre dentro de una sala viva.

1. DESARROLLO TEORICO: RADIO DE REVERBERACION EN CAMPO DIFUSO Y NO DIFUSO

Como se ha comentado en la introducción, la teoría clásica supone que el campo directo y el reverberante siempre se cortan entre ellos a una distancia llamada distancia crítica (r_c) o radio de reverberación. Según la formulación clásica esta distancia es:

$$r_c = 0.0566 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot V}{T}} \quad (1)$$

donde Q es el factor de directividad de la fuente, V es el volumen del recinto en m^3 y T es el tiempo de reverberación en segundos.

Otras teorías se oponen al supuesto de la teoría clásica y proponen un campo reverberante no constante:

A partir de la teoría de M. Barron para campo no difuso [1], igualando los términos de campo directo y reverberante se llega a la expresión siguiente:

$$\frac{Q}{r^2} = 312 \left(\frac{T}{V} \right) \cdot e^{-0.04r/T} \quad (2)$$

Tal y como se aprecia en la ecuación, el enfoque de esta teoría se basa en considerar el campo reverberante como una función exponencial decreciente con la distancia receptor-fuente. En este caso, el radio de reverberación debe encontrarse por iteración.

A partir de la expresión (2) pueden suceder dos situaciones:

- Que la curva de campo directo intercepte con la del reverberante a una distancia determinada (r_c) llamada distancia crítica.
- Que las curvas no intercepten nunca, caso que implica que el campo directo siempre estará por encima del reverberante.

Admitiendo que las curvas no se cortan, a partir de la igualdad expuesta en (2), puede determinarse su valor mínimo y hallar, así, la distancia mínima entre ambas curvas. Derivando la expresión e igualando a cero obtenemos:

$$r_{\min} = 50T \quad (3) \quad \text{y} \quad Q_{\min} = 105\,561.5209 \frac{T^3}{V} \quad (4)$$

El valor Q_{\min} expresa el factor de directividad mínimo que debe tener la fuente sonora para que el campo directo no intercepte la curva del reverberante. La distancia r_{\min} expresa, para una Q_{\min} , la distancia mínima en la que las curvas se hallan más próximas (la segunda derivada siempre es positiva).

Según Arau ([2], [3]) la ecuación para campo no difuso es:

$$\frac{Q}{r^2} = 31200 \left(\frac{T}{V} \right) \cdot \left[n \cdot e^{-0.04r/T_i} + (1-n) \cdot e^{-0.04r/T} \right] \quad (5)$$

Se aprecia un nuevo parámetro en juego T_i correspondiente al *Tiempo inmediato* o *EDT* (*Early Decay Time*). Siguiendo los pasos citados anteriormente, obtenemos, para el cálculo de la r_{\min} :

$$\frac{QV}{312T} = r^2 \cdot e^{0.04r/T_i} \left[n + (1-n) \cdot e^{0.04r} (T_i - T)/T \cdot T_i \right] \quad (6)$$

Después de varias aproximaciones, se puede llegar a una ecuación simplificada tal como:

$$r_{\min} = 50T_i \quad (7) \quad \text{y} \quad Q_{\min} = 105\,561.5209 \frac{T \cdot T_i^2}{V} \left[1 + (1-n)2(T - T_i)/T \right] \quad (8)$$

En estas expresiones aparece el factor n que representa el cociente entre la densidad de la energía sonora en el instante inicial respecto la densidad de energía sonora en estado estacionario. Se trata de la importancia entre el T_i respecto el TR60 (T). En la mayoría de los casos, el valor de n es generalmente de 0.9 lo que significa que el EDT es un 90% más importante que el tiempo de reverberación.

Después de recordar la teoría y las ecuaciones para determinar el radio de reverberación en un espacio concreto, estudiaremos, para un caso dado, como se comportan estas teorías y valoraremos la posibilidad de experimentar el fenómeno de anecoicidad en una situación real:

2. CARACTERIZACIÓN DE UNA SITUACIÓN REAL; MEDIDAS EN UNA IGLESIA:

Con el fin de contrastar los cálculos teóricos con resultados experimentales se eligió una Iglesia como escenario. Se contó con un equipo que nos permitía probar varias configuraciones.

Además de medir el nivel de presión sonora para poder determinar el radio de reverberación se obtuvieron también los parámetros y criterios acústicos siguientes: TR60, EDT, STI, C_{80} , D_{50} , G, SNR, y se realizó una simulación por software. Sólo comentaremos los resultados más importantes para el caso que nos ocupa. El análisis de estos parámetros nos sirvió para contrastar, también, el comportamiento de las teorías “modernas” frente a la teoría clásica.

2.1. Ubicación puntos de medición

El lugar escogido fue una iglesia que contaba con un volumen significativo (factor deseable), pero que resultó tener un TR60 demasiado elevado para alcanzar nuestro objetivo, como veremos más adelante.

Se distribuyeron 12 puntos de medición a lo largo de la iglesia separados cada 2 metros a partir de la fuente sonora.

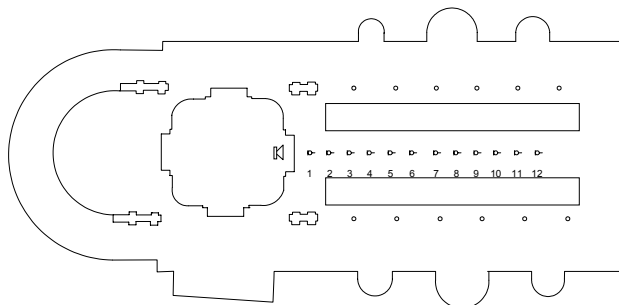


Figura 1: Distribución de los puntos de medición a lo largo de la iglesia.

2.2. Altavoces utilizados; medida de la directividad

Se utilizaron 3 altavoces con diferentes factores de directividad Q para poder hacer una comparación entre ellos. Los factores de directividad se determinaron en la cámara anecoica del Laboratorio de Acústica de La Salle con el fin de descartar posibles variaciones en los datos facilitados por los fabricantes. El primer de los altavoces era una fuente omnidireccional B&K 4296, el segundo un Amina ACC 822 E y el tercer altavoz era el que presentaba la directividad más alta y consistía en un Martin Audio AM 604 P.

Frecuencia (Hz.)	500	1000	2000	4000
Q omni	1	1	1	1
Q amina	3.74	5.66	3.35	4.38
Q martin	8.9	17.78	18	26.3

Tabla 1: Valores de directividad de cada fuente

2.3. Características de la iglesia

El volumen de la iglesia era de unos 18.985 m³ y su tiempo de reverberación, según el altavoz usado, el que se muestra en la siguiente tabla:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TR60 omni (s)	10.42	10.19	8.78	7.41	6.17	4.12
TR60 amina (s)	10.20	9.60	8.43	7.69	6.37	4.09
TR60 martin (s)	10.20	10.30	8.65	7.58	6.09	3.99

Tabla 2: Tiempo de reverberación medido con los diferentes altavoces.

Si por ejemplo analizamos el EDT y el radio crítico, para un altavoz en diferentes posiciones, observaremos como la diferencia entre EDT i TR60 no es muy significativa (no es un caso para estudiar según teoría de campo no difuso). También se observa como la distancia crítica clásica es muy similar al resto, aunque siempre, un poco inferior.

	TR60	EDT	Rc clásica	Rc difuso	Rc no difuso
Martin –pos. 2	7.58	6.03	6.94	7.05	7.08
Martin –pos. 3	7.59	7.02	6.93	7.04	7.05
Martin –pos. 4	7.73	6.19	6.87	6.97	7.00
Martin –pos. 5	7.68	6.19	6.89	7.00	7.03
Martin –pos. 6	7.71	7.13	6.88	6.98	6.99
Martin –pos. 7	7.61	7.2	6.92	7.03	7.04
Martin –pos. 8	7.69	7.01	6.89	6.99	7.01
Martin –pos. 9	7.74	7.60	6.87	6.97	6.97
Martin –pos. 10	7.83	7.70	6.83	6.92	6.92
Martin –pos. 11	7.86	7.46	6.81	6.91	6.92
Valor medio	7.69	7.37	6.88	6.98	7

Tabla 3: Diferencia entre r_c clásico, el r_c difuso y no difuso

2.4. Medida y cálculo de la Distancia crítica:

Si medimos el nivel de presión sonora a lo largo de los 12 puntos obtendremos una representación gráfica del nivel SPL en función de la distancia. De esta forma puede hallarse experimentalmente (y de manera aproximada) la distancia en la que el campo reverberante empieza a dominar sobre el nivel SPL total (distancia crítica):

Distancia crítica (m)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	dB(A)
Omni	4	5	5.5
Amina	8	7	11.5
Martin	11	14	14.5

Tabla 4: Distancia crítica medida para diferentes frecuencias y altavoces

Los cálculos y medidas del radio de reverberación a 1000Hz y 2000 Hz:

	Rc clásica	Rc difuso	Rc no difuso	Rc medido
Omni	2.94	2.95	2.96	4
Amina	6.88	6.98	7	8
Martin	12.26	12.66	12.78	11

Tabla 5: Comparación valores medidos y calculados a 1000Hz

	Rc clásica	Rc difuso	Rc no difuso	Rc medido
Omni	3.22	3.26	3.27	5
Amina	5.83	5.92	5.95	7
Martin	13.68	13.86	14.03	14

Tabla 6: Comparación valores medidos y calculados a 2000Hz

La iglesia resultó tener un tiempo de reverberación demasiado elevado, cosa que provocará, para cualquier caso, la intercepción entre campo directo y reverberante y la no aparición, obviamente, del fenómeno de la anecoicidad.

Es preciso comentar también que las medidas se realizaron en situación de campo difuso, por lo que las dos teorías (Barron y Arau) coincidían en los resultados previstos. Del mismo modo también se aprecia la convergencia en los resultados con la teoría clásica.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Fenómeno de anecoicidad

Como se ha podido comprobar en las tablas anteriores existe una distancia donde el campo reverberante se corta con el campo directo. Por lo tanto es imposible encontrar el efecto de anecoicidad.

Si realizamos algunos cálculos a partir de la ecuación (4), teniendo en cuenta que el TR60 a 1KHz es de 7,69 segundos y el volumen de la sala de 18.985 m³, la Q_{min} tendría que ser de 2532. ¿Qué significa esto?

Hablamos de encontrar un altavoz “ideal” que transmitiera un rayo sonoro en una dirección, como un láser en analogía óptica. El ángulo de cobertura que tendría el altavoz sería de 4°.

La búsqueda del efecto de anecoicidad nos obliga a disminuir el binomio TR60 / Volumen. Como se puede ver en la fórmula anterior, si aumentamos el volumen de la sala y mantenemos el TR60, la Q_{min} del altavoz también va a disminuir. Igualmente en el caso contrario cuando disminuimos el TR60 a volumen constante, la Q también disminuye.

Por lo que respecta a la r_{min} para el caso estudiado, esta adquiere un valor de 385 metros a 1000Hz. Es obvio que el recinto escogido está lejos de poder presentar el fenómeno de anecoicidad.

A continuación se muestra una tabla donde se resumen las condiciones mínimas del altavoz más directivo para que se cumpliera el efecto:

	500	1000	2000	4000
Q real	8.9	17.78	18	26.3
TR60 real (s)	8.65	7.58	6.09	3.99
Q_{min}	3416	2421	1192	338
r_{min} (m)	445	379	305	200
Ángulo de cobertura (°)*	3.5	4	6	11

Tabla 7: Condiciones mínimas para provocar el fenómeno de anecoicidad

Se puede ver que los ángulos de cobertura a conseguir son muy pequeños explicitando la imposibilidad de encontrar altavoces que reúnan estas características.

También podemos ver que la r_{min} es muy elevada respecto a la longitud máxima del recinto analizado.

4. CONCLUSIONES FENOMENO DE ANECOICIDAD

Después de los resultados experimentales podemos resumir las conclusiones finales con algunos puntos relevantes:

- La r_c clásica es siempre menor que la r_c difusa y la r_c no-difusa.
- La diferencia entre r_c clásica y difusa es pequeña para directividades bajas pero incrementa con Q a favor del caso difuso de manera significativa.
- Para el caso no difuso respecto el clásico y el difuso, para un elevado factor de directividad Q, la distancia de reverberación crece notablemente cuanto más pequeño sea el EDT.
- Los valores del radio crítico, medidos y calculados, convergen para directividades elevadas, presentando pequeñas diferencias atribuibles a la formulación propia de la teoría estadística.
- Para hallar el fenómeno de anecoicidad es importante partir de un espacio con reverberación no demasiado elevada (dentro de considerarlo un espacio vivo) y con un volumen importante. Además, deben usarse altavoces de directividades muy elevadas.

5. LÍNEAS FUTURAS:

- Buscar un escenario más idóneo para poder demostrar la teoría de la anecoicidad. Más idóneo significa que el recinto tenga un tiempo de reverberación menor y un volumen elevado.
- Buscar altavoces con índices de directividad más altos. Un ejemplo sería probar con el SB-1 de Meyer Sound que tiene un ángulo de cobertura de 10° tanto en horizontal como en vertical.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] ARAU, H.: "An improved reverberation formula", Acustica (vol.65, pàg. 163), 1998.
- [2] BARRON, M. i LEE, L.J.: "Energy relations in concert, Auditoria I", JASA (vol. 84, pàg. 618), 1998.

- [5] ARAU, H.: "General theory of the energy relations in halls with asymmetrical absorption", Building Acoustics (vol. 5, nº3), 1999.
- [6] ARAU, H.: "The anechoicity phenomenon in a live room", Forum Acousticum, Berlín, 1999. Acta Acústica (vol. 85), 1999, suppl. 1, p.S389.