

El fenómeno de la anecoicidad en una sala viva

Higini Arau Puchades

ESTUDI ACUSTIC H. ARAU. C/Travessera de Dalt 118, 3^o1^a, Barcelona (08024)

Resumen

En la presente comunicación científica demostraremos la posibilidad de conseguir un comportamiento anecoico de un recinto, que tiene poca absorción, que normalmente se le conceptúa como una sala viva. Hallaremos las relaciones matemáticas que regulan el proceso físico de este curioso fenómeno acústico, tanto en campo difuso como no difuso, y emitiremos conclusiones de interés práctico.

Introducción

Como continuación de las publicaciones [1], [2], [3], que tratan acerca de la influencia del radio de reverberación r_c sobre la densidad de la energía estacionaria de un recinto y donde emitimos debe utilizarse un nuevo método de cálculo del radio de reverberación r_c , tanto para campo difuso y no difuso, que se determinaba por iteración a partir de la igualdad entre los componentes de campo sonoro directo y reverberado, ahora trataremos una cuestión más conspicua e interesante que

aborda, en contra de lo esperado por la teoría clásica, el fenómeno de que las curvas del campo sonoro directo y reverberado nunca se intercepten.

Esto, como veremos, determinará la posibilidad de obtener un comportamiento anecoico de una sala calificada corrientemente como una sala viva, por lo que veremos que la directividad de la fuente sonora tendrá un papel fundamental, como es lógico, dentro del conjunto de variables que participan en este fenómeno acústico.

Desarrollo teórico: comportamiento en campo sonoro difuso

Recordemos que el radio de reverberación r_c se calcula en la teoría clásica a partir de la siguiente expresión:

$$r_c = (1/312)^{1/2} (QV / T)^{1/2} = 0.0566 (QV / T)^{1/2} \quad (1)$$

Donde Q es el factor de directividad de la fuente sonora, V el volumen del recinto (m^3) y T el tiempo de reverberación (s).

En la teoría clásica se ocurre que la curva de campo sonoro directo siempre corta la del campo sonoro reverberado que se supone constante.

En nuestra teoría [1] y [2] indicamos que en condiciones de campo difuso el radio de reverberación tenía que calcularse por iteración a partir de la siguiente expresión:

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

en donde observamos que el campo reverberado, de acuerdo con Barron-Lee [4], depende de una función exponencial decreciente con la distancia receptor-fuente y por tanto no es constante como contempla la teoría clásica.

Analizando la expresión (2) se determina existen dos situaciones:

Que la curva del campo directo corte a la del campo reverberado a una distancia que denominamos radio de reverberación, r_c .

Que ambas curvas no se intercepten nunca.

Si la curva del campo directo no corta a la curva del campo reverberado significa que la primera siempre será más energética que la segunda por lo que, en el gráfico densidad energía-distancia, el campo sonoro directo estará por encima del campo reverberado a cualquier distancia de la fuente, por lo que habremos conseguido obtener una anecoicidad del sonido en una sala que podamos estimar reverberante. Esto implicará que la inteligibilidad del sonido incluso pueda calificarse de buena, o bien excelente, a pesar de la pésima condición de reverberación que pueda tener el recinto.

Admitiendo que ambas curvas no se corten, intentaremos determinar a qué factor de directividad mínimo de la fuente y a qué distancia mínima ambas

Factor de Directividad (Q)	Radio de reverberación r_c	
	Clásico (1)	Difuso (2)
1	5.66	6.01
5	12.66	14.65
15	21.92	29.42
25	28.30	43.91
35	33.49	62.69
42.2244	36.78	99.7
50	40.02	-
75	49.02	-
100	56.60	-

Tabla 1: Análisis del radio de reverberación r_c

(-) significa que la curva del campo sonoro directo no corta a la curva del campo sonoro reverberado.

curvas se hallan más próximas. Cualquiera otro valor de Q superior a Q_{\min} mantendrá el campo directo con mayor contenido energético que el campo reverberado.

Así, a partir de la expresión (2), podemos escribir una función $f(r)$, que vale:

$$f(r) = e^{0.04r/T} / r^2 = 312 T / QV \quad (3)$$

Hallando la primera derivada de la expresión (3), obtenemos:

$$f'(r) = ((0.04 r / T) - 2) e^{0.04r/T} / r^3 = 0$$

de donde se deduce que r , llamada r_{\min} , vale:

$$r_{\min} = 2T / 0.04 = 50T \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en la expresión (3), obtendremos que Q , llamada Q_{\min} , es:

$$Q_{\min} = 312 \cdot 4T^3 / (0.04^2 e^2 V) = 105 561.5209 T^3 / V \quad (5)$$

La distancia r_{\min} y el factor de directividad Q_{\min} , determinados a través de las expresiones (4) y (5) respectivamente, significan:

1. El factor Q_{\min} expresa el factor de directividad mínimo que debe tener la fuente sonora para que el campo sonoro directo no intercepte a la curva del campo reverberado.

2. La distancia r_{\min} expresa, para una Q_{\min} , y siempre a igualdad de V y T , la distancia mínima en que se produce que las curvas de campo directo y reverberante se hallen más próximas sin cortarse. (Obsérvese que $f''(r)$ para $r = r_{\min}$ es siempre positiva).

En consecuencia se obtiene que para cualquier otro factor de directividad de la fuente sonora Q que sea superior, o igual, a Q_{\min} , a igualdad de volumen V del recinto y del tiempo de reverberación T , las curvas del campo sonoro directo y reverberado nunca se interceptarán por lo que obtendremos que la curva del campo sonoro directo siempre será mayor, o sea más energética, que la curva del campo reverberado. Lo que producirá una respuesta anecoica del sonido en un recinto que

puede tener un elevado tiempo de reverberación.

Estudio práctico del tema analizado: campo sonoro difuso

Imaginemos que tenemos un recinto de volumen $V=20000 \text{ m}^3$ que tiene un tiempo de reverberación $T = 2 \text{ s}$; sala que normalmente se la califica como sala viva.

Primeramente calcularemos el radio de reverberación r_c del recinto, por aplicación de la teoría clásica dada por la expresión (1) y por el método iterativo propuesto por nosotros, válido para campo difuso, obtenido a través de la expresión (2), a partir de los siguientes factores de directividad de la fuente sonora Q : 1, 5, 15, 25, 35, 42.2244, 50, 75, 100. Los resultados calculados se exponen en la tabla 1:

En este caso, en virtud de las expresiones (4) y (5) tenemos: $Q_{\min} = 42.224484$, $r_{\min} = 100 \text{ m}$.

En las figuras de 1 a 3 ilustramos, para este caso, algunos gráficos de la evolución energética de las componentes de campo sonoro directo y reverberado para distintos valores del factor de directividad considerados en el ejemplo de la Tabla 1. El gráfico a) de cada figura representa las evoluciones de las densidades relativas de energía sonora en función de la distancia fuente-receptor r , ($\epsilon / \epsilon_{10} : \epsilon_d / \epsilon_{10}$, $\epsilon_T / \epsilon_{10}$), del campo sonoro directo ϵ_d (en trazo continuo) y el reverberado ϵ_r (en trazo discontinuo), generada por una fuente sonora de factor directividad Q , respecto a la producida por campo sonoro directo ϵ_{10} por una fuente omnidireccional a 10 m. El gráfico b) muestra la diferencia entre las curvas anteriores: ($\epsilon_d / \epsilon_{10} - \epsilon_T / \epsilon_{10}$). El radio crítico coincide con el paso por cero de esta última curva.

Desarrollo teórico: Comportamiento en campo sonoro no difuso

En este caso, de acuerdo a la formulación que presentamos en la teoría [2], [3], tenemos que el radio de rever-

beración r_c debe calcularse por iteración a partir de la siguiente expresión:

$$Q / r^2 = 312 (T / V) [n e^{-0.04r/T_i} + (1-n) e^{-0.04r/T}] \quad (6)$$

Para efectuar el cálculo del r_{\min} en el caso de que ambas curvas no se corten, escribiremos la expresión (6) del siguiente modo:

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

En la que efectuando una expansión en primer orden de la función potencial del corchete,

($a^x \approx 1 + x \ln a$), se obtiene:

$$QV / 312 T \approx r^2 e^{-0.04r/T_i} [1 + (1-n) \cdot 0.04 r (T - T_i) / T T_i] \quad (7)$$

Despreciando el segundo sumando del corchete por pequeño frente a 1, se obtiene la siguiente expresión:

$$f(r) \approx e^{-0.04r/T_i} / r^2 = 312 T / QV \quad (8)$$

Hallando la primera derivada de $f(r)$ y aislando r , como antes realizamos, se determina r_{\min} :

$$r_{\min} \approx 2 T_i / 0.04 = 50 T_i \quad (9)$$

Introduciendo (9) en (7) se calcula el siguiente valor aproximado de Q_{\min} :

$$Q_{\min} = (105 561.5209 T T_i^2 / V) [1 + (1-n) 2 (T - T_i) / T] \quad (10)$$

Por este procedimiento no nos ha sido posible determinar de forma analítica una expresión exacta de r_{\min} y Q_{\min} , pero sin embargo los valores que pueden calcularse a través de las expresiones (9) y (10) son bastante aproximados a los que pueden hallarse por iteración imponiendo la condición de separación mínima de las curvas.

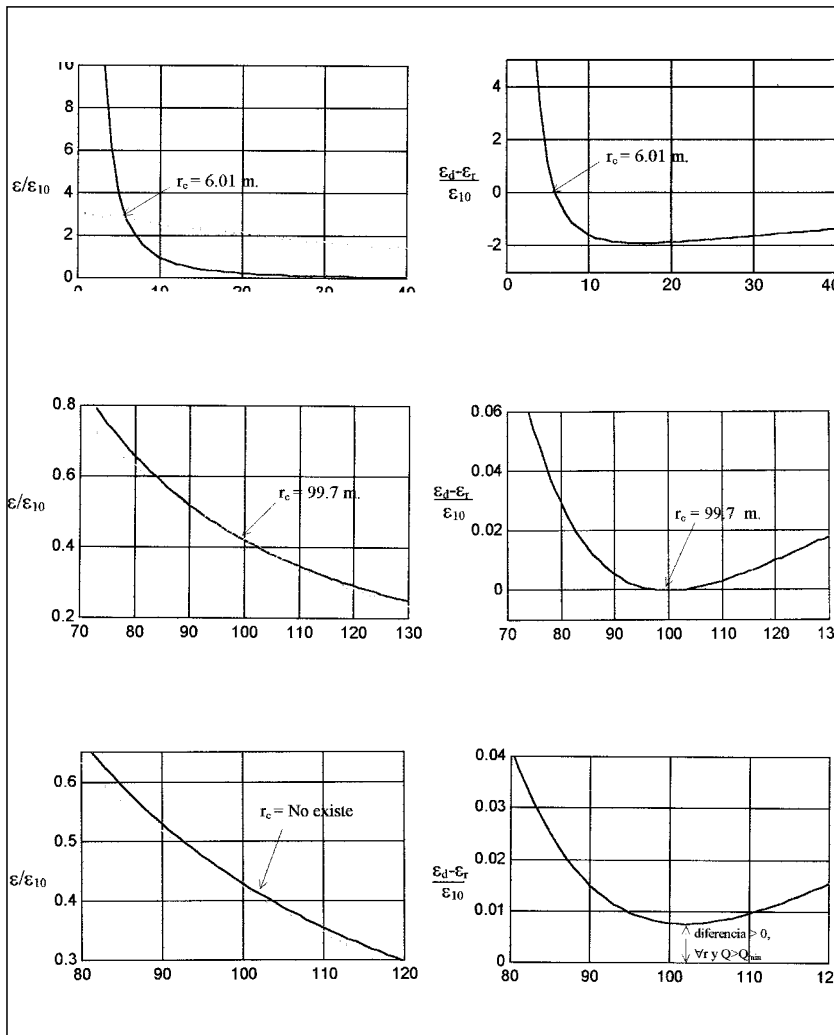
Estudio práctico del tema analizado: campo sonoro no difuso

Supongamos el ejemplo anterior de un recinto en el que $V = 20000 \text{ m}^3$, $T = 2 \text{ s}$, $T_i = 1.8 \text{ s}$ y $n = 0.9$ lo que im-

Factor de Directividad (Q)	Radio de reverberación r_c caso no difuso (6)
1	6.05
5	14.91
15	30.74
25	47.96
35	-
42.2244	-
50	-
75	-
100	-

Tabla 2: Análisis del radio de reverberación r_c

(-) significa que la curva del campo sonoro directo no corta a la curva del campo sonoro reverberado. Por tanto no existe radio de reverberación r_c .



plica que T_i es exactamente igual al EDT por definición.

Ahora calcularemos el radio de reverberación r_c , por iteración desde (6), para los factores de directividad de la fuente sonora Q: 1, 5, 15, 25, 35, 42.2244, 50, 75, 100.

El r_{min} y Q_{min} calculados a partir de las expresiones (9) y (10) son: $r_{min} = 90$ m., $Q_{min} = 34.8859$ mientras que los valores que se determinan por iteración son: $r_{min} = 90.86$ m., $Q_{min} = 34.964$.

Conclusiones finales

Como valoración final del estudio realizado tenemos:

El efecto de anecoicidad de un recinto que puede calificarse como vivo, desde el punto de vista de su estado de reverberación, puede conseguirse mediante dos procedimientos:

Por aumento del factor de directividad de la fuente sonora hasta un valor Q_{min} a partir del cual cualquier valor de Q igual o superior a Q_{min} genera el efecto de que el campo sonoro directo sea siempre predominante sobre el campo reverberado no produciéndose nunca la intersección de ambas curvas. Cuanto menor sea el tiempo de reverberación inmediato T_i frente al tiempo de reverberación T del recinto se acelerará el proceso de obtención del efecto de anecoicidad del sonido en el recinto. Ambas magnitudes Q_{min} y T_i serán factores esenciales para conseguir una apreciable inteligibilidad del sonido a pesar de que pueda existir una desagradable sensación de reverberación en el recinto.

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a mi colaborador J. Soler por su ayuda en la confección de esta comunicación científica.

Bibliografía

- [1] H. Arau (1996). Revista de Acústica. Vol. XXVII nº 1 y 2.
- [2] H. Arau (1996) Revista de Acústica. Vol. XXVII nº 1 y 2.
- [3] Fe de Erratas de la publicación [2]. Revista de Acústica. Vol. XXVII nº 3 y 4.
- [4] M. Barron & L. J. Lee. J. Acoust. Soc. Am. nº 84, 618-628.