

# Predicción del tiempo de reverberación en salas mediante procesos de difusión de la energía acústica



Juan M. Navarro<sup>1</sup>, José Escolano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Avanzadas, Universidad Católica San Antonio de Murcia

<sup>2</sup> Grupo de Investigación de Procesado Multimodal y Multimedia, Universidad de Jaén  
jmnavarro@ucam.edu

PACS: 43.55.Br, 43.55.Ka

## Resumen

Las ecuaciones del tiempo de reverberación son las herramientas de predicción más utilizadas en acústica de salas por su simplicidad de uso y su precisión razonable. Sin embargo, las limitaciones de la teoría estadística en recintos complejos son conocidas; por ejemplo, su aplicación en salas de dimensiones desproporcionadas o en salas con volúmenes acoplados. En este artículo se presenta un modelo de predicción de la distribución del campo sonoro y del tiempo de reverberación basado en un proceso de difusión de la energía acústica. Este modelo puede considerarse una extensión de la teoría estadística incorporando una dependencia espacial de la predicción, siendo fácil de implementar y con rapidez de cálculo. En primer lugar se describen los fundamentos y los desarrollos que permiten al modelo incorporar los diferentes fenómenos que se producen en un recinto complejo. Al mismo tiempo, se presentan ejemplos para demostrar la validez del modelo en diferentes situaciones y tipología de recintos.

## Abstract

The equations of the reverberation time are the most widely used prediction tools in acoustical design due to their simplicity and reasonable results. However, the limitations of the statistical theory in complex scenarios are well known; for instance, their application in disproportionate rooms and in enclosures with coupled volumes. In this paper, a sound field distribution and a reverberation time prediction model based in a diffusion process of the acoustic energy is presented. This model can be considered as an extension of the statistical theory adding a spatial dependency to the prediction, and being easy to implement and with low computation load. First, the foundations and the successive developments carried out to deal with different propagating phenomena occurring in a complex enclosure. Numerical experiments are then described to show the validity of the mode in different room types.

## 1 Introducción

Desde sus inicios, la acústica de salas se ha preocupado de la relación entre las propiedades físicas del recinto, principalmente sus límites, y las propiedades del campo sonoro generado en su interior. Entre los diferentes fenómenos de un campo sonoro dentro de un recinto, el proceso de reverberación es el más importante calificador de la acústica de una sala [1]. Las características de reverberación afectan a la inteligibilidad de la palabra y definición en la señal vocal [2], así como la claridad de las interpretaciones musicales [3]. Desde que a principios del siglo xx se demostró que el tiempo de reverberación proporciona una unidad de medida adecuada de la calidad acústica de salas de grandes dimensiones, la predicción de este parámetro se ha convertido en

una fase imprescindible en tareas como el diseño de recintos acústicos.

Partiendo de la suposición de campo difuso, Sabine [4] estableció la primera relación en términos de volumen  $V$ , área de superficie  $S_t$ , y el coeficiente de absorción medio  $\bar{\alpha}$ . A lo largo de estos años hasta la actualidad, se han desarrollado otros modelos estadísticos que añadiendo alguna suposición, permiten obtener resultados más precisos bajo determinadas circunstancias [5-7]. En todos estos casos, los modelos de acústica estadística necesitan de algunos requerimientos estadísticos para cumplir con los campos sonoros reverberantes que se predicen. Un campo sonoro que cumple con estos requisitos se suele llamar "difuso". Dada su facilidad de aplicación, estos modelos siguen usándose habitualmente

por profesionales de la acústica para predecir el campo sonoro en salas de todo tipo. Sin embargo, la teoría del campo difuso tiene limitaciones importantes de aplicación que suelen olvidarse. Fundamentalmente, sus predicciones pierden precisión cuando aumenta la irregularidad en la geometría, por ejemplo salas alargadas, y cuando aumenta la no uniformidad de distribución de la absorción [8]. Además, las ecuaciones de la acústica estadística dan como resultado un valor único para toda la sala, el cual no depende de la posición de la fuente, de la posición del receptor, ni la distribución de los materiales absorbentes perdiéndose la distribución espacial del tiempo de reverberación.

Aunque estos modelos estadísticos pueden verse como casos límite de la ecuación de ondas [9], tales modelos se entiende más rigurosamente como casos límite de la acústica geométrica [10] en la cual el sonido se modela como un conjunto de partículas sonoras sin interacción. Los métodos geométricos más importantes que se han aplicado a acústica son los métodos del trazado de rayos [11] y de la fuente imagen [12]. Estos métodos han crecido en popularidad debido a su capacidad de considerar geometrías complejas y diferentes condiciones acústicas interiores, lo que se ha plasmado en numerosos programas comerciales [13]. Generalmente, ofrecen un grado de precisión aceptable en la predicción de diferentes parámetros de acústica de salas [14]. Sin embargo, algunos caminos de reflexión importantes pueden llegar a perderse al simular salas de grandes dimensiones y con múltiples espacios conectados [15]. Además, el aumento en el número de rayos lanzados para alcanzar resultados de confianza puede llevar tiempos de computación prohibitivos.

Recientemente, se ha propuesto un modelo teórico basado en la ecuación de transferencia radiativa de la energía para generalizar los algoritmos de predictivos basados en la propagación de partículas sonoras [16]. Esta teoría general permite sentar las bases de los modelos geométricos y englobar en ellos el modelo de la ecuación de difusión. El uso del proceso de difusión de la energía acústica [17] se puede utilizar para predecir, con precisión y con un coste computacional bajo, el campo sonoro en salas de forma arbitraria y distribución de la absorción no uniforme, principalmente en salas poco absorbentes [18].

En este trabajo se repasan los diferentes desarrollos realizados en el modelo de la ecuación de difusión para su aplicación en salas de formas complejas mostrando sus ventajas frente a los modelos estadísticos. Este artículo está dividido en las siguientes secciones. En primer lugar se presentan los principios del modelo de la ecuación de difusión repasando el modelo de transferencia

radiativa de la energía. Seguidamente se explican las diferentes expansiones que se han ido desarrollando sobre la ecuación de difusión que permiten modelar los fenómenos de propagación presentes en salas complejas. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2 Principios del modelo

### 2.1 El modelo de transferencia radiativa de energía acústica

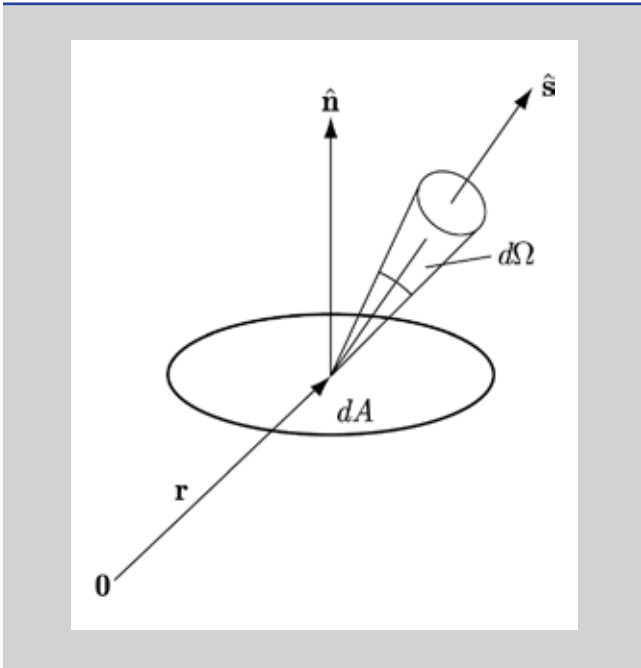
#### 2.1.1 Introducción

El sonido, como la luz, es un fenómeno de ondas. Aunque existen varias diferencias entre luz y sonido, usando las similitudes entre ambos fenómenos de propagación fue posible desarrollar técnicas de modelado de acústica de salas conocidas como acústica geométrica. Existen un gran número de métodos ampliamente reconocidos basados en estas técnicas aunque cada uno de ellos suele derivarse por separado [19]. Por lo tanto, existía la necesidad de establecer unos fundamentos generales para el modelado geométrico de la acústica de salas, más aun cuando recientemente la comunidad científica ha prestado especial atención a un modelo energético que hace uso de la ecuación de difusión [17]. Es posible usar la teoría clásica de la transferencia radiativa de la óptica para proponer un modelo general de propagación de energía acústica que permita unificar los fundamentos de una amplia variedad de métodos geométricos acústicos incluyendo el modelo de la ecuación de difusión [16].

#### 2.1.2 Ecuación de transferencia radiativa acústica

En analogía con la óptica, en este modelo se supone que las ondas se comportan como partículas conocidas como fonones. La interacción de las partículas sonoras con el medio se puede describir mediante una ecuación integro-diferencial. La teoría de la transferencia trabaja con la energía que se propaga a través o es emitida por una determinada superficie  $dA$  y la proporción de partículas que la atraviesan definiendo la *radiancia sonora*  $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}, t)$  donde  $\mathbf{r}$  representa un vector de posición,  $\hat{\mathbf{s}}$  es el vector de dirección y  $t$  corresponde con el tiempo y cuyas unidades son  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ . La Figura 1 muestra un esquema del flujo de energía a través de un elemento diferencial de área  $dA$  dentro de un elemento diferencial de ángulo sólido  $d\Omega$ .

La ecuación de transferencia radiativa acústica se deriva usando el principio de conservación de energía. Definiremos un rayo sonoro como un grupo de partículas sonoras que se mueven en una dirección  $\hat{\mathbf{s}}$  dentro de un ángulo sólido  $d\Omega$  y se suele representar como un haz tal



**Figura 1.** Esquema del flujo de energía a través de un elemento diferencial de área  $dA$  dentro de un elemento diferencial de ángulo sólido  $d\Omega$ .

y como muestra en la Fig. 1. Según la teoría de la transferencia, un rayo pierde energía a través de la divergencia y la atenuación, incluyendo la absorción y la dispersión fuera del haz, mientras que gana energía de la dispersión que entra en el haz desde el exterior y de las fuentes sonoras en el medio. Por lo tanto, la ecuación de transferencia es una expresión matemática de los cambios que sufre la radiación sonora en función del tiempo debido a un balance de contribuciones de energía positiva y negativa:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}, t)}{\partial t} = -\hat{\mathbf{s}} \cdot \nabla L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}, t) - \mu_t L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}, t) + \mu_s \int_{\Omega} P(\hat{\mathbf{s}}', \hat{\mathbf{s}}) L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}', t) \partial \Omega' + L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}', t), \text{ en } V \quad (1)$$

donde  $\mu_t$  es el coeficiente de atenuación como la suma del coeficiente de absorción  $\mu_a$  y el coeficiente de dispersión  $\mu_s$ . Estos coeficientes definen las propiedades de atenuación del medio mediante absorción y dispersión, siendo proporcionales al camino libre medio recorrido. Para una sala con un volumen  $V$  y área superficial  $S_t$ , el camino libre medio de la sala  $\lambda$  puede calcularse con una ecuación analítica sencilla [10]:

$$\lambda = \frac{4V}{S_t} \quad (2)$$

Por lo tanto, la fracción de radiación incidente dispersada por objetos en un camino libre medio se designa como  $\mu_s$ ,

$$\mu_s = \frac{(1 - \bar{\alpha})}{\lambda} \quad (3)$$

Para tener en cuenta la absorción del medio y de los objetos, la fracción de radiación incidente absorbida en un camino libre medio se designa como  $\mu_a$ ,

$$\mu_a = m \frac{\bar{\alpha}}{\lambda}, \quad (4)$$

donde  $m$  es la atenuación debida a la absorción del aire [20] y todas las variables tiene una dimensión de  $m^{-1}$ .

La ecuación (1) es la ecuación de transferencia radiativa acústica. A diferencia de lo que suele ocurrir en el campo de la óptica, esta última ecuación depende del tiempo debido a que las partículas sonoras se propagan a una velocidad finita.

### 2.1.3 Condiciones de contorno

La ecuación (1) solo es valida para puntos en el interior del recinto, no sirve para los límites del mismo. La radiación sonora que sale de las superficies del recinto debe determinarse mediante la resolución de unas condiciones de contorno. Unas condiciones implícitas o reflectantes introducen una interpretación física de dispersión y absorción en los límites de la sala, o sea, las partículas creadas en la superficie son el resultado de las reflexiones de las partículas que impactan en ella.

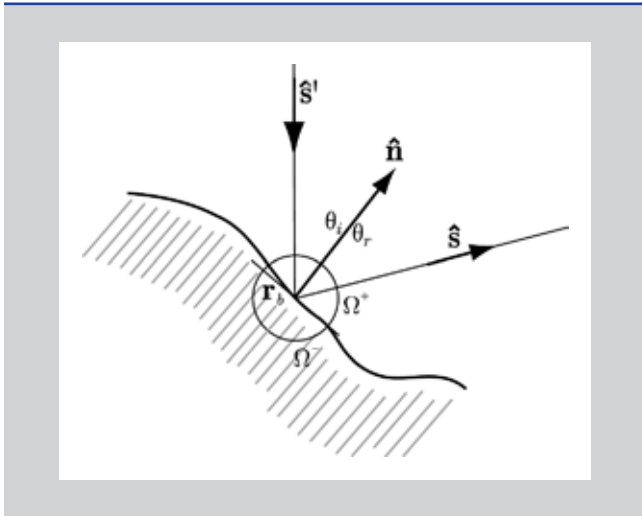
$$\int_{\Omega} L(\mathbf{r}_b, \hat{\mathbf{s}}, t) (\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{n}}) \partial \Omega = \int_{\Omega} R_F(\mathbf{r}_b; \hat{\mathbf{s}}', \hat{\mathbf{s}}) L(\mathbf{r}_b, \hat{\mathbf{s}}', t) (\hat{\mathbf{s}}' \cdot -\hat{\mathbf{n}}) \partial \Omega' \text{ en } \partial V \quad (5)$$

En la última ecuación,  $R_F$  representa el factor de reflexión de la superficie con unidades  $sr^{-1}$  definida como la probabilidad de que una partícula en el punto  $\mathbf{r}_b$  moviéndose en la dirección  $\hat{\mathbf{s}}'$  sea reflejada hacia la nueva dirección  $\hat{\mathbf{s}}$ , tal y como se muestran en el esquema de la Fig. 2. Finalmente, la ecuación (1), para el interior del recinto, junto con la ecuación (5), para los límites del mismo, componen el sistema de ecuaciones para el transporte de partículas sonoras en el modelo de transferencia radiativa acústica.

## 2.2 El modelo de la ecuación de difusión acústica

### 2.2.1 Ecuación de difusión

La ecuación de transferencia radiativa es difícil de resolver dado que tiene seis variables independientes. El número de variables puede reducirse realizando unas suposiciones adecuadas sobre el comportamiento de las partículas sonoras en un medio dispersivo con el objeto de obtener un proceso de difusión de la energía. En general, la ecuación de difusión describe situaciones físicas



**Figura 2.** Esquema de las direcciones involucradas en las condiciones de contorno.

tales como la conducción del calor en un cuerpo sólido, la dispersión de población y otros procesos similares. Para obtener la aproximación de difusión es necesario aplicar dos suposiciones principales:

1. La densidad de dispersión debe ser grande y la reflexión de energía debe dominar sobre la absorción.
2. El intervalo de tiempo necesario para que existan un cambio sustancial de flujo de energía es mucho mayor que el tiempo transcurrido en recorrer una distancia de un camino libre medio.

En resumen, el modelo de la ecuación de difusión acústica supone que las reflexiones en los objetos y en los límites del local son difusas. Además, las variaciones de densidad de energía y flujo de energía en el espacio deben ser pequeñas.

Un método formal de resolver la ecuación integro-diferencial (1) es expandir la radiación sonora mediante armónicos esféricos [16]. En esta aproximación de primer orden las variables de posición y de dirección se separan en dos nuevas funciones, la densidad de energía acústica  $w(\mathbf{r}, t)$  y el vector de flujo de energía acústica  $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ ,

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}, t) = \frac{c}{4\pi} w(\mathbf{r}, t) + \frac{3}{4\pi} \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \cdot \hat{\mathbf{s}} \quad (6)$$

De esta manera, y suponiendo una fuente sonora omnidireccional  $q_0(\mathbf{r}, t)$  en el volumen, la distribución de la densidad de energía sonora puede expresarse como,

$$\frac{\partial w(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -D \nabla^2 w(\mathbf{r}, t) + c \mu_a w(\mathbf{r}, t) = q_0(\mathbf{r}, t), \text{ en } V \quad (7)$$

donde  $\nabla^2$  es el operador de Laplace y  $D$  es el coeficiente de difusión que se expresa como,

$$D = \frac{c}{3\mu_t} = \frac{c}{3\left(\frac{1}{\lambda} + m\right)} \approx \frac{\lambda c}{3} \quad (8)$$

El coeficiente de difusión es un término que tiene en cuenta la geometría y forma de la sala a través del camino libre medio, ver ecuación (2), y donde  $c$  es la velocidad del sonido.

### 2.2.2 Condiciones de contorno

Como se observa, la ecuación de difusión (7) es una ecuación diferencial en derivadas parciales de tipo parabólico que expresa la evolución espacial y temporal de la densidad de energía acústica. Esta ecuación es válida para un medio infinito y debe completarse con unas condiciones de contorno para tener en cuenta la absorción de energía acústica en las superficies de la sala. Una forma habitual de expresar el intercambio de energía en los límites se conoce como condiciones de contorno mixtas. La expresión de la radiación acústica obtenida mediante la aproximación por difusión, ver ecuación (6), se aplica en las condiciones de contorno generales, ver ecuación (5). Evaluando las integrales después de la sustitución se obtiene,

$$D \frac{\partial w(\mathbf{r}_b, t)}{\partial \hat{\mathbf{n}}} + \frac{c \alpha(\mathbf{r}_b)}{2(2 - \alpha(\mathbf{r}_b))} w(\mathbf{r}_b, t) = 0 \quad (9)$$

donde se ha usado una analogía con la acústica de salas por el cual el factor de reflexión o la reflectividad de energía puede expresarse usando el coeficiente de absorción como  $(1 - \alpha(\mathbf{r}_b))$ . La ecuación (9) se conoce como la condición de contorno modificada [21] y junto con la ecuación (7) forman el sistema de ecuaciones del modelo de difusión acústica dentro del volumen y en sus límites. Tal y como ocurre en los modelos geométricos, mediante la condición de contorno se indica la banda de frecuencia que se está evaluando por el modelo de difusión. Cambiar los valores de los coeficientes de absorción significa el cambio en la banda de frecuencias evaluada. Por otro lado, la absorción se describe localmente, o sea cada superficie tiene asociada su propia absorción. Esta forma más precisa de describir la absorción de forma local es una ventaja sobre la teoría estadística de la reverberación, la cual considera solamente el coeficiente de absorción medio de la sala.

Esta derivación del modelo de difusión de muestra que este método puede considerarse como parte de las técnicas de la acústica geométrica. Previamente, Valeau et al. [18] demostraron que el modelo de difusión puede entenderse también como una extensión de la teoría estadística de la reverberación para campos sonoros no difusos.

### 2.2.3 Predicción del tiempo de reverberación

En la acústica de salas es sabido que mediante la respuesta impulsional de una sala es posible definir las propiedades acústicas de un recinto cerrado. Existe una única respuesta impulsional de la sala para cada par de posición fuente-receptor dentro del recinto. En este estudio, se utilizará el modelo de difusión acústica para estimar la respuesta impulsional de la sala con el objetivo de calcular el tiempo de reverberación. La ecuación de difusión acústica modela la evolución temporal de la densidad de energía acústica,  $w(\mathbf{r}, t)$ , propagándose en una sala y reflejándose en las diferentes paredes. Por lo tanto, el resultado de la predicción de la ecuación de difusión acústica, cuando la señal emitida por la fuente es un impulso será una estimación de la respuesta impulsional energética. Una vez calculada la solución dependiente del tiempo de  $w(\mathbf{r}, t)$ , la función temporal de la energía sonora expresa como:

$$L_p(\mathbf{r}, t) = 10 \log_{10} \left( \frac{w(\mathbf{r}, t) \rho c^2}{P_{ref}^2} \right), \quad (10)$$

donde  $P_{ref}^2$  es  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa y  $\rho$  es la densidad del aire. El tiempo de reverberación se puede calcular mediante la integración de la pendiente de la respuesta impulsional energética [22]. Normalmente, debido a la dificultad de conseguir el rango dinámico requerido para evaluar la caída de 60 dB, la velocidad de caída se obtiene desde 5 dB hasta 35 dB por debajo del nivel máximo inicial y se le conoce como  $T_{30}$ .

Para resolver el sistema de ecuaciones del modelo de difusión acústica se hace necesario el uso de métodos numéricos de cálculo. El primer método que se utilizó con la difusión acústica fue el método de elementos finitos [17, 18] a través de una implementación de un software comercial. El método de elementos finitos es adecuado principalmente para simulaciones de la ecuación de difusión en régimen estacionario aprovechando su flexibilidad para modelar formas irregulares. Sin embargo, los requerimientos computacionales se incrementan si usamos el método de elementos finitos para un análisis transitorio de la ecuación de difusión. Recientemente, los autores de este artículo han propuesto el método de diferencias finitas como técnica numérica alternativa en el dominio temporal [23]. El método de diferencias finitas proporciona unos esquemas para resolver la ecuación de difusión en régimen transitorio fáciles de implementar y más eficientes en recursos computacionales. Es importante resaltar que los resultados evaluados mediante este método se realizan a lo largo de todo el dominio de cálculo, de manera que no hace falta realizar otra simulación si el punto receptor se mueve. Es decir, se predice la respuesta impulsional en todos los puntos receptores de una sala discretizada con solo una ejecución del algoritmo.

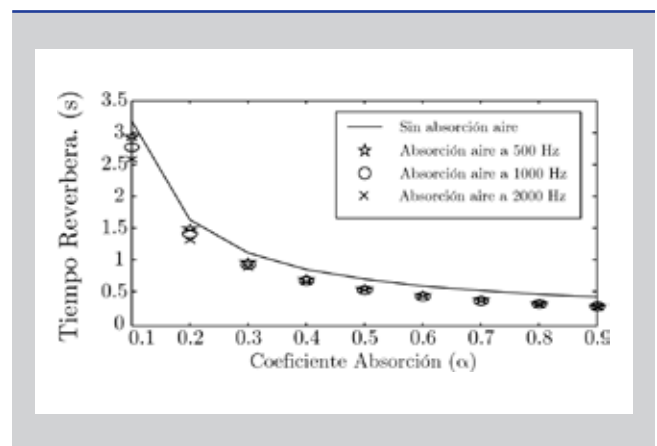
## 3 Desarrollos

Para modelar la propagación del sonido en recintos cerrados complejos es necesario que el método utilizado incorpore ciertos fenómenos importantes para la correcta simulación de los mismos. En este apartado se presentan algunos de los desarrollos que se han ido incorporando en el modelo de difusión acústica durante estos últimos años y que aportan flexibilidad al mismo. Para cada desarrollo se muestra un ejemplo numérico para resaltar la validez de este modelo.

### 3.1 Absorción del aire

La atenuación atmosférica del sonido describe el proceso de disipación de energía que se produce a lo largo de la propagación del sonido en forma de calor. Las partículas de aire contenidas en el interior de un recinto atenúan el sonido en función de la frecuencia del mismo, la temperatura, humedad relativa y la distancia recorrida. Por lo tanto, es un fenómeno físico que debe incorporarse en cualquier algoritmo de simulación de acústica de salas para obtener resultados precisos. Este factor de atenuación es especialmente importante en la banda de alta frecuencias del sonido y en recintos grandes, donde la distancia recorrida por la onda es mayor [20].

El modelo de la ecuación de difusión, ver ecuación (7), tiene en cuenta este proceso de atenuación por el medio a través del coeficiente de atenuación atmosférica  $m$ . En la Fig. 3 se representan los tiempos de reverberación obtenidos al simular una sala con dimensiones 10 m de ancho, 20 m de largo y 10 m de alto para cuatro condiciones diferentes de atenuación atmosférica; sin absorción y valores de absorción a 500 Hz, 1.000 Hz y 2.000 Hz. La absorción de las superficies del local se



**Figura 3.** Tiempos de reverberación (TR) obtenidos en la simulación de una sala  $10 \times 20 \times 10 \text{ m}^3$  en función de la absorción, sin absorción del aire (línea sólida), con una absorción del aire a 500 Hz (\*), absorción del aire a 1.000 Hz (-) y absorción del aire a 2.000 Hz (+).

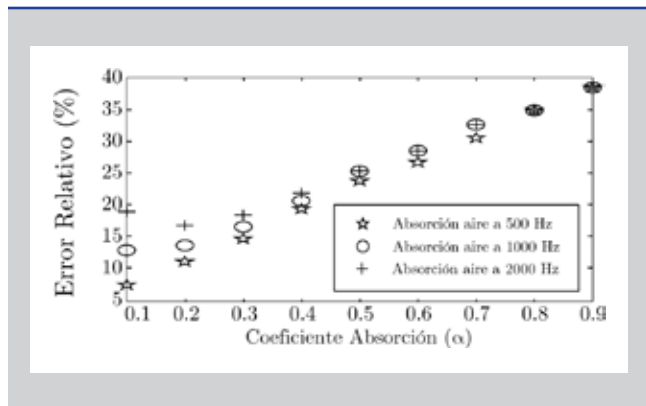
varió entre 0,1 y 0,9 distribuida homogéneamente. Como se puede observar en esta gráfica, los valores de tiempo de reverberación estimados decrecen cuando la absorción del aire aumenta mostrando el buen comportamiento de la ecuación de difusión acústica.

A continuación, se obtiene el error relativo entre la simulación sin absorción del aire y las simulaciones con absorción del aire con el objetivo de analizar la influencia y significación de modelar este fenómeno. Los errores relativos calculados se muestran en la Fig. 4 tomando como referencia los resultados de la simulación sin absorción del aire. Se observa que el error relativo es siempre superior al 5% para todos los casos. De acuerdo con la norma ISO/DIN 3382 [24] este porcentaje del 5% es el límite subjetivo para el tiempo de reverberación. Por lo tanto, queda demostrada la influencia considerable de la atenuación atmosférica para obtener resultados precisos en las predicciones.

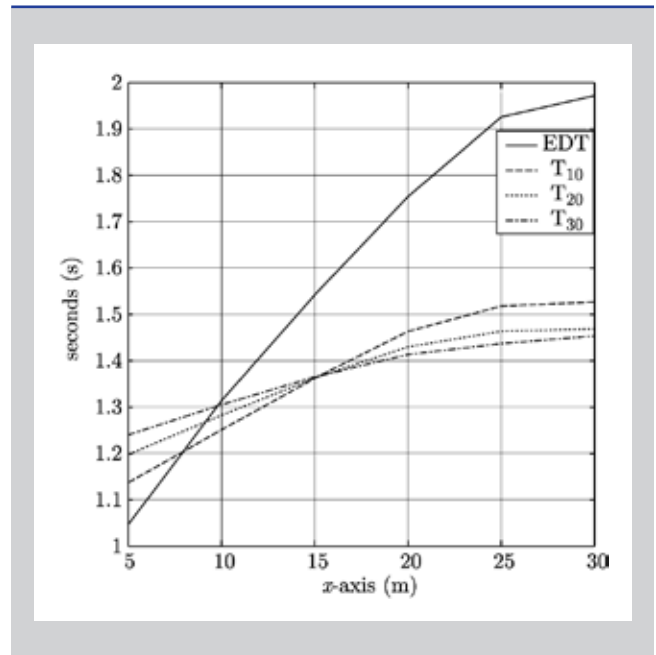
### 3.2 Sala alargada

Se sabe que el campo sonoro creado en una sala alargada, es decir, donde una de sus dimensiones es grande comparada con las demás, no es difuso. Por lo tanto, en este tipo de geometrías las suposiciones de la acústica estadística no se cumplen y el tiempo de reverberación es dependiente de la distancia a la fuente sonora. En este apartado se muestra la capacidad del modelo de la difusión acústica para simular distribuciones no homogéneas de las curvas de caída temporal.

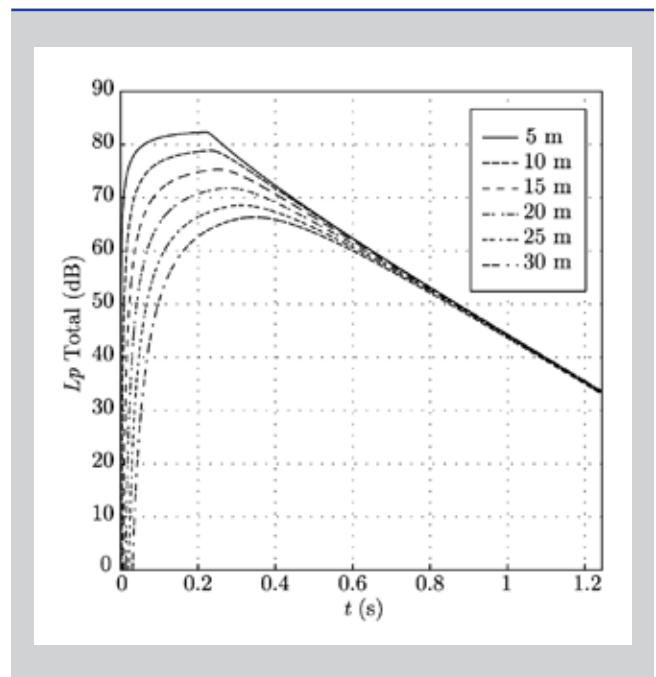
En la Fig. 5 se ilustran los valores estimados de RT ( $T_{10}$ ,  $T_{20}$  y  $T_{30}$ ), así como de EDT (primer tiempo de caída) en una sala de 32 m de largo, 4 m de ancho y 4 m de alto con una absorción de 0,1 en todas las paredes. El tiempo de reverberación aumenta cuando la distancia a



**Figura 4.** Error relativo entre simulaciones sin absorción del aire y valores obtenidos en simulaciones con una absorción del aire a 500 Hz (\*), absorción del aire a 1.000 Hz (-) y absorción del aire a 2.000 Hz (+).



**Figura 5.** Valores de RT y EDT calculados en una sala larga de  $32 \times 4 \times 4 \text{ m}^3$  con absorción uniforme de 0,1, en función de la posición del receptor.



**Figura 6.** Curvas de caída en seis posiciones distintas a lo largo de la dimensión mayor de la sala.

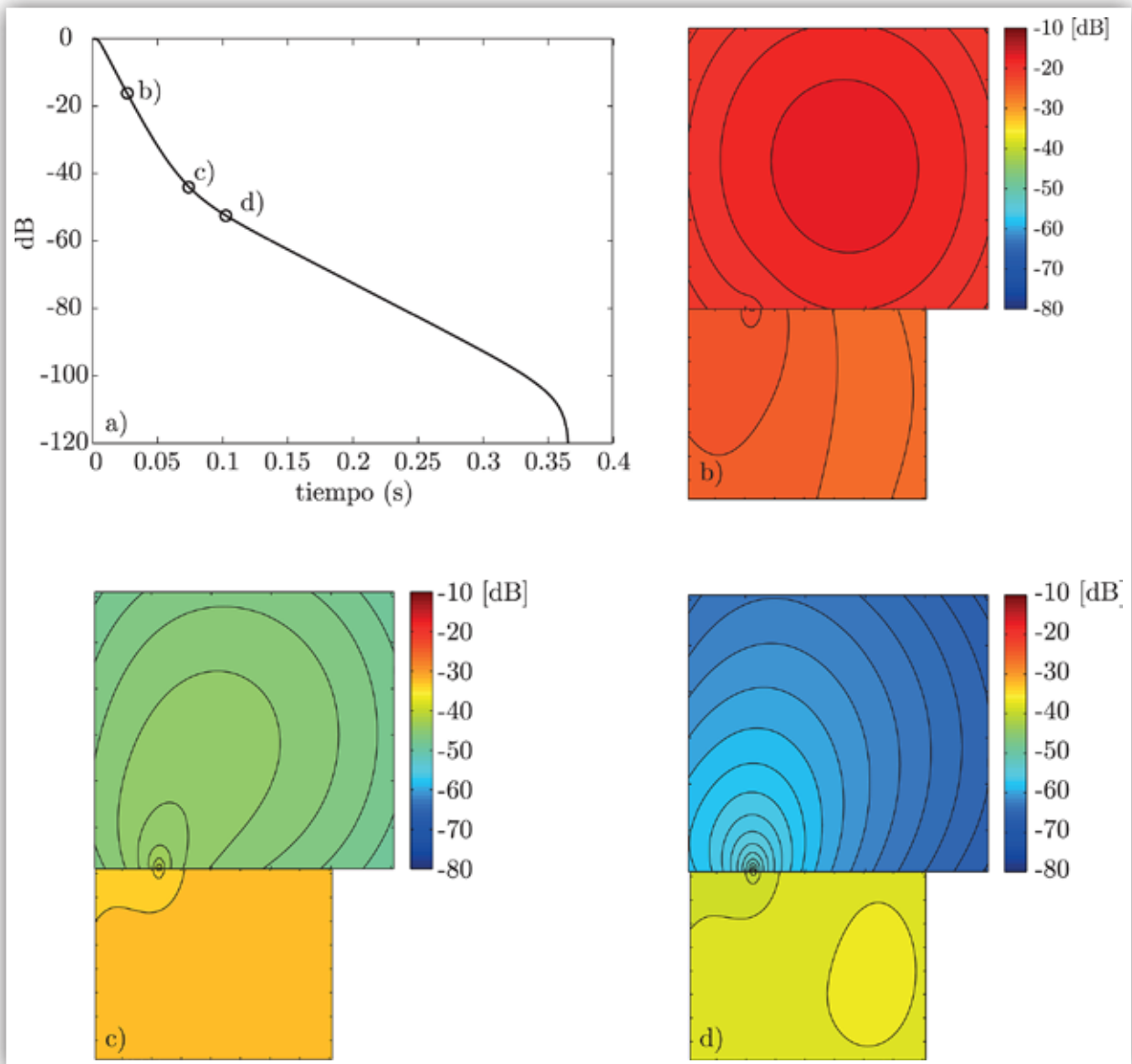
la fuente sonora incrementa. El valor de  $T_{30}$  muestra un pequeño incremento de un 15% mientras que el EDT uno cercano al 100%. Mediante la fórmula de Sabine se obtiene un RT de 1,5 s, valor aproximado al que tiende el calculado mediante la solución numérica de la ecuación

de difusión. Analizando las curvas de caída temporales a diferentes posiciones a lo largo de la mayor dimensión se puede observar que los primeros instantes de las caídas son más bruscos en posiciones cercanas a la fuente y se vuelven más suaves conforme la distancia con la fuente aumenta. Esto causa un gran aumento del EDT con la distancia. Sin embargo, las partes finales de las caídas de todas las curvas tienen aproximadamente la misma pendiente causando esa menor variación en las estimaciones de  $T_{30}$ .

### 3.3 Salas acopladas por una apertura

Los volúmenes acoplados están compuestos por dos o más espacios interconectados a través de aperturas

acústicamente transparentes. Estas configuraciones, son de particular interés en salas de conciertos porque permiten compaginar una alta claridad con fuerte reverberación gracias al fenómeno de decaimiento de doble pendiente [25]. Esta configuración también se puede encontrar en varias edificaciones o construcciones como por ejemplo las iglesias. Para simular la acústica de dos salas acopladas conectadas por una apertura, el proceso de difusión se convierte en un problema inhomogeneo dado que cada sala tiene su propio coeficiente de difusión. Por consiguiente, el dominio a resolver  $V$  se descompone en dos subvolúmenes  $V1$  y  $V2$ . Además, se supone que el valor del camino libre medio de cada sala no queda afectado por el acoplamiento. Seguidamente, se obtiene este conjunto de ecuaciones [25]



**Figura 7.** Respuesta de sistema acoplado formado por dos salas. a) Curva de caída en punto receptor en sala absorbente. Mapa de niveles en las dos salas para diferentes instantes de tiempo. b) Primera pendiente c) Punto inflexión d) Segunda pendiente.

$$\begin{aligned} \frac{\partial w(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - D_1 \nabla^2 w(\mathbf{r}, t) &= P(\mathbf{r}, t) \text{ in } V_1, \\ \frac{\partial w(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - D_2 \nabla^2 w(\mathbf{r}, t) &= 0 \text{ in } V_2, \end{aligned} \quad (10)$$

las cuales se usan junto con la ecuación (9) de las condiciones de contorno. Es importante resaltar que este método puede ampliarse para su uso en un número arbitrario de espacios acoplados o con un número arbitrario de fuentes sonoras sin añadir más suposiciones. Como ejemplo de una respuesta de doble pendiente, se modelaron dos salas acopladas a través de una puerta de dimensiones 0,2 m de ancho y 3,9 m de alto. La primera sala está recubierta de un material absorbente con coeficiente alto igual a 0,6, mientras que la segunda sala se puede considerar reflectante pues su coeficiente de absorción es 0,1. La fuente sonora está situada en el primer recinto de mayores dimensiones. Al comenzar la emisión de la fuente, parte de la energía acústica atraviesa la apertura alcanzando el recinto contiguo. La Fig. 7 muestra la respuesta impulsional energética de este sistema acoplado formado por dos recintos. Al cesar de emitir la fuente sonora la energía acústica en la sala más absorbente se atenúa a mayor velocidad que en la sala más reflectante, creándose la primera pendiente de la caída energética, tal y como se observa en la Fig. 7 (b). Seguidamente, se alcanza un instante donde la energía remanente en la sala reflectante es mayor que en la sala absorbente y parte de esta energía regresa a la sala emisora apareciendo una segunda pendiente de caída, ver Fig. 7 (d). El instante donde se produce este cambio de pendiente es cuando el vector de flujo de energía acústica, o intensidad, se anula en las inmediaciones de la apertura y se le conoce como punto de inflexión.

## 4 Conclusiones

La estimación del tiempo de reverberación es una herramienta necesaria en el campo de la acústica recintos. A día de hoy, las formulas clásicas del tiempo de reverberación de la acústica estadística se siguen usando ampliamente, olvidándose a menudo el hecho de que esta teoría está basada en suposiciones que pueden limitar su aplicación.

En este artículo se realiza una revisión del modelo de la ecuación de difusión acústica como método alternativo para predecir el tiempo de reverberación en salas complejas y con bajo coste computacional. Se ha mostrado que el modelo de difusión puede considerarse una aproximación geométrica-estadística del campo sonoro en salas y que tienen sus fundamentos en una ecuación conocida como la ecuación de transferencia radiativa de energía. Las diferentes extensiones que se han desarrollado del modelo de la ecuación de difusión le permiten simular entornos complejos y realistas, donde la absor-

ción del aire es importante y los acoples entre varios volúmenes pueden afectar a la respuesta acústica de la sala. Además, como se ha mostrado en el ejemplo de una sala alargada, los resultados obtenidos por este método son dependientes de la posición fuente-receptor y de la distribución de materiales en las paredes.

Sin embargo, quedan todavía algunos desafíos que resolver en un futuro en forma de limitaciones del modelo de difusión acústica. Por ejemplo, en salas con paredes cuyas reflexiones sean principalmente especulares, las estimaciones de tiempo de reverberación realizadas por el modelo de difusión no son consistentes físicamente. Además la ecuación no puede modelar el fenómeno de la difracción que sufren las ondas en algunos obstáculos.

## 5 Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Economía de España bajo el proyecto con referencia TEC2009-14414-C03-01 y el proyecto con referencia TEC2012-37945-C02-01, y por la Universidad Católica San Antonio bajo el proyecto con referencia PMAFI-PI-13/11.

## 6 Referencias

- [1] L. L. Beranek, "Acoustics and the Concert Hall," J. Acoust. Soc. Am. 57:1258-1262, 1975.
- [2] H. Steeneken, T. Houtgast, "A Physical Method for Measuring Speech Transmission Quality," J. Acoust. Soc. Am., 67:318-326, 1980.
- [3] T. Hidaka, N. Nishihara, "Objective evaluation of chamber-music halls in Europe and Japan," J. Acoust. Soc. Am., 116:357-372, 2004.
- [4] W. C. Sabine, "Collected Papers on Acoustics; Paper 1 - "Reverberation," Cambridge: Harvard Press, 1927 (Reimpreso en 1964 por Dover).
- [5] C. F. Eyring, "Reverberation time in "dead" rooms," J. Acoust. Soc. Am. 1:217- 241, 1930.
- [6] G. Millington, "A modified formula for reverberation," J. Acoust. Soc. Am. 4:69-82, 1932.
- [7] H. Arau-Puchades, "An improved reverberation formula," Acustica 65:163-180, 1988.
- [8] M. Hodgson, "When is diffuse-field theory accurate?" In Proc. Wallace Clement Sabine Centennial Symposium, 157-160, Cambridge, MA, 1994.
- [9] P. M. Morse, K. U. Ingard, Theoretical Acoustics. McGraw-Hill, New York, 1968.
- [10] W. B. Joyce, "Sabine's reverberation time and ergodic auditoriums," J. Acoust. Soc. Am., 58:643-655, 1975.



- [11] A. Krokstad, S. Strom, S. Sorsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique," *J. Sound Vibration*, 8(1): 118-125, 1968.
- [12] J. B. Allen, D. A. Berkley, "Image method for efficiently simulating small-room acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, 65(4):943-950, 1979.
- [13] J. H. Rindel, "The Use of Computer Modeling in Room Acoustics," *Journal of Vibroengineering*, 3:219-224, 2000.
- [14] M. Vorländer, "International round robin on room acoustical computer simulation," In *Proceedings of 15th International Congress on Acoustics*, 577-580, Trondheim, Norway, 1995.
- [15] H. Lehnert, "Systematic errors of the ray-tracing algorithm," *Applied Acoustics*, 38:207-221, 1993.
- [16] J. M. Navarro, F. Jacobsen, J. Escolano, J. J. Lopez, "A theoretical approach to room acoustic model based on a radiative transfer model," *Acta Acustica United with Acustica*, 96:1078-1089, 2010.
- [17] J. Picaut, L. Simon, J. D. Polack, "A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation," *Acustica*, 83:614-621, 1997.
- [18] V. Valeau, J. Picaut, M. Hodgson, "On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction," *J. Acoust. Soc. Am.*, 119:1504-1513, 2006.
- [19] L. Savioja. *Modeling Techniques for Virtual Acoustics*. PhD thesis, Helsinki University of Technology, Telecommunications Software and Multimedia Laboratory, Espoo, Finland, 1999.
- [20] H. E. Bass, H. J. Bauer, L. B. Evans, "Atmospheric absorption of sound: Analytical expressions," *J. Acoust. Soc. Am.*, 52(3):821-825, 1972.
- [21] Y. Jing, N. Xiang, "On boundary conditions for the diffusion equation in room acoustic predictions: Theory, simulations, and experiments," *J. Acoust. Soc. Am.*, 123:145-153, 2008.
- [22] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time," *J. Acoust. Soc. Am.*, 37:409-412, 1965.
- [23] J. M. Navarro, J. Escolano, J. J. Lopez, "Implementation and evaluation of a diffusion equation model based on finite difference schemes for sound field prediction in rooms," *Applied Acoustics*, 73:659-665, 2012.
- [24] ISO/DIS 3382, *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, 2009.
- [25] A. Billon, V. Valeau, A. Sakout, and J. Picaut, "On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, 120:2043-2054, 2006.



Envíese a: **Revista Española de Acústica - SEA**  
 e-mail: [secretaria@sea-acustica.es](mailto:secretaria@sea-acustica.es)  
<http://www.sea-acustica.es>

Estoy interesado en:

- **ASOCIARME A LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA**
- **SUSCRIBIRME A LA REVISTA DE ACÚSTICA**

Apellidos: \_\_\_\_\_ Nombre: \_\_\_\_\_

Dirección para correspondencia: \_\_\_\_\_

C.P.: \_\_\_\_\_ Ciudad: \_\_\_\_\_ Provincia: \_\_\_\_\_

Tel.: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ e-mail: \_\_\_\_\_

Centro de trabajo: \_\_\_\_\_

Puesto de trabajo: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

C.P.: \_\_\_\_\_ Ciudad: \_\_\_\_\_ Provincia: \_\_\_\_\_

Tel.: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ e-mail: \_\_\_\_\_

## **Scan&Paint:** es mucho mas fácil localizar las fuentes de ruido en cualquier tipo de sala

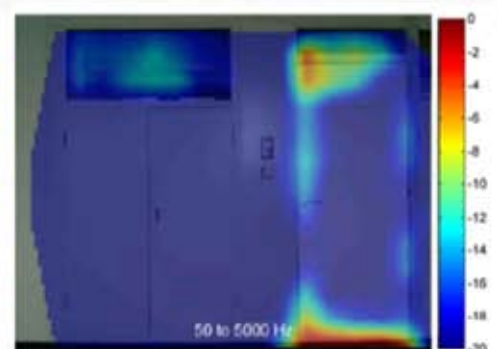
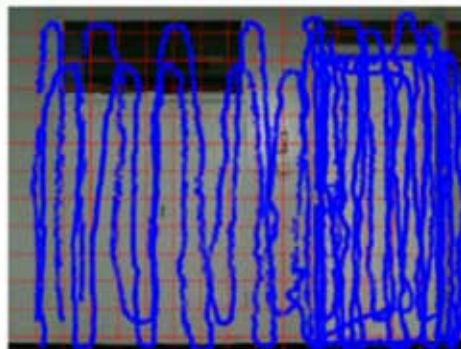
Es frecuente encontrar importantes bajas de aislamiento acústico en determinados puntos de elementos constructivos sin que necesariamente haya una causa apreciable. Gracias a nuevas técnicas de medida recientemente introducidas, como "Scan & Paint", es posible caracterizar el campo sonoro mediante barridos con una sólo sonda cerca de cualquier superficie de una forma rápida y precisa. La técnica de medida esta basada en escanéos manuales con una sonda de intensidad P-U mientras se filma la medida con una cámara de video. Las señales acústicas y el video son sincronizados automáticamente, permitiendo conocer el nivel sonoro y espectro acústico en cualquier punto de la superficie evaluada. Esta técnica permite la generación de mapas sonoros de las variaciones de presión, intensidad o velocidad de partícula a lo largo de la superficie medida lo que permite localizar fuentes sonoras incluso a bajas frecuencias.

### **¡Todavía más fácil!**

[www.microflown.com/products/solutions/scan-paint](http://www.microflown.com/products/solutions/scan-paint)

¡Subscríbete a nuestra lista de noticias antes del 24 de Abril y podrás ganar un pack completo de Scan&Paint!\*

<http://www.microflown.com/subscribe/>



\*Incluye una sonda de intensidad P-U, una webcam, un sistema de adquisición multicanal y el software Scan&Paint.