



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

CÁLCULO CORREGIDO, BASADO EN LA TEORÍA MODERNA, DE LOS CAMPOS ACÚSTICOS (DIRECTO, TEMPRANO Y TARDÍO)

PACS: 43.55.Br

Requena Plens, Jose Manuel; Vera Guarinos, Jenaro

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal
Escuela Politécnica Superior de Alicante – Edif. Politécnica II
Universidad de Alicante – Campus de San Vicente del Raspeig
Email: info@jmrplens.com; jenaro@ua.es

PALABRAS CLAVE: Campo directo, campo temprano, campo reverberante, teoría moderna

ABSTRACT

The theoretical calculation of the direct, early and late fields has been a matter of analysis by many authors. This project is based on the Barron and Lee (1988) theories, and the Sato and Bradley (2008) ones. Our study is developed starting from experimental data and the possibility of using other results obtained in validated simulation models with the help of "EASE", which makes it possible to have a wide variety of situations. This is why the adjustment coefficients that we introduce in the equations of the revised or modern theory now provide results more adjusted to reality. These coefficients intend, in their definition, to be related to the position of the source and the geometry of the enclosure.

Apart from a better kindness in the adjustments with respect to the experimental results, it has been found that what we call 'early field' has a decay that depends on the inverse of the distance.

RESUMEN

El cálculo teórico de los campos directo, temprano y reverberante han sido objeto de análisis por parte de muchos autores. Este trabajo se basa en las teorías de Barron y Lee (1988), y de Sato y Bradley (2008). Nuestro estudio se desarrolla a partir de datos experimentales y en la posibilidad de usar otros resultados obtenidos en modelos de simulación validados con ayuda de "EASE", lo que posibilita tener una amplia variedad de situaciones. Es por lo que los coeficientes de ajuste que introducimos en las ecuaciones de la teoría revisada o moderna proporcionan ahora unos resultados más ajustados a la realidad. Dichos coeficientes pretenden, en su definición, estar relacionados con la posición de la fuente y la geometría del recinto.

A parte de una mejor bondad en los ajustes respecto a los resultados experimentales, se ha encontrado que lo que llamamos 'campo temprano' presenta un decaimiento que depende de la inversa de la distancia.

1. INTRODUCCIÓN

La teoría revisada corregida es un método modificado del cálculo de campos acústicos que no es definitivo, sino que es un paso intermedio en la búsqueda de un cálculo más ajustado a lo que se obtiene experimentalmente.

Para entender el concepto de campo útil y campo perjudicial es necesario conocer uno de los aspectos fundamentales del sistema auditivo humano, la persistencia acústica. En Hass (1951) (inspirado por Petzold, 1927) se demostraba que el cerebro humano no discrimina entre dos sonidos que tengan una separación temporal máxima aproximada de 50 ms, influyendo también en la ubicación percibida del origen de esos dos sonidos, ubicando ambos en el origen del primero (efecto de precedencia o efecto *Hass*).

Este concepto nos indica que además del campo directo, nuestro oído integra y, por tanto, no interfieren en la inteligibilidad, las primeras reflexiones del sonido, trasladando así los campos directo y reverberado a los campos útil y perjudicial, donde el útil incorpora el campo directo y el temprano hasta los 50 ms (de 0 a 50 ms) y el perjudicial está formado por el campo acústico desde los 50 ms (de 50ms a infinito).

Hay múltiples investigaciones que intentan encontrar una formulación matemática para calcular el nivel de los campos acústicos a una distancia concreta de la fuente. Nos vamos a basar en Barron y Lee (1988) para desarrollar una forma diferente o corregida de calcular los campos acústicos a como ellos lo plantean, introduciendo coeficientes como se propone en Sato y Bradley (2008) y otros cambios.

Una vez definidos los cálculos se compararán los resultados con los obtenidos mediante simulación con el programa EASE.

2. TEORIA REVISADA

Los campos acústicos se pueden dividir en tres partes temporales, campo directo (*Direct*), campo temprano o primeras reflexiones (*Early*) y campo tardío o reverberante (*Late*). Teniendo en cuenta estas consideraciones se puede comprender que la diferencia entre el campo acústico total (excepto el directo) menos el campo tardío da como resultado el campo temprano, matemáticamente tal como lo definen Barron y Lee (1988) queda del siguiente modo:

$$I_D(r) = \frac{WQ}{4\pi r^2} \quad (1)$$

$$I_L(r) = \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13.82}{T} \left(\frac{r}{c} + t_0\right)\right)} \quad (2)$$

$$I_E(r) = \frac{4W}{A} \left(e^{-\left(\frac{13.82}{T} \left(\frac{r}{c}\right)\right)} - e^{-\left(\frac{13.82}{T} \left(\frac{r}{c} + t_0\right)\right)} \right) \quad (3)$$

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Donde t_0 es el tiempo de integración que en el caso de este trabajo son 0.05 segundos. La fracción $\frac{r}{c}$ indica el tiempo que tarda el sonido en llegar a la distancia r . W es la potencia acústica de la fuente en vatios. A es la absorción equivalente. T es el tiempo de reverberación en segundos.

3. TEORIA REVISADA CORREGIDA

Las ecuaciones anteriores si bien se acercan al comportamiento de los campos acústicos dentro de un recinto, no se ajustan a los valores obtenidos en la realidad, es por ello por lo que se propone incluir una serie de coeficientes en las ecuaciones con los que ajustar los resultados y obtener así unos valores de coeficientes específicos para un recinto concreto. Antes de mostrar las ecuaciones con los coeficientes es necesario comentar que se ha encontrado una relación del decaimiento del campo temprano frente a la inversa de la distancia tal como se puede observar a continuación:

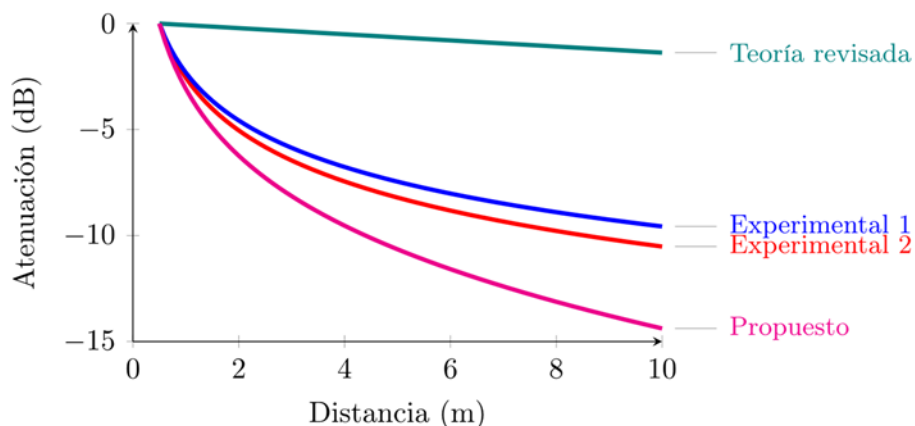


Figura 1. Decaimiento frente a la distancia del campo temprano definido por Barron y Lee (Teoría revisada), dos medidas experimentales y cuando se incluye la inversa de la distancia (Propuesto)

Esta relación con la inversa de la distancia se ha comprobado solo en los siguientes supuestos:

- El recinto tiene forma rectangular.
- Sólo existe una fuente sonora y ésta es omnidireccional.
- El tiempo de integración del campo temprano comprende el intervalo temporal entre 1-2 ms y 50 ms.
- El volumen del recinto es superior a 600 m³ (aunque en recintos a partir de 200 m³ ya empieza a observarse este comportamiento).

Por lo que, siguiendo con las ecuaciones anteriores, la inclusión de coeficientes y la inversa de la distancia en el campo temprano queda del siguiente modo:

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

$$I_D(r) = \frac{WQ}{4\pi r^2} C_D \quad (4)$$

$$I_L(r) = \frac{4W}{A} e^{-\left(\frac{13.82}{T} \left(\frac{r}{c} + t_0\right)\right) \varepsilon_L} C_L \quad (5)$$

$$I_E(r) = \frac{4W}{Ar} \left(e^{-\left(\frac{13.82}{T} \left(\frac{r}{c}\right)\right) \varepsilon_E} C_E - e^{-\left(\frac{13.82}{T} \left(\frac{r}{c} + t_0\right)\right) \varepsilon_L} C_L \right) \quad (6)$$

Los coeficientes se obtienen mediante regresión igualando los resultados de las ecuaciones a los valores obtenidos mediante simulación o medición experimental.

Una vez se obtienen los coeficientes se tienen unos coeficientes y parámetros físicos de un recinto concreto, esto repetido para múltiples recintos puede dar como resultado un método para obtener los valores de los coeficientes según los parámetros del recinto y por tanto realizar cálculos muy ajustados a la realidad.

4. EXPERIMENTACIÓN

Se ha simulado dos tipos de recintos ubicados en la universidad de Alicante, son dos aulas, una de ellas de la Escuela de Óptica (OP/S003 – 18.9x9.6x2.8 m) y otra de la Escuela Politécnica Superior IV (EP/0-26M – 11.9x7.1x2.7 m).

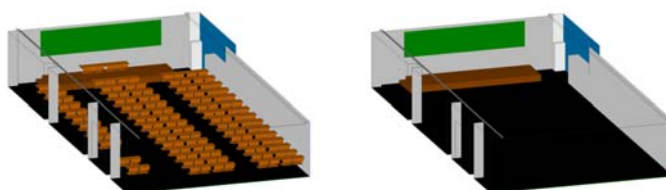


Figura 2. Modelo del aula OP/S003 realizado con EASE

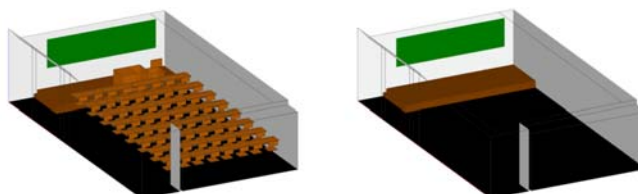


Figura 3. Modelo del aula EP/0-26M realizado con EASE

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Debido a la complejidad del cálculo cuando se incluye el mobiliario solo se van a comentar los cálculos realizados sin mobiliario.

En el caso del aula OP/S003 se obtienen las siguientes curvas de campo útil y campo perjudicial:

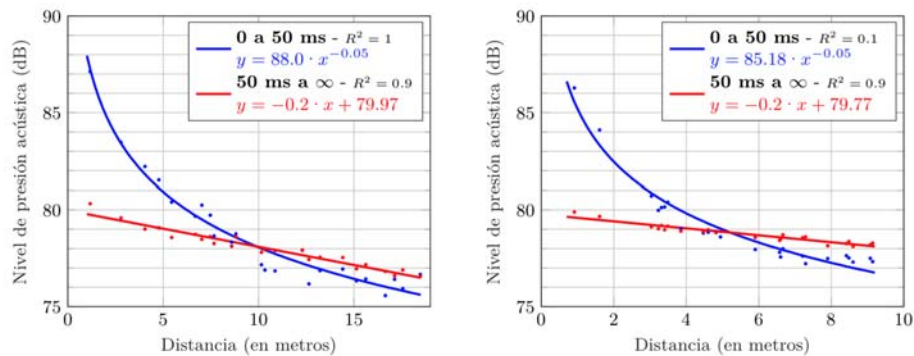


Figura 4. Campos útil y perjudicial en el aula OP/S003 simulada en EASE con fuente en la esquina (izquierda) y fuente en el centro (derecha)

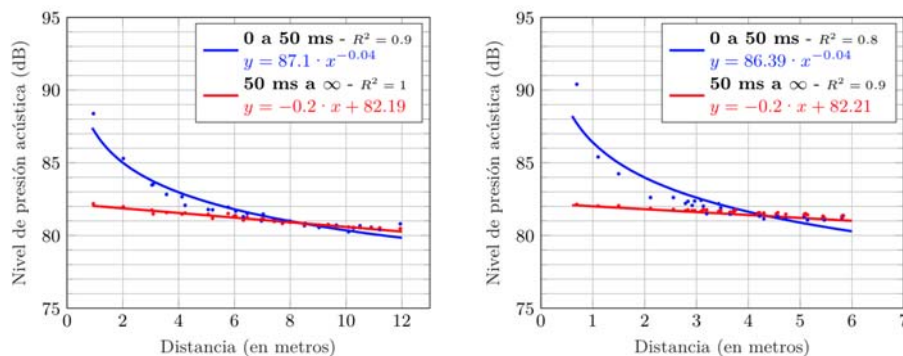


Figura 5. Campos útil y perjudicial en el aula EP/0-26M simulada en EASE con fuente en la esquina (izquierda) y fuente en el centro (derecha)

5. APLICANDO LA TEORIA REVISADA CORREGIDA

Una vez se han obtenido las curvas de los campos acústicos se pueden ajustar mediante regresión las ecuaciones de la teoría revisada (4)(5)(6) y obtener los valores de los coeficientes. A continuación, se muestran las curvas producidas por la teoría revisada corregida junto a las curvas obtenidas anteriormente.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

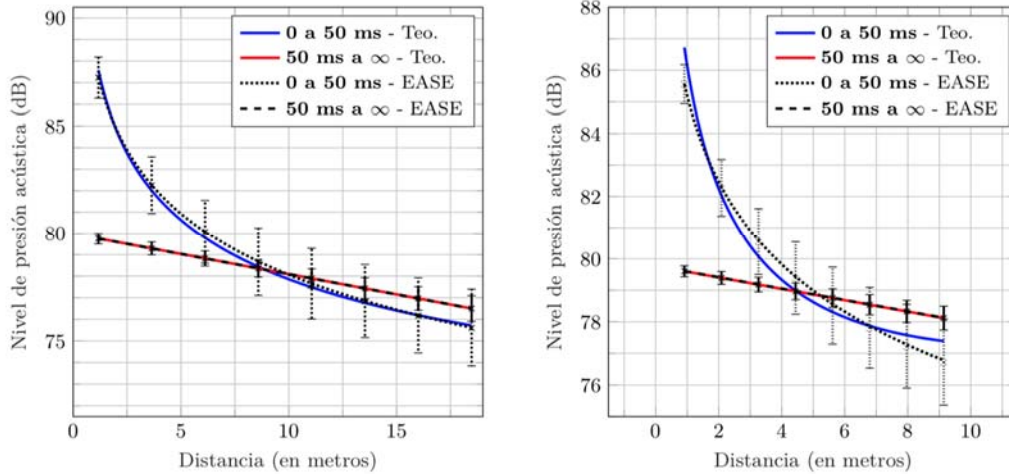


Figura 6. Campos en el aula OP/S003. **Izquierda:** Fuente en la esquina, $\varepsilon_L = 1.244$, $C_L = 1.268$, $C_D = 0.949$, $\varepsilon_E = -0.339$ y $C_E = 3.533$. **Derecha:** Fuente en el centro, $\varepsilon_L = 1.195$, $C_L = 1.175$, $C_D = 0.937$, $\varepsilon_E = -2.123$ y $C_E = 1.683$.

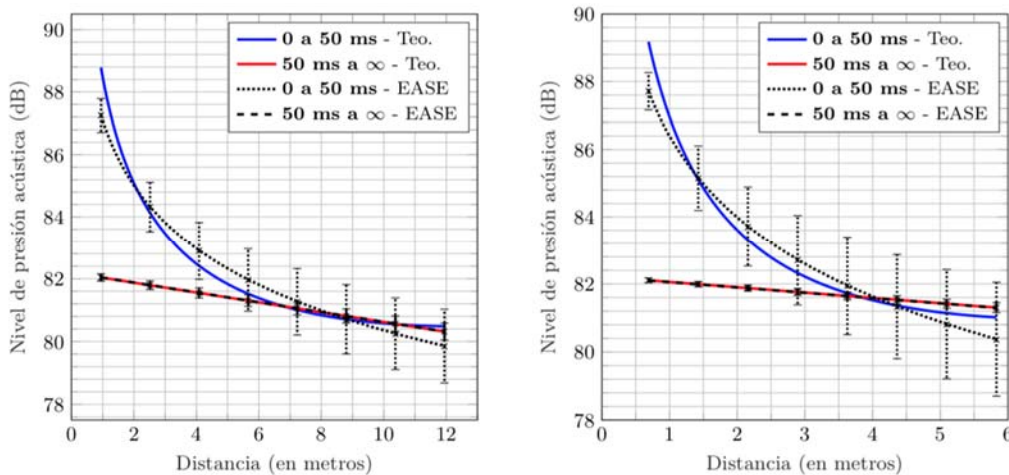


Figura 7. Campos en el aula EP/0-26M. **Izquierda:** Fuente en la esquina, $\varepsilon_L = 1.084$, $C_L = 0.839$, $C_D = 1.046$, $\varepsilon_E = -2.209$ y $C_E = 1.618$. **Derecha:** Fuente en el centro, $\varepsilon_L = 1.081$, $C_L = 0.843$, $C_D = 0.965$, $\varepsilon_E = -3.895$ y $C_E = 1.073$.

6. ACLARACIONES

Todo el proceso en detalle puede ser consultado en el trabajo Plens (2018) disponible en el repositorio de la Universidad de Alicante (RUA: <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/77578>). en él se muestran más resultados modificando las dimensiones del recinto, se extiende la explicación de la teoría revisada corregida y se trata la problemática de encontrar una relación matemática entre los coeficientes y los parámetros del recinto.

7. CONCLUSIONES

La teoría revisada corregida se ha desarrollado basándose en lo estudiado por (Barron & Lee, 1988) pero manteniendo en la ecuaciones la posibilidad de elegir cualquier tiempo de integración,

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

permitiendo la aplicación de esta teoría en otros casos donde se estudien campos diferentes a los estudiados aquí.

La corrección propuesta aquí difiere en algunos aspectos a la corrección propuesta en (Sato & Bradley, 2008). Sato y Bradley proponen unas constantes para los términos exponenciales de las ecuaciones, y ninguna modificación de los niveles globales, en esta comunicación incluimos coeficientes variables para los términos exponenciales y para los niveles globales, incluido el campo directo.

Mediante herramientas como MATLAB se ha probado diferentes ubicaciones de los coeficientes de corrección para obtener el mejor ajuste posible a las medidas reales. Debido a este proceso se encontró que el campo temprano tenía un decaimiento frente a la distancia mayor a lo definido por los autores citados anteriormente (aunque en (Sato & Bradley, 2008) ya se adelantaba esta idea), analizando diferentes soluciones se ha determinado que el campo temprano decrece con la inversa de la distancia y así se ha tenido en cuenta en las ecuaciones.

El ajuste de estas ecuaciones a las curvas obtenidas en las medidas experimentales o simuladas ofrecen un valor de R^2 en todos los casos mayor a 0.9 y en la mayoría de valor 1, por lo que su validez está confirmada quedando pendiente encontrar una relación entre los coeficientes y los parámetros del recinto. Una vez encontrada esta relación se obtendrán unos cálculos teóricos de los campos acústicos muy fieles a lo que se obtendría en una medición experimental.

8. BIBLIOGRAFIA

- Barron, M., & Lee, L. J. (1988). Energy relations in concert auditoriums. I. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(2), 618-628. <https://doi.org/10.1121/1.396840>
- Hass, H. (1951). Über den Einfluss eines Einfach-Echos auf die Hörsamkeit von Sprache. *Acustica*, 1, 49-58.
- Petzold, E. (1927). *Elementare raumakustik*. Bauwelt-verlag.
- Requena Plens, J. M. (2018). *Estudio de la relación campo directo/reverberado; útil/perjudicial*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/77578>
- Sato, H., & Bradley, J. S. (2008). Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(4), 2064–2077. <https://doi.org/10.1121/1.2839283>