

# Ecuación de salas de Audición Musical de forma Transparente para el Público

José Joaquín Rieta, Juan Manuel Sanchis

Departamento de  
Ingeniería Electrónica  
Universidad de  
Politécnica de Valencia  
e-mail contacto:  
jjrieta@eln.upv.es;

*Existen diversos métodos de ecualización de recintos que operan siempre con la sala vacía debido al efecto molesto sobre la audiencia de las señales utilizadas para excitar la sala (ruido rosa, tonos de 1/3 de octava, etc.). En estas condiciones, la obtención de la respuesta en frecuencia y la posterior ecualización se realizará sobre unos resultados que no tienen en cuenta a los espectadores ni cualquier otro cambio que haya podido acontecer en la sala mientras tiene lugar el evento musical. Además, esta ecualización no puede reajustarse objetivamente durante la celebración del evento. En la presente contribución se propone un método capaz de obtener la respuesta en frecuencia de la sala de forma imperceptible para la audiencia. Para ello, se procede a incluir un barrido de tonos dentro de un pasaje musical que puedan ser enmascarados y a la vez recuperados satisfactoriamente con un micrófono de referencia en la sala. De esta forma es posible obtener la respuesta de la sala en presencia de público y realizar los ajustes de ecualización simultáneamente a la reproducción de cualquier pasaje sonoro.*

Los resultados indican que la respuesta en frecuencia obtenida con este método coincide con la de los métodos tradicionales, siendo su gran ventaja el hecho de que puede realizarse en todo momento de forma transparente para la audiencia.

En cualquier espacio destinado para la escucha, musical o vocal, suele buscarse una determinada respuesta en frecuencia que permita disfrutar del acontecimiento en las condiciones preferidas por la audiencia. Usualmente se suele buscar una respuesta plana que sirva como punto de referencia para los ajustes posteriores necesarios [1]. Estos ajustes forman parte del propio diseño y acondicionamiento acústico de la sala en la que, dependiendo del uso que vaya a tener, también se ajustan

parámetros como el tiempo de reverberación [2]. Para intentar corregir los defectos de respuesta de la sala surgen las técnicas de ecualización [2]–[5], que también deben considerar no sólo la sala, sino también todo el sistema de refuerzo sonoro [6].

Para realizar el proceso de ecualización es necesario conocer primeramente la respuesta en frecuencia de la sala y, para ello, normalmente se utiliza el método de la señal interrumpida, emitiendo un ruido rosa, un ruido blanco, o un barrido de tonos como señal de test [2]. La opción más utilizada suele ser el ruido rosa, pues posee la misma potencia para cada uno de los tercios de octava. Así, considerando que los ecualizadores profesionales son capaces de actuar en bandas de 1/3 de octava, resulta sencillo actuar sobre la respuesta en frecuencia de la sala. En segundo lugar, por su sencillez, suele emplearse una técnica similar emitiendo barridos de tonos puros según las bandas de 1/3 de octava y seguir el mismo proceso que para el caso del ruido rosa.

Otras alternativas de ecualización se basan en la emisión de secuencias pseudoaleatorias (*maximum length sequence*, MLS) cuyas propiedades están controladas de forma tal que su autocorrelación da lugar a la función periódica  $\delta(t)$  siendo capaz de excitar todas las bandas de frecuencia de la sala [7]. Después, realizando la correlación cruzada entre la propia secuencia MLS emitida y la señal obtenida como respuesta del sistema, es posible obtener la respuesta al impulso de la sala y, por transformada de Fourier, su respuesta en frecuencia [6], [8].

Independientemente del método de ecualización elegido, la evaluación de las señales captadas en el recinto nos permitirá conocer su respuesta en frecuencia y, por tanto, dispondremos de la posibilidad de minimizar el efecto de la sala y del sistema sonoro reforzando o atenuando aquellas bandas de frecuen-

cia que dichos bloques atenúen o refuercen, respectivamente [5].

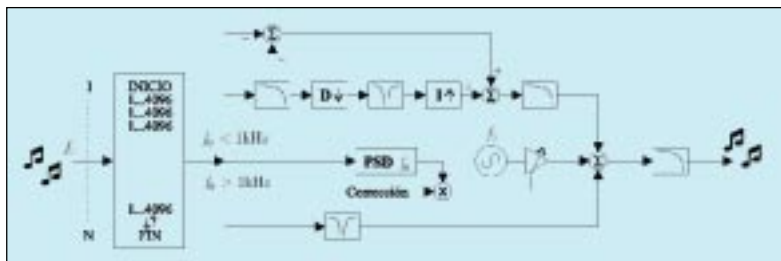
Los métodos que acaban de comentarse presentan dos inconvenientes:

- (i) La ecualización se realiza en condiciones irreales, por ejemplo, en ausencia de público, debido a que resulta un proceso molesto.
- (ii) Una vez realizada, es fija e incapaz de adaptarse a las condiciones cambiantes del recinto.

En este trabajo se propone un nuevo método que consiste en insertar un barrido de tonos con el nivel adecuado dentro de un pasaje musical de forma que, al ser reproducido dicho pasaje, la audiencia no perciba los tonos debido al efecto de enmascaramiento sonoro y al concepto del ancho de banda crítico, según el cual, la eliminación en un pasaje sonoro de un ancho de banda menor de 1/3 de octava pasa desapercibida para la audiencia [1], [2]. Sin embargo, el tono insertado dentro del pasaje se puede recuperar mediante filtrado, siendo posible de esta forma, conocer la respuesta en frecuencia de la sala durante la reproducción del pasaje sonoro y, además, de forma imperceptible para la audiencia. Por tanto, mediante la inserción de un barrido completo de tonos enmascarados, es posible obtener la relación entre la potencia con que fueron radiados y con la que se reciben y, por tanto, la respuesta en frecuencia de la sala, lo cual permitirá poder ecualizarla posteriormente durante la reproducción del pasaje.

## Metodología

El proceso completo ha sido realizado con un sistema de reproducción y almacenamiento digital basado en Ordenador Personal. Cada una de las pruebas ha consistido en seleccionar un pasaje sonoro procedente de un disco compacto, procesarlo con las funciones desarrolladas bajo Matlab [9] para crear los huecos



espectrales, que se corresponden con las frecuencias normalizadas de 1/3 de octava, insertar los tonos y generar un fichero de sonido que contiene el resultado. Finalmente, dicho fichero es radiado en una sala mediante un sistema de refuerzo sonoro (ver fig. 1) y, simultáneamente, se registra la señal que captan uno o varios micrófonos de referencia, que permitirán recuperar el pasaje con los tonos enmascarados pero alterados por la respuesta en frecuencia de la sala.

El paso siguiente será volver a procesar bajo Matlab el pasaje grabado para recuperar los tonos y poder evaluar la modificación de amplitud que han experimentado. En caso de que alguna de las frecuencias emitidas no haya podido ser recuperada, es posible recurrir a un factor de corrección de potencia del tono correspondiente, modificarlo según proceda y volver a repetir el experimento. En este caso, se debe prestar atención a que el tono con el nuevo coeficiente de potencia siga pasando desapercibido para la audiencia.

En general, el proceso descrito se puede controlar mediante varios parámetros de entrada que son: la duración de cada tono, el vector de frecuencias a las que se incluyen los tonos, el vector de factores de corrección de potencias de los tonos y el factor de diezmo para el trabajo con las bandas bajas de frecuencia.

Los filtros digitales empleados han sido siempre de respuesta infinita al impulso (IIR), pues requieren muchos menos coeficientes que los de respuesta finita (FIR) y, por tanto, un orden menor para cumplir con las

especificaciones buscadas [10], [11]. Además, para conseguir el comportamiento de fase cero con los sistemas IIR, se ha hecho uso del filtrado bidireccional de las secuencias procesadas [12].

Para la etapa de diezmo de la señal (ver fig. 1) se ha empleado un filtro paso bajo de Butterworth de orden 7, que permitirá limitar la frecuencia máxima de la señal antes de diezmar.

Para la etapa de filtrado de banda eliminada se ha elegido también un filtro de Butterworth pero de orden 6. De esta forma se consigue realizar un hueco espectral con un ancho de banda menor de 1/3 de octava de la frecuencia a la que se realiza el hueco. Esta elección viene impuesta por el funcionamiento del oído humano, pues se comporta como un banco de filtros con un ancho de banda variable según el concepto de ancho de banda crítico [1].

Como se ha dicho, en el filtrado de las bandas inferiores a 1kHz se utiliza la técnica de diezmo-filtrado-interpolación (ver fig. 1) con el fin de reducir las exigencias del filtro digital necesario [11]. En todos los casos, se emplea el segmentado de secuencias [10] en la señal de entrada para dividirla en tramos de 4096 puntos y luego procesarla.

Para clarificar las operaciones que se realizan sobre la señal, a continuación se presentan una serie de figuras en donde se actuará sobre un pasaje musical, de manera que resulte más sencilla la interpretación del proceso. Así, la figura 2 muestra parte del espectro del pasaje musical utilizado después de haber sido filtra-

do con un filtro de banda eliminada de Butterworth de orden 6 con una frecuencia central de 315Hz. El filtro inicial ha sido diseñado para una frecuencia central de 3150Hz, la señal se ha diezmo por un factor de 10, se ha aplicado el filtro, y se ha vuelto a interpolar de nuevo por 10 (ver rama superior del diagrama de la fig. 1).

En este caso, puesto que el proceso de diezmo, filtrado de banda eliminada e interpolación, deja redu-

do con un filtro de banda eliminada de Butterworth de orden 6 con una frecuencia central de 315Hz. El filtro inicial ha sido diseñado para una frecuencia central de 3150Hz, la señal se ha diezmo por un factor de 10, se ha aplicado el filtro, y se ha vuelto a interpolar de nuevo por 10 (ver rama superior del diagrama de la fig. 1).

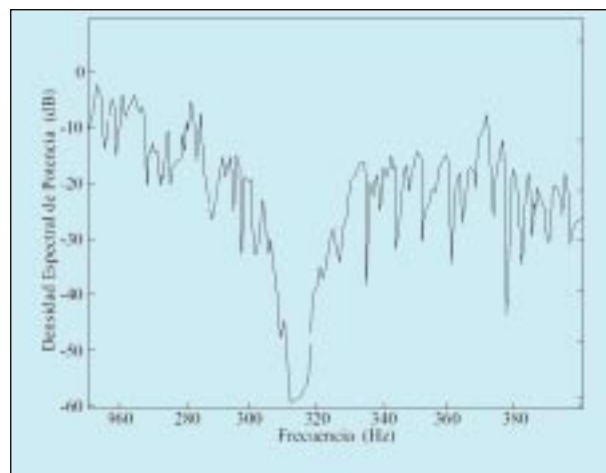


Fig. 2. Densidad espectral de potencia del pasaje musical tras aplicar el filtrado de banda eliminada con  $f_0 = 315\text{Hz}$ .

cido el ancho de banda de la señal a la frecuencia de corte del filtro paso bajo previo a la etapa de diezmo, debe instrumentarse una forma para conservar las altas frecuencias del pasaje musical.

Esto se consigue guardando las altas frecuencias (por sustracción de las bajas) y sumándolas directamente tras el proceso de interpolación. Esto es posible gracias al filtrado de fase cero.

Para los 1/3 de octava superiores a 1kHz, el tono se inserta directamente tras un filtrado de banda eliminada (ver rama inferior de la fig. 1).

En los huecos creados será donde se introducirán los tonos, de forma que cada uno de ellos quedará incrustado en su interior con el fin de que sea enmascarado por las frecuencias que le rodean, tal como

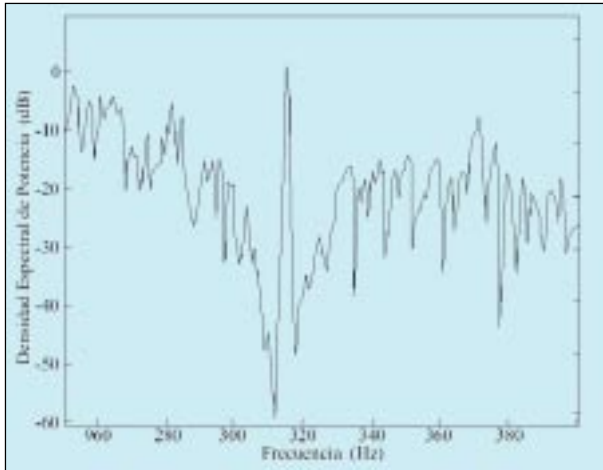
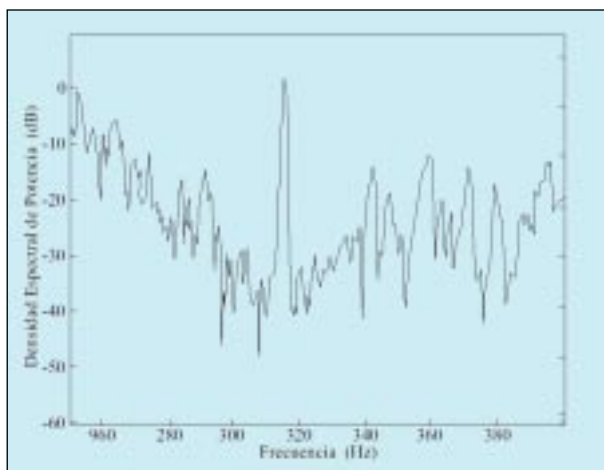


Fig. 3. Densidad espectral de potencia del pasaje musical con la inclusión de un tono de  $f_0 = 315\text{Hz}$  listo para su emisión en el recinto bajo test.

se muestra en la fig. 3. Los tonos se van incluyendo en instantes sucesivos de tiempo. La duración mínima de cada uno de los tonos es de 1 segundo, por defecto; esta duración es programable y depende del tiempo de reverberación esperado, interesando que la duración sea siempre mayor que dicho tiempo. La duración total de los 30 tonos evaluados determinará la duración mínima del pasaje musical a utilizar en el proceso de obtención de la respuesta en frecuencia de la sala.

Fig. 4. Densidad espectral de potencia del pasaje musical con la inclusión de un tono de  $f_0 = 315\text{Hz}$  recibido en el recinto bajo test.

Además, los tonos que se insertan en el hueco espectral creado deben tener una potencia concreta que viene determinada por la banda de frecuencias que vaya a ser eliminada. Así, mediante la relación de



Parseval [13] se calcula la densidad espectral de potencia de la señal y, posteriormente, se seleccionan los índices de la FFT para los que se desea calcular la potencia, normalizándola según el ancho de banda elegido [11]. Esto dará a conocer la potencia que el pasaje musical contiene en ese ancho de banda y permitirá decidir cuál es la amplitud adecuada del tono que debe insertarse en el hueco espectral correspondiente. Además, esta primera forma de determinación de la potencia que debe poseer cada tono, podrá variarse mediante el factor de corrección dependiendo de las condiciones de la sala, el pasaje sonoro y, sobre todo, para garantizar un nivel de recepción y recuperabilidad aceptables.

El paso siguiente será evaluar la modificación de amplitud que introduce la sala a dicha frecuencia (ver figura 4).

En el caso de que alguna frecuencia no sea recuperable, se puede recurrir al factor de corrección mencionado anteriormente, que permite variar la potencia con el fin de aumentarla, siempre y cuando este aumento no implique que el tono sea excesivamente audible.

## Resultados

Para las pruebas llevadas a cabo se han utilizado varios pasajes musicales, que abarcan diferentes estilos de música, con el fin de averiguar si algún tipo de música requiere una

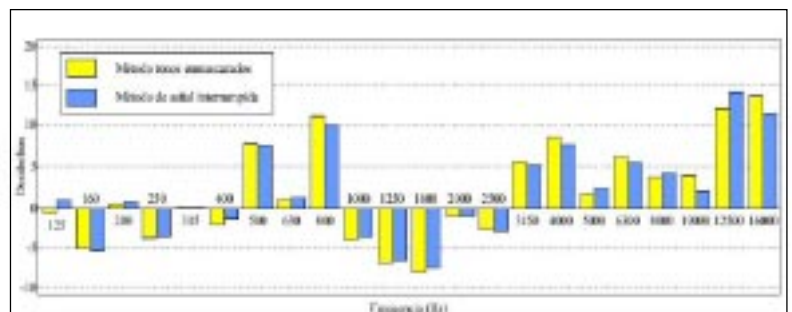


Fig. 5. Comparación de la respuesta de equalización necesaria para compensar la respuesta de la sala, obtenida mediante el método de señal interrumpida y mediante el método de tonos enmascarados.

Una vez el pasaje musical ha sido emitido con los tonos enmascarados, se deben recuperar las amplitudes de éstos con el fin de saber cuál ha sido su variación. Para ello, podrá pensarse en la realización de un filtrado en banda eliminada, si bien, una alternativa más práctica y elegante consiste calcular la FFT de la señal recibida y multiplicarla por una exponencial compleja con la frecuencia que se desea recuperar [14]. Esto permite obtener los coeficientes de la FFT asociados a dicha frecuencia y, por tanto, conocer la amplitud del tono correspondiente.

corrección de potencia especial sobre alguna banda de frecuencias. La respuesta en frecuencia obtenida con este método para los diversos pasajes probados ha sido comparada con la respuesta en frecuencia, obtenida para la misma sala, por los métodos tradicionales que utilizan ruido rosa y barrido de frecuencia. La comparativa de ambos análisis se muestra en la fig. 5.

Como se puede observar, el resultado de respuesta en frecuencia y la equalización necesaria para compensar la respuesta de la sala arrojan unos valores muy similares entre las

técnicas tradicionales y la de enmascaramiento.

Después de analizar diversos pasajes musicales con los tonos enmascarados en su interior se deduce que el método no suele precisar ajustes del factor de corrección de potencia.

Si bien, en aquellos pasajes donde la densidad espectral de potencia es muy reducida en ciertas bandas de frecuencia se ha hecho precisa una elevación del factor de potencia, siendo en algunas ocasiones apreciable el tono añadido.

Es recomendable, por tanto, utilizar pasajes musicales de amplio contenido espectral.

Otro hecho a destacar es la limitación en frecuencia que impone el propio sistema de refuerzo sonoro, que puede limitar la emisión de muy bajas frecuencias y por tanto, hacer innecesaria la ecualización fuera del ancho de banda del sistema de sonido.

Para finalizar se ha evaluado sobre un conjunto de 25 individuos el grado de apreciación y de molestia que supone la inclusión del tono enmascarado con un pasaje musical de amplio espectro. Mediante las medidas obtenidas de la molestia subjetiva realizadas puede afirmarse que su efecto es inapreciable.

Debemos tener en cuenta además que en las condiciones prácticas para las que está pensado este procedimiento de ecualización (actuaciones musicales, conferencias...) los oyentes no realizan una escucha crítica durante la música emitida previa al acontecimiento musical, y la inclusión de los tonos pasa más desapercibida.

## Conclusiones

En la presente contribución se ha mostrado una nueva forma de obtener la respuesta en frecuencia de una sala y la posibilidad de realizar su ecualización mediante la inserción de tonos dentro de un tramo musical

que pasan desapercibidos para la audiencia.

Esta nueva forma de proceder permite solventar los problemas tradicionales de ecualización de salas de audición musical, en donde la ecualización se realiza en condiciones diferentes de las finales, para evitar molestar a la audiencia, y además resulta imposible modificarla, de forma objetiva, una vez realizado el ajuste.

El método de los tonos enmascarados permite solucionar esta problemática y, como se ha mostrado en los resultados, es capaz de ofrecer una respuesta en frecuencia prácticamente igual a la que se obtiene con los métodos tradicionales.

Por ello, además de ser un método novedoso, su funcionamiento es muy satisfactorio.

En fases posteriores de este desarrollo está previsto implementar el método sobre un procesador digital de señal. □

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración prestada por todas las personas que participaron en la realización de las pruebas de audición, por su paciencia y alto grado de motivación e interés en el experimento.

## Referencias

- [1] W. M. Hartmann, *Signals, Sound, and Sensation: Modern Acoustics and Signal Processing*, Springer Verlag, 1998.
- [2] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Elsevier Science Publishers Ltd., 4th edition, 2000.
- [3] M. Karjalainen, E. S. A. Piirila, A. Jarvinen, and J. Huopaniemi, "Comparison of loudspeaker equalization methods based on *Digital signal processing* techniques," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 47, no.

1-2, pp. 14-31, 1999.

[4] J. N. Mourjopoulos, "Digital equalization of room acoustics" *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 42, no. 11, pp. 884-900, 1994.

[5] S. T. Neely and J. B. Allen, "Invertibility of a room impulse-response," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 66, no. 1, pp. 165-169, 1979.

[6] P. Vogel and D. Devries, "Electroacoustic system response in a hall - a convolution of impulse sequences," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 42, no. 9, pp. 684-690, 1994.

[7] M. Vorlander and H. Bietz, "Comparison of methods for measuring reverberation time," *Acustica*, vol. 80, no. 3, pp. 205-215, 1994.

[8] E. P. Palmer, R. D. Price, and S. J. Burton, "Impulse response and transfer function measurements in rooms by m-sequence cross correlation," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, no. 2, pp. 734-741, 1986.

[9] *Matlab 6.5 Reference Manual: The language for technical computing.*, The MathWorks Inc., 2002.

[10] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., 1989.

[11] V. K. Ingle and J. G. Proakis, *Digital Signal Processing Using Matlab*, Bookware Companion Series, 2000.

[12] *Signal processing toolbox for use with Matlab. User's Guide.*, The MathWorks Inc., 2002.

[13] A. D. Poularikas, *The Handbook of Formulas and Tables for Signal Processing*, IEEE Press, 1999.

[14] E. C. Ifeachor and B. W. Jervis, *Digital signal processing: a practical approach*, Addison and Wesley Publishing Company, 1993.