

Simulador de espacios acústicos

María Fernanda Díaz V.

Recibido el 25 de agosto de 2009. Aprobado el 30 de octubre de 2009

Resumen

Cuando un sonido es producido en un recinto, un oyente recibe una señal de sonido directo y una señal de sonido reflejado en cada una de las superficies. Por lo anterior, escuchar una orquesta sinfónica al aire libre es diferente a escucharla en un recinto cerrado; se generan sensaciones diferentes.

La sonorización de voces e instrumentos en una aplicación de grabación o sonido en vivo, generalmente involucra efectos que generan la sensación de que una voz o instrumento está siendo reproducida en un espacio acústico específico, por ejemplo: en un coliseo, en una iglesia, en una sala pequeña de conciertos, etc.

El presente artículo resume un trabajo que está orientado a comprender el uso de los filtros digitales para procesar una señal de audio y recrear la sensación de estar en diferentes recintos. El análisis de la función de transferencia y la primera aproximación de este simulador acústico se realizó usando los bloques de Simulink de la herramienta software de Matlab, basado en un ejemplo de reverberación de la Versión 7.0.4.36, y la tarjeta del Sistema de desarrollo TMS320C6711 DSK de Texas Instruments.

Palabras clave:

Acústica, Acústica arquitectónica, cámara anecoica, eco, filtro de eco, filtro de reverberación, reflexiones tempranas, reverberación, tiempo de reverberación.

Abstract:

When a sound is generated inside a hall, the listener receives a direct sound-wave and a reflected one produced by each one of the chamber surfaces. Hence, listening a symphony orchestra outdoors is different from listening it indoors: The sensations generated by the sound-waves are different.

The sonorization of voices and instruments in an audio recording or live-sound application usually includes effects to produce the sensation that a voice or an instrument is being played in a specific acoustic room, such as a coliseum, a church, a small concert hall, etc.

This paper is addressed to understand the use of digital filters to process an audio signal and recreate the sensation of being in different halls. The transfer function analysis and the first approximation of the acoustic simulator was implemented using Matlab's Simulink blocks, based on the reverberation example included in the version 7.0.4.36, and the Texas Instruments' TMS320C6711 DSK development board.

Keywords

Acoustics, architectural acoustics, anechoic chamber, early reflections, echo, echo filter, reverberation, reverberation filter, reverberation time.

I. Introducción.

El sonido es una onda mecánica que se define como la propagación de una perturbación en el aire. La velocidad del sonido se estima en 345 m/s o 1242 km/h a 23°C, con una variación de 0,17% por grado centígrado. La disciplina que se encarga de su estudio es la acústica.

La acústica es una disciplina nueva desde el punto de vista científico. En 1887 el físico inglés Lord Rayleigh escribió los fundamentos teóricos de la acústica y a finales del siglo XVIII Wallace Clement Sabine realizó aplicaciones importantes de la acústica en la arquitectura.

En el siglo pasado, con la evolución de la electrónica y las herramientas de software, los estudiosos de la acústica tuvieron las herramientas para producir y medir el comportamiento acústico de una sala. Hasta entonces los diseñadores acústicos se basaban en observaciones de recintos exitosos en la reproducción de señales sonoras (Vaquero & Gil, 1999). En Colombia la situación ha sido más empírica, pues muchas de las compañías que realizan sonorizaciones se basan en mitos y mediciones subjetivas.

La acústica se encuentra dividida en diferentes sub-disciplinas, algunas de ellas definidas por el ingeniero Federico Miyara (2004):

- *Acústica física*: Análisis de los fenómenos sonoros mediante modelos físicos y matemáticos.
- *Psicoacústica*: Estudio de las sensaciones evocadas por los sonidos y sus diversos parámetros.
- *Acústica arquitectónica*: Estudio de la acústica de salas y su influencia sobre la escucha de música y palabra.
- *Acústica estructural*: Estudio del sonido que se propaga por las estructuras en forma de vibraciones.
- *Mediciones acústicas*: Técnicas de medición de diversos parámetros como frecuencia, intensidad, espectro, etc.
- *Electroacústica*: Es la sub-disciplina de la acústica encargada del estudio de los dispositivos que convierten energía acústica en energía eléctrica (por ejemplo micrófonos), así como de los dispositivos que producen el efecto inverso, convirtiendo energía eléctrica en energía acústica (por ejemplo altavoces y cajas acústicas).

En el estudio de la acústica son importantes los conceptos de electroacústica, acústica arquitectónica, y tiempo de reverberación. Las principales causas que determinan una mala acústica en una sala, son la concentración de las ondas sonoras en determinados puntos y la reverberación. Para mejorar estas

condiciones se utiliza la sonorización que depende de la acústica propia de la sala y de la distribución, ajuste, y calidad de equipos electroacústicos.

El ajuste de un sistema de sonido debe considerar la respuesta en frecuencia y la respuesta de fase de una caja acústica en un recinto con características acústicas predeterminadas. Es importante realizar mediciones de la función de transferencia de la respuesta en frecuencia y respuesta de fase de las cajas acústicas usando como referencia una señal de ruido rosa. En la Figura 1 se puede observar las conexiones usando el smartLive.

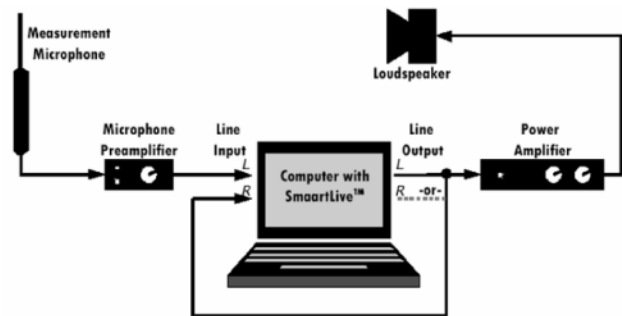


Figura 1. Configuración de hardware para medir un altavoz
Fuente: Henderson, 2004.

Para evaluar las propiedades acústicas de las salas y de los materiales, los científicos emplean instrumentos tales como cámaras anecoicas o medidores de nivel de sonido. La cámara anecoica es una habitación libre de ecos y reverberaciones, en la que todo el sonido es absorbido por pirámides de fibra de vidrio colocadas en la superficie de las paredes y el techo (Microsoft Encarta, 2007).

Acústica arquitectónica

La acústica arquitectónica estudia las propiedades del comportamiento del sonido para su propagación adecuada en un recinto. Dicho comportamiento se encuentra en función de fenómenos físicos como reflexiones tempranas, reverberación, eco, y resonancia.

El eco es uno de los fenómenos que se presenta en un lugar con superficies reflectoras. Es una única reflexión que retorna al punto donde se encuentra la fuente unos 100ms o más después de ser emitido el sonido. El tiempo T en que se produce se relaciona con la distancia d a la superficie más próxima (Miyara, 2004).

$$T=2d/c$$

Ecuación 1. Fuente: Miyara, 2004.

Donde c es la velocidad del sonido igual a 345 m/s. Cuando un sonido es producido en un recinto cu-

bierto por diferentes superficies como piso, techo, y pared, un oyente recibe una señal de sonido directo y una señal de sonido reflejado en cada una de las superficies. Las primeras reflexiones se denominan tempranas. En la Figura 2 puede observarse este efecto.

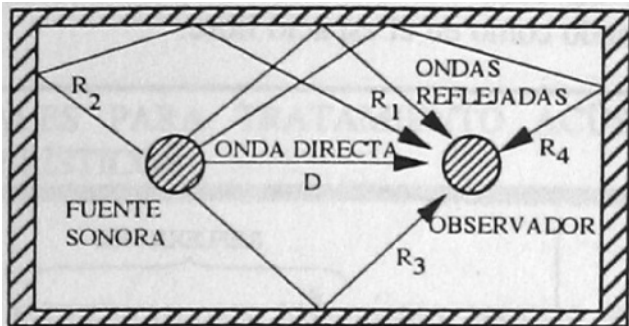


Figura 2. Reflexiones ocasionadas por la acústica del recinto debido a la excitación de una fuente sonora. Fuente: Recuerdo, 1999.

Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación es el tiempo requerido para que la densidad de energía promedio del sonido decrezca una millonésima parte de su valor inicial, después de que una fuente sonora es silenciada. Su unidad es el segundo (Olson, 1957).

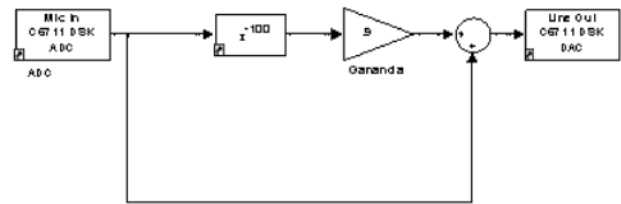
El físico Wallace Clement Sabine desarrolló una aproximación del tiempo de reverberación la cual plasmó en una fórmula, donde el tiempo de reverberación depende del volumen de la sala y de los coeficientes de absorción de las superficies de la misma; cuando éstas son muy absorbentes, el tiempo es pequeño y se dice que la sala es sorda. Si en cambio las paredes son reflectoras, el tiempo es muy grande, y los sonidos se percibirán entremezclados y confusos; entonces se dice que la sala es resonante (Microsoft Encarta, 2007).

Eco y Reverberación

Existe un fenómeno acústico derivado de las reflexiones del sonido en un recinto. Es una ligera prolongación del sonido una vez que se ha extinguido la reproducción de la fuente sonora original. Para que este efecto corresponda a una reverberación, estas ondas reflejadas sufrirán un retardo menor a 100ms. Cuando este tiempo es mayor podemos hablar de un efecto de eco donde se aprecia un efecto de repetición.

En el procesamiento digital de señales se usan filtros digitales para crear efectos especiales de eco y reverberación como pueden apreciarse en la Figura 3.

Filtro de Eco



Filtro de Reverberación

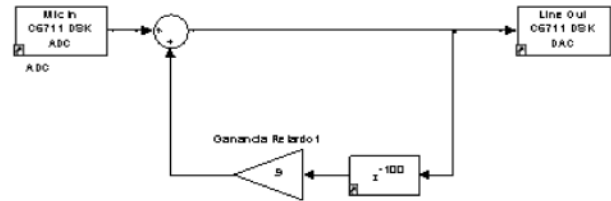


Figura 3. Diagrama de bloques para Filtros de Eco y reverberación. Fuente: Ashok, 2002.

Las ecuaciones de diferencia que describen los filtros de eco y reverberación son las siguientes, respectivamente:

$$y[n] = x[n] + \alpha x[n - D]$$

Ecuación 2. Fuente: Ashok, 2002.

La ecuación 2 describe un filtro FIR cuya salida es igual a la suma de la entrada con la entrada retrasada D muestras y atenuada por un factor alfa.

$$x[n] = y[n] - \alpha y[n - D]$$

Ecuación 3. Fuente: Ashok, 2002.

La ecuación 3 describe un filtro IIR cuyo diagrama puede verse como el inverso del sistema Eco, reemplazando alfa por menos alfa. También puede apreciarse que la salida $y[n]$ es la suma de la entrada con la salida retrasada D muestras y atenuada por un factor alfa.

Teóricamente debería ser fácil ajustar filtros de eco y reverberación para simular efectos realistas incluyendo más términos con diferentes retrasos y atenuaciones. En la práctica no es tan simple, y los filtros usados por fabricantes de equipos comerciales y sofisticados en efectos digitales de audio, son de propiedad exclusiva de cada una de estas compañías. (Ashok, 2002)]

Un simulador acústico comercial muy interesante es el Altiverb, herramienta software desarrollada por Audioease. Esta herramienta es un plug-in que permite

simular la respuesta de una fuente sonora en diferentes recintos del mundo, por ejemplo: En la Catedral de Notre Dame, sala de conciertos de Amsterdam, Iglesia de San Josephs, casa de la opera en Sidney, entre otros.

Este software contiene grabaciones de las respuestas al impulso de estos recintos y haciendo uso de la convolución, obtiene la respuesta del recinto ante una señal de entrada escogida por el usuario. La ecuación 4 define la convolución discreta, para encontrar la respuesta $y[n]$ de un sistema definido por la respuesta al impulso $h[n]$ ante una entrada $x[n]$.

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n - k]$$

El simulador presentado en este artículo no contiene mediciones de respuestas al impulso de diferentes recintos como lo hace el Altiverb. En cambio simula las reflexiones en un recinto haciendo uso de los filtros digitales de eco y reverberación variando el retardo de las muestras D .

II. Desarrollo Diseño de la Aplicación para el Simulador Acústico

El parámetro más importante que define las características acústicas de un recinto es el tiempo de reverberación. Para recrear la acústica de un lugar con base en los efectos de reverberaciones y eco, se escogió el sistema presentado en la Figura 4 que es una combinación de los filtros de eco y reverberación de la Figura 3. Este sistema se denomina Simulador Acústico.

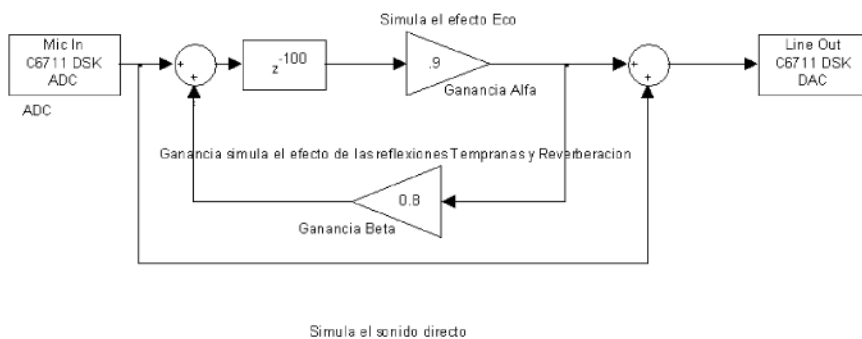


Figura 4. Diagrama de bloques Simulador Acústico Fuente: Matlab, 2005.

Para recrear la acústica de un recinto, el Simulador Acústico considera los siguientes efectos:

- Efecto de reverberación para producir la sensación de las reflexiones tempranas en las paredes de un

recinto gracias a la realimentación atenuada en un valor de Beta.

- Efecto de eco para producir la sensación de las reflexiones tardías más allá de los 100ms gracias al bloque de retardo atenuado en un valor α .
- Sonido directo al sumar en la salida la señal de entrada.

La acción del Simulador Acústico, al considerar que en cada reflexión la señal sonora sufre la misma atenuación, puede describirse usando la ecuación en diferencia presentada en la ecuación 5:

$$y[n] = x[n] + \alpha x[n - D] + \alpha^2 \beta x[n - 2D] + \alpha^3 \beta^2 x[n - 3D] + \dots$$

Ecuación 5. Fuente: El Autor, 2009

Si se retrasan ambos lados D unidades y se multiplica por α y β , se obtiene la ecuación 6:

$$\alpha \beta \cdot y[n - D] = \alpha \beta \cdot x[n - D] + \alpha^2 \beta \cdot x[n - 2D] + \alpha^3 \beta^2 x[n - 3D] + \dots$$

Ecuación 6. Fuente: El Autor, 2009

Restando la ecuación 6 de la 5, se obtiene una forma compacta del sistema mostrada en la ecuación 7:

$$y[n] - \alpha \beta \cdot y[n - D] = x[n] + \alpha \cdot x[n - D] - \alpha \cdot \beta \cdot x[n - D]$$

Ecuación 7. Fuente: El Autor, 2009

Se puede observar como los coeficientes que acompañan los diferentes instantes de la entrada son constantes, lo que significa que el sistema es LTI (Lineal e Invariante con el Tiempo). La función de transferencia en Z para este sistema se describe en la ecuación 8:

$$\frac{Y[z]}{X[z]} = \frac{1 + \alpha \cdot (1 - \beta) \cdot Z^{-D}}{1 + \alpha \cdot \beta \cdot Z^{-D}}$$

Ecuación 8. Fuente: El Autor, 2009

Las ecuaciones 5, 6, 7 y 8 fueron desarrolladas por el autor de este artículo, basadas en el análisis de las ecuaciones en diferencia de los filtros de eco y reverberación que se encuentran en el libro "Procesamiento de señales analógicas y digitales" de Ambaradar Ashok (2002).

Observando la ecuación 8, los valores de α y β deben ser inferiores a uno para que atenúen las señales en cada reflexión simulando algún tipo de absorción en las paredes y para hacer estable el sistema.

Tomando valores de α y β de 0.9 y 0.8 respectivamente, con un retardo $D=1200$ para graficar la respuesta al impulso del sistema del Simulador Acústico. Esta respuesta se presenta en la Figura 5.

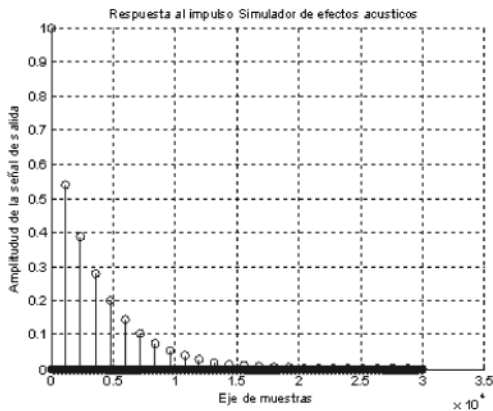


Figura 5. Simulación Respuesta al Impulso del Simulador Acústico en Matlab. Fuente: El Autor, 2009

La Figura 6 presenta un ecograma que representa las características acústicas de un recinto donde se aprecian los tiempos de las reflexiones tempranas, tardías, y el tiempo del sonido directo. Si se compara este ecograma con la respuesta al impulso de la Figura 6, se puede notar que ambas son similares en forma. Por tanto, el diseño es adecuado para aproximarse al efecto deseado.

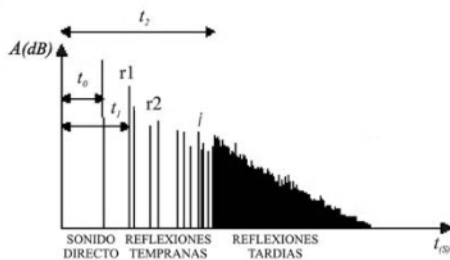


Figura 6. Ecograma de un Recinto. Fuente: Ramos, 2005.

Desarrollo de la aplicación en Matlab e Implementación de la Aplicación en la Tarjeta de desarrollo TMS320C6711 Texas instruments

Para desarrollar el simulador acústico en Matlab se usó Simulink aprovechando las posibilidades de descripción de esta herramienta y su generación de código en lenguaje C, el cual es posteriormente compilado utilizando el Code Composer de Texas Instruments.

Debe tomarse en cuenta que un retardo K muestra, para la frecuencia de muestreo del ADC del DSP a

8kHz, se convierte en $(K/8000)$ segundos para lograr conocer el tiempo de reverberación real estimado con la respuesta al impulso de la función de transferencia implementada para cada D en Matlab.

Después de implementar la ecuación de diferencias usando los diagramas de bloques de Simulink, puede añadirse el DIP switch block (C6711 DIP Switch) para variar el retardo de la ecuación en diferencias implementada y poder recrear diferentes efectos de reverberación y eco. Esto se logra al mover los switches de usuario 1, 2 y 3 de la tarjeta. En la tabla 1 se muestran los tiempos de reverberación estimados por Matlab para cada posible combinación de estos tres switches. Para definir el espacio acústico simulado se usó como patrón la tabla de tiempos óptimos de reverberación de la figura 10 según el tiempo de retardo.

Requerimientos para la implementación

Para implementar el Simulador Acústico, se necesitan los siguientes elementos:

1. Computadora con sistema operativo Windows con puerto paralelo configurado en el registro 0x378, y en modo SPP o ECP.
2. Code Composer 2.1
3. Matlab 7.0.1.
4. Un micrófono dinámico.
5. Un juego de parlantes autoamplificados.
6. Sistema de desarrollo TMS320C6711 DSK, cable de conexión para el puerto paralelo, y fuente de alimentación.

III. Resultados

El simulador genera 8 diferentes efectos de acuerdo a la posición de los switches de usuario de la tarjeta de desarrollo, creando la sensación de estar en diferentes recintos con diferentes tiempos de reverberación. En la Tabla 1 se incluye también el tiempo de reverberación para las diferentes posiciones de los interruptores de usuario del DSK.

Switch 3	Switch 2	Switch 1	Retraso D Delay	Muestra TR30	Estimado en Matlab TR30	Recinto Recreado o Música apropiada para este TR
Sw 3	Sw 2	Sw 1				
Off	Off	Off	100	2223	0,277	Estudios de Grabación
Off	Off	On	300	7600	0,95	Sala de conferencias Bandas de Rock o Teatros Pequeños
Off	On	Off	500	10000	1,25	Bandas de Rock o Teatros Pequeños
Off	On	On	600	12000	1,5	Iglesia, Opera o Auditorio
On	Off	Off	700	15000	1,87	Orquesta sinfónica
On	Off	On	900	19000	2,3	Orquesta sinfónica
On	On	Off	1100	20000	2,5	Orquesta sinfónica
On	On	On	1300	22000	2,75	Orquesta sinfónica

Tabla 1. Tiempo de Reverberación (TR30) estimado del Simulador Acústico y su respectiva asociación a diferentes recintos recreados. Fuente: El Autor, 2009

Los tiempos de reverberación estimados en Matlab se tomaron con respecto a la reducción en la señal a una milésima parte después de que la fuente sonora es silenciada. En la práctica de los estudios acústicos es muy utilizado el TR30 debido a la dificultad de recrear un nivel tan alto en la fuente omnidireccional sonora para lograr que decaiga la señal los 60dB para mediciones del TR60.

Las asociaciones a los diferentes recintos recreados con el tiempo estimado obtenido en Matlab están de acuerdo con los datos presentados en la Figura 7 que describe los tiempos óptimos para diferentes tipos de recintos o para determinada clase de género musical.

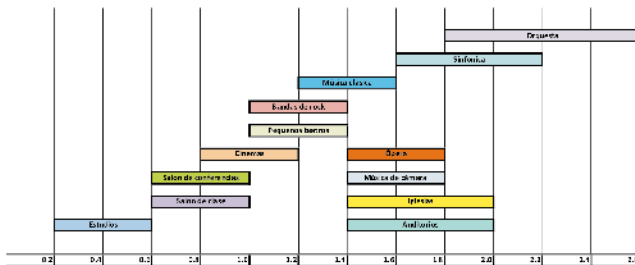
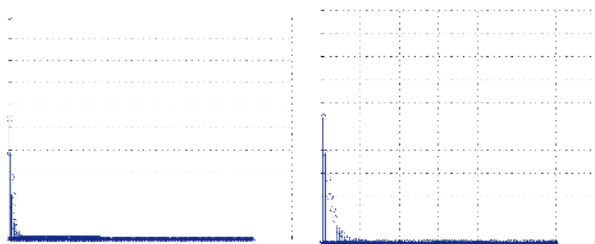


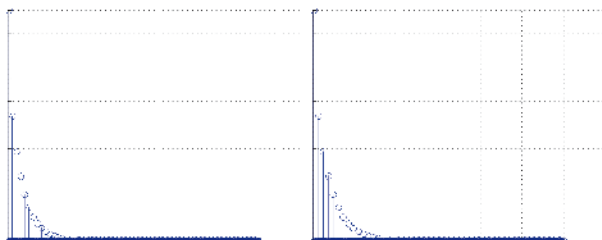
Figura 7. Tiempos óptimos de Reverberación en segundos de acuerdo al recinto acústico o género musical. Fuente: Dirac-delta, 2009.

En la Figura 8 pueden observarse los gráficos de respuesta al impulso de la función de transferencia en Z del simulador acústico, usando la ecuación 8 para cada uno de los diferentes valores del retraso D mostrados en la tabla 1. El tiempo se estimó cuando la señal decae 30dB. Debe tenerse en cuenta que el número de muestras debe dividirse por 8000 debido a la frecuencia de muestreo del ADC de la tarjeta de adquisición de datos.

D=100, TR30 estimado 0,277s D=300, TR30 estimado 0,95s

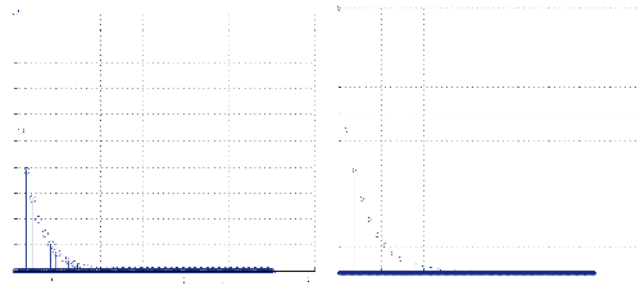


D=500, TR30 estimado 1,25s D=600, TR30 estimado 1,5s



D=700, TR30 estimado 1,87s

D=900, TR30 estimado 2,3s



D=1100, TR30 estimado 2,5s

D=1300, TR30 estimado 2,75s

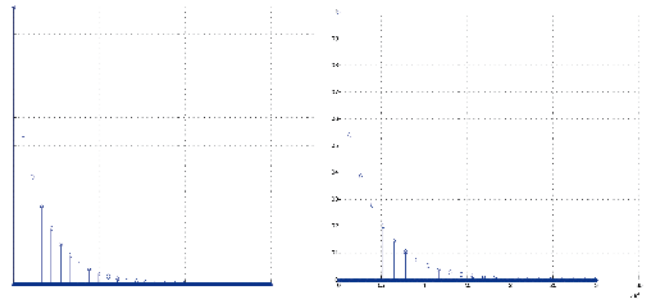


Figura 8. Simulación de Respuesta al impulso en Matlab del simulador acústico para diferentes retardos. Fuente: El Autor, 2009.

IV. Agradecimientos

Este trabajo se realizó con la colaboración de la Universidad Autónoma de Occidente y la Universidad del Valle quienes facilitaron las licencias de software.

V. Conclusiones

- La implementación del Simulador acústico en la tarjeta de desarrollo TMS320C6711 DSK con ayuda de Simulink implicó el uso del software code composer de Texas instruments pero simplifiqué la implementación en hardware.
- Se ha comprobado que en el diseño e implementación de un simulador de efectos acústicos se usan filtros de eco y filtros de reverberación. Involucrar estos dos tipos de filtros, genera un efecto más realista como los usados en las cámaras de efectos digitales usados en el audio profesional.
- Se logró recrear la sensación de encontrarse en diferentes recintos acústicos al apreciar el sonido procesado por el simulador. Es importante advertir que al desarrollar esta aplicación se realiza el proceso inverso del estudio acústico en un recinto, donde se genera un impulso sonoro y mediante un software se obtiene el ecograma determinando; una de las características más importantes que define el comportamiento acústico de una

sala como es el tiempo de reverberación. Con ayuda del simulador se recrea el sistema o sala y mediante la respuesta impulsional puede medirse el tiempo de reverberación que se escuchará.

VI. Referencias

- [1] Ashok, A. (2002). *Procesamiento de señales analógicas y digitales*. Editorial Thomson, México.
- [2] Altiverb 6, 2009. Recuperado el 2 de octubre de 2009, de <http://www.audioease.com/Pages/Altiverb/AltiverbMain.html>
- [3] Gráfico, "Optimum reverberation times at 1kHz for a number of different room sizes and uses". Recuperado el 8 de Octubre de 2009, de <http://www.diracdeltaco.uk/science/source/r/e/reverberation%20time/source.html>.
- [4] Dušić, D. (2007). *Guía para el desarrollo de aplicaciones sobre el TMS320C6711 DSK, utilizando Matlab-Simulink*. Universidad Autónoma de Occidente, Cali.
- [5] Microsoft Encarta (2007) [DVD]. "Cámara anecoica". Microsoft Corporation.
- [6] Eargle J. & Foreman C. (2002). *JBL Audio Engineering for Sound Reinforcement*. JBL Pro Audio Publications, USA.
- [7] Glen M. Ballou, editor (2005). *Handbook for Sound Engineers*. Tercera edición, Editorial Elsevier Inc, USA.
- [8] Henderson, P. (2004). *Empezando con SmartLive: Procedimientos Básicos de Montaje y Medición* (Traducción al Castellano por James Woods) SIA Software Company, Inc., Whitinsville, MA USA. Recuperado el 28 de octubre de 2007, de <http://www.eaw.com/info/EAW%20Smart/Manuals/Empezando-con-SmartLive.pdf>
- [9] MATLAB. Ejemplo de implementación de reverberación usando Simulink. Versión 7.0.4.365 Release 14. Enero 29 de 2005.
- [10] Meyersound (2000). *Guía para optimizar sistemas de sonorización*, México.
- [11] Miyara, F. (2004). *Acústica y sistemas de sonido*. Cuarta edición. Colombia
- [12] Olson Harry F. Ph. D. (1957). *Acoustical Engineering*. Editorial D. Van Nostrand company. Estados Unidos.
- [13] Proakis. Jhon, Manolakis. Dimitris (1998). *Tratamiento digital de señales*. Prentice-Hall. Madrid.
- [14] Pueo B. & Navarro J. (1996). *Desarrollo de un método de cálculo de parámetros acústicos usando procesamiento digital de la señal*. Escuela Universitaria de Gandia, Universidad Politécnica de Madrid. Tecniacustica, Barcelona.
- [15] Ramos O., Céspedes D. & Jasá V. (2005). *Sistema de realidad acústica virtual*. 7º Simposio Argentino de Inteligencia Artificial - ASAI2005 Rosario, 29-30 de Agosto. Argentina.
- [16] Recuero, M. (1999). *Acústica arquitectónica aplicada*. Editorial Paraninfo, Madrid. España.
- [17] Vaquero, M. & Gil, C. (1999). *Sonido profesional*. Editorial Paraninfo. Madrid. España.

María Fernanda Díaz V. Ingeniera Electrónica, Universidad Autónoma de Occidente. Especialista en Redes de Comunicación, Universidad del Valle. Estudiante Maestría en ingeniería con énfasis en electrónica, Universidad del Valle. Sus principales líneas de investigación son el audio y la acústica. Actualmente se desempeña como directora de programa de las Tecnologías en Electrónica y Telecomunicaciones de la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium. dir.electrónica@unicatolica.edu.co