



HERRAMIENTA 3D-FDTD PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO MEDIANTE VISUALIZACIÓN DEL CAMPO SONORO RESULTANTE

Referencia PACS: 43.55.Ka, 43.60.c

Machín, Jorge¹; San Martín, Ricardo¹; Ferrer, Miguel²

¹Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía s/n, Pamplona, España.
jorge.machin@unavarra.es, ricardo.sanmartin@unavarra.es

²Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Valencia, España.
mferrer@ocom.upv.es

ABSTRACT

This work shows the potential of the finite difference time domain method (FDTD) for those simulations that require some type of signal processing. A tool in MATLAB ® language has been implemented which can perform FDTD simulations and verify the correct functioning of different signal processing algorithms, such as Active Noise Control (ANC). Since it is a time simulation, FDTD method provides information about resulting sound field at each moment, reflecting the behavior of the algorithms and the room both in transient and stationary states.

RESUMEN

Este trabajo muestra el potencial de la técnica de diferencias finitas en el dominio temporal (FDTD) para el estudio de la propagación del campo acústico en recintos donde se generan sonidos en base a algún tipo de procesamiento de las señales acústicas existentes en el recinto. Se ha diseñado una herramienta, en lenguaje MATLAB®, en la que se pueden realizar simulaciones mediante FDTD y comprobar el correcto funcionamiento de diferentes algoritmos de procesamiento de señal para la aplicación de Control Activo de Ruido (CAR). La técnica FDTD, al tratarse de una simulación en tiempo, ofrece información del campo acústico resultante en cada instante, reflejando el comportamiento de los algoritmos y de la sala tanto en el transitorio como en el estacionario.

1. INTRODUCCIÓN

Mediante las técnicas FDTD la propagación del campo sonoro se simula numéricamente aproximando las derivadas parciales en espacio y tiempo de la ecuación de ondas mediante diferencias finitas. De esta manera se determina el nivel sonoro para cada momento en los puntos de una malla que comprende el espacio a simular, permitiendo modelar todos los fenómenos acústicos ondulatorios, como pueden ser la difracción, interferencias, etc. Esta técnica es ampliamente utilizada en la actualidad aplicándose, por ejemplo, en el estudio de la influencia del *seat deep effect* en auditorios [1], o el análisis de las prestaciones de diferentes tipos de difusores acústicos [2].

La interfaz implementada permite diseñar y analizar infinidad de geometrías tanto en 2D como en 3D. Se convierte por tanto en una herramienta flexible para el estudio de fenómenos ondulatorios cuya principal limitación es el tiempo necesario para realizar las simulaciones. Sin embargo, la creciente potencia computacional invita a pensar que esta limitación será en breve minimizada.

Por otro lado, para mostrar el potencial de la herramienta presentada en este estudio, se ha elegido un algoritmo aplicado al Control Activo de Ruido (CAR). Esta técnica consiste en reducir el ruido presente en un punto o zona a partir de una señal generada electroacústicamente en contrafase al ruido. Se basa en el principio de superposición de ondas sonoras, más concretamente en el de interferencia destructiva. Pueden encontrarse en la literatura numerosas referencias de su aplicabilidad [3] [4].

2. SIMULACIÓN DEL CAMPO SONORO MEDIANTE FDTD

La técnica FDTD simula la propagación del campo sonoro, para lo que utiliza una aproximación numérica en derivadas parciales de la ecuación de ondas. Para la resolución de estas ecuaciones se aproximan las primeras derivadas por diferencias finitas centradas.

La expresión de la aproximación utilizada para la solución de las derivadas parciales es la siguiente:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \frac{f(x_0 + \frac{1}{2} \Delta x) - f(x_0 - \frac{1}{2} \Delta x)}{\Delta x} \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{t=t_0} = \frac{f(t_0 + \frac{1}{2} \Delta t) - f(t_0 - \frac{1}{2} \Delta t)}{\Delta t} \quad (3)$$

El método elegido estima los valores en instantes alternos; se calculan las velocidades¹ u_x , u_y y u_z en el mismo instante de tiempo mientras que la presión p se obtiene en otro instante, con la finalidad de conseguir un error de segundo orden debido a las aproximaciones utilizadas en las derivadas temporales. Las expresiones a resolver en cada instante de tiempo son las siguientes:

$$p(x, t + \frac{\Delta t}{2}) = p(x, t - \frac{\Delta t}{2}) - \Delta t \rho c^2 \frac{u(x + \frac{1}{2}, t) - u(x - \frac{1}{2}, t)}{\Delta x} \quad (4)$$

$$u(x + \frac{1}{2}, t + \Delta t) = u(x + \frac{1}{2}, t) - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{p(x + 1, t + \frac{\Delta t}{2}) - p(x, t + \frac{\Delta t}{2})}{\Delta h} \quad (5)$$

La herramienta diseñada realiza simulaciones cumpliendo siempre la condición de estabilidad de que el número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) sea siempre inferior o igual a la unidad, una condición de convergencia de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Para que la interfaz fuese lo más versátil posible se decidió introducir en la frontera de nuestro dominio de simulación determinadas condiciones de contorno y estudiar las diferencias entre distintas absorciones en las paredes. Para ello, las paredes fueron definidas mediante Perfectly Matched Layer (PML) [5]. Al mismo tiempo, se consideró impedancia infinita en la frontera del dominio con velocidad de partícula nula ($u_n = 0$) en las superficies, donde n es la dirección perpendicular a la dirección del contorno [6]. Cabe destacar que el usuario sólo debe elegir la geometría de la sala y el coeficiente alpha del PML, y la interfaz se encarga de crear las matrices necesarias para la simulación, lo que facilita el cambio de la geometría a estudio y un ahorro importante en el tiempo de diseño de las diferentes experiencias. Todos los transductores que aparecen en estas simulaciones son puntuales, y se comportan de manera omnidireccional.

¹ El vector velocidad se resuelve dos o tres veces, según la dimensión 2D o 3D del dominio, una para cada uno de los ejes que lo forman.

3. ALGORITMO DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO (CAR)

Como algoritmo de procesamiento de señal para el estudio del campo acústico resultante se decidió implementar un sistema de Control Activo de Ruido basado en el algoritmo LMS con estructura de filtrado-x, uno de los más usados para este fin [7] [8] [9]. Este algoritmo usa filtros adaptativos que recalculan sus coeficientes en cada iteración de la simulación, lo que se asemeja a una aplicación en tiempo real. Dichos coeficientes varían minimizando la potencia de la señal de error (señal que se compone de la originalmente existente en el sensor de control, llamado sensor de error, mezclada con la señal generada por el algoritmo).

Tanto la interfaz como el algoritmo están diseñados para ser capaces de funcionar con tantas fuentes de ruido, fuentes secundarias “anti-ruido” y sensores de error (micrófonos) como se desee, lo que da un amplio abanico de posibilidades al usuario. Para el correcto funcionamiento de la simulación, deben calcularse tantos filtros adaptativos como pares señal de referencia – fuentes secundarias haya en la simulación.

En el caso de sistemas genéricos multicanales (cuando se tiene más de un sensor de error), los coeficientes de cada filtro adaptativo varían intentando minimizar la suma de las potencias de las señales de error en cada micrófono, es decir, los nuevos coeficientes se calculan como la media de todas las señales de error e_k por su correspondiente señal de referencia filtrada xf_{ijk} [7]. Dado un sistema genérico con I fuentes de ruido, J fuentes secundarias y K sensores de error, la señal de referencia i -ésima filtrada por la estimación del camino acústico que enlaza la fuente secundaria j -ésima con el sensor k -ésimo la llamaremos xf_{ijk} .

A los coeficientes del filtro adaptativo que relacionan la fuente de ruido i con la fuente secundaria j se les denomina w_{ij} y se calculan conforme a la siguiente expresión:

$$w_{ij} = w_{ij} - 2 \cdot \mu \cdot (xf_{ij1} \cdot e_1 + xf_{ij2} \cdot e_2 + \dots + xf_{ijk} \cdot e_k) \quad (6)$$

A su vez, se generan tantas señales “anti-ruido” como fuentes secundarias J :

$$y_j = x_1 \cdot w_{1j} + x_2 \cdot w_{2j} + \dots + x_I \cdot w_{Ij} \quad (7)$$

Existen tantas señales x_i de referencia como fuentes de ruido I . A su vez estas señales de referencia son filtradas por las plantas acústicas, que enlaza la fuente secundaria j -ésima con el sensor k -ésimo, B_{ij} :

$$xf_{ijk} = x_i \cdot B_{ij} \quad (8)$$

Y, por último, se monitoriza la señal de error e_k (señal a minimizar) en tantos puntos como sensores K se hayan definido.

La adquisición de las señales de referencia x_i , necesarias para el correcto funcionamiento del CAR, se realiza mediante un sistema mecánico, es decir, se considera que la señal de ruido es captada por un acelerómetro o similar. Este paso se realiza en casos reales [10] de forma mecánica para evitar la retroalimentación acústica del sistema o en motores encapsulados, para conocer la señal de referencia.

4. APLICACIONES IMPLEMENTADAS

En este apartado se presentan algunas simulaciones, tanto en 2D como en 3D, de ejemplos desarrollados con la interfaz diseñada que analizan el correcto funcionamiento del sistema CAR. De este modo se muestra la potencialidad de la herramienta al mismo tiempo que se visualizan diferentes fenómenos presentes en un sistema de este tipo.

4.1 Simulaciones 2D

La primera demostración del funcionamiento de la interfaz, en 2D, se trata de dos simulaciones en una sala en forma de “L” invertida, de 6x4 m en sus lados mayores, con una fuente de ruido

emitiendo, de forma continua, una señal senoidal de 300 Hz, y situada en la esquina inferior izquierda a 0.5 m de las dos paredes. La primera de ellas se realiza con un sistema CAR formado por cuatro fuentes anti-ruido (marcadas en la Figura 1 con círculos) y un único sensor de error (marcado en la Figura 1.izda con un guión), mientras que la segunda simulación está compuesta por las mismas cuatro fuentes secundarias y tres sensores de error (marcados con guiones en la Figura 1.dcha).

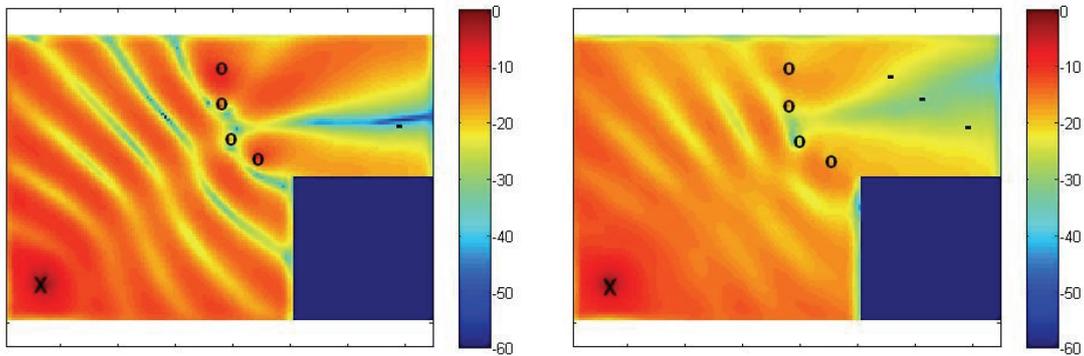


Figura 1. Presión media de las simulaciones, en dB ref. 1, con sistema CAR de 4 Fuentes secundarias y 1 sensor (izda) y 4 fuentes secundarias y 3 sensores (dcha).

La Figura 1 muestra el campo acústico resultante calculado integrando la presión sonora durante 10 ms ya en el estacionario del filtro adaptativo. En la misma gráfica se muestra un fenómeno presente en los sistemas de control activo de ruido local: se obtienen importantes atenuaciones en torno a los sensores de error, pero sólo en una pequeña zona alrededor de los sensores (directamente proporcional a la longitud de onda del ruido a eliminar), por lo que para que el sistema cree mayores zonas de atenuación, debemos añadir más sensores de control y situarlos estratégicamente en el espacio para que el efecto de cancelación local de ruido en cada uno se vaya solapando a través del espacio. Puesto que en la actualización de los coeficientes de cada filtro intervienen todas las señales de error, es posible que no se alcancen atenuaciones tan elevadas como en el caso en el que el sistema tiene un único sensor, puesto que los filtros adaptativos intentarán encontrar una solución de compromiso para minimizar la suma de la potencia de las señales de error en todos los sensores a la vez.

Se debe ser consciente de este efecto para diseñar el sistema CAR que más pueda interesar: se tiene que elegir entre atenuar una mayor zona de la sala o sacrificar esa zona por una atenuación mayor en un único punto.

A modo de ejemplo, en la Figura 2, se ofrece una representación de las señales grabadas en los sensores de error, para una nueva simulación. El sistema CAR es exactamente igual al de la Figura 1.dcha, pero la fuente de ruido emite una señal de ruido filtrada paso bajo a la frecuencia de 300 Hz.

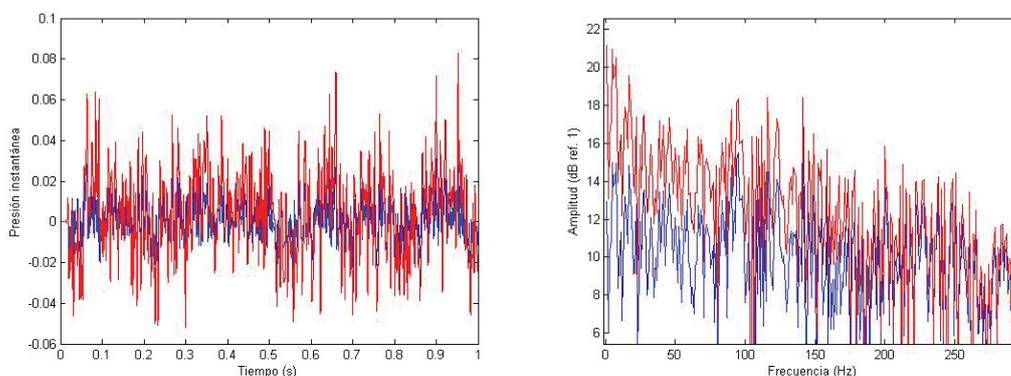


Figura 2. Presión instantánea en uno de los sensores con (azul) y sin (rojo) sistema CAR de 4 Fuentes secundarias y 3 sensores. Izda – en tiempo y dcha – en frecuencia y en dB ref. 1.

Se observa cómo el control activo de ruido es eficiente para señales aleatorias de baja frecuencia. Las mayores atenuaciones se consiguen a muy baja frecuencia, por debajo de los 100 Hz, como se puede ver en la Figura 2.dcha.

Por último, en la Figura 3, se muestra la diferencia entre activar o no el sistema CAR en la misma simulación. Como puede observarse, se aprecia una atenuación del ruido en toda la zona de interés.

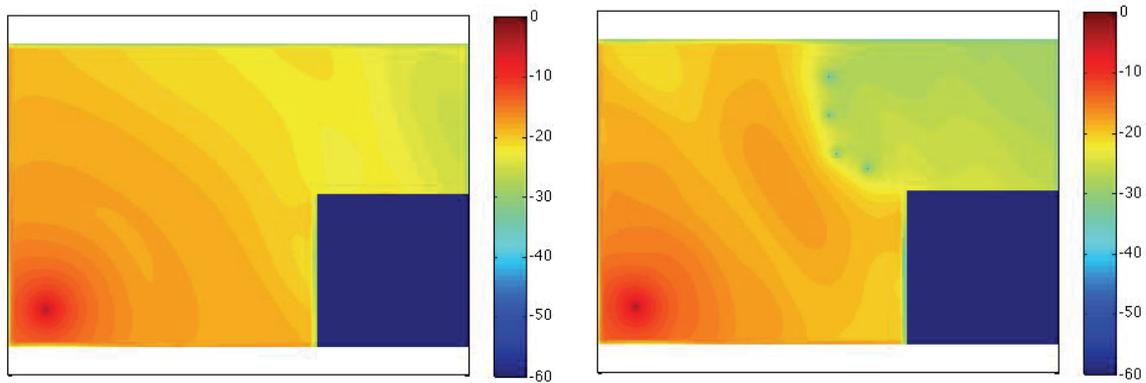


Figura 3. Diferencia entre CAR activado y desactivado, en dB ref. 1, a la izquierda la sala sin sistema CAR y a la derecha con sistema CAR de 4 Fuentes secundarias y 3 sensores.

4.2 Simulaciones 3D

Tras comprobar el correcto funcionamiento de la interfaz en el caso dos dimensiones se pasó al diseño de la interfaz en 3D. Dado que la simulación en 2D se consideró una primera aproximación al problema, se decidió realizar una simulación muy similar a la realizada en el caso de 2D (el mismo dibujo del sistema CAR, pero con variaciones en la altura) para ver el comportamiento de la sala y del sistema CAR en 3D.

La simulación llevada a cabo en 3D consiste en una sala en forma de L invertida con unas dimensiones de 6x4m en sus lados mayores y altura constante de 3 m. El sistema CAR está compuesto por 4 fuentes secundarias, todas ellas a 0.75 m de altura (puntos azules de la Figura 4) y 3 sensores de error a una altura de 1.5 m (puntos verdes de la Figura 4), la fuente de ruido (punto rojo en la Figura 4) está situada en la esquina inferior izquierda a una altura de 0.5 m sobre el suelo, emitiendo una señal senoidal de 100 Hz.

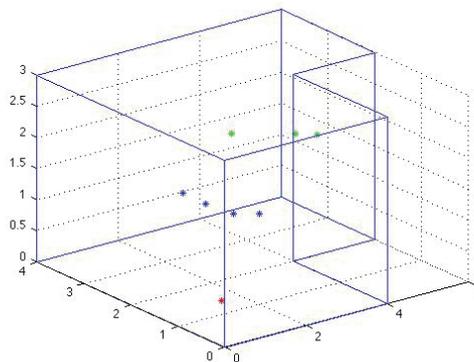


Figura 4. Esquema del sistema CAR simulado.

En la Figura 5 (izda), se muestran las presiones medias (integrando 10 ms en el estacionario del filtro adaptativo) de la sala con CAR a diferentes alturas. Se representan cortes horizontales con alturas 0.5, 0.75, 1.5 y 2 metros (de izda a dcha y de arriba abajo). Al mismo tiempo, en la Figura 5 (dcha) se presenta la misma simulación pero con el sistema CAR desactivado.

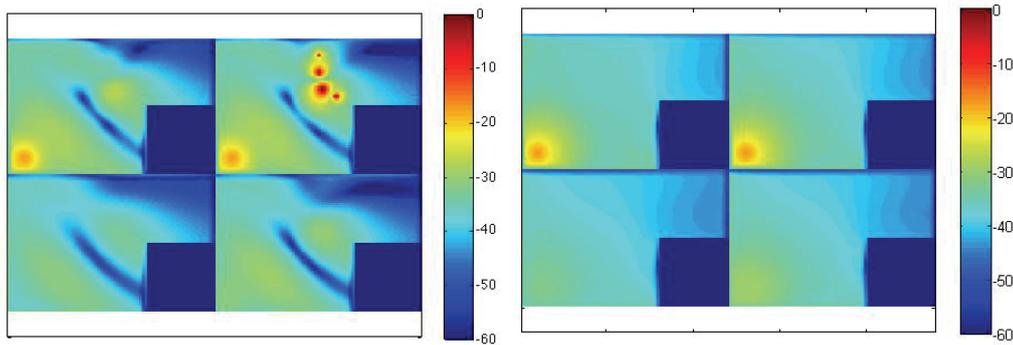


Figura 5. Presiones medias en la sala con CAR (izda) y sin CAR (dcha). De izda a dcha y de arriba a abajo se muestra el resultado de la simulación a diferentes alturas, 0.5, 0.75, 1.5 y 2 metros.

Por último, y para apreciar mejor la atenuación producida por el sistema CAR se representa en la Figura 6 la relación en dB (ref. presión media sin CAR) entre las presiones medias con y sin CAR activado para las mismas alturas.

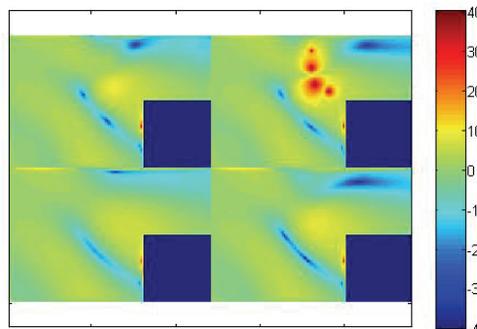


Figura 6. Atenuación producida por el CAR (dB ref. presión media sin CAR). De izda a dcha y de arriba abajo, resultado de la simulación a 0.5, 0.75, 1.5 y 2 metros.

Se observa claramente la actuación del sistema CAR. Puede apreciarse cómo en las posiciones de las fuentes secundarias el ruido ha aumentado considerablemente, consecuencia de los niveles emitidos por las mismas, y cómo en la mayor parte de la sala el ruido ha aumentado de nivel frente a los niveles obtenidos sin CAR. Sin embargo, también se observa cómo estos niveles de ruido sí que han disminuido en la zona de interés, alrededor de los sensores de error.

5 .CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo muestra la potencialidad de combinar la técnica de simulación FDTD con distintos algoritmos de procesado de la señal, más concretamente algoritmos adaptativos aplicados al Control Activo de Ruido (CAR). Al tratarse de una simulación en el dominio temporal, permite obtener información acerca de cómo actúan los diferentes algoritmos aplicados con el paso del tiempo. De esta manera, proporciona una representación del comportamiento de los algoritmos y de la sala tanto en el transitorio como en el estacionario, facilitando la comprensión y eficiencia de los algoritmos utilizados.

Se ha desarrollado una herramienta de simulación tridimensional en lenguaje MATLAB®, sencilla en su uso pero robusta en su rendimiento, que analiza el resultado del campo acústico en un recinto de un sistema CAR. Esta herramienta posibilita la observación tanto del campo acústico en cada momento como la evolución de los filtros adaptativos, analizando las señales en los sensores y permitiendo la modificación de la geometría y la absorción de la sala. Se ha comprobado que la técnica FDTD es apropiada para realizar esta tarea.

Se debe tener en cuenta la propagación del sonido en un recinto para elegir la mejor posición posible tanto de las fuentes secundarias “anti-ruido” como de los sensores de error. Una de las aplicaciones de esta herramienta es la posibilidad de realizar distintas simulaciones para

optimizar estas posiciones y aumentar la eficacia del sistema CAR [11]. Se ha observado que un sistema CAR puede ofrecer mayores atenuaciones en las zonas cercanas a los sensores con una única fuente secundaria y sensor. Sin embargo, utilizando más fuentes y/o sensores se observa una mayor superficie de atenuación.

La interfaz diseñada está optimizada para la simulación de diferentes algoritmos de procesamiento de señal, que pueden implementarse con relativa facilidad. Sin embargo, puede adaptarse para otros campos como la cancelación de eco, el estudio de difusores activos, o para la realización de exposiciones didácticas sobre fenómenos ondulatorios como la difracción, superposición de ondas, efecto Doppler, etc. Incluso podría utilizarse en caracterización de salas mediante la obtención de la respuesta al impulso, aunque con la limitación de la relación entre el tamaño de la malla y la frecuencia máxima a analizar.

Disminuir el tiempo de cálculo de las simulaciones es otro de los objetivos a desarrollar. Para ello, se están estudiando alternativas de depuración de código, optimización del cálculo numérico, hardware basado en unidades de procesamiento de gráficos (GPU) o líneas de simetría para reducir el espacio de cálculo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Lokki, A. Southern and L. Savioja. "Studies on seat deep effect with 3D FDTD modeling". Forum Acusticum, Denmark 2011.
- [2] J. Redondo. "Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes". Acta Acustica united with Acustica 93 (4), 611-622. 2007.
- [3] S. M. Kuo, D. R. Morgan, Active Noise Control Systems-Algorithms and DSP Implementation, New York, John Wiley & Sons, 1996.
- [4] S.M. Kuo, S. Mitra, W.-S. Gan. "Active noise control system for headphone applications", IEEE Transactions on Control Systems Technology 14 (2), 331-335. 2006.
- [5] Thomas L. Geers. "Evaluation of the Perfectly Matched Layer for Computational Acoustics". Journal of Computational Physics 139 (1), 166-183. 1998.
- [6] J. Escolano, S. Bleda, B. Pueo, J. J. Lopez. "Wave Field Synthesis simulation by means of finite-difference time-domain technique". EUSIPCO 2004 (European Signal Processing Conference), Austria 2004.
- [7] B. Widrow. Multichannel adaptive filtering for signal enhancement. IEEE Transactions on circuits and systems CAS-28 (6), 606-610. 1981.
- [8] E. Bjanarson. "Analysis of the filtered-X LMS algorithm". IEEE Transactions on Speech and Audio Processing 3 (6), 504-514, 1995.
- [9] S.M. Kuo, D.P. Das, G. Panda. "New block filtered-X LMS algorithms for active noise control Systems". IET Signal Processing 1 (2), 73-81. 2007.
- [10] M. Cuesta and P. Cobo Parra. "Control activo de ruido de escape de una fuente encapsulada utilizando una referencia múltiple". TecniAcústica 1999, Spain 1999.
- [11] S. Alireza and M. Hossein. "Optimizing Secondary Source Location in Acoustics ANC Systems". Information and Communication Technologies, ICTTA . vol (2), 1953 – 1957. 2006.