

## INFLUENCIA DE NÚMERO Y LOCALIZACIÓN DE FUENTES SECUNDARIAS EN EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA MULTICANAL DE CONTROL ACTIVO LOCAL DE RUIDO PARA RECINTOS CERRADOS

Leopoldo Budde<sup>a,b</sup>, Roberto R. Rossi<sup>a</sup>, Sebastián P. Ferreyra<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales (LabDSP), Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, AV Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Rep. Argentina, polibudde@gmail.com, rrossi@efn.uncor.edu, <http://www.dsp.efn.unc.edu.ar/>

<sup>b</sup>Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada al CONICET Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Maestro López esq. Av. Cruz Roja Argentina. CP 5016ZAA, Córdoba, Rep. Argentina, sferreyra@scdt.frc.utn.edu.ar <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra/>

**Palabras clave:** control activo de ruido multicanal, sistemas adaptativos, procesamiento digital de señales, acústica de recintos.

**Resumen.** El control activo de ruido se basa en la emisión de un campo acústico secundario que genera interferencia destructiva en la zona deseada. Cuando se busca cancelar ruido en un recinto, es necesario utilizar un sistema de control multicanal, en donde tanto el número como la posición de las fuentes secundarias son cruciales para su desempeño. El sistema debe ser adaptativo para aplicarse a situaciones de transferencia acústica no conocidas de antemano, y para adaptarse a variaciones de la fuente de ruido. En este trabajo se comparan los resultados obtenidos a partir de simulaciones de un sistema de control activo local multicanal en el interior de un recinto físico real, al variar el número y la ubicación de las fuentes secundarias. En una primera etapa se realizó un estudio de las posibles posiciones para cada fuente, basándose en los planos nodales de los modos propios existentes en el recinto. Luego se realizó el montaje de las configuraciones propuestas en el recinto físico real y se midieron las funciones de transferencia de los caminos secundarios involucrados. En una segunda etapa, se simuló el sistema de control analizando el efecto de la variación del número y localización de fuentes secundarias sobre las atenuaciones finales obtenidas en el sistema.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diferentes métodos para el control del ruido en recintos cerrados. El control pasivo de ruido (PNC: Passive Noise Control) es eficiente para controlar (atenuar) el espectro de medias y altas frecuencias, sin embargo para obtener resultados satisfactorios en bajas frecuencias requiere incorporar materiales de masa y tamaño considerables. Por otra parte, el control activo de ruido (ANC: Active Noise Control) permite reducir la amplitud del ruido (producido por una ó múltiples fuentes sonoras) en un punto del espacio introduciendo un campo acústico secundario. El ruido secundario es de igual amplitud y fase opuesta al primario, de manera que al interferirse las ondas se produce la cancelación de ambas señales (González, 2012). El ANC se presenta como una alternativa eficiente en bajas frecuencias, que complementa al método de PNC.

Al implementar un sistema de control activo de ruido (ANCS: Active Noise Control System) en un recinto se debe trabajar con múltiples fuentes secundarias y múltiples sensores de error (sistema multicanal), debido a la complejidad del campo sonoro en el interior del mismo (Kuo and Morgan, 1996).

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia tanto de la localización, como del número de fuentes secundarias en el desempeño de un sistema multicanal de control activo de ruido acústico para el interior de automóviles. Para esto se construyó un recinto de dimensiones similares a las de una cabina de automóvil, y mediante cálculos y mediciones del campo sonoro en su interior se determinaron las posibles ubicaciones para las fuentes de control. Además, se midieron las funciones de transferencia de los caminos secundarios para distintas configuraciones fuente-receptor propuestas, y se realizaron simulaciones computacionales de un sistema de control realimentado aplicando el algoritmo MFxLMS, tomando como señal primaria el sonido típico producido por un motor de combustión interna de 4 cilindros. Finalmente, se evaluó la influencia de la variación del número y localización de fuentes secundarias en las atenuaciones finales obtenidas, pudiendo concluir que al incrementar el número de fuentes secundarias se obtienen mayores atenuaciones del ruido a cancelar. Además, al analizar las distintas configuraciones espaciales se observa que localizar las fuentes secundarias en las esquinas del recinto mejora el desempeño del sistema.

## 2 RUIDO A CANCELAR

El campo sonoro en el interior de un automóvil presenta una alta complejidad debido a tres principales razones. En primer lugar, existen numerosas fuentes sonoras distribuidas a lo largo del vehículo. En segundo lugar, muchas de estas fuentes tienen componentes complejas y no estacionarias, conformadas por una mezcla de armónicos, señales aleatorias y elementos transitorios. Finalmente, el funcionamiento de un automóvil consiste en un conjunto de diferentes condiciones, desde encender el motor hasta la aceleración de las marchas (Allman-Ward et al, 2001). Por este motivo, se simplificó el modelo con el objetivo de implementar el ANCS en el prototipo diseñado.

Al analizar el sonido producido por un automóvil, es posible distinguir tres componentes fundamentales: el ruido producido por el motor (incluyendo admisión y escape), el ruido aerodinámico producido por la colisión del aire y la carrocería del vehículo (interfase fluido-estructura), y el ruido de rodamiento producido por el rozamiento de los neumáticos y la superficie. El giro del motor y el movimiento de los pistones generan un espectro armónico de ruido, cuyas componentes espectrales de banda angosta están directamente relacionadas a las revoluciones por minuto (rpm) del motor. Para autos modernos, el ruido aerodinámico es menos significativo que el ruido producido por el motor y los neumáticos, como consecuencia

del bajo coeficiente aerodinámico del vehículo. Sin embargo, resulta significativo cuando el objeto se desplaza a altas velocidades (por lo general superiores a 100 km/h). En cuanto al ruido de rodaje causado por los neumáticos y la superficie (pavimento, gravilla, tierra), puede decirse que la densidad espectral de potencia del mismo presenta una alta correlación con la velocidad del vehículo (Pudder and Steffens, 2000).

En este trabajo sólo se consideró el ruido producido por el motor del automóvil, el cual fue sintetizado a partir de una combinación específica de señales generadas. La frecuencia fundamental del sonido producido por un motor de combustión interna de 4 tiempos y 4 cilindros (ciclo Otto), operando a una velocidad angular de 2500 rpm, es 83 Hz. La fuente primaria de ruido se encuentra situada en el exterior del recinto a 0,40 m de la pared frontal y 0,50 m de altura, y en la Figura 1 se muestra la densidad espectral de potencia (PSD: Power Spectral Density) del ruido generado, medida por el sensor de error número 1. En la imagen se aprecia la componente fundamental y los distintos armónicos.

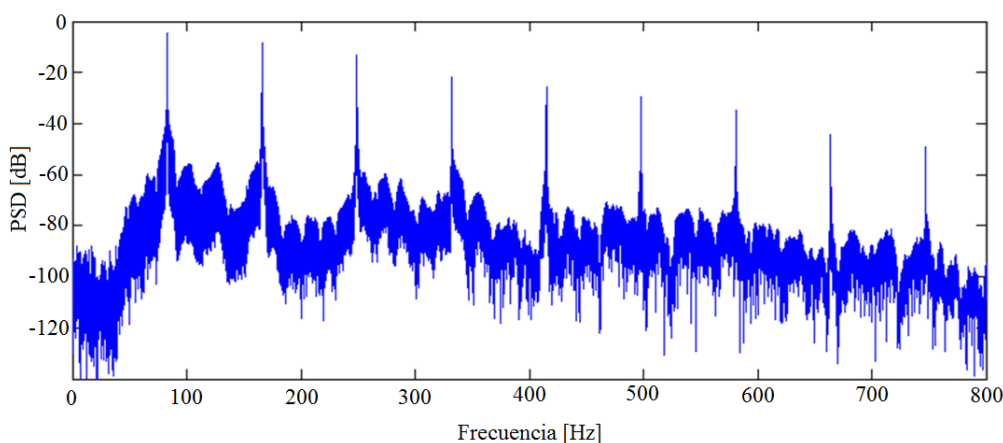


Figura 1: Densidad espectral de potencia de ruido simulado a cancelar (señal primaria)

### 3 SIMULACIONES COMPUTACIONALES

Los ANCS pueden clasificarse como prealimentado o realimentado. En un ANCS prealimentado una entrada de referencia coherente con el ruido es censada previa a su propagación más allá de la fuente secundaria. Por otra parte, en uno realimentado, se busca cancelar el ruido sin el beneficio de dicha entrada de referencia (Narahari, 2003). Los ANCS realimentados utilizan la señal de error para estimar una señal de referencia, además de utilizarlas en el proceso de adaptación. Debido al retardo inherente del sistema el controlador debe actuar en parte como predictor, siendo posible cancelar ruidos de banda angosta únicamente (González, 2012).

Para poder realizar el procesamiento digital de la señal, es necesario transferir las señales de ruido del entorno acústico al eléctrico mediante micrófonos (con el acondicionamiento de señal correspondiente), y posteriormente convertirla al dominio digital mediante conversores analógico/digital. Una vez procesada la información y generada las señales secundarias, las mismas deben ser convertidas al dominio analógico mediante conversores digital/analógico, amplificadas, y ser transferidas al entorno acústico por medio de altavoces (González et al, 2013). Las funciones de transferencia de todas las etapas nombradas suelen agruparse en una única función de transferencia llamada *camino secundario* para cada par fuente-receptor.

#### 3.1 Condiciones de simulación

El modelo computacional básico de un ANCS considera tres aspectos fundamentales: el

entorno acústico sobre el cual opera el sistema, los transductores (fuentes y sensores), y el procesamiento digital de señal a realizar. Con el objetivo de lograr mayor versatilidad y reducir el costo computacional de las simulaciones, se construyó un recinto de prueba, ubicándose en su interior sensores de error y fuentes secundarias. Se midió para cada caso de estudio la respuesta impulsiva de los caminos secundarios aplicando la técnica de deconvolución de señales determinísticas utilizando barridos sinusoidales de frecuencia (sweeps). Se midió también la respuesta impulsiva de los pares fuente primaria de ruido y sensores de error.

Debido a que cada medición caracteriza al entorno acústico y los transductores correspondientes para un determinado par fuente-receptor, al convolucionar la señal de ruido sintetizada con la respuesta impulsiva de la fuente primaria y cada sensor de error, se obtiene la señal correspondiente al ruido censado por cada uno de ellos. Luego al realizar la convolución de la señal generada por el controlador con la respuesta impulsiva de cada camino secundario, se obtiene la señal que corresponde al ruido secundario presente en cada sensor de error. Realizando la suma de las señales correspondientes en cada punto de estudio es posible calcular el ruido residual y las atenuaciones obtenidas por el sistema. Una vez caracterizados el entorno acústico y los transductores por medio de mediciones de respuestas impulsivas, es necesario simular el procesamiento digital de señal a realizar por el controlador.

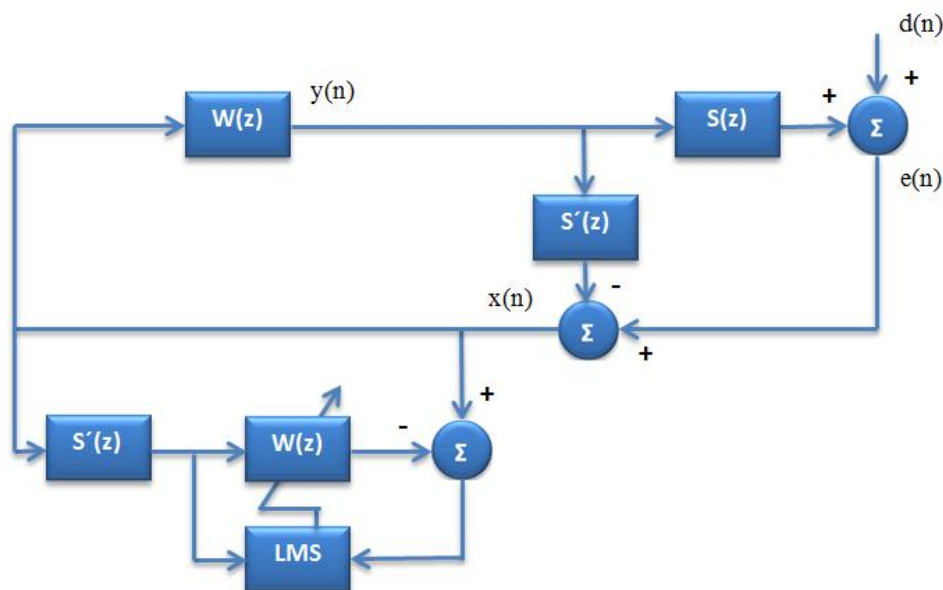


Figura 2: Diagrama en bloques del algoritmo MFxLMS

Al momento de implementar un sistema de control adaptativo existen diferentes algoritmos. El algoritmo seleccionado para esta aplicación es el LMS de referencia X Filtrada Modificado (MFxLMS: Modified Filtered-x Least Mean Square), por ser más estable que el original FxLMS (FxLMS: Filtered-x Least Mean Square), sin que esto implique una disminución de las atenuaciones sonoras obtenidas (González et al, 2013). En la Figura 2 se puede apreciar el diagrama en bloques de un ANCS monocanal con el algoritmo MFxLMS, en donde  $S(z)$  representa el camino secundario,  $S'(z)$  la estimación del mismo, y  $W(z)$  el filtro de control. La señal  $d(n)$  corresponde al ruido a cancelar, siendo  $y(n)$  la señal a la salida del filtro de control, y  $e(n)$  el ruido residual. La simulación se realizó con un procesamiento del tipo muestra por muestra con aritmética de coma flotante de doble precisión, razón por la cual los errores de precisión finita son despreciables. La frecuencia de muestreo utilizada fue 8

kHz, y se simuló la operación del sistema durante un tiempo fijo de 40 s en todos los casos analizados.

Al iniciar el funcionamiento del ANCS, en primer lugar se realizó un aprendizaje de cada camino secundario utilizando como señal de entrada ruido blanco de media 0 y varianza 1. Este proceso de aprendizaje del camino secundario se realizó también mediante un sistema adaptativo, ya que el camino secundario es desconocido para el controlador. En este caso, el esquema utilizado fue el de “identificación de planta” en lugar del esquema de “predictor” que se utilizará en el controlador realimentado. Dicho proceso de aprendizaje finalizó en el momento en que el valor medio cuadrático del error (principal medida del estado de convergencia de los algoritmos LMS) se estabilizó, es decir que no presentó variaciones mayores a un porcentaje determinado. Para las simulaciones se tomaron sólo los primeros 100 ms de cada camino secundario, y el aprendizaje de los mismos se realizó con filtros digitales de respuesta impulsiva finita (FIR: Finite Impulse Response) de 600 coeficientes, lo cual implica que el sistema de control sólo tuvo en cuenta los primeros 75 ms de los mismos. Si bien la estimación de los caminos secundarios no es perfecta debido a que solo se aprende una porción de cada uno de ellos, el algoritmo presenta una alta tolerancia a los errores en dicha estimación (Kuo and Morgan, 1996). Debido a que se trabajó con dos sensores de error y cuatro fuentes secundarias fue necesario realizar mediciones y aprendizajes de 8 caminos secundarios diferentes para cada configuración, los cuales tienen en cuenta la función de transferencia entre cada sensor y cada fuente.

Una vez definidas las características analógicas y acústicas del ANCS, se procedió a habilitar el proceso de aprendizaje de los controladores adaptativos independientes que excitan a cada una de las fuentes secundarias mediante el algoritmo MFxLMS. Una vez concluido el proceso de aprendizaje de los controladores, se procedió a evaluar el desempeño del sistema completo. Existen distintos factores que pueden ser analizados para evaluar el desempeño de un ANCS, entre ellos se encuentran la atenuación final lograda, el tiempo de convergencia y la estabilidad del sistema. En este trabajo, el criterio utilizado para comparar los resultados obtenidos en las distintas configuraciones propuestas fue el análisis de las atenuaciones finales en las principales componentes armónicas del ruido.

### 3.2 Recinto, fuentes y sensores

Las dimensiones del recinto de prueba construido se obtuvieron a partir del promedio de las dimensiones reales de 4 cabinas de automóviles tipo sedán. La geometría del recinto es tipo paralelepípedo rectangular, la cual permite calcular con exactitud las frecuencias de los modos propios de vibración. Está construido con paneles de madera tipo fenólico y fibra de media densidad, ambas de 9 mm de espesor, recubiertas interiormente con material absorbente sonoro poroso (espuma de poliuretano). Esto último, con el fin de reducir el tiempo de reverberación del recinto y aproximarse al valor del coeficiente medio de absorción sonora real de la cabina de un automóvil. Además, dicho acondicionamiento permitió mejorar la relación señal directa/reverberante logrando un mejor acoplamiento entre la energía de las fuentes secundarias y los micrófonos de error, lo cual es siempre conveniente en los ANCS (Kuo and Morgan, 1996).

Las fuentes secundarias utilizadas en el ANCS implementado son direccionales y presentan una respuesta en frecuencia de 40 Hz a 20 kHz,  $\pm 3$  dB. Son fuentes pasivas de dos vías compuestas por altavoces coaxiales montados sobre recintos ventilados del tipo reflector de bajos (bass réflex), los cuales fueron diseñados mediante el método de los parámetros Thielle-Small (Small, 1973). En todas las configuraciones propuestas las fuentes secundarias fueron ubicadas de forma tal que el eje normal a los altavoces cruce el punto medio definido por los dos sensores de error.

Los sensores de error utilizados son micrófonos de medición tipo electret (Behringer ECM 8000), los cuales presentan un patrón de directividad omnidireccional y una respuesta en frecuencia de 20 Hz a 20 kHz,  $\pm 3$  dB.

#### 4 CONFIGURACIONES

Si bien los ANCS dependen significativamente del procesamiento digital de señales implementado, si el arreglo físico no está optimizado los mismos pueden generar resultados insatisfactorios. Por tal motivo, resulta necesario conocer las características acústicas del sistema y aplicar las técnicas de diseño que se consideren más apropiadas para asistir al control adaptativo digital (Kuo and Morgan, 1996).

La presencia de ondas sonoras incidentes y reflejadas en recintos cerrados genera interferencia constructiva y destructiva, a partir de lo cual se crean las ondas estacionarias o modos propios de vibración en el recinto. Estos modos corresponden a una determinada frecuencia propia, y están caracterizados por un nivel de presión sonora que varía dependiendo del punto bajo análisis (Ferreyra et al, 2012). La existencia de modos propios genera en cada punto concentraciones de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual caracteriza a cada recinto (Carrión, 2001). A su vez, existen planos en donde la presión sonora es siempre cero para determinadas frecuencias, los cuales son denominados planos nodales (Kuttruff, 2000).

Para un desempeño efectivo del sistema debe tenerse especial cuidado en la selección de las posiciones de los sensores de error, los cuales no deben estar en superficies nodales mayores (Kuo and Morgan, 1996). Asimismo, las fuentes secundarias deben evitar estar ubicadas en planos nodales, de modo que sean capaces de excitar el campo sonoro de manera adecuada para generar la cancelación deseada. En base a esto se determinaron las posiciones de los sensores de error y de las fuentes secundarias planteando 3 configuraciones distintas, y se midieron las funciones de transferencia de los caminos secundarios involucrados. En la Figura 3 se presenta un esquema en 3 dimensiones simplificado de la configuración 3, a modo de ejemplo. A continuación se presenta una breve descripción de las tres configuraciones seleccionadas.

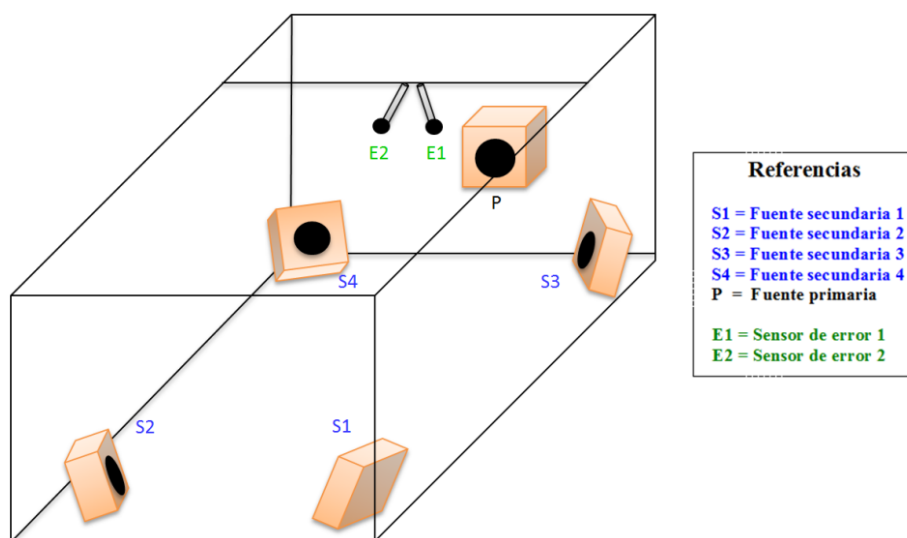


Figura 3: Plano en tres dimensiones simplificado de la configuración 3

## 4.1 Configuración 1

La primera configuración propuesta para el análisis, considera las fuentes secundarias situadas en las posiciones típicas de los altavoces en automóviles. Para determinar la posición exacta de cada fuente, se realizó un estudio de 4 automóviles tipo sedán y de los planos nodales en el interior del recinto. En la [Figura 4](#) se puede observar el plano en donde se especifican las ubicaciones. La altura de las fuentes y de los sensores de error es de 0,20 m y 0,85 m respectivamente.

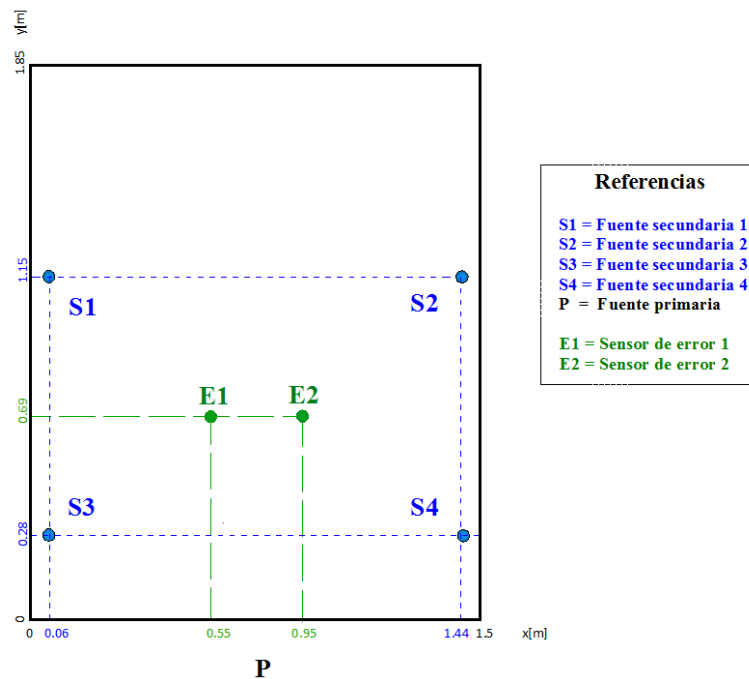


Figura 4: Vista superior de la configuración 1.

## 4.2 Configuración 2

La segunda configuración tiene por objetivo simplificar los caminos secundarios. Esto se logró mediante la reducción de las distancias entre las fuentes secundarias y los sensores de error. En la [Figura 5](#) se muestra un esquema de esta configuración. La altura de las fuentes y de los sensores de error es de 0,65 m y 0,85 m respectivamente.

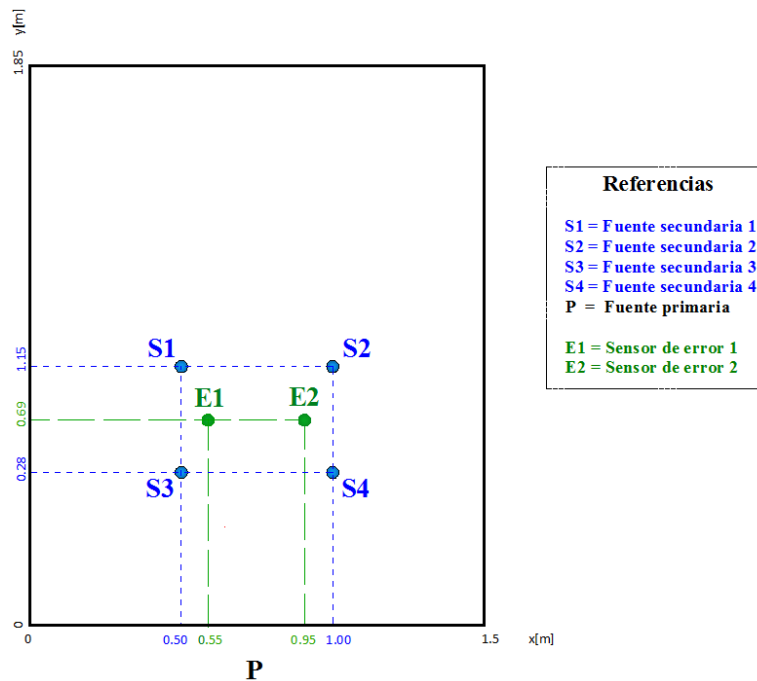


Figura 5: Vista superior de la configuración 2.

### 4.3 Configuración 3

Finalmente, se optó por implementar el sistema de control situando las fuentes secundarias en las esquinas del recinto, con el objetivo de excitar la mayor cantidad posible de modos propios de vibración. En la Figura 6 se muestra un esquema de esta configuración. La altura de las fuentes y de los sensores de error es de 0,20 m y 0,85 m respectivamente.

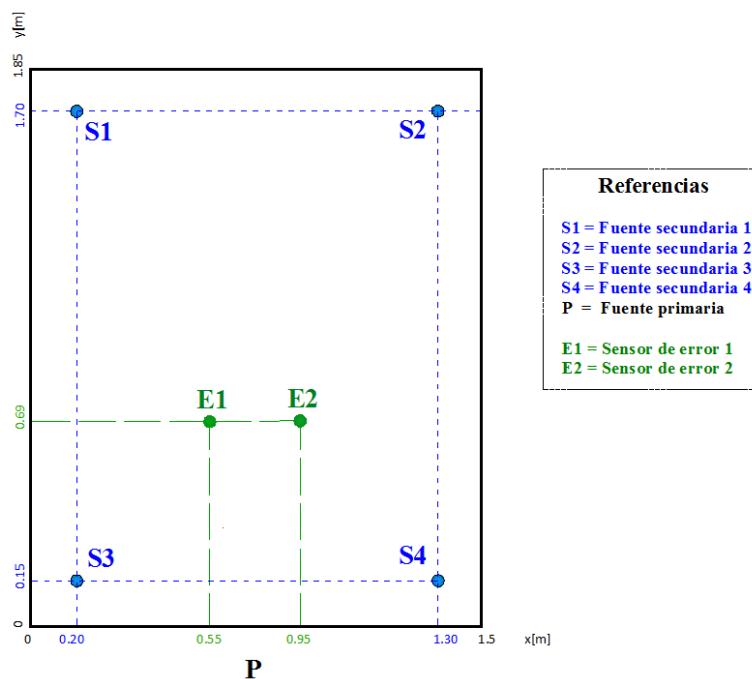


Figura 6: Plano de la configuración 3



## 5 RESULTADOS

### 5.1 Influencia del número de fuentes secundarias

El procedimiento empleado para evaluar cada una de las 3 configuraciones estudiadas fue el siguiente: se comenzó realizando simulaciones computacionales del sistema multicanal de control activo de ruido para la configuración 1 con una, dos, tres y cuatro fuentes secundarias activas. En la [Tabla 1](#) y [Figura 7](#) se presentan los resultados las atenuaciones sonoras obtenidas en decibeles para cada caso en los 6 primeros armónicos de la frecuencia fundamental del ruido a cancelar, y el promedio de las mismas.

Número de fuentes	Atenuación sonora [dB]						
	Frecuencia [Hz]						
	83	166	249	332	415	498	Promedio
1	1	8	10	3	2	7	5
2	81	48	68	59	3	8	44
3	83	70	76	53	3	12	49
4	83	78	77	63	4	14	53

Tabla 1: Atenuaciones sonoras en dB obtenidas para la configuración 1, al variar el número de fuentes secundarias.

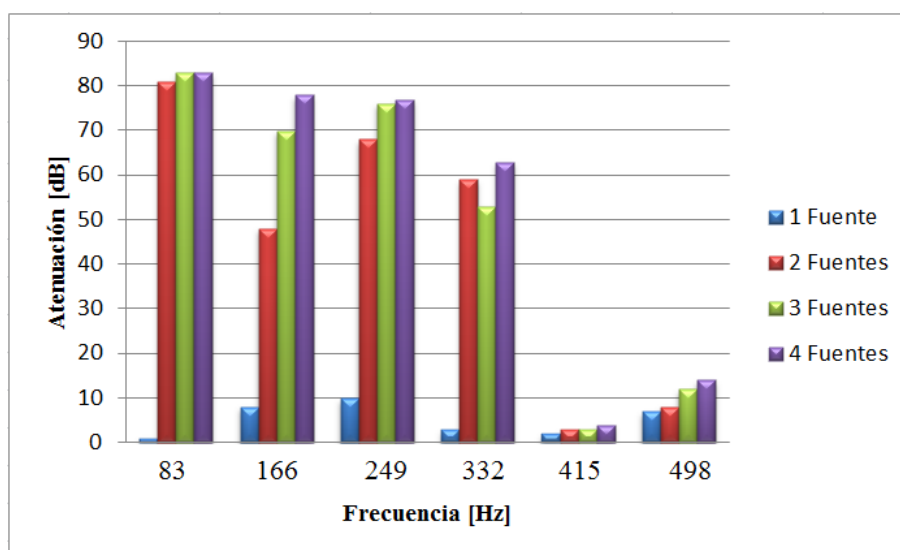


Figura 7: Gráfico de las atenuaciones sonoras obtenidas para la configuración 1, al variar el número de fuentes secundarias.

En la [Figura 8](#) se presenta la evolución temporal de la PSD de la señal de error en un sensor de la configuración 1, para una y cuatro fuentes secundarias.

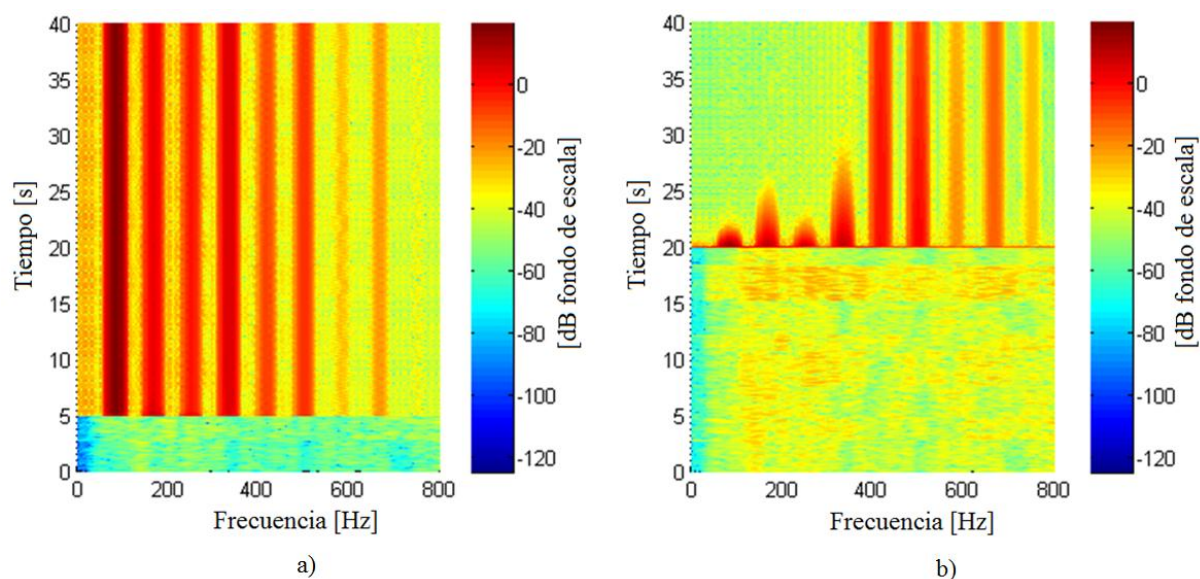


Figura 8: Evolución temporal de la PSD en la configuración 1: a) una fuente secundaria; b) cuatro fuentes secundarias.

Del análisis de los resultados obtenidos, ver Figura 7, se puede afirmar que al incrementar el número de fuentes secundarias activas, aumentan los valores de las atenuaciones sonoras obtenidas para los principales armónicos del ruido primario. La Figura 8 evidencia esta conclusión. La parte inferior de la misma muestra los primeros segundos de simulación, donde el sistema se utiliza para el aprendizaje del camino secundario. Se observa que dicho aprendizaje es más rápido con una sola fuente secundaria (5 s en la Figura 8 a) que con cuatro fuentes secundarias (20 s en la Figura 8 b). Sin embargo, una vez comenzada la acción de los controladores propiamente dichos, la cancelación del ruido se logra en un tiempo mucho menor al utilizar una mayor cantidad de fuentes secundarias. La Figura 8 a confirma que el hecho extremo de utilizar una única fuente secundaria en esta aplicación genera resultados insatisfactorios.

## 5.2 Influencia de la localización de las Fuentes secundarias

El proceso descrito en el apartado 5.1 se repitió para las otras dos configuraciones, variando en cada una el número de fuentes secundarias activas. En la Tabla 2 y Figura 9 se presenta el promedio de las atenuaciones sonoras en dB obtenidas en los armónicos de la señal generada para cada uno de los casos evaluados.

Número de fuentes	Atenuación sonora [dB]		
	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
1	5	6	3
2	44	35	60
3	49	51	80
4	53	54	75

Tabla 2: Atenuaciones sonoras promedio en dB para las 3 configuraciones propuestas con una, dos, tres y cuatro fuentes secundarias.

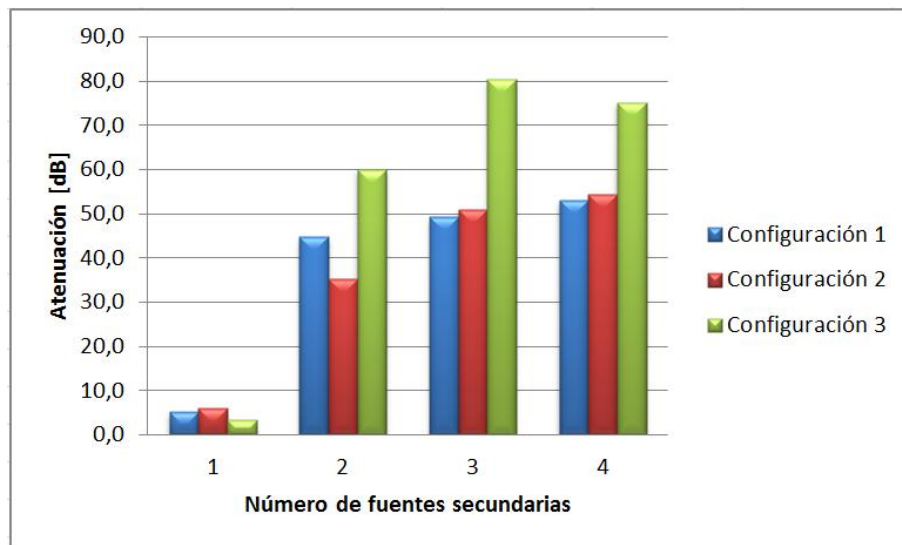


Figura 9: Gráfico de las atenuaciones sonoras en dB obtenidas para las distintas configuraciones variando el número de fuentes secundarias

Del análisis de los resultados obtenidos, se puede aseverar que no se observan diferencias significativas entre las atenuaciones sonoras obtenidas para las configuraciones 1 y 2. Sin embargo, la configuración 3 permitió obtener atenuaciones notablemente mayores a las dos primeras operando con 2, 3 y 4 fuentes secundarias. El hecho de localizar las fuentes en las esquinas del recinto implica que estas son capaces de excitar la totalidad de los modos propios presentes en el mismo, ya que estos presentan máximos de presión en dichas ubicaciones (Ferreyra et al, 2012). Esto constituye un factor fundamental en el desempeño del control de ruido, haciendo evidente el hecho de que un sistema físico no optimizado será incapaz de brindar resultados eficaces independientemente de la eficiencia del procesamiento de señal implementado.

## 6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En primer lugar se concluye que el aumento del número de fuentes secundarias en un sistema multicanal de control activo de ruido acústico para el interior de recintos permite obtener mayores atenuaciones de la señal a cancelar. Si bien al incrementar la cantidad de caminos secundarios se requiere más tiempo para el aprendizaje de los mismos, una vez finalizado dicho proceso el desempeño del sistema aumenta considerablemente.

En segundo lugar, al evaluar la influencia de la localización de las fuentes secundarias en los resultados obtenidos, se observa que en esta aplicación en particular ubicando las mismas en las esquinas del recinto se obtienen mayores atenuaciones debido a la capacidad de excitar la totalidad de los modos propios. Si bien esto permite obtener resultados superiores en comparación con las otras dos configuraciones propuestas, a la hora de implementar el sistema en un hardware específico deberá tenerse en cuenta, entre otras cosas, el procesamiento requerido para cada configuración en función de la complejidad de los caminos secundarios.

Es importante destacar que la mayor atenuación obtenida fue 80 dB, lo cual ocurrió en la configuración 3, para 3 fuentes secundarias activas, superando el resultado obtenido en la misma configuración con 4 fuentes. Queda sujeto a discusión el motivo por el cual esto ocurre.

El presente trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto Integrador “Sistema de Control Activo de Ruido Acústico Periódico para el Interior de Automóviles” de la carrera Ingeniería

Electrónica en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Actualmente se está desarrollando la implementación del procesamiento de señal en tiempo real de dicho ANCS en el módulo de evaluación del DSP StarCore MSC7116 de la empresa Freescale Semiconductor Inc. Se propone como trabajo futuro realizar el mismo estudio llevado a cabo en este trabajo, pero realizando el procesamiento de señal en el controlador operando en tiempo real.

## 7 AGRADECIMIENTOS

A la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba. Al Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales (LabDSP), Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Al Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada al CONICET, de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.

## 8 REFERENCIAS

- Allman-Ward, M., Balaam, M.P. and Williams, R., Source Decomposition for Vehicle Sound Simulation. *CETIM Conference*, 2001.
- Carrión Isbert, A., Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, *Alfaomega*, 2001.
- Ferreira S. P., Cravero G. A., Ramos O, Tommasini F., y Araneda M. Identificación de modos propios de vibración de recintos a partir del análisis de respuestas impulsivas. *Mecánica Computacional* Vol. XXXI, pág. 3969-3989. X Congreso Argentino de Mecánica Computacional. 13 al 16 noviembre de 2012, Salta, República Argentina.
- González, F.A., Controlador activo adaptativo de ruido acústico periódico para un protector de audición y/o auricular. *Proyecto Integrador, LabDSP, FECEFyN, UNC*, 2012.
- González, F. A., Rossi, R., Molina, G. R., and Parlanti, G, FxLMS and MFxLMS Stability Constrains when used in Active Noise Control. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 11(1), 213-217, 2013.
- Kuo, S.M, and Morgan, D.R., Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. *Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing*, 1996.
- Kuttruff H., Room Acoustics, *Fourth Edition*, Taylor and Francis, 2000.
- Narahari, N., Noise cancellation in headphones. M. Tech. credit seminar report, Electronic Systems Group, EE Dept, IIT Bombay, 2003.
- Pudder, H. and Steffens S., Improved Noise Reduction for Hands-Free Car Phones Utilizing Information on Vehicle and Engine Speeds. *EUPISCO, Tenth European Signal Processing Conference (pp. 1851-1854)*, 2000.
- Small, R. H. Vented-Box ludspeakers system, small-signal analysis, large-signal analysis, synthesis and appendices. *Journal of the Audio Engineering Society*, 21:363-372, 438-444,549-554, 635-639, 1973.