

Pontificia Universidad Javeriana

Maestría en Ingeniería Electrónica

**Estudiante:
Mauricio Alberto García Martínez**

**Directores:
Ingeniero Diego Patiño PhD.
Ingeniero Ricardo Quintana M.Sc.**

Trabajo de investigación

**Proyecto de Investigación:
Sensores virtuales en control activo de ruido**

Noviembre de 2015

Tabla de contenido

1. Introducción	5
1.1 Justificación.....	7
1.2 Objetivos	9
1.3 Elección de la máquina o ruido a atenuar	9
2. Identificación del sistema electro-acústico	14
2.1 Identificación paramétrica.....	14
2.2 Resultados	19
2.3 Conclusiones en la identificación del camino secundario.....	26
3. Algoritmo FxLMS para control activo de ruido	27
3.1 Resultados de simulación del algoritmo FxLMS implementado (archivo .m).....	29
3.2 Implementación del algoritmo FxLMS en la tarjeta de procesamiento digital de señales TSM320C6713 DSK.....	30
3.3 Conclusiones.....	37
4. Algoritmo de sensor virtual	38
4.1 Técnica de micrófono virtual adaptativo LMS.....	39
4.2 Metodología para obtener los datos de simulación.....	40
4.3 Evaluación de la robustez del algoritmo de estimación y control	42
4.4 Comportamiento del algoritmo, variando la distancia entre la posición del sensor real y virtual	46
5. Conclusiones y Trabajo futuro	50
Bibliografía	52

Lista de Imágenes

Imagen 1. Diagrama del algoritmo FXLMS.....	5
Imagen 2. Diagrama del sistema de control que utiliza sensores virtuales	8
Imagen 3. Sierra Sin fin.....	10
Imagen 4. Cizalla	10
Imagen 5. Tronzadora.....	10
Imagen 6. Torno	10
Imagen 7. Fresadora	11
Imagen 8. Compresor de aire	11
Imagen 9. Compresor utilizado	12
Imagen 10. Medición del compresor	12
Imagen 11. Espectro general del ruido del compresor	13
Imagen 12. Diagrama de bloque estructura generalizada	14
Imagen 13. Diagrama de bloque estructura ARX.....	15
Imagen 14. Diagrama de bloque estructura FIR	15
Imagen 15. Diagrama de bloque estructura AR	15
Imagen 16. Diagrama de bloque estructura modelo FIR.....	16
Imagen 17. Diagrama de bloque estructura modelo AR.....	16
Imagen 18. Diagrama de bloque modelo ARX	17
Imagen 19. Diagrama de bloque algoritmo LMS.....	18
Imagen 20. Filtro adaptativo FIR.....	19

Imagen 21. Diagrama de bloques algoritmo FxLMS.....	28
Imagen 22. Configuración de la implementación.....	31
Imagen 23. Atenuación de frecuencia de 120 Hz	32
Imagen 24. Atenuación del ruido en el tiempo.....	32
Imagen 25. Atenuación del ruido en frecuencia	33
Imagen 26. Algoritmo para descargar a la DSP	34
Imagen 27. Señal controlada de 100 Hz, en la DSP	35
Imagen 28. Señal controlada a 100 Hz (frecuencia) en la DSP.....	35
Imagen 29. Control de ruido en el compresor en DSP ($\mu = 3e-04$).....	37
Imagen 30. Control de ruido en el compresor en DSP ($\mu = 3e-04$).....	37
Imagen 31. Diagrama de bloque general del enfoque de sensores virtuales	38
Imagen 32. Diagrama de bloque del algoritmo LMS para sensores virtuales [23]	39
Imagen 33. Algoritmo integrado de control y estimación (Simulink).....	40
Imagen 34. Algoritmo LMS para identificación de Wu [23]	42
Imagen 35. Configuración de los micrófonos y fuentes para la prueba de robustez.....	42
Imagen 36. Atenuación en posición del sensor virtual (4 personas)	43
Imagen 37. Atenuación en posición del sensor virtual (4 personas)	44
Imagen 38. Atenuación en posición del sensor virtual (1 personas)	44
Imagen 39. Atenuación en función de la frecuencia (personas)	45
Imagen 40. Atenuación en función de la frecuencia (puerta y ventana)	46
Imagen 41. Configuración de las fuentes y micrófonos para la prueba de distancias.....	47
Imagen 42. Ejemplo de la forma modal en una sala rectangular [49].....	48
Imagen 43. Atenuación del ruido del compresor a varias distancias.....	48

Lista de Tablas

Tabla 1. Elementos del algoritmo FxLMS	6
Tabla 2. Características de las máquinas.....	11
Tabla 3. Resultados de identificación ARX con el ruido del compresor	20
Tabla 4. Resultados de identificación FIR con el ruido del compresor	21
Tabla 5. Resultados de identificación AR con ruido del compresor.....	21
Tabla 6. Resultados de identificación LMS con ruido del compresor.....	21
Tabla 7. Resultados de identificación ARX con el barrido de frecuencia	22
Tabla 8. Resultados de identificación FIR con el barrido de frecuencia.....	22
Tabla 9. Resultados de identificación AR con el barrido de frecuencia.....	22
Tabla 10. Resultados de identificación LMS con el barrido de frecuencia	23
Tabla 11. Resultados de identificación ARX con ruido blanco	24
Tabla 12. Resultados de identificación FIR con ruido blanco.....	24
Tabla 13. Resultados de identificación AR con ruido blanco	24
Tabla 14. Resultados de identificación LMS con ruido blanco	24
Tabla 15. Resultados de identificación LMS con ruido blanco	25
Tabla 16. Resultados de simulación FxLMS.....	30
Tabla 17. Elementos utilizados en la implementación.....	31
Tabla 18. Resultados de atenuación en Simulink (Tonos).....	33
Tabla 19. Resultados de atenuación en Simulink (compresor)	34
Tabla 20. Resultados de atenuación en la DSP (tonos puros)	36

Tabla 21. Resultados de atenuación en la DSP (Compresor)	36
Tabla 22. Estimación de filtros para la simulación del sensor virtual	41
Tabla 23. Atenuación del ruido del compresor en la posición del sensor virtual.....	43
Tabla 24. Degradación promedio de la atenuación respecto a 1 persona	45
Tabla 25. Atenuación del ruido del compresor en la posición del sensor virtual.....	45
Tabla 26. Degradación promedio de la atenuación (Personas)	46
Tabla 27. Comportamiento del algoritmo a diferentes distancias.....	47
Tabla 28. Degradación promedio de la atenuación (Distancias).....	49
Tabla 29. Comportamiento del algoritmo a diferentes distancias (400 coeficientes) utilizando como entrada el tono de 100 Hz	49
Tabla 30. Comportamiento del algoritmo a diferentes distancias (1000 coeficientes) utilizando como entrada el tono de 100 Hz	49

1. Introducción

El ruido acústico afecta la calidad de vida de la sociedad y se puede definir como una sensación auditiva desagradable para el receptor [3], o como un sonido no deseado, siendo este causante de estrés, enfermedades auditivas crónicas, bajo rendimiento laboral [4], etc. En la mayoría de industrias se puede encontrar maquinaria que genera ruidos, los cuales causan a largo plazo, cambios negativos en la salud de los empleados. Una de las empresas en que se tiene este tipo de problemas, es la industria metalmecánica, ya que en este entorno se trabaja continuamente con una gran variedad de máquinas generadoras de varios tipos de ruido acústico, entre ellas, herramientas que cortan, pulen y perforan metal, u otras como los compresores de aire utilizados principalmente para pintar las piezas terminadas.

Para minimizar los efectos negativos del ruido en empleados, por lo general se proponen técnicas de control pasivo, las cuales son aquellas que utilizan métodos de aislamiento acústico, como: barreras acústicas (paredes) y protectores auditivos. Estas técnicas pasivas son conocidas por su buen rendimiento en altas frecuencias, pero su comportamiento en bajas frecuencias es pobre. [1]

El control activo de ruido, se refiere a controlar o atenuar ruido acústico en puntos del espacio, sin la necesidad de introducir una barrera física entre el ruido y el receptor. Esta técnica se basa principalmente en el principio de superposición de ondas, el cual enuncia que la interferencia entre dos o más ondas puede ser destructiva o constructiva, es decir, que estas ondas pueden interferir para aumentar o atenuar su nivel. Para crear una interferencia destructiva, se deben sumar dos ondas iguales en amplitud y frecuencia, una de ellas con fase invertida, dando como resultado una atenuación considerable de nivel.

A continuación se muestra el diagrama de bloque del algoritmo FXLMS (Imagen 1), comúnmente utilizado para control activo de ruido acústico en recintos.

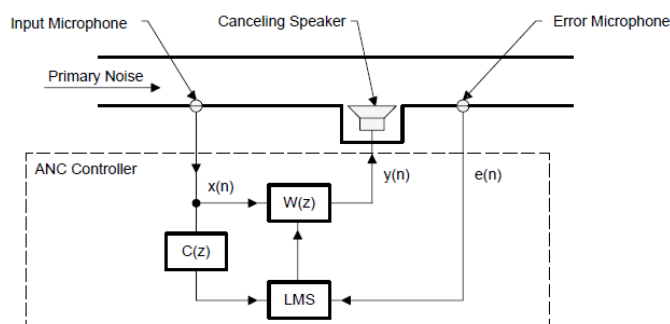


Imagen 1. Diagrama del algoritmo FXLMS

Fuente. [2] - FXLMS Algorithm for Feed forward Active Noise Cancellation

El sistema de control activo de ruido FXLMS, está compuesto por los siguientes elementos:

Elemento	Descripción
Primary Noise	Fuente primaria o ruido generado por la máquina
Input Microphone	Sensor de referencia que captura la señal del ruido que se quiere atenuar.
$x(n)$	Señal de entrada capturada por el sensor de referencia.
$c(z)$	Estimación de la función de transferencia del camino secundario
$w(z)$	Filtro adaptativo que estima la señal que cancela el ruido en la posición del micrófono de error.
$e(n)$	Señal de error
$y(n)$	Señal de control
LMS (Least Mean Square)	Algoritmo adaptativo que genera los coeficientes del filtro adaptativo $W(z)$, a partir de la señal residual $e(n)$, y de la señal de entrada $x(n)$ filtrada por $C(Z)$.
Cancelling Speaker	Fuente de control o fuente secundaria.
Error Microphone	Sensor que captura la suma de los campos sonoros originados por la fuentes primaria y secundaria. También es la posición del espacio, en que el ruido es cancelado.
Secondary path	Camino secundario o función de transferencia entre el micrófono de error y la fuente secundaria.
Primary path	Camino primario o función de transferencia entre el micrófono de error y la fuente primaria

Tabla 1. Elementos del algoritmo FxLMS

1.1 Justificación

Uno de los escenarios en que las personas están más expuestas a niveles de ruido altos, y en tiempos prolongados, son las jornadas laborales en la industria agropecuaria, construcción, centros de llamadas, industria metalmeccánica, etc. Este tipo de empresas por lo general tienen maquinaria o fuentes que emiten diferentes tipos de ruido y con altos niveles de presión sonora, tales como: ventiladores, motores eléctricos, taladros, tornos, etc. La exposición a determinados niveles de presión sonora o ruido, dependiendo del tiempo de exposición, puede desencadenar consecuencias negativas en la salud del receptor [4].

En estos lugares, en algunas de sus áreas o secciones, los niveles de ruido sobrepasan los establecidos por la legislación en salud ocupacional “Resolución 1792 de 1990” por la cual se adoptan los niveles límites permisibles para la exposición ocupacional al ruido. Según un estudio de diagnóstico realizado por la división de salud ocupacional del Instituto de seguro social (I.S.S), seccional Cundinamarca en 1989, se encontró que el ruido está presente en un 60% de las empresas encuestadas. Se encontró que la hipoacusia neuro-sensorial, está en el primer lugar de las enfermedades profesionales, de tal manera que en 1989 constituyó un 42.7% ; para 1992 el 56.2% y para 1994 representó el 64.9%, del total de las enfermedades profesionales a nivel nacional [5]. La exposición al ruido en jornadas laborales, en especial si este es de baja frecuencia, puede ocasionar mareos, dolor de cabeza, trastornos gástricos y problemas de estrés. Una de las enfermedades profesionales más comunes, sigue siendo la pérdida de la capacidad auditiva, la cual representa aproximadamente el 10%, del total de las enfermedades profesionales desde 1999 hasta 2001, incluyendo síntomas como zumbidos en los oídos. El ruido también ocasiona problemas de voz y de concentración que pueden ocasionar accidentes laborales y bajo rendimiento laboral [6]. Otros efectos del ruido en el sistema auditivo son: el efecto enmascarador que interfiere en la comunicación hablada en lugares de trabajo, cansancio auditivo, bajo rendimiento en los procesos cognoscitivos, trastornos del sueño, hipertensión, cardiopatía, hipoacusia, etc. [7].

Algunas soluciones se han implementado para reducir los índices de ruido en dichos ambientes laborales, con el fin cumplir con los niveles establecidos por la legislación en salud ocupacional y prevenir daños en la salud de los trabajadores. La mayoría de estas soluciones son basadas en el control pasivo de ruido, tales como: protectores auditivos y aislamiento con barreras acústicas. Estos métodos tienen algunas limitaciones, por ejemplo los protectores auditivos pueden disminuir en gran parte el nivel de ruido, pero estos obstruyen la comunicación oral con los demás trabajadores y no son efectivos en bajas frecuencias [8]. Por otra parte las barreras acústicas dependen en gran parte de su densidad y espesor para realizar el aislamiento, dichas barreras dependiendo su espesor, aíslan ruido en función de la frecuencia (longitud de onda), esto quiere decir que entre mas ancha y densa sea la pared o barrera acústica, esta aislará una longitud de onda mayor [1]. Este método de control de ruido para bajas frecuencias es poco práctico por algunas razones, una de ellas es el tamaño de la

barrera, ya que al ser lo bastante pesada y grande, puede ocasionar los siguientes inconvenientes:

- Obstaculizar el uso de la maquinaria (fuente de ruido) por el empleado
- El alto costo de la barrera (para bajas frecuencias)
- Si la barrera está ubicada en un segundo piso o mayor, el peso de esta puede ocasionar daños en la estructura del recinto, ya que en un principio el lugar fue diseñado para otro tipo de condiciones.

Otra de las soluciones para atenuar niveles de presión sonora altos, es la técnica de control activo de ruido, la cual está basada principalmente en la superposición de ondas [8]. La cual contempla que si en una región del espacio existe un campo sonoro primario (ruido a controlar), se puede generar un campo sonoro secundario (ruido de control), tal que la suma de estos dos campos sea nula.

Uno de los problemas de esta técnica, es que el control de ruido se realiza únicamente en la posición de los micrófonos de error, lo cual es poco práctico en una situación real, ya que estos sensores deberían ubicarse en la cabeza del individuo afectado, para que este se vea beneficiado por el control. Una solución alternativa a este problema, es utilizar un “micrófono virtual”, es decir, utilizar una técnica para estimar la presión sonora en una posición del espacio, en la cual no esté ubicado un micrófono real, para de esta manera, atenuar el sonido no deseado en la posición del sensor virtual (zona en que el receptor estaría ubicado). Esta predicción es generada a partir de las mediciones realizadas por el sensor de error real [9]

A continuación en la imagen (2) se muestra un diagrama general del sistema de control activo de ruido, utilizando un sensor virtual.

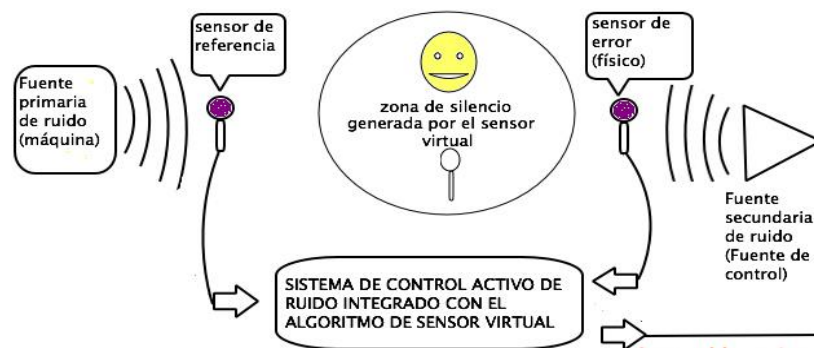


Imagen 2. Diagrama del sistema de control que utiliza sensores virtuales

1.2 Objetivos

Objetivo general:

Atenuar el nivel de ruido ocasionado por una máquina utilizada en la industria metalmecánica, usando una técnica activa, sin utilizar un sensor en la posición del receptor.

Objetivos específicos:

- 1) Atenuar el nivel de presión sonora de la máquina, utilizando un sensor real en la posición de los oídos del usuario, a través de una técnica control activo de ruido.
- 2) Realizar un algoritmo para estimar la presión sonora en los oídos del usuario, el cual sea robusto ante los cambios del campo sonoro, y que su rendimiento no se vea afectado por largas distancias entre el sensor real y virtual.
- 3) Verificar el rendimiento del estimador en el sistema de control activo de ruido.

1.3 Elección de la máquina o ruido a atenuar

Para propósitos del proyecto, es importante investigar que máquinas generadoras de ruido se utilizan comúnmente en la industria metalmecánica, esto con el fin de analizar cual de ellas se adapta al contexto del control activo de ruido en bajas frecuencias. Las máquinas analizadas fueron las siguientes:

- Sierra sinfín
- Cizalla
- Tronzadora
- Torno
- Fresadora
- Compresor de aire

Una vez identificadas las máquinas anteriores, se procedió a analizar que clase de ruido generaban estas. A continuación en la tabla 2. Se muestran las características principales del ruido de cada máquina.

Máquina	Imagen	Características de la máquina y del ruido
Sierra Sin fin	 <p data-bbox="548 617 799 646">Imagen 3. Sierra Sin fin</p>	<p>Herramienta utilizada para cortar diferentes materiales, tales como madera, hierro, acero, etc. La parte principal de esta máquina es una lámina constituida por dientes, similar a una sierra de mano (segueta). Luego de realizar el análisis de la grabación de la sierra sin fin [14], se obtuvo que contenía ruido tonal de alta frecuencia en 500 Hz y 1300 Hz.</p>
Cizalla	 <p data-bbox="581 1010 766 1039">Imagen 4. Cizalla</p>	<p>Herramienta eléctrica de corte de hojalata, metales finos o de poco espesor, cuenta con dos cuchillas, su funcionamiento es similar al de una tijera. Al analizar el espectro de la grabación [15], se encontró que contenía ruido tonal e intermitente con picos de 250 Hz hasta 3000 Hz.</p>
Tronzadora	 <p data-bbox="553 1419 792 1449">Imagen 5. Tronzadora</p>	<p>Herramienta de corte móvil que utiliza un disco frontal, utilizada en materiales metálicos como acero, hierro, cobre o aleaciones. Al realizar el análisis de la siguiente grabación [11], se obtuvo una frecuencia fundamental de 1880 Hz, con armónicos hasta los 6000 Hz.</p>
Torno	 <p data-bbox="581 1797 766 1827">Imagen 6. Torno</p>	<p>Herramienta mecánica que sirve para cortar y realizar ranuras a piezas de formas geométricas, a partir de revolución (giros). Al analizar la grabación [16], se encontró que contenía ruido tonal e intermitente con picos que iban de 500Hz hasta 2KHz aproximadamente.</p>



Fresadora	 <p data-bbox="561 573 784 600">Imagen 7. Fresadora</p>	<p data-bbox="930 197 1398 821">Es una herramienta rotativa de varios filos de corte, utilizada para el desbastado y/o afinado de piezas de madera o acero, incluso se utiliza para crear una gran cantidad de formas con estos materiales. Esta herramienta genera un ruido tonal de alta frecuencia, que generalmente está entre los 1000 Hz y los 2000 HZ, dependiendo de las características físicas de la fresadora y del material que esté trabajando. Al realizar el análisis de la siguiente grabación [10], se obtuvo una frecuencia representativa de 1453 Hz.</p>
Compresor de aire	 <p data-bbox="516 1182 829 1209">Imagen 8. Compresor de aire</p>	<p data-bbox="930 831 1398 1753">Es una máquina utilizada para aumentar la presión, con el fin de desplazar fluidos compresibles como gases o vapores. Generalmente se utiliza para pintar materiales, junto a una pistola que controla el flujo de pintura. También se utiliza para recargar aire en llantas de vehículos. Esta herramienta por lo general tiene dos etapas en las que genera ruido, la primera es cuando está cargando aire, y la segunda es cuando se está descargando y/o usando. En la etapa de carga, su motor genera varios tonos o frecuencias determinadas, en las cuales se encuentran varias de baja frecuencia (menor a 100 Hz). Al analizar las grabaciones [12] y [13], se obtuvo que la máquina emitía ruido de baja frecuencia representativo, en los 70 HZ y varios armónicos hasta 255 Hz.</p>

Tabla 2. Características de las máquinas

Elección de la máquina

Una vez medidas las máquinas anteriores, se llegó a la conclusión de que las pruebas de control activo de ruido se realizarían con el ruido del compresor de aire, ya que es una fuente fija e irradia ruido de baja frecuencia. Lo anterior es conveniente ya que investigaciones realizadas en control activo de ruido, generalmente manejan frecuencias máximas de 500 Hz, y al ser una fuente estática, se facilita el control de la presión sonora.

Ya que la universidad posee con un compresor de aire en la facultad de Ingeniería, este se utilizó para realizar mediciones iniciales, en las imágenes 9 y 10 se muestra el compresor.



Imagen 9. Compresor utilizado



Imagen 10. Medición del compresor

Medición del ruido del compresor

Las mediciones se realizaron con los siguientes elementos:

- Micrófono omnidireccional “RTA dbx - driverack”
- Computadora portátil
- Tarjeta de sonido externa “Digidesign Mbox 2”
- Software Audacity

A continuación en la imagen 11, se presenta el espectro del ruido del compresor, se puede observar que la mayoría de la energía está ubicada en el rango de 0 a 220 Hz, con picos que resaltan en: 15Hz, 31Hz, 45Hz, 78Hz, 93Hz, 125Hz, 220Hz y 343Hz.

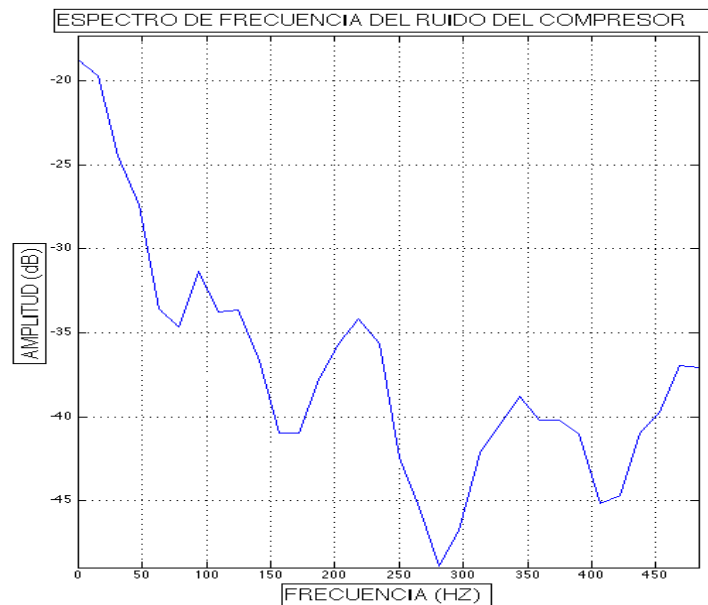


Imagen 11. Espectro general del ruido del compresor

2. Identificación del sistema electro-acústico

Para aplicaciones de control activo de ruido se hace necesario introducir la estimación del camino secundario, ya que sin esta, se produce un retraso de fase entre la señal de referencia y la señal de error, lo cual impide la correcta actualización de los coeficientes [20]. El camino secundario (sistema electro-acústico) está compuesto por la fuente secundaria (parlante), el amplificador, el micrófono físico (error) y el recinto.

Los métodos offline utilizados para la identificación de sistemas, fueron los siguientes: ARX (Auto regresivo con entrada exógena), AR (autoregresivo), FIR (Finite impulse response) y LMS (Least Mean Square).

2.1 Identificación paramétrica

Para realizar pruebas de identificación del camino secundario, se utilizará la herramienta matemática “Matlab”, esta plataforma contiene varios modelos paramétricos para identificación de sistemas lineales, los cuales se ajustan a la estructura generalizada mostrada en la ecuación (1). También se muestra el diagrama de bloque de dicha estructura en la imagen 12.

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (1)$$

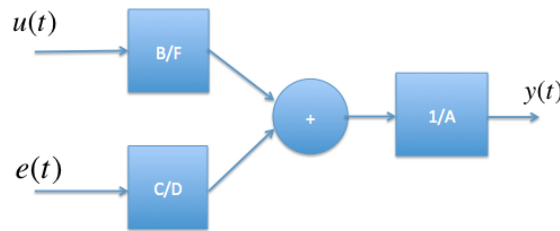


Imagen 12. Diagrama de bloque estructura generalizada

Donde A, B, C y D, son polinomios del operador de desplazamiento (q).

u(t) es la entrada del sistema (Ruido blanco)

e(t) ruido del sistema

y(t) es la salida del sistema (Grabación de audio del ruido blanco, tomada por el sensor de error)

Para el modelo ARX, los polinomios C, D y F son igual a uno “1”, por lo cual la ecuación queda de la siguiente manera (2), y su diagrama de bloque se observa en la imagen 13.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (2)$$

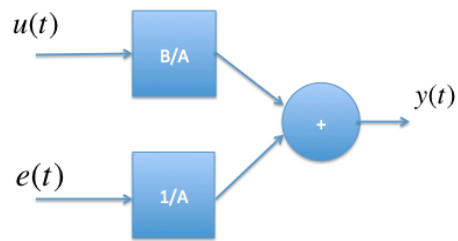


Imagen 13. Diagrama de bloque estructura ARX

Para el modelo FIR solo se utiliza el polinomio B, ecuación (3), y su diagrama de bloque se observa en la imagen 14.

$$y(t) = B(q) u(t) + e(t) \quad (3)$$

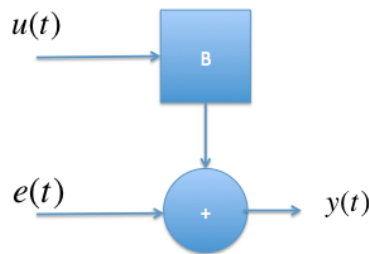


Imagen 14. Diagrama de bloque estructura FIR

Para el modelo AR solo se utiliza el polinomio A, ecuación (4), y su diagrama de bloque se observa en la imagen 15.

$$A(q)y(t) = u(t) + e(t) \quad (4)$$

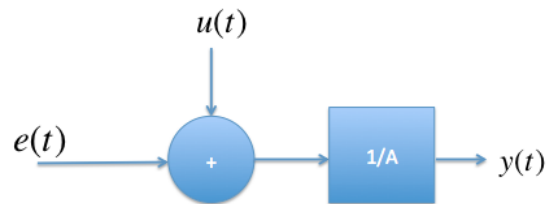


Imagen 15. Diagrama de bloque estructura AR

Modelos empleados

1) FIR (Respuesta al impulso Finita)

Modelo mostrado en la imagen 16, en el cual la salida depende de los valores pasados de la entrada, ecuación (3)

$$y(n) = b' \bar{u}(n) \quad (3)$$

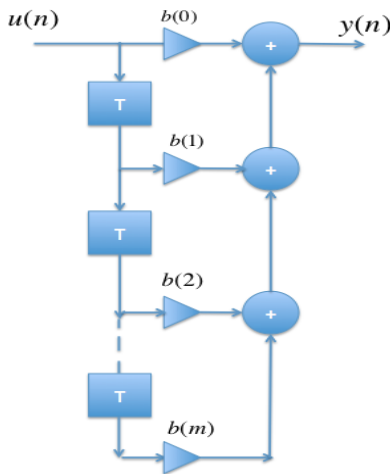


Imagen 16. Diagrama de bloque estructura modelo FIR

Donde T son los retardos que se aplican a la entrada, b' es el vector traspuesto de los coeficientes del filtro, $\bar{u}(n)$ es la entrada, y "m" es el orden del filtro.

2) AR (Auto regresivo)

Modelo mostrado en la imagen 17, en el que está considerado que la salida depende de los valores pasados de la misma. En (4) se muestra el modelo AR basado en realimentación.

$$y(n) = a'y(n - 1) \quad (4)$$

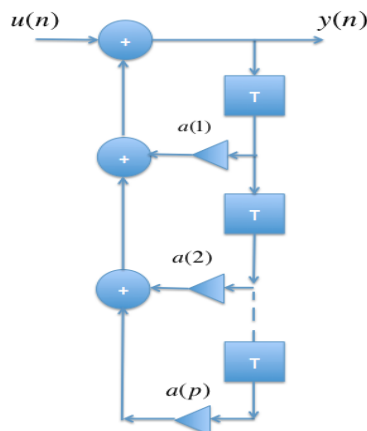


Imagen 17. Diagrama de bloque estructura modelo AR

Donde T son los retardos que se aplican a la salida, a' es el vector traspuesto de los coeficientes del filtro, $\bar{u}(n)$ es la entrada, $y(n)$ la salida, y “p” es el orden del filtro.

3) ARX “Auto regresivo con entrada exógena”

Modelo mostrado en imagen 18, en el que está considerado que la salida depende de valores pasados de la entrada y de la salida, ecuación (5)

$$y(n) = b' \bar{u}(n) + a' y(n - 1) \quad (5)$$

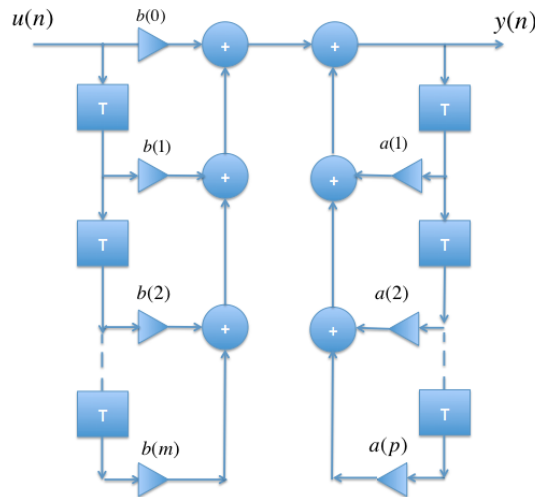


Imagen 18. Diagrama de bloque modelo ARX

4) LMS “Least Mean Square”

Algoritmo adaptativo que minimiza el error cuadrático medio entre la señal deseada (salida medida) y la señal estimada, para encontrar los coeficientes del sistema. La ecuación 6 muestra la expresión LMS que encuentra los coeficientes que minimizan el error.

$$W(n + 1) = W(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (6)$$

Donde $W(n+1)$ es el coeficiente en el instante $n+1$ y $W(n)$ el coeficiente actual, μ es el coeficiente (tamaño de paso) que controla la convergencia y estabilidad del algoritmo LMS, $e(n)$ es el error y $x(n)$ la entrada. En este modelo se profundizará un poco mas, ya que se utilizará en gran medida para el desarrollo del proyecto.

A continuación en la imagen 19, se muestran los componentes del algoritmo LMS para identificación de sistemas.

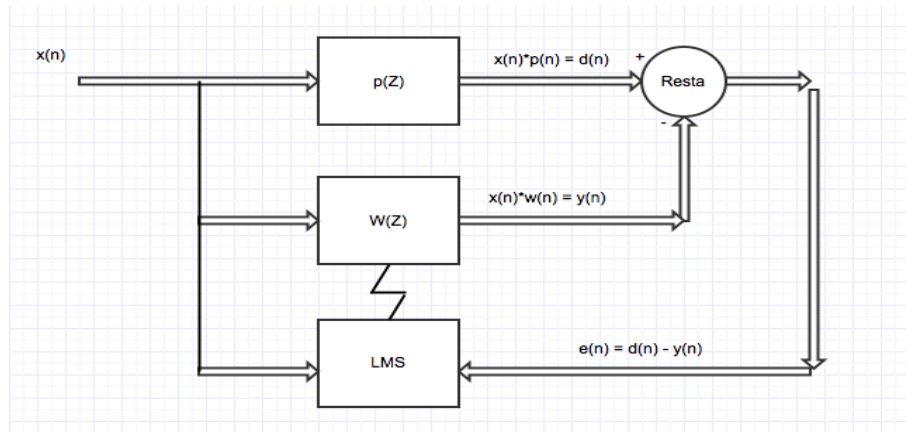


Imagen 19. Diagrama de bloque algoritmo LMS

$x(n)$ = Entrada al algoritmo de identificación (Para el caso de identificación del camino secundario, esta entrada sería el ruido blanco)

$P(Z)$ = Sistema a identificar

$d(n)$ = Salida deseada (Para el caso de identificación del camino secundario, esta sería la grabación del ruido blanco en el micrófono de error)

$W(Z)$ = Filtro adaptativo

$y(n)$ = Salida del filtro adaptativo

$e(n)$ = Señal de error, $d(n) - y(n)$, para realimentar al bloque LMS

LMS = Algoritmo adaptativo que actualiza los coeficientes del filtro adaptativo.

Filtro adaptativo

Un filtro adaptativo como su nombre lo indica, actualiza iterativamente sus coeficientes para adaptarse a sistemas variantes en el tiempo o ambientes cambiantes. Este filtro puede ser FIR (de respuesta al impulso finita o que usa valores pasados de la entrada para generar una salida) o IIR (Respuesta al impulso infinita o que usa valores pasados tanto de la entrada como de la salida) [17].

Por simplicidad se asume que el filtro adaptativo es de tipo causal, el cual es implementado como una realización discreta de forma directa FIR. En la imagen 20 se muestra el diagrama de bloque del filtro adaptativo FIR [18].

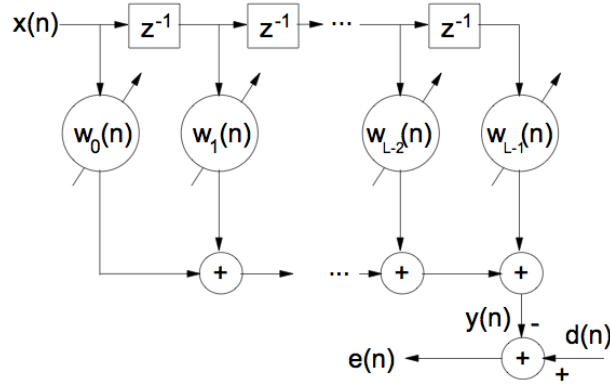


Imagen 20. Filtro adaptativo FIR

Algoritmo adaptativo LMS

El algoritmo adaptativo depende del criterio de optimización o función de costo, la cual para el algoritmo LMS se basa en minimizar el error cuadrático medio, descrito en la ecuación 7.

$$J = E[e^2(k)]$$

$$J = E[(d(n) - y(n))^2] \quad (7)$$

En orden de encontrar los coeficientes que minimizan el error cuadrático medio, se utiliza el método de gradiente descendente (8)

$$W(n + 1) = W(n) - \mu \nabla(J) \quad (8)$$

A continuación se muestra la ecuación del algoritmo LMS de Widrow [19].

$$W(n + 1) = W(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (9)$$

Donde $W(n+1)$ es el coeficiente en el instante $n+1$ y $W(n)$ el coeficiente actual, μ es el coeficiente (tamaño de paso) que controla la tasa de convergencia y estabilidad del algoritmo LMS, $e(n)$ es el error y $x(n)$ la entrada.

2.2 Resultados

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos con los métodos descritos en la sección anterior. Esto para comprobar que tan acertados son cada uno de los modelos, con el fin de tomar una decisión en cuanto a que método se utilizará en la identificación del camino secundario.

Como prueba se utilizaron los elementos descritos a continuación:

- Micrófono omnidireccional de condensador : RTA dbx – driverack
- Parlante activo de 6 pulgadas, KRK Rokit 6
- Software Pro-tools

Las señales de entrada empleadas para realizar la identificación, fueron: Ruido Blanco, Barrido senoidal de 0 Hz a 500 Hz y finalmente el ruido del compresor. Una vez realizada la identificación del modelo, se procedía a comparar la salida estimada, con la salida real del sistema, esto con el fin de obtener valores de similitud entre ellos, para esto se empleó la ecuación de FIT dada en la Ecuación (10). El número de muestras utilizadas para la señal de entrada y salida fue 100000.

$$FIT = 100\left(1 - \frac{\|y-\hat{y}\|}{\|y-mean(y)\|}\right) \quad (10)$$

Donde "y" es la salida medida, " \hat{y} " es la salida estimada [50]

Resultados obtenidos con el ruido del compresor como señal de entrada

En Matlab, los órdenes N_a y N_b , corresponden al número de coeficientes con el que se desea estimar el modelo. N_a se refiere a los coeficientes del polinomio $A(q)$ y N_b a los coeficientes del polinomio $B(q)$. [21]

(Ruido Compresor) ARX		
Nb	Na	FIT
10	10	16 %
1	10	1.8%
10	1	8.49%
50	50	66.6%
1	50	3.5%
50	1	56 %
200	20	80 %
300	20	86.5%
400	20	89.2 %

Tabla 3. Resultados de identificación ARX con el ruido del compresor

(Ruido Compresor) FIR		
Nb	Na	FIT
10	0	6.2 %
25	0	43.6 %
50	0	53.82 %
100	0	68.4 %
200	0	80.2 %
300	0	86.2 %
400	0	88.8 %

Tabla 4. Resultados de identificación FIR con el ruido del compresor

(Ruido Compresor) AR	
N	FIT
10	-994 %
25	-1.1401e+03 %
50	-1.6550e+03 %
100	-1.9727e+03 %
200	-3.2366e+03 %
300	-3.7423e+03 %

Tabla 5. Resultados de identificación AR con ruido del compresor

(Ruido Compresor) LMS	
Orden	FIT (%)
10	3.92
25	43.18
50	52.53
100	66.08
200	76.37
300	80.81
400	83.14
500	84.4

Tabla 6. Resultados de identificación LMS con ruido del compresor

En la tabla 3 y 4 se puede observar que a medida que se aumenta el orden del modelo, también aumenta el porcentaje FIT. En la tabla 3 se observa que si el número de coeficientes de salida es mayor al número de coeficientes de la entrada, la estimación del modelo empeora. En la tabla 5, se observa que el modelo Auto regresivo no realiza una buena estimación, ya que el error es mas grande que la señal de salida medida.

Resultados obtenidos con el barrido de frecuencia como señal de entrada

(sine swept) ARX		
Nb	Na	FIT
10	10	35.47%
1	10	3.3%
10	1	-33%
50	50	63.4%
1	50	-0.8290%
50	1	-469.4067%
100	100	62.2104%
10	100	42.8%
10	200	44%
200	20	12.4873%
200	200	60.9198%
100	200	66.8954%
100	300	71.8916%
100	400	72%
50	500	82.8971%

Tabla 7. Resultados de identificación ARX con el barrido de frecuencia

(sine swept) FIR		
Nb	Na	FIT
10	0	-420.8968%
25	0	-634.3143%
50	0	-717.5698%
100	0	-1.6989e+03%
200	0	-791.3020%
300	0	-641.6993%

Tabla 8. Resultados de identificación FIR con el barrido de frecuencia

(sine swept) AR	
N	FIT
10	-3.9391e+04%
25	-4.2294e+04%
50	-4.9106e+04%
100	-5.3569e+04%
200	-5.8010e+04%
300	-2.0861e+05%

Tabla 9. Resultados de identificación AR con el barrido de frecuencia

(Sine Swept) LMS	
Orden	FIT (%)
10	-0.4561
25	-2.5013
50	9.9542
100	19.8900
200	32.6007
300	35.2472
400	34.3864
500	34.8690

Tabla 10. Resultados de identificación LMS con el barrido de frecuencia

En la tabla 7 se observa que la identificación ARX con entrada (barrido sinusoidal) es mas acertada, si el número de coeficientes de salida es mayor al número de coeficientes de entrada. La identificación con los modelos FIR, AR y LMS no es efectiva con este tipo de entrada.

Resultados obtenidos con ruido blanco como señal de entrada

(Ruido Blanco) ARX		
Nb	Na	FIT (%)
10	10	4.6
1	10	0.0470
10	1	3.4
50	50	60.4
1	50	0.0273
50	1	56.0763
100	20	62.7
200	20	71.8512
300	20	79.1313
400	20	81.6421
500	20	83.4444

Tabla 11. Resultados de identificación ARX con ruido blanco

(Ruido Blanco) FIR		
Nb	Na	FIT (%)
10	0	3.4102
25	0	48.8950
50	0	56.0281
100	0	62.4813
200	0	72.1224
300	0	79.5358
400	0	82.0834
500	0	84.1

Tabla 12. Resultados de identificación FIR con ruido blanco

(Ruido Blanco) AR	
N	FIT (%)
10	-162.2837
25	-166.5212
50	-168.4017
100	-174.5079
200	-182.9002

Tabla 13. Resultados de identificación AR con ruido blanco

(Ruido Blanco) LMS	
Orden	FIT (%)
10	1.6
25	46.55
50	56.07
100	62.47
200	71.93
300	79.4
400	82.1
500	84

Tabla 14. Resultados de identificación LMS con ruido blanco

Utilizando ruido blanco como señal de entrada, se observa que los modelos ARX, FIR y LMS responden bien ante un número alto de coeficientes de entrada, por otra parte el modelo AR sigue sin arrojar FIT aceptables.

Resultados de la identificación del camino secundario utilizando el algoritmo LMS implementado (archivo .m)

A continuación en la tabla 15, se muestran resultados obtenidos para la identificación del camino secundario. Para esta prueba se utilizó ruido blanco de 1 minuto de duración (480000 muestras) y frecuencia de muestreo de 8 Khz.

Orden del sistema	FIT	μ	Tiempo de convergencia del error
100	NA	0.3	No converge
100	34%	3e-02	15 ms
100	51%	3e-03	25 ms
100	51%	3e-04	2 s
100	43%	3e-05	12.5 s
100	14%	3e-06	30 s
400	NA	0.3	No converge
400	NA	3e-02	No converge
400	58%	3e-03	20 ms
400	76%	3e-04	1 s
400	72%	3e-05	9 s
400	44%	3e-06	60 s
700	NA	0.3	No converge
700	NA	3e-02	No converge
700	NA	3e-03	No converge
700	87%	3e-04	0.8 s
700	82%	3e-05	6.7 s
700	58%	3e-06	60 s

Tabla 15. Resultados de identificación LMS con ruido blanco

Consideraciones obtenidas a través del análisis de los resultados del algoritmo LMS implementado

Al analizar la tabla 15, se observa que si se conserva el mismo tamaño de paso μ , y se eleva considerablemente el orden del filtro, el algoritmo LMS se torna inestable, luego para que este se estabilice de nuevo, hay que disminuir el tamaño de paso μ .

Al aumentar el orden, se aumenta el FIT:

Si $m_1 > m_2$ entonces $FIT_1 > FIT_2$

Al aumentar el tamaño de paso se disminuye el tiempo de convergencia:

Si $\mu_1 > \mu_2$ entonces $tc_1 < tc_2$

Si se aumenta el orden se disminuye el tiempo de convergencia:

Si $m_1 > m_2$ entonces $tc_1 < tc_2$

Para que el algoritmo LMS converja en la media, el tamaño de paso μ debe estar en el siguiente rango:

$$0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{max}} \quad (11)$$

Donde λ_{max} es el máximo auto-valor de la matriz de auto correlación de la señal de entrada [47].

2.3 Conclusiones en la identificación del camino secundario

El método ARX fue uno de los mejores, ya que en la estimación del camino secundario este modelo arroja un FIT del 89.2% con ordenes $N_b = 400$ y $N_a = 20$, utilizando el ruido del compresor como entrada al sistema. Sin embargo también se puede observar que el método FIR logra un FIT de 88.8% para 400 coeficientes, lo cual solo es un 0.4 % menos del FIT obtenido con el modelo ARX, el cual usa 20 coeficientes mas. En conclusión se podría deducir que ARX y FIR son los mejores métodos para identificación fuera de línea.

Los cálculos de FIT con las tres señales de prueba, para el modelo auto-regresivo, fueron algo incoherentes, debido a que solo utiliza información de la salida, y no tiene en cuenta los valores de la entrada.

El algoritmo LMS arroja un FIT muy similar a el calculado por los métodos FIR y ARX, solo los diferencia un 5% con el ruido del compresor. Este método se podría utilizar para identificación en línea, a causa de su bajo costo computacional y el poco tiempo utilizado en el cálculo de la identificación, ya que para calcular 400 coeficientes, el algoritmo ARX o FIR tardaban alrededor de 30 minutos, y el algoritmo LMS tardaba máximo 2 segundos.

El algoritmo LMS de Matlab muestra mejor desempeño que el implementado, ya que el implementado logra un FIT máximo de 76% a 400 coeficientes, utilizando como entrada ruido blanco, y el algoritmo LMS de Matlab logra 82% a 400 coeficientes.

Por su rapidez en el cálculo, se decide utilizar el algoritmo LMS para identificaciones posteriores.

3. Algoritmo FxLMS para control activo de ruido

Los diseñadores han propuesto varios sistemas de control, la mayoría enmarcados en control robusto y en control adaptativo.

Control Robusto

La teoría de control robusto permite que hayan diferencias entre el modelo matemático del sistema y el comportamiento real de este. El primer paso para realizar este tipo de control, es obtener un modelo de la planta, que para este caso es un sistema electro-acústico. Por ejemplo, en [24] hallan la función de transferencia usando la teoría modal, por otra parte en [25] se expresa la función de transferencia en espacio de Laplace. También existen otros modelos [26, 27, 28, 29] los cuales utilizan la ecuación de estado. Por otra parte en [29,30], se utiliza la teoría de identificación de sistemas para hallar el modelo.

Control adaptativo

La metodología mas utilizada en control activo de ruido, es la de control adaptativo, esta tiene la ventaja de que los coeficientes del sistema estimado se van actualizando mediante un proceso iterativo y realimentado, para el caso de control activo de ruido, el control adaptativo actualiza los coeficientes de la planta, respecto a la presión sonora en el sensor de error (posición en la que se realiza el control), y la señal de referencia. El algoritmo en el cual se basaron este tipo de controladores, es el LMS, mencionado en el capítulo anterior. El controlador mas utilizado en control activo de ruido, es el FxLMS “Filtered x Least Mean Square” [31, 32].

Dado que el camino secundario $H(z)$ transforma la señal de control emitida por el actuador, es importante tenerlo en cuenta en el desarrollo de la función de costo (12) del algoritmo de control. Como resultado de la minimización, se hace necesario filtrar la señal de referencia, con una estimación del camino secundario $C(z)$, como se puede observar en la imagen 21.

Otros algoritmos adaptativos

Varios algoritmos de control han sido diseñados como variaciones del algoritmo LMS, [33] muestra el algoritmo “recursive LMS y FuLMS”, los cuales modifican las estructuras de los controladores con el fin de convertir el control adaptativo a un filtro realimentado. En [34], $x(n)$ y $e(n)$ se filtran con el fin de darle prioridad a determinadas frecuencias elegidas por el usuario, [35] lo aplica para disminuir la percepción subjetiva en las personas. Los artículos [36, 37, 38] son una secuencia de artículos enfocados en el análisis del algoritmo FxLMS para expandirlo al caso de múltiples fuentes secundarias y múltiples receptores. La conclusión en [40] es que el mejor desempeño se logra cuando se utilizan varios controladores FxLMS monocanal en vez de uno multicanal. Otro caso de control adaptativo es mostrado en [39, 40], en

el cual consiste en actualizar las variables de amplitud y fase de un conjunto de señales sinusoidales, que al sumarlas forman la señal de control. Para este caso se logra una reducción de 34dB. Casos no lineales, motivados por el hecho de que puede existir saturación en el actuador, se muestran en [41, 42, 43, 44]. En estas referencias se utiliza redes neuronales como algoritmo adaptativo. Sin embargo, [44] muestra que se obtiene mayor atenuación usando el algoritmo FxLMS.

Algoritmo FxLMS

Este algoritmo de control mostrado en la imagen 21, es una variación del algoritmo de identificación LMS, con (3) tres importantes diferencias:

- 1) La señal de error se obtiene como la suma de: la señal de ruido y la señal de control, filtrada por el camino secundario. Esto debido a que el campo acústico total, es equivalente a la suma de presiones sonoras provenientes de la fuente primaria (ruido) y de la fuente secundaria o de control.
- 2) Al solucionar el problema de optimización para la suma del error, se obtiene que la entrada al bloque LMS debe ser filtrada por una estimación de la función de transferencia del camino secundario $C(Z)$.
- 3) Para efectos de simulación, debe tenerse en cuenta la función de transferencia del camino secundario $H(Z)$.

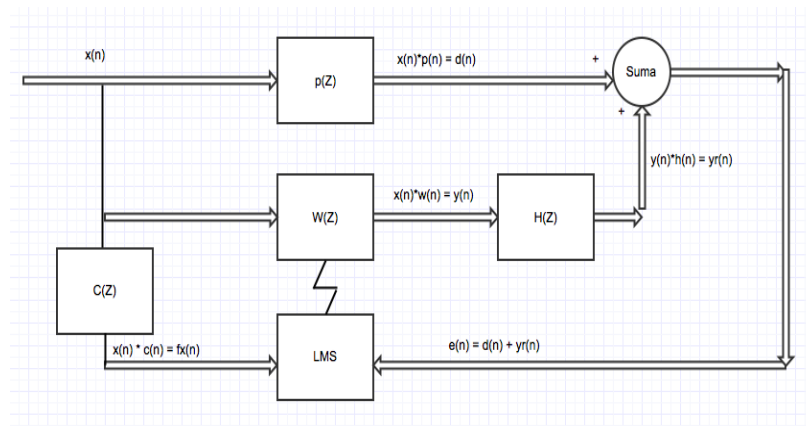


Imagen 21. Diagrama de bloques algoritmo FxLMS

Algoritmo adaptativo FxLMS

Este algoritmo adaptativo depende del criterio de optimización o función de costo, la cual para el algoritmo FxLMS se basa en minimizar el error cuadrático medio, descrito en la ecuación 12.

$$J = E[(d(n) + yr(n))^2] \quad (12)$$

Teniendo en cuenta que la señal de control $y(n)$, se filtra con el camino secundario $h(n)$

$$yr(n) = y(n) * h(n) \quad (13)$$

Para encontrar la expresión que minimiza la ecuación (12), se utiliza el método de gradiente descendiente de la ecuación (8). Al desarrollar el gradiente se encuentra la ecuación (14) del algoritmo FxLMS, la cual encuentra los coeficientes que minimizan la señal de ruido en el sensor de error.

$$W(n + 1) = W(n) - 2\mu e(n)fx(n) \quad (14)$$

Donde $W(n+1)$ es el coeficiente en el instante $n+1$ y $W(n)$ el coeficiente actual, μ es el coeficiente (tamaño de paso) que controla la tasa de convergencia y estabilidad del algoritmo FxLMS, $e(n)$ es el error y $fx(n)$ es la entrada filtrada por una estimación del camino secundario $c(n)$.

3.1 Resultados de simulación del algoritmo FxLMS implementado (archivo .m)

A continuación en la tabla 13 se muestran los resultados de simulación para el algoritmo de control activo de ruido FxLMS, utilizando como entrada el ruido del compresor.

Orden de la estimación del camino secundario	μ	Tiempo de convergencia del error
100	3e-04	No converge
100	3e-05	Inestable (aumenta)
100	3e-06	Inestable (aumenta)
100	3e-07	120 ms
100	3e-08	170 ms
100	3e-09	1.2 s
400	3e-04	Inestable (aumenta)
400	3e-05	Inestable (aumenta)
400	3e-06	Inestable (aumenta)
400	3e-07	Inestable (aumenta)
400	3e-08	82 ms
400	3e-09	346 ms

700	3e-04	Inestable (aumenta)
700	3e-05	Inestable (aumenta)
700	3e-06	Inestable (aumenta)
700	3e-07	Inestable (aumenta)
700	3e-08	Inestable (aumenta)
700	3e-09	Inestable (aumenta)
700	3e-10	Inestable (aumenta)
700	3e-11	Inestable (aumenta)
700	3e-12	375 ms

Tabla 16. Resultados de simulación FxLMS

Consideraciones obtenidas a través del análisis de los resultados del algoritmo FxLMS

Observando la tabla 16, hay que disminuir el tamaño del paso μ cuando el algoritmo se torne inestable. De igual manera que en el algoritmo LMS, si se aumentan los coeficientes, el algoritmo se tornará inestable, por lo cual hay que aumentar el tamaño del paso. Al disminuir el tamaño de paso μ , el error tardará mas tiempo en converger

3.2 Implementación del algoritmo FxLMS en la tarjeta de procesamiento digital de señales TSM320C6713 DSK

Para realizar pruebas de control con el algoritmo FxLMS en tiempo real, es necesario implementarlo en una tarjeta de procesamiento digital de señales. Para lograr el objetivo se utilizaron los elementos descritos en la tabla 17, en la imagen 22 se muestra una fotografía de la configuración de los elementos.

Elemento	Uso
Simulink Matlab	Implementación del algoritmo para poder cargarlo a la tarjeta DSP
Tarjeta DSP - TSM320C6713DSK	Hardware de implementación, el cual cuenta con comunicación USB al ordenador, entrada y salida estéreo de audio.
Code Composer Studio V3.1	Software de comunicación entre la tarjeta y el ordenador, para compilación y carga del algoritmo a la DSP.
Tarjeta de sonido USB, M-box2	Tarjeta de sonido con dos entradas de micrófono XLR, que recibe las señales provenientes de los micrófonos de referencia y error, y luego las envía a la tarjeta DSP.
Altavoz Subwoofer Activo M-Audio de 10 pulgadas	Fuente secundaria que reproduce la señal de control proveniente de la DSP.

Altavoz activo Tannoy de 6 pulgadas	Fuente primaria que reproduce la señal de ruido que se quiere atenuar.
Micrófono senheiser e614 super cardiode	Sensor de referencia utilizado para capturar la señal de ruido que se quiere atenuar.
Micrófono RTA dBx omnidireccional	Sensor de error utilizado para realimentar el algoritmo FxLMS.
Cableado necesario	Cables para conectar micrófonos, parlantes, etc.

Tabla 17. Elementos utilizados en la implementación



Imagen 22. Configuración de la implementación

(sensor de referencia a la izquierda, sensor de error a la derecha)

Algoritmo FxLMS en simulink

Primero que todo, antes de implementar el algoritmo en la DSP, se debe diseñar el algoritmo en Simulink, para posteriormente poderlo cargar a la tarjeta de procesamiento digital de señales. Para esto se hace necesario diseñar algunos bloques de simulink para implementar el algoritmo FxLMS, los bloques requeridos fueron los siguientes:

- LMS
- Convolución en tiempo real (FIR forma directa)
- Filtro adaptativo FIR

A continuación en la imagen 23 se muestra el control realizado por el algoritmo FxLMS implementado en simulink, para 400 coeficientes, $\mu = 1e-07$ y una entrada seno de 120 HZ. Se puede observar, que el error converge alrededor de las 1000 muestras, y dado que la señal empieza en 400 Muestras y su frecuencia de muestreo es 1000 HZ, se puede decir que la señal converge alrededor de los 0.6 segundos

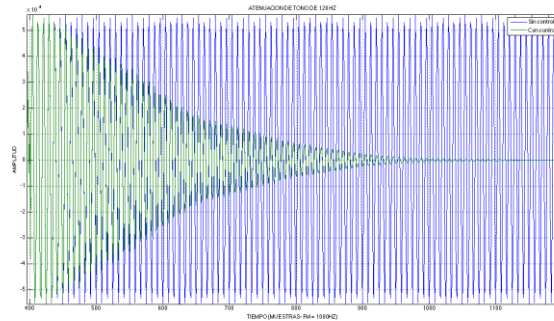


Imagen 23. Atenuación de frecuencia de 120 Hz

A continuación en la imagen 24 se muestra la gráfica de error (atenuación) para 400 coeficientes y $\mu = 1e-05$, utilizando como entrada el ruido del compresor. Los resultados se obtuvieron a partir del promedio de cuatro realizaciones, atenuando la señal 6 dB, con un FIT de 81% en la identificación del camino secundario.

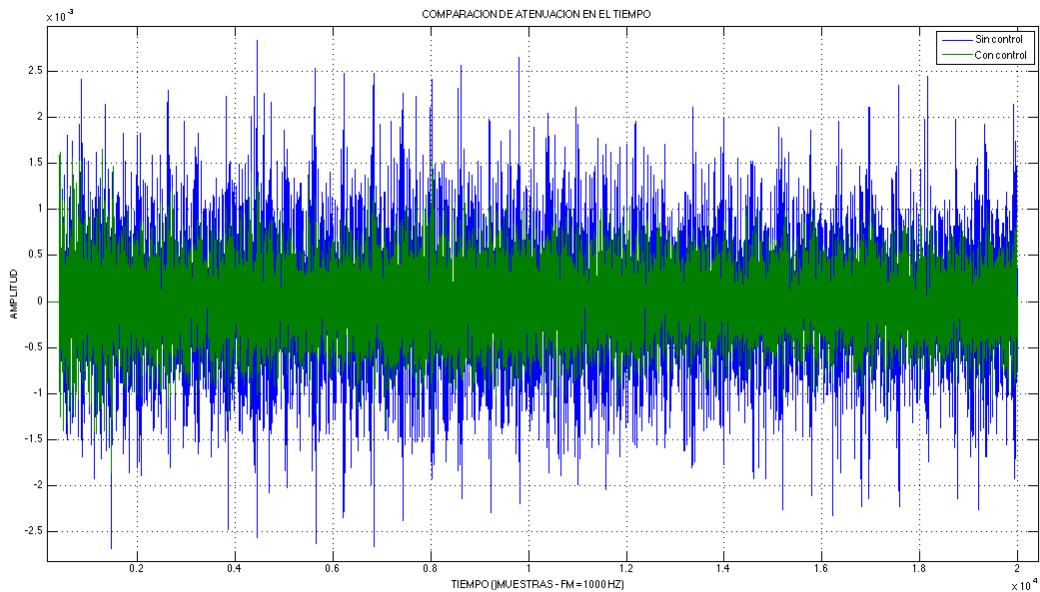


Imagen 24. Atenuación del ruido en el tiempo

(azul "sin control" – verde "con control")

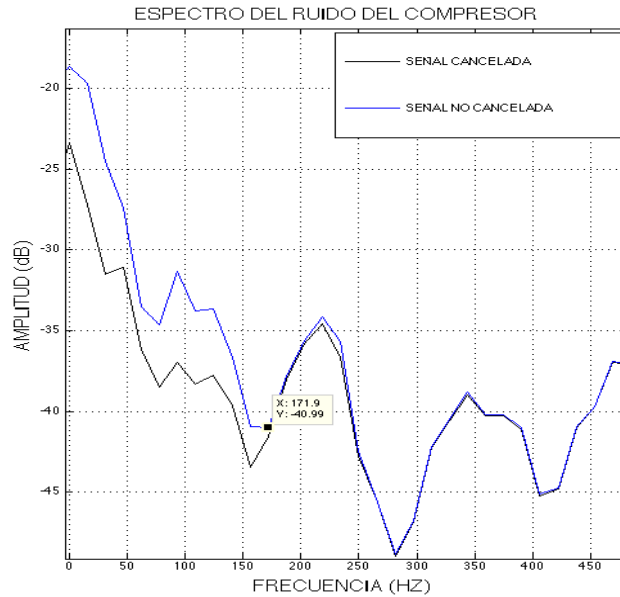


Imagen 25. Atenuación del ruido en frecuencia
(azul “sin control” - verde “con control”)

Al analizar la imagen 25, se puede observar que la atenuación se realiza en bajas frecuencias, en el rango de 0 Hz a 170 Hz, a mayores frecuencias no funciona el control de ruido.

Resultados de convergencia y atenuación en simulink

A continuación en la tabla 18, se muestran resultados para varias frecuencias (400 coeficientes, $\mu = 1e-07$ y FIT 81%), se puede deducir que a medida que la frecuencia aumenta, también lo hace el tiempo de convergencia, a excepción de las frecuencias de 120 Hz y 160 Hz, las cuales convergen rápidamente en comparación a las anteriores.

Frecuencia (Hz)	Tiempo de convergencia (error)	Atenuación (dB)
60	1 s	31 dB
80	1.3 s	27.4 dB
100	2.3 s	27 dB
120	0.6 s	31.4 dB
140	2.5 s	34 dB
160	1.5 s	33.9 dB
190	15 s	30.5 dB

Tabla 18. Resultados de atenuación en Simulink (Tonos)

En la tabla 19 se muestra una de las configuraciones que mas atenuaba el ruido del compresor, dando una atenuación de 6 dB promedio de toda la señal, en una simulación de 20 segundos.

Tamaño de paso (estable)	Tamaño de paso (inestable)	Atenuación (dB)
1.1e-05	1.2e-05	6 dB

Tabla 19. Resultados de atenuación en Simulink (compresor)

Implementación del algoritmo FxLMS en la DSP

Para la implementación del algoritmo en la tarjeta DSP, se realizó el diagrama descrito en la imagen 26, como se puede observar, solo es necesario utilizar el filtro adaptativo, el algoritmo LMS y la estimación $\hat{C}(Z)$ del camino secundario, ya que el camino primario y el camino secundario son las funciones de transferencia reales del sistema electro acústico.

Para esta prueba en tiempo real se utilizaron 400 coeficientes de la estimación de la respuesta al impulso del camino secundario $\hat{C}(Z)$. Se hicieron pruebas de control en varios tonos puros de baja frecuencia, entre ellos: 60 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 120 Hz, 140 Hz, 160 HZ y 190 HZ. Dicha identificación se realizó con ruido blanco y mediante el método LMS, obteniendo un FIT de 74.6 % en el caso de 400 coeficientes.

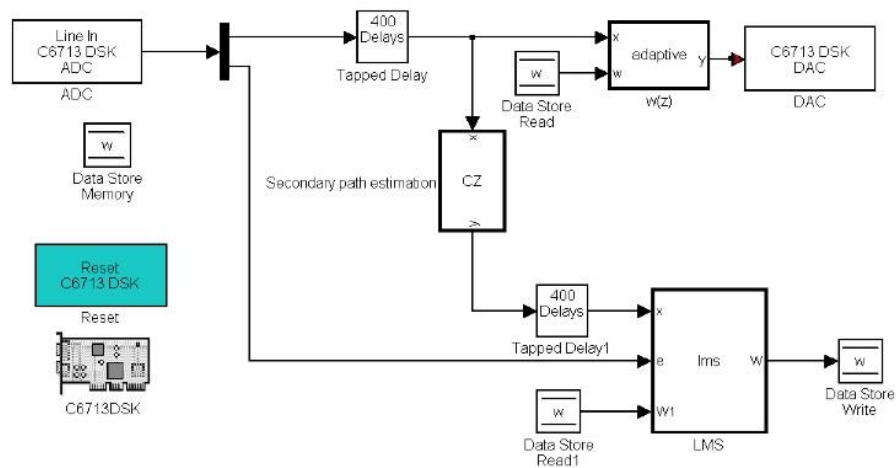


Imagen 26. Algoritmo para descargar a la DSP

Para monitorear el rendimiento del algoritmo, se grabó la señal proveniente del micrófono de error, a continuación en las imágenes 27 y 28, se muestra como disminuye el nivel en el sensor de error, respecto al tiempo y a la frecuencia respectivamente. En la imagen 27 se puede observar que aparecen dos picos de nivel altos antes de que el control sea efectuado, esto se debe a que en ese momento el algoritmo está siendo cargado a la DSP.

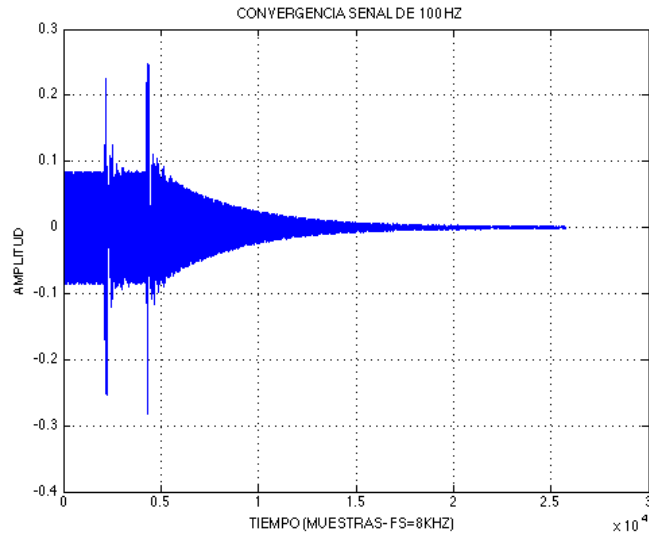


Imagen 27. Señal controlada de 100 Hz, en la DSP

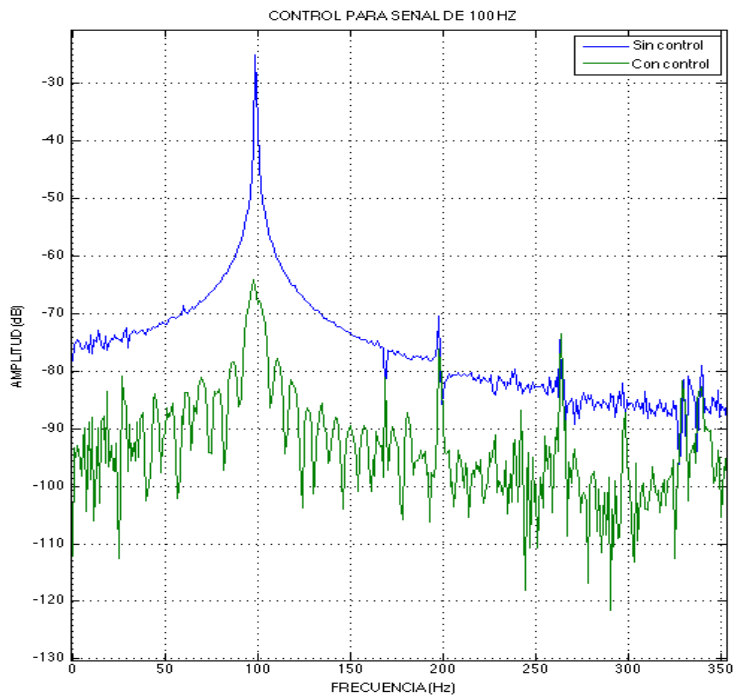


Imagen 28. Señal controlada a 100 Hz (frecuencia) en la DSP

Todas las pruebas de control fueron exitosas con los tonos puros mencionados, estas se realizaron con 400 coeficientes, tamaño de paso $\mu = 3e-03$.

Resultados de control en la DSP

A continuación en la tabla 20, se muestran tiempos de convergencia del error y atenuación, para tonos puros. En esta tabla también se evidencia la dependencia del tiempo de convergencia con la frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Tiempo de convergencia (error)	Atenuación (dB)
60	2 s	27.6 dB
80	2 s	26.4 dB
100	2.4 s	27.3 dB
120	5 s	23.1 dB
140	27 s	21.7 dB
160	45 s	21.3 dB
190	130 s	20.5 dB

Tabla 20. Resultados de atenuación en la DSP (tonos puros)

Pruebas de control en la DSP, con el ruido del compresor

Con el ruido del compresor se hicieron varias pruebas de control con 400 coeficientes y varios tamaños de paso μ . A continuación en la tabla 21 se muestra el comportamiento del control con varios tamaños de paso μ . Se obtuvo una atenuación promedio máxima de 4 dB, aunque en el dominio de la frecuencia, imagen 30, se puede ver que el ruido se atenúa de 0 a 100 Hz y cerca de 550 Hz. Se utilizó frecuencia de muestreo de 8 KHz.

Tamaño de paso	Atenuación promedio (dB)
3e-05	1 dB
3e-04	4 dB
3e-03	NA/Inestable
3e-02	NA/Inestable

Tabla 21. Resultados de atenuación en la DSP (Compresor)

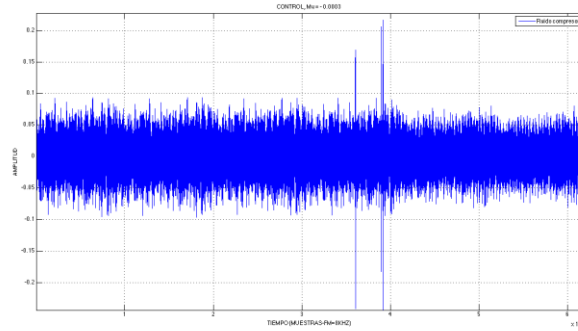


Imagen 29. Control de ruido en el compresor en DSP ($\mu = 3e-04$)

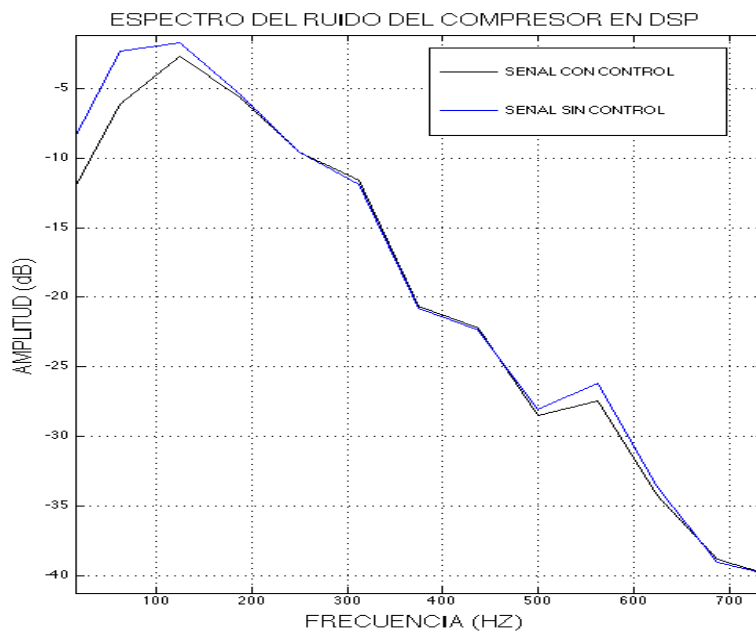


Imagen 30. Control de ruido en el compresor en DSP ($\mu = 3e-04$)

3.3 Conclusiones

En el control realizado en la DSP, se obtuvieron resultados satisfactorios en los tonos puros de baja frecuencia, ya que se logró atenuar entre 20 dB y 27 dB de amplitud. Las pruebas de control realizadas con el ruido del compresor fueron poco satisfactorias, ya que la mayor atenuación fue de 4 dB promedio.

4. Algoritmo de sensor virtual

Como se había mostrado al principio del libro, uno de los objetivos del proyecto es diseñar un algoritmo de sensores virtuales, que estime la presión sonora en la posición de un micrófono virtual, para luego disminuir el nivel de presión sonora en esa posición del espacio, en la que no existe un micrófono real. En este capítulo se presentarán la base teórica y los resultados obtenidos a partir de la simulación del algoritmo de sensores virtuales utilizado.

En la imagen 31 se puede observar el diagrama de bloque general de un algoritmo de control activo de ruido, integrado con el algoritmo de sensores virtuales.

Donde $x(n)$ es la señal de entrada o fuente primaria, $e_v(n)$ es la presión sonora total en la posición del sensor virtual, $e_p(n)$ es la presión sonora en la posición del micrófono real, $\hat{e}_v(n)$ es la estimación de la presión sonora en la posición del micrófono virtual, la cual realimentará al controlador, y finalmente $u(n)$ es la señal de control. [22]

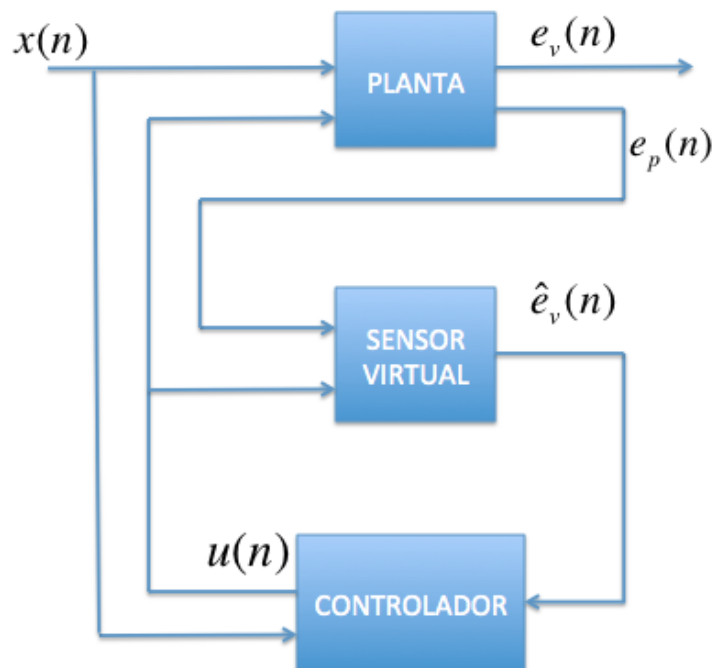


Imagen 31. Diagrama de bloque general del enfoque de sensores virtuales

4.1 Técnica de micrófono virtual adaptativo LMS

El algoritmo (sensor virtual) de estimación utilizado es llamado “técnica de micrófono virtual adaptativo LMS”. Este algoritmo fue desarrollado por Cazzolato [23] y emplea el algoritmo adaptativo LMS para hallar las transformaciones que ocurren entre la posición del micrófono de error real y la posición del micrófono virtual, con el fin de estimar la presión sonora total en la posición del micrófono virtual.

A continuación en la imagen 32 se muestra el diagrama de bloque del algoritmo adaptativo LMS para sensores virtuales, donde $e_p(n)$ es la presión sonora en el micrófono de error real, $u(n)$ es la señal de control, $\tilde{d}_p(n)$ es la estimación del campo sonoro primario en la posición del sensor real, \tilde{G}_{pu} es la estimación de la respuesta al impulso del camino secundario en el sensor real, $\tilde{y}_p(n)$ es la estimación del campo sonoro secundario en la posición del micrófono real, W_p es la transformación del micrófono real al virtual respecto al campo sonoro primario, W_u es la transformación del micrófono real al virtual respecto al campo sonoro secundario, $\tilde{d}_v(n)$ es la estimación del campo sonoro primario en la posición del sensor virtual, $\tilde{y}_v(n)$ es la estimación del campo sonoro secundario en la posición del sensor virtual, finalmente se halla la estimación $\tilde{e}_v(n)$ de la presión sonora en la posición del micrófono virtual, a partir de la suma de los campos sonoros estimados en la posición virtual.

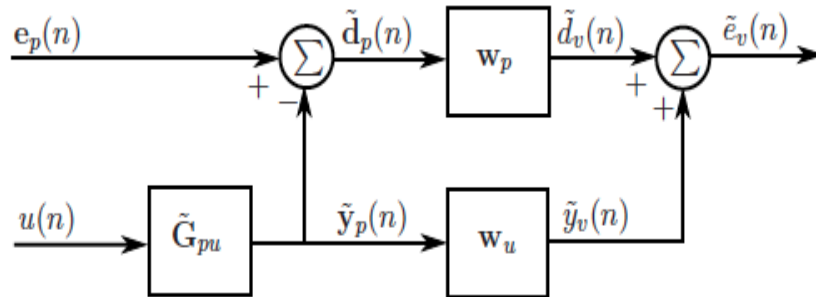


Imagen 32. Diagrama de bloque del algoritmo LMS para sensores virtuales [23]

Este algoritmo proviene de la idea general de que el campo sonoro total en cada uno de los micrófonos, es igual a la suma de los campos primario y secundario.

Por ejemplo, en el algoritmo descrito en la imagen 32, la estimación del campo sonoro primario $\tilde{d}_p(n)$ en el micrófono de error real, se obtiene a partir de la medición del campo sonoro total en el sensor real $e_p(n)$, menos la estimación del campo sonoro secundario, ecuación (15).

$$\begin{aligned}\tilde{d}_p(n) &= e_p(n) - \tilde{y}_p(n) \\ &= e_p(n) - \tilde{G}_{pu}(n) * u(n)\end{aligned}\quad (15)$$

La estimación del campo secundario $\tilde{y}_p(n)$ en la posición del sensor real, se calcula como la señal de control filtrada por la estimación del camino secundario en el sensor real \tilde{G}_{pu} , tal como se muestra en la ecuación (15).

Una vez se tienen las estimaciones de los campos sonoros primario y secundario en el micrófono real, se utilizan los filtros W_p y W_u para hallar respectivamente la estimación de la presión sonora primaria y secundaria, en la posición del sensor virtual, para finalmente sumarlas y estimar la señal de error en la posición del micrófono virtual, ecuación (16).

$$\begin{aligned} \tilde{e}_v(n) &= \tilde{d}_v(n) + \tilde{y}_v(n) \\ &= W_p(n) * \tilde{d}_p(n) + W_u(n) * \tilde{y}_p(n) \end{aligned} \quad (16)$$

Donde $W_p(n)$ y $W_u(n)$, se hallan a través del algoritmo de identificación LMS.

Implementación del algoritmo

A continuación en la imagen 33 se muestra el algoritmo realizado en simulink para control de ruido en la posición de un sensor virtual, utilizando el ruido del compresor como señal de entrada.

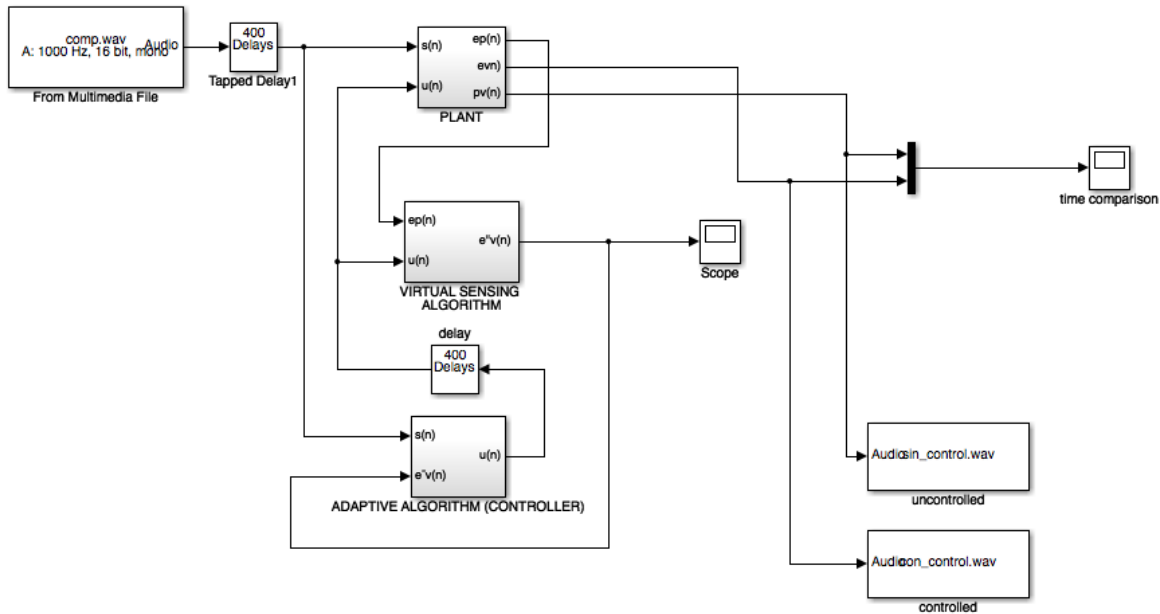


Imagen 33. Algoritmo integrado de control y estimación (Simulink)

4.2 Metodología para obtener los datos de simulación

Con el fin de simular el sistema completo de control y estimación, se debe realizar una etapa de identificación previa, la cual incluye mediciones en las posiciones de los micrófonos real y virtual, respecto a las fuentes primaria y secundaria, para ello se propone la siguiente metodología.

1. Medir la fuente primaria en la posición del micrófono real
2. Medir la fuente primaria en la posición del micrófono virtual
3. Medir la fuente secundaria en la posición del micrófono real
4. Medir la fuente secundaria en la posición del micrófono virtual
5. Conservar el archivo de audio reproducido en la fuente primaria
6. Conservar el archivo de audio reproducido en la fuente secundaria

Una vez se tienen todos los archivos de audio anteriores, se procede a realizar las identificaciones que permitirán la simulación del sistema, a continuación, la tabla 22 muestra como se combinan las mediciones descritas anteriormente, para obtener los filtros demandados por el algoritmo de control y estimación. Para simular la planta (recinto acústico), se utilizan los seis archivos de audio descritos anteriormente. En la tabla 22 se muestran las identificaciones LMS necesarias para simular la planta. La tabla 22 también muestra como estimar los filtros W_p y W_u .

Parámetro a estimar	Sigla del parámetro	Entrada para identificación	Salida para identificación
Respuesta al impulso del campo sonoro primario al sensor virtual	$\tilde{P}_v(n)$	Ruido Blanco (audio 5)	$d_v(n)$ (audio 2)
Respuesta al impulso del campo sonoro primario al sensor real	$\tilde{P}_r(n)$	Ruido Blanco (audio 5)	$d_p(n)$ (audio 1)
Respuesta al impulso del campo sonoro secundario al sensor virtual	$\tilde{S}_v(n)$	Ruido Blanco (audio 6)	$y_v(n)$ (audio 4)
Respuesta al impulso del campo sonoro secundario al sensor real	$\tilde{S}_r(n)$	Ruido Blanco (audio 6)	$y_p(n)$ (audio 3)
Transformación del campo primario, del sensor real al virtual	W_p	$d_p(n)$	$d_v(n)$
Transformación del campo secundario, del sensor real al virtual	W_u	$y_p(n)$	$y_v(n)$

Tabla 22. Estimación de filtros para la simulación del sensor virtual

Con la anterior información se puede simular la planta o recinto acústico, es decir, se pueden estimar los niveles de presión sonora totales (campo primario mas campo secundario) en las posiciones de los micrófonos de error real $e_p(n)$ y virtual $e_v(n)$.

Lo anterior servirá para comprobar si el algoritmo integrado (control-estimación) realmente atenúa en la posición del sensor virtual.

También se pueden hallar los filtros W_p y W_u que estiman la presión sonora total en la posición del micrófono virtual $\tilde{e}_v(n)$, la cual realimentará el algoritmo de control.

Como ejemplo, a continuación en la imagen 34, se muestra el diagrama del algoritmo LMS en la identificación de W_u .

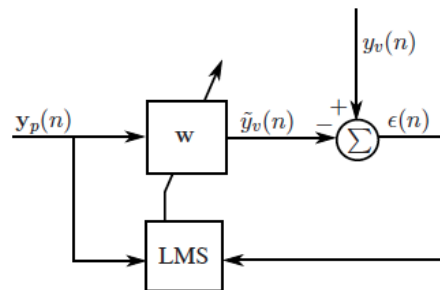


Imagen 34. Algoritmo LMS para identificación de W_u [23]

4.3 Evaluación de la robustez del algoritmo de estimación y control

Las simulaciones del algoritmo se realizaron con datos obtenidos en un recinto de 3mts de largo, 3 mts de ancho y 2.5 mts de alto, en la imagen 35 se muestra un esquema de la configuración de las fuentes y micrófonos para la prueba de robustez.

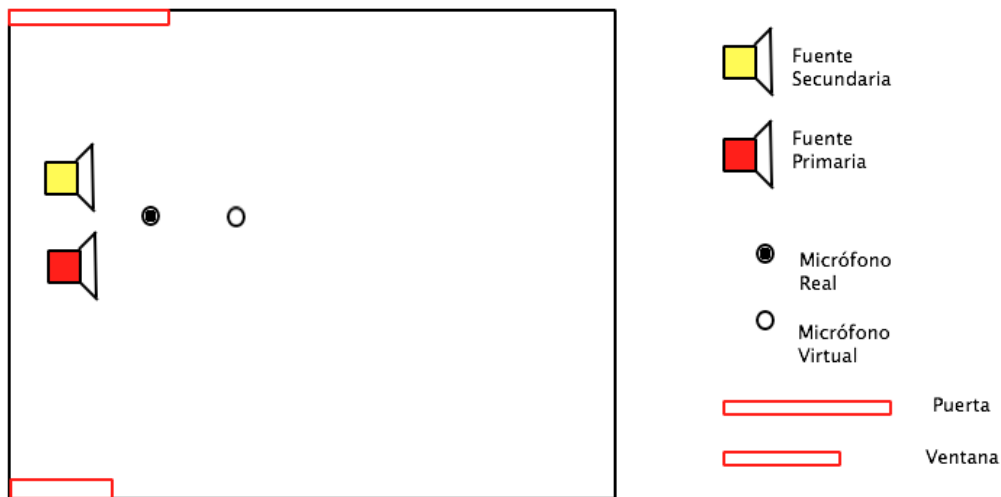


Imagen 35. Configuración de los micrófonos y fuentes para la prueba de robustez

Para evaluar la robustez del algoritmo ante cambios del campos sonoro, se realizaron varias pruebas, una de ellas fue ingresar progresivamente varias personas al recinto, el número máximo de personas fueron cuatro “4”. Lo anterior se realizó con el fin de evaluar que tanto cambiaba la atenuación del ruido, a medida que ingresaban personas al recinto. A continuación en la tabla 23, se muestran los resultados obtenidos con un orden de 400 coeficientes, utilizando como señal de entrada el ruido del compresor. La distancia del sensor virtual al real fue de 70 cm.

Las identificaciones del algoritmo anterior se hicieron inicialmente para una sola persona, después únicamente se cambió la simulación de la planta para cada situación, es decir, el algoritmo de control y estimación es el mismo para todos los casos.

Condición	Mu (estable)	Mu (inestable)	Valor promedio con control (dB FS)	Valor promedio sin control (dB FS)	Diferencia (atenuación)
1 persona	1e-03	2e-03	-22.9	-14.5	8.4
2 personas	1e-03	2e-03	-21.6	-15.2	6.4
3 personas	1e-03	2e-03	-17.75	-13.25	4.5
4 personas	1e-03	2e-03	-16.77	-11.66	5.11

Tabla 23. Atenuación del ruido del compresor en la posición del sensor virtual (cambiando número de personas)

En la tabla 23 se observa que cada vez que se ingresa una persona al recinto, cambia la atenuación del algoritmo en la posición del sensor virtual, de igual manera el algoritmo sigue atenuando.

A continuación en las imágenes 36 y 37, se muestra como se atenúa el nivel del ruido del compresor, en el dominio del tiempo y de la frecuencia respectivamente.

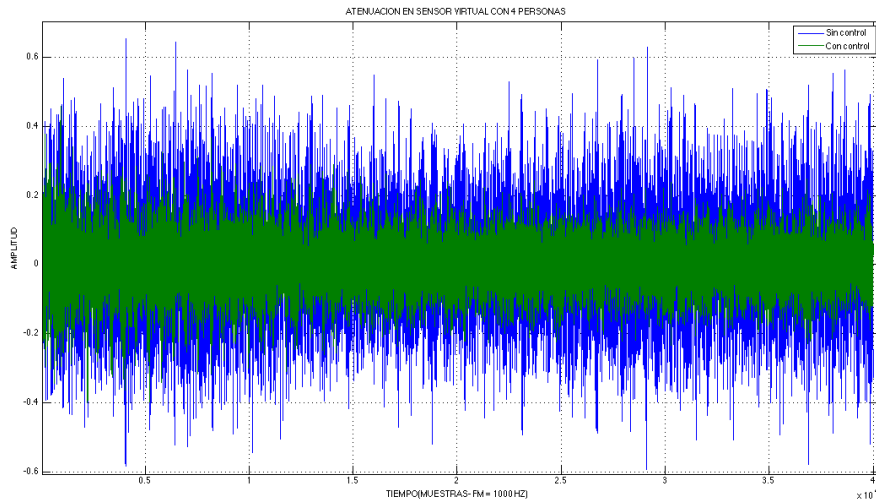


Imagen 36. Atenuación en posición del sensor virtual (4 personas)

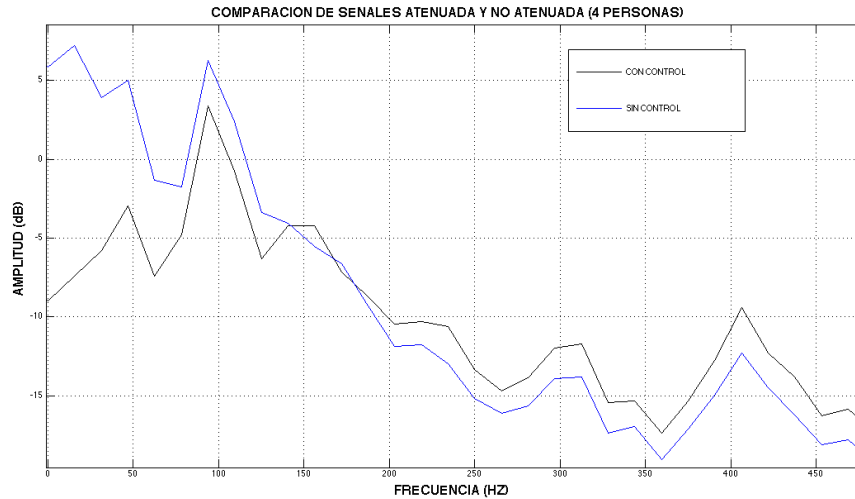


Imagen 37. Atenuación en posición del sensor virtual (4 personas)

Se puede observar en la imagen 37, que hay varias atenuaciones en algunas frecuencias, por ejemplo en el rango de 0 Hz a 50 Hz.

Para la atenuación con una persona, en la imagen 38, se notan atenuaciones similares a la condición de cuatro personas, pero con una atenuación marcada en 94 Hz.

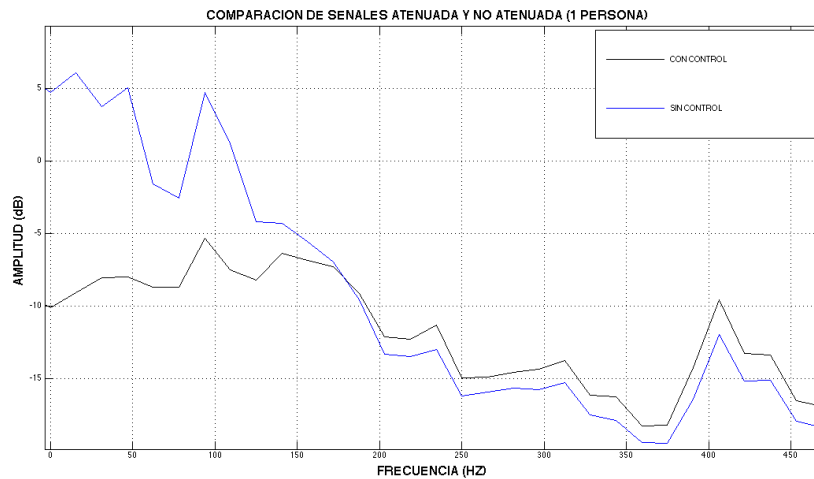


Imagen 38. Atenuación en posición del sensor virtual (1 personas)

En la imagen 39, se observa la atenuación en dB realizada por el algoritmo, ingresando progresivamente las personas al recinto, se nota que hay atenuaciones significativas en el rango de 0 Hz a 50 Hz y otra atenuación en 93 Hz que se ve afectada por el número de personas. También se puede ver que aproximadamente hasta 175 Hz (cruce por cero) el controlador actúa, es decir, la banda de atenuación es de 0 Hz a 175 Hz.

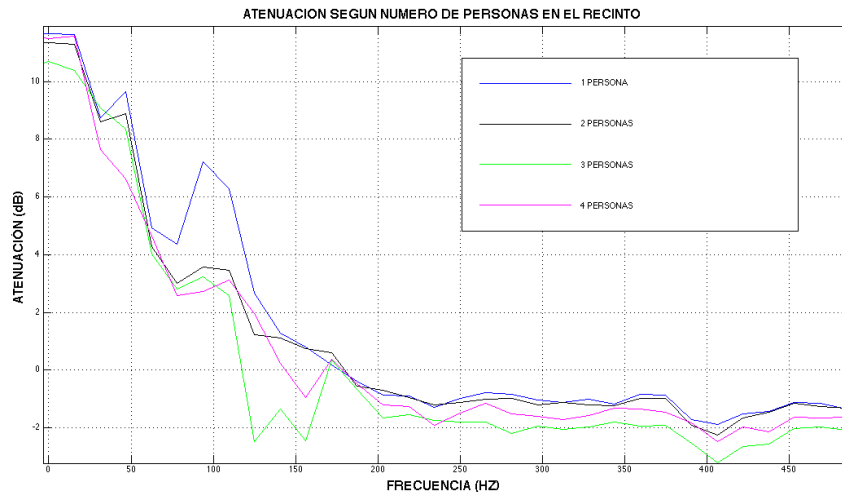


Imagen 39. Atenuación en función de la frecuencia (personas)

A continuación en la tabla 24, se muestra la degradación promedio en dB, que sufre la atenuación, para los casos de 2, 3 y 4 personas, respecto a la atenuación de referencia con 1 persona. Se puede ver que la situación mas afectada es con 3 personas dentro del recinto, arrojando 2 dB promedio de diferencia respecto al caso de una 1 persona.

Condición	Degradación promedio (dB)
2 personas	-0.9711
3 personas	-2.0654
4 personas	-1.5102

Tabla 24. Degradación promedio de la atenuación respecto a 1 persona

Otra de las pruebas de robustez realizadas, se desarrolló variando el entorno acústico, mediante la apertura de una puerta y una ventana del recinto. A continuación en la tabla 25, se muestran los resultados obtenidos con un orden de 400 coeficientes, utilizando como señal de entrada el ruido del compresor.

Condición	Mu (estable)	Mu (inestable)	Valor promedio con control (dB FS)	Valor promedio sin control (dB FS)	Diferencia (atenuación)
Puerta y ventana cerrada	1e-03	2e-03	-19.78	-12.63	7.15
Puerta abierta	1e-03	2e-03	-17.16	-11.86	5.3 dB
Ventana abierta	1e-03	2e-03	-19.34	-12.63	6.71
Puerta y ventana abierta	1e-03	2e-03	17.77	11.69	6.08

Tabla 25. Atenuación del ruido del compresor en la posición del sensor virtual (Abriendo puerta y ventana)

La tabla 25 muestra que no hay mucha variación en la atenuación de nivel, respecto a los cambios del entorno proporcionados por la puerta y la ventana.

En la imagen 40, se observa la atenuación en dB realizada por el algoritmo, abriendo puerta y ventana en el recinto, se nota que hay atenuaciones en el rango de 0 Hz a 160 Hz aproximadamente. De igual manera el cruce por cero indica en que frecuencias el controlador atenúa, en este caso hasta 170 Hz aproximadamente.

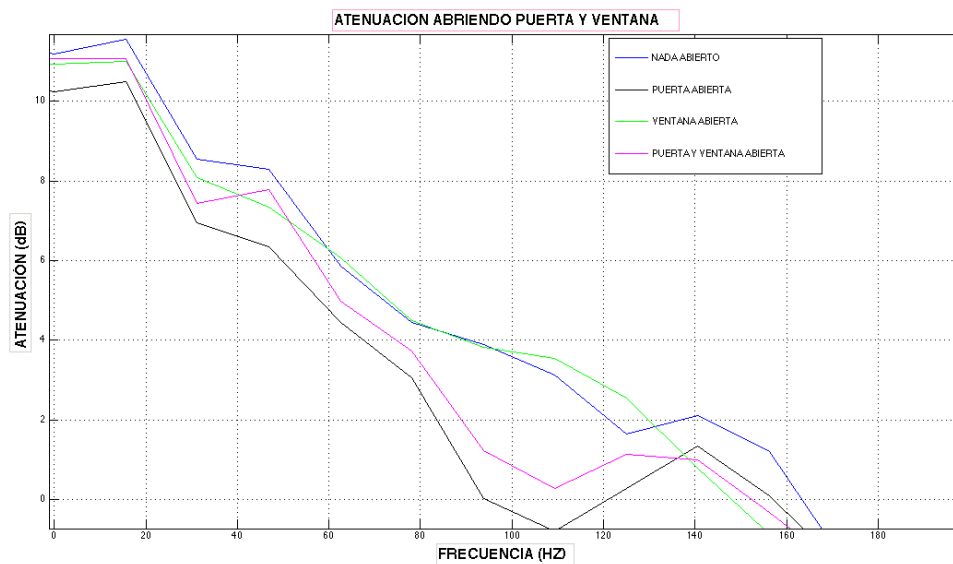


Imagen 40. Atenuación en función de la frecuencia (puerta y ventana)

A continuación en la tabla 26, se muestra la degradación promedio en dB, que sufre la atenuación, para los casos de puerta abierta, ventana abierta y, puerta y ventana abiertas, respecto a la atenuación de referencia con nada abierto. Se puede ver que la situación más afectada es con la puerta abierta, arrojando 1.66 dB promedio de diferencia respecto al caso de referencia.

Condición	Degradación promedio (dB)
Puerta abierta	-1.6613
Ventana abierta	-0.3869
Puerta y ventana abiertas	-1.1045

Tabla 26. Degradación promedio de la atenuación respecto a la condición de ventana y puerta cerrada

4.4 Comportamiento del algoritmo, variando la distancia entre la posición del sensor real y virtual

Para probar la respuesta del algoritmo a diferentes distancias, se realizó la configuración mostrada en la imagen 41. La distancia del micrófono real a las fuentes siempre fue la misma (15 cm), pero la longitud del micrófono virtual al real, se varió cuatro veces, las distancias utilizadas fueron: 50 cm, 90 cm, 140 cm y 190 cm.

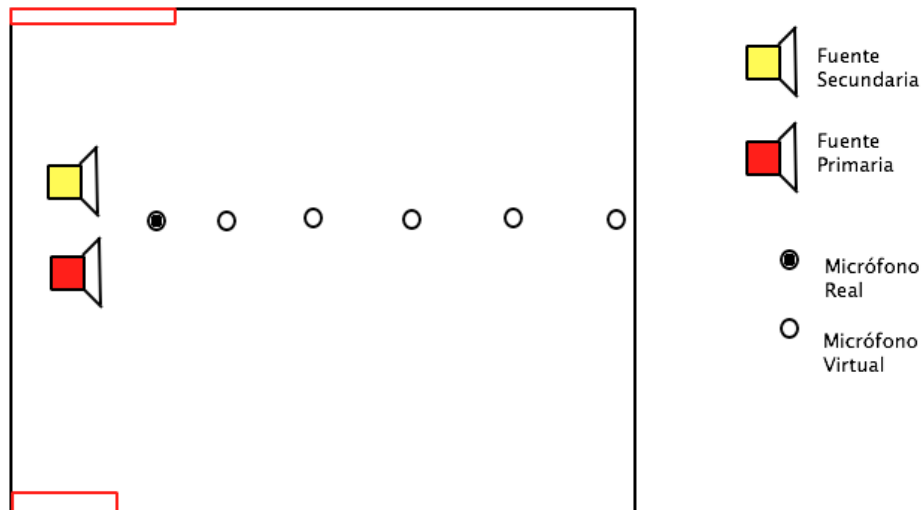


Imagen 41. Configuración de las fuentes y micrófonos para la prueba de distancias

A continuación en la tabla 27 se puede observar el comportamiento del algoritmo a 400 coeficientes, utilizando como señal de entrada el ruido del compresor.

Condición	Mu (estable)	Mu (inestable)	Valor RMS con control (dB FS)	Valor RMS sin control (dB FS)	Diferencia (atenuación)
50 cm	1e-03	2e-03	-19.67	-11.52	8.15
90 cm	9e-04	10e-04	-19.88	-13.27	6.61
140 cm	8e-04	9e-04	-20.18	-12.4	7.78
190 cm	8e-04	9e-04	-16.28	-8.02	8.26

Tabla 27. Comportamiento del algoritmo a diferentes distancias

(400 coeficientes) utilizando como entrada el ruido del compresor

Observando el comportamiento del control respecto a la distancia en la tabla 27, se puede notar que la atenuación tiene un comportamiento no lineal, ya que la atenuación no disminuye progresivamente a medida que aumenta la distancia. Esto puede ser a causa del comportamiento modal del recinto, el cual nos dice que la respuesta en frecuencia de la sala, es diferente en varios puntos del espacio, en especial en bajas frecuencias [46], por ello, hay puntos en el espacio en los que se incrementa o disminuye substancialmente los niveles de presión sonora. A continuación se da un breve resumen de lo que es el comportamiento modal de una sala.

Comportamiento modal de un recinto regular (paralelepípedo)

La amplitud normalizada de las ondas estacionarias en un recinto, respecto a su posición, se conoce como forma modal. En un recinto rectangular las ondas

estacionarias se crean cuando la longitud de onda es un múltiplo de la longitud del recinto en cualquier dirección, (L_1, L_2, L_3) [48]. La forma modal $\psi_n(X)$ puede ser expresada en la posición $X = (x_1, x_2, x_3)$ como:

$$\psi_n(X) = \cos\left(\frac{n_1\pi x_1}{L_1}\right) \cos\left(\frac{n_2\pi x_2}{L_2}\right) \cos\left(\frac{n_3\pi x_3}{L_3}\right)$$

Donde n_1, n_2, n_3 son número enteros que indican el número de modo, L las longitudes del recinto, Con el fin de hacerse una idea de cómo se comporta la presión sonora dentro de un recinto, se muestra un ejemplo en la imagen 42.

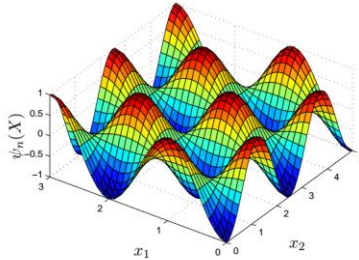


Imagen 42. Ejemplo de la forma modal en una sala rectangular [49]

En la imagen 43 se puede observar que la atenuación en cada distancia tiene un comportamiento diferente en frecuencia. Por ejemplo en 50 cm el controlador atenúa 11.38 dB en 46 Hz, y en 190 cm atenúa 3.4 dB, y por otra parte en 190 cm se atenúa 12.5 dB la frecuencia de 93 Hz, y en 50 cm se atenúa 8 dB. Se puede observar que no hay una relación directa entre el aumento de distancia y la disminución de la atenuación.

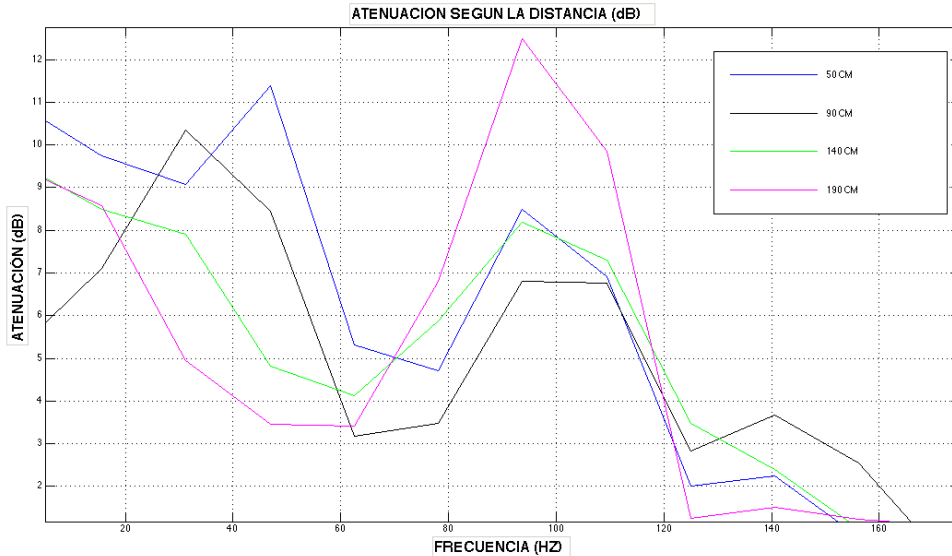


Imagen 43. Atenuación del ruido del compresor a varias distancias

A continuación en la tabla 28, se muestra la degradación promedio en dB, que sufre la atenuación, para los casos de 90cm, 140 cm, y 190 cm, respecto a la atenuación de referencia a 50 cm. Se puede ver que la situación mas afectada es a 90 cm, arrojando 0.7 dB promedio de diferencia respecto al caso de referencia.

Condición	Degradación promedio (dB)
90 cm	-0.6908
140 cm	-0.5951
190 cm	-0.5800

Tabla 28. Degradación promedio de la atenuación (Distancias)

A continuación en las tablas 29 y 30 se muestra el comportamiento del algoritmo a 400 y 1000 coeficientes respectivamente, utilizando como señal de entrada un tono de 100 Hz, dichas pruebas se realizaron para corroborar la respuesta del algoritmo integrado (controlador-sensor virtual) a diferentes distancias, pero con una señal de entrada menos compleja.

Distancia	Mu (estable)	Mu (inestable)	Valor RMS con control (dB FS)	Valor RMS sin control (dB FS)	Diferencia (atenuación)
25 cm	4e-04	5e-04	-28.3 dB	-3.1 dB	25.2 dB
50 cm	1e-04	2e-04	-25.2 dB	-4.6 dB	20.6 dB
90 cm	4e-05	7e-05	-30.2 dB	-6.4 dB	23.8 dB
140 cm	2e-05	4e-05	-19.2 dB	-2.9 dB	16.3 dB
190 cm	1e-05	2e-05	-21.7 dB	-3.7 dB	18 dB

Tabla 29. Comportamiento del algoritmo a diferentes distancias (400 coeficientes) utilizando como entrada el tono de 100 Hz

Se puede observar en la tabla 29, que a medida que aumenta la distancia, hay que disminuir el tamaño de paso, de lo contrario el algoritmo de control no converge. También se puede notar que la atenuación de la señal sinusoidal tiene un comportamiento no lineal, similar al del control realizado con el ruido del compresor. En la tabla 30 se observa que a 1000 coeficientes, la atenuación en la distancia es mas alta y uniforme que a 400 coeficientes.

Distancia	Mu (estable)	Mu (inestable)	Valor RMS con control (dB FS)	Valor RMS sin control (dB FS)	Diferencia (atenuación)
25 cm	1e-04	2e-04	-28.7 dB	-2.2 dB	26.5 dB
50 cm	1e-05	2e-05	-31.4 dB	-2.6 dB	28.8 dB
90 cm	9e-05	1e-04	-35.4 dB	-5.7 dB	29.7 dB
140 cm	1e-05	2e-05	-25 dB	-2.8 dB	22.2 dB
190 cm	1e-06	2e-06	-39.8 dB	-2.7 dB	37.1 dB

Tabla 30. Comportamiento del algoritmo a diferentes distancias (1000 coeficientes) utilizando como entrada el tono de 100 Hz

5. Conclusiones y Trabajo futuro

Conclusiones

En cuanto a la parte de identificación, se evaluaron los métodos ARX, FIR, LMS y AR, para la identificación del camino secundario, obteniendo buenos resultados en los tres primeros. En la parte de control, se utilizó el algoritmo FxLMS, obteniendo buenos resultados, tanto en la simulación como en la implementación en la DSP, usando como entrada, tonos puros de baja frecuencia, atenuando entre 27 dB y 31 dB en la parte de simulación, y entre 20 dB y 27 dB en la implementación. Para el caso en el que se utilizó el ruido del compresor como entrada, no se obtuvieron resultados muy favorables comparados con el caso anterior, ya que se obtuvo una atenuación promedio de 6 dB para la simulación y 4 dB para la implementación. Se mostró un método efectivo para implementar algoritmos en la tarjeta C6713.

Como aporte fundamental, se logró diseñar un algoritmo integrado (controlador – sensor virtual), el cual es robusto ante cambios del campo sonoro, ya que este controla (atenúa), en varias condiciones en las que el campo sonoro se ve afectado, tales como: el ingreso de personas al recinto, y la apertura de puerta y ventana. Para el caso de personas que ingresan al recinto, se obtuvieron atenuaciones promedio del ruido del compresor, entre 4.5 dB y 8 dB para la parte de simulación. Para el caso de variaciones con puerta y ventana abierta, se lograron atenuaciones promedio en simulación, entre 5.3 dB y 7.15 dB, utilizando el ruido del compresor como entrada. El algoritmo integrado atenuó en el rango de 0 Hz a 175 Hz, para una frecuencia de muestreo de 1000 Hz.

También se obtuvieron buenos resultados en cuanto a la atenuación del tono puro (100 Hz), variando la distancia entre el sensor de error real, y la posición del sensor de error virtual, obteniendo atenuaciones en simulación, entre 16.3 dB y 25.2 dB para una identificación previa de 400 coeficientes. Se obtuvieron mejores resultados de atenuación en el tono de 100 Hz, cuando se incrementó el número de coeficientes a (1000) en la identificación previa, obteniendo atenuaciones entre 22.2 dB y 37.1 dB.

Para el caso de la atenuación en el sensor virtual, variando las distancias y utilizando el ruido del compresor como entrada al sistema de control y estimación, se obtuvieron atenuaciones entre 6.61 dB y 8.26 dB para una identificación previa de 400 coeficientes.

En general se comprobó que el algoritmo integrado (controlador – sensor virtual), es robusto ante cambios del campo sonoro, ya que este logró cancelar ruido en las condiciones establecidas, aunque en cada una de ellas, el rendimiento se haya visto algo afectado. Este algoritmo mostró que funciona a varias distancias entre el sensor real y el sensor virtual, viéndose algo afectado por el comportamiento modal del recinto.

Las degradaciones promedio dadas por el cambio del campo sonoro y el cambio de distancia entre el sensor real y virtual, no superaron los 2 dB, y los 0.7 dB respectivamente, mostrando un comportamiento relativamente bueno.

Trabajo Futuro

- Es importante evaluar el control activo de ruido con el algoritmo “FxLMS”, para frecuencias de muestreo menores a 8Khz, ya que no fue posible a causa de las limitaciones de la tarjeta DSP. Se podría utilizar la función de Simulink “Downsample”.
- Realizar pruebas de control activo de ruido con múltiples controladores monocanal.
- Implementar el algoritmo integrado (control-sensor virtual), en una tarjeta de procesamiento digital de señales, para realizar pruebas en tiempo real. Incluso se podría implementar en la misma tarjeta C6713 DSK.
- Realizar pruebas del algoritmo integrado (control-sensor virtual) a distancias mayores de 190 cm.
- Probar métodos de identificación ARX y FIR para aplicarlo al método de sensores virtuales LMS, utilizando como señal de entrada el ruido del compresor. Ya que con este se obtuvieron mejores porcentajes FIT.
- Estudiar la posibilidad de realizar identificaciones en línea con el algoritmo LMS, ya que este tarda poco tiempo en realizar la identificación. Con el fin de que el algoritmo sea mas robusto ante cambios abruptos del campo sonoro.
- Realizar pruebas con otros algoritmos identificación tales como: LMS normalizado y LMS recursivo, para aplicaciones de control activo de ruido.
- Realizar pruebas de control, usando acelerómetros como sensor de referencia.
- Comparar atenuaciones de nivel entre el algoritmo de control y el algoritmo integrado (control-sensor virtual).
- Antes de aplicar control activo de ruido a un recinto, sería interesante aplicar acondicionamiento acústico que redujera considerablemente los tiempos de reverberación, para que así el algoritmo de control no requiera de tantos coeficientes para estimar la respuesta al impulso del sistema.

Bibliografía

- [1] D. A. Harris, *Noise Control Manual: guidelines for problem solving in the industrial/commercial acoustical environment*, 1st ed. Van Nostrand Reinhold, 1991, p. 172.
- [2] P. B. Pathak and M. P. P. Hirave, “FXLMS Algorithm for Feed forward Active Noise Cancellation,” pp. 978–981, 2012.
- [3] V. Y. D. T. MINISTERIO DE AMBIENTE, “RESOLUCIÓN 0627 ‘Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental.’” p. 30, 2006.
- [4] E. A. for S. and H. at Work, “¿Qué es el Ruido?,” 2014. [Online]. Available: https://osha.europa.eu/es/topics/noise/what_is_noise_html.
- [5] M. Reina, “Hacia una revisión de la conceptualización metodológica para calificar pérdidas auditivas por exposición a ruido ocupacional,” 2002
- [6] Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, “El ruido en cifras,” 2004.
- [7] S. de estudios ambientales IDEAM, *Bogotá, febrero de 2006 11*, vol. 04. Bogotá, 2006, pp. 11–299.
- [8] F. Miyara, *Control de Ruido*. Rosario, Argentina: ASOLOFAL, 1999, p. 426.
- [9] C. . García, Bonito, Elliot, S.J, Boucher, “Generation of zones of quiet using a virtual microphone arrangement,” *J. Acoust. Soc.*, 1997.
- [10] F. Coco, “Trabajo en fresadora vertical,” 2012. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=92jNrFu7VIA>.
- [11] T. Ferremayoreo, “Cortadora de metal (tronzadora),” 2011. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=8B6p6d-2Xl8>.
- [12] PIISAMEXICO, “2hp compresor de aire industrial,” 2009. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dcpvBMqZjj0>.
- [13] P. Herrera, “Compresor de pistón,” 2012. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=4VACs5ZNz9w>.
- [14] H. Biegun, “Sierra Sin fin - Hierros Torrent S.A -,” 2010. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=iqRdq0OUtBw>.

- [15] Mlvideos7698, “Cizalla eléctrica rotativa #34,” 2011. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=VlviaOQjZAg>.
- [16] I. Mycenter, “Uso de torno mediano y pequeño.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N3lNYFGQDSE>.
- [17] B.Widrow and S.D.Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, 1985
- [18] J. Proakis and D. Manolakis, *Digital Signal Processing, principles, algorithms and applications*. Prentice Hall, 1996.
- [19] S. Kuo, Gan, W, Kalluri, *Active Noise Control Systems, Algorithms and DSP Implementation*. New York, 1996.
- [20] . Widrow, D. Shur, and S. Shaffer, “On adaptive inverse control,” in Proc. 15th Asilomar Conf, 1981, pp. 185–189.
- [21] LJUNG, Lennart. System identification. Birkhäuser Boston, 1998.
- [22] Petersen, C. D., Fraanje, R., Cazzolato, B. S., Zander, A. C., & Hansen, C. H. (2008). A Kalman filter approach to virtual sensing for active noise control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(2), 490-508.
- [23] Cazzolato, B. An adaptive LMS virtual microphone. In Proceedings of Active 02, pages 105-116, Southampton, UK, 2002.
- [24] B. Fang, A. Kelkar, and S. Joshi, “Modelling and control of acoustic-structure interaction in 3-d enclosures,” in Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on, vol. 1, pp. 873–878 vol.1, 2002.
- [25] S. Lane and R. Clark, “Active control of a reverberant enclosure using an approximate constant volume velocity source,” in American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998, vol. 4, pp. 2606–2610 vol.4, 1998.
- [26] S. Griffin, C. Hansen, and B. Cazzolato, “Feedback control of structurally radiated sound into enclosed spaces using structural sensing,”
- [27] F. Liu, B. Fang, and A. Kelkar, “Lqg-based robust broadband control of acoustic-structure interaction in 3-d enclosure,” in American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003, vol. 1, pp. 803–808 vol.1, 2003.
- [28] T. Yucelen and F. Pourboghraat, “Active noise blocking: Non-minimal modeling, robust control, and implementation,” in American Control Conference, 2009. ACC '09., pp. 5492–5497, 2009.

- [29] A. Sampath, R. Prasanth, and R. Mehra, “Robust interior noise control using system identification and linear matrix inequality (lmi) based control,” in *Control Applications*, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on, vol. 1, pp. 679–683 vol.1, 1998.
- [30] R. Mehra, P. ARambel, A. Sampath, R. Prasanth, and T. Parham, “On-line identification, flutter testing and adaptive notching of structural mode parameters for v-22 tiltrotor aircraft,” *Sadhana*, vol. 25, no. 2, pp. 137–158, 2000.
- [31] M. De Diego, A. Gonzalez, and C. Garcia, “On the performance of a local active noise control system,” in *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1999. Proceedings., 1999 IEEE International Conference on, vol. 2, pp. 885–888 vol.2, 1999.
- [32] J. Landaluze, I. Portilla, J. Pagalday, A. Martínez, and R. Rejero, “Application of active noise control to an elevator cabin,” *Control Engineering Practice*, vol. 11, no. 12, pp. 1423 – 1431, 2003. Award winning applications-2002 IFAC World Congress.
- [33] L. J. Eriksson, “Development of the filtered-u algorithm for active noise control,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 89, no. 1, pp. 257–265, 1991.
- [34] S. M. Kuo and J. Tsai, “Residual noise shaping technique for active noise control systems,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 95, no. 3, pp. 1665–1668, 1994.
- [35] S. D. Sommerfeldt and T. O. Samuels, “Incorporation of loudness measures in active noise control,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, no. 2, pp. 591–599, 2001.
- [36] S. Elliott, I. Stothers, and P. Nelson, “A multiple error lms algorithm and its application to the active control of sound and vibration,” *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 35, no. 10, pp. 1423–1434, 1987.
- [37] S. Elliott, C. Boucher, and P. Nelson, “The behavior of a multiple channel active control system,” *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 40, no. 5, pp. 1041–1052, 1992.
- [38] S. Elliott and C. Boucher, “Interaction between multiple feedforward active control systems,” *Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on*, vol. 2, no. 4, pp. 521–530, 1994.
- [39] B. Wu and M. Bodson, “Direct adaptive cancellation of periodic disturbances for multivariable plants,” in *Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on*, vol. 3, pp. 3079–3084 vol.3, 2002.

- [40] B.Wu and M. Bodson, "Direct adaptive cancellation of periodic disturbances for multivariable plants," *Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 6, pp. 538–548, 2003.
- [41] C. X. Tan and H. Tachibana, "Nonlinearity-tolerated active noise control using an artificial neural network," in *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 1997. 1997 IEEE ASSP Workshop on*, pp. 4 pp.–, 1997.
- [42] R. Bambang, L. Anggono, and K. Uchida, "Dsp based rbf neural modeling and control for active noise cancellation," in *Intelligent Control, 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on*, pp. 460–466, 2002.
- [43] A. Montazeri and J. Poshtan, "Design of a mimo neuro-controller for anc system with loudspeaker nonlinearity in enclosure," in *Signal Processing and Communications, 2007. ICSPC 2007. IEEE International Conference on*, pp. 1415–1418, 2007.
- [44] A. Montazeri, J. Poshtan, and M. Jahed-Motlagh, "Evaluating the performance of a nonlinear active noise control system in enclosure," in *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*, pp. 2484–2488, 2007.
- [45] Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2001). *The master handbook of acoustics (Vol. 4)*. New York: McGraw-Hill.
- [46] Bonello, O. J. (1981). A new criterion for the distribution of normal room modes. *Journal of the Audio Engineering Society*, 29(9), 597-606.
- [47] Moon, T. K., & Stirling, W. C. (2000). *Mathematical methods and algorithms for signal processing (Vol. 1)*. New York: Prentice hall.
- [48] J.W. Parkins, S. D. Sommerfeldt, and J. Tichy, "Narrowband and broadband active control in an enclosure using the acoustic energy density," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 108, no. 1, pp. 192–203, 2000.
- [49] R, Quintana, D. Patiño , "Control Activo de Ruido en Recintos", pp 8-9, 2015
- [50] Compare model output and measured output. [Online]. Available: http://www.mathworks.com/help/ident/ref/compare.html#inputarg_sys