

## RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera de Sonido.

2. **TITULO:** Prototipo de un cancelador de Feedback o Retroalimentación.

3. **AUTOR:** Mónica Reyes Quiroga.

4. **LUGAR:** Bogotá, D. C.

5. **FECHA:** Agosto de 2011

6. **PALABRAS CLAVE:** Feedback, Retroalimentación, Filtros Notch, Filtros Adaptativos, Transformada de Fourier, Detección de Picos, Análisis Espectral, Acoples Acústicos, Control de Retroalimentación Acústica.

7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El trabajo es el resultado de una investigación profunda de los diferentes métodos de control de retroalimentación acústica propuestos en las pasadas 5 décadas y la implementación de un nuevo método basado en el análisis espectral de la señal de entrada de un sistema de refuerzo sonoro , un criterio de detección de picos utilizando herramientas estadísticas y la aplicación de un filtro notch a la frecuencia interferente detectada.

8. **LINEA DE INVESTIGACIÓN:** Análisis y Procesamiento de Señales ,Control, Acústica , Audio y Automatización.

9. **FUENTES CONSULTADAS:** [1] **VAN WATERSCHOOT.** Toon. Design and evaluation of digital signal processing algorithms for acoustic feedback and echo cancellation. 2009. 381 p.

[2] **COLABORADORES DE WIKIPEDIA.** Retroalimentación. Wikipedia, La enciclopedia libre, <<http://es.wikipedia.org/wiki/Realimentaci%C3%B3n>>. 2011.

[3] **COLABORADORES DE WIKIPEDIA** Audio Feedback. Wikipedia, La enciclopedia libre, < [http://en.wikipedia.org/wiki/Audio feedback](http://en.wikipedia.org/wiki/Audio_feedback)>.2011.

- [4] **EARGLE.** John. Manual de Referencia para el Diseño de Sistemas de Sonido.1999. 99p.
- [5] **VAN WATERSCHOOT.** Toon 50 years of Acoustic Feedback Control: State of the Art and Future Challenges. 2011. 78 p.
- [6] **SONIDO Y ELECTROACUSTICA.**  
<[http://www.4shared.com/get/Yhx4f9Cq/SONIDO\\_y\\_electroacustica.html](http://www.4shared.com/get/Yhx4f9Cq/SONIDO_y_electroacustica.html)>
- [7] **SCHROEDER .M. R.,** “Improvement of acoustic-feedback stability by frequency shifting,” J. Acoust. Soc. Amer., vol. 36, no. 9. 1964. 1728 p.
- [8] **SCHROEDER .M. R.,** “Improvement of acoustic feedback stability in public Address systems, 3rd Congr. Int. Acoust. (ICA '59), Stuttgart, 1959, 775 p.
- [9] **VAN WATERSCHOOT.** Toon, G. **ROMBOUTS, P. VERHOEVE,** and **M.MOONEN,** “Doubletalk-robust prediction error identification algorithms for acoustic echo cancellation,”IEEE Trans. Signal Process. vol. 55, no. 3, 2007.p. 846,
- [10] **R. HASTINGS-JAMES y MW SAGE.** Recursive generalized least squares procedure for online identification of process parameters. Proc IEE VOL 116 NO 12. 1969. 205 p.

- [11] **ROCHA Ariel. FERREIRA Aníbal** , An Accurate Method of Detection and Cancellation of Multiple Acoustic Feedbacks, University of Porto, Portugal, INESC Porto, Porto, Portugal, Presentado en la convención AES 118th Barcelona, Spain 2005.
- [12] **FOLEY, J. B.** Adaptive periodic noise cancellation for the control of acoustic howling. En Proc. IEE Colloq. Adaptive Filters, Londres, UK 1989, p. 7/1–7/4.
- [13] **M. P. LEWIS, T. J. TUCKER, y D. M. OSTER.** Method and apparatus for adaptive audio resonant frequency filtering. U.S. Patent 5, 245, 665, 1993.
- [14] **M. H. ER, T. H. OOI, L. S. LI, y C. J. LIEW.** A DSP-based acoustic feedback canceller for public address systems. En Proc. Int. Conf. Signal Process. (ICSP '93), Beijing, China, 1251–1254.p. 1993
- [15] **MAPP. Peter. EILIS. Christien.** Improvements in Acoustic Feedback Margin in Sound Reinforcement Systems Presentado en la convención AES 106<sup>th</sup> Munich, Germany 1999.
- [16] **ALEGSA.COM.** <<http://www.alegsa.com.ar/Dic/sistema.php>>
- [17] **OPPENHEIM. Alan. WILSKY. Alan.** Señales y Sistemas. 2da edición. Prentice Hall.992 p.
- [18] **HEINRICH KUTTRUFF.** Room Acoustics. Quinta Edición. Taylor & Francis, 2000 . 349 p

- [19] **COLABORADORES DE WIKIPEDIA.** Transfer Function.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Transfer function](http://en.wikipedia.org/wiki/Transfer_function)>. 2011.
- [20] **MONOGRAFIAS.COM** .Criterio de estabilidad de Nyquist.  
<<http://www.monografias.com/trabajos12/crtestb/crtestb.shtml>>. 2011.
- [21] **WEINBERG HARRY.** La Cibernética, El Arte del Timonel.  
<[http://pwp.etb.net.co/ferqui/lec\\_ciber\\_arte\\_timonel.htm](http://pwp.etb.net.co/ferqui/lec_ciber_arte_timonel.htm)>. 1959.
- [22] **DOCTOR PROAUDIO.** Acople Acústico.  
<<http://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/acoples.htm>].> 2011.
- [24] **W. LEOTWASSANA, R. PUNCHALARD, y K. SIIAPHAN.** Adaptive Howling Cancellor Using Adaptive IIR Notch Filter: Simulation and Implementation. IEEE Int. Conf. Neural Networks. Signal Processing. 2003.
- [24] **BORES** Signal Processing.  
<[http://www.bores.com/courses/intro/iir/5\\_resp.htm](http://www.bores.com/courses/intro/iir/5_resp.htm)>. 2011.
- [25] **TROXEL.** Dana. Understanding Acoustic Feedback and Supresors. Rane Corporation. 2005.
- [26] **COLABORADORES DE WIKIPEDIA.** Infinite Impulse Response.Wikipedia, La enciclopedia libre.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Infinite\\_impulse\\_response](http://en.wikipedia.org/wiki/Infinite_impulse_response)>.2011.

[27] **MAILXMAIL.COM.** <<http://www.mailxmail.com/curso-estadistica-basica-supervisores-aplicada-control->

Procesos/estadistica-descriptiva-aplicaciones-media-desviacion-estandar>.2009.

**10. CONTENIDOS:** El estudio consta de una introducción al problema de la retroalimentación acústica , abordando las principales investigaciones realizadas en las pasadas 5 décadas principalmente, y luego realizando un estudio del fenómeno físico de la retroalimentación acústica entendiéndose esta como un sistema de lazo cerrado.El estudio contiene tambien la definición y estudio de una serie de conceptos que hacen parte de toda la investigación como lo son la teoria de señales y sistemas, el analisis espectral, el control de retroalimentación en base a la supresión de acoples con filtros ranura entre otros. Tras un desglose matematico del sistema de retroalimentación acustica , su respectiva funcion de transferencia es encontrada como una estructura de filtros IIR que necesita buscar su estabilidad de acuerdo a un criterio establecido. Finalmente el metodo propuesto es anunciado y explicado con metodos de bloques y ecuaciones. Los resultados obtenidos del proceso de señal son mostrados en las graficas , satisfactoriamente los picos aplicados a la señal de entrada son atenuados considerablemente.

**11. METODOLOGIA:** Para poder realizar el algoritmo cancelador de feedback es necesario estudiar varias técnicas y procesos. Lo primero es el entendimiento profundo del proceso de retroalimentacion y los metodos de control de retroalimentacion, donde se reunan las diferentes teorías y estudios propuestos dentro de los cuales se pueden encontrar:

- Sistemas de lazo cerrado
- Funcion de transferencia de retroalimentacion acustica
- Metodos de control de retroalimentacion acustica

Los cuales se derivan a su vez en diferentes topicos y temas de otras areas como señales y sistemas y dsp, siendo estos tambien tecnicas para la implementacion del algoritmo.Tras el estudio e investigacion de la teoria existente acerca del tema, una demostracion matematica del sistema lazo cerrado que representa el feedback acustico es necesaria con el fin de demostrar la procedencia de su funcion de transferencia que va a ser la base sobre la cual se trabajara el metodo propuesto para la retroalimentacion. En vista de que el metodo propuesto implementara un filtro IIR la demostracion de su funcion de transferencia tambien es necesaria para la comprension de su funcionamiento ya

que no es suficiente solo con plantear su función de transferencia. Una vez estudiados y demostradas las ecuaciones y funciones de transferencia respectivas, se planteará un método nuevo cuyo objetivo principal será la estabilización del sistema y la atenuación de la frecuencia interferente. La técnica utilizada para ello será una programación en el software Matlab, que realizará la simulación del proceso de retroalimentación en base a una señal sinusoidal como se explicará más adelante, la idea básicamente es procesar una señal que incluya un pico en frecuencia, Matlab lee la señal de audio y el filtro programado procesará la señal detectando el pico y atenuándolo reescribiendo una señal nueva donde la presencia del pico habrá disminuido notablemente del espectro de la señal. La técnica para poder realizar el análisis del espectro de la señal mediante el cual se detectará el feedback incluye una transformada rápida de Fourier que mostrará que está pasando en el dominio de la frecuencia, así como también el cálculo de la magnitud espectral en base a la sumatoria de la energía total de la señal, la estrategia siguiente será calcular el método que me permita discriminar el pico feedback acertadamente y como paso final la aplicación del filtro notch a la señal con la frecuencia detectada, que como se mencionó anteriormente, atenuará la señal.

**12. CONCLUSIONES:** En esta investigación se realizó un estudio profundo de la teoría existente en cuanto a control de retroalimentación acústica, de donde se pudo determinar y crear un nuevo método, sin embargo es importante aclarar que se profundizó en los métodos de SAFR supresión de acoples en base a filtros ranura o notch en vista de que el método propuesto se compuso de esta teoría y profundizar fue algo obligatorio. Un profundo desarrollo matemático del proceso de retroalimentación permitió entender y aclarar los métodos investigados en el estado del arte. Se presentó un nuevo método para la detección y cancelación de la retroalimentación acústica que combina técnicas de identificación espectral de interferencias y filtros notch o ranura, donde la evaluación de contenido espectral es fundamental para la evaluación del espectro de la señal entrante, así como el cálculo de la magnitud espectral. El filtro notch IIR de segundo orden se eligió por poseer moderada carga computacional y también porque el método propuesto tiene sus bases en los métodos de supresión de acoples en base a filtros ranura, que tras el análisis espectral emplea un criterio de detección de picos efectivo que discrimina la frecuencia interferente y ajusto el parámetro del filtro para su debida atenuación, de lo anterior se puede concluir que el método propuesto es de 2 fases. El criterio de detección de picos es completamente nuevo, emplea técnicas estadísticas para el análisis y promedio de la señal de entrada, y a su vez crea un límite o threshold a partir de la varianza y desviación estándar encontradas con sus respectivas ecuaciones. De los resultados obtenidos se puede concluir que el criterio es capaz de discriminar de entre varios picos

máximos la frecuencia feedback , sin atenuar otros picos que son componentes deseados del espectro de la señal. Por lo cual puede ser considerado como el proceso mas relevante de todo el desarrollo del proyecto. El filtro notch implementado no usa una estructura predeterminada , se realizo a partir de la ubicación de los polos y ceros de acuerdo a la teoria estudiada , los polos deben ser ubicados en las cercanias de cero para lograr el ancho de banda angosto, a su vez el filtro demostro su alta capacidad de atenuacion en el diseño de prueba .Es importante concluir tambien que el algoritmo no realiza una adaptacion iterativa de los pesos del filtro, como usualmente sucede en los filtros adaptativos , sin embargo el filtrado implementado es adaptativo en cuanto a que la actualizacion y modificacion de los parametros dependen del analisis del espectro efectuado en la primera fase.De la simulación podemos concluir que el algoritmo diseñado tiene una alta capacidad de detectar de picos, de estimar su frecuencia y atenuarla en diferentes valores que pueden ser observados en las pruebas. Auditivamente, el pico interferente se sigue sintiendo levemente, lo cual también se debe a la condición artificial creada para simular el proceso de retroalimentación ya que el pico o sinusoidal es aplicado a la señal de entrada de forma permanente, para un efecto real de retroalimentación acústica la situación seria completamente diferente. En dichas condiciones reales, cuando el filtrado notch sea aplicado en la frecuencia central detectada, el sistema lazo cerrado que es la retroalimentación acústica, se vería interrumpido y la perturbación desaparecería completamente mientras el filtro se mantuviese activo.

**PROTOTIPO DE UN CANCELADOR DE FEEDBACK O  
RETROALIMENTACION.**

**MONICA REYES QUIROGA.**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA BOGOTA.**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**INGENIERIA DE SONIDO**

**BOGOTA D C**

**2011**



**PROTOTIPO DE UN CANCELADOR DE FEEDBACK O  
RETROALIMENTACION.**

**MONICA REYES QUIROGA.**

**Proyecto de grado para optar por el titulo de: INGENIERA DE SONIDO**

**Tutor  
DARIO PAEZ  
Docente Académico**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA BOGOTA.**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**INGENIERIA DE SONIDO**

**BOGOTA D C**

**2011**

**Notas de aceptación**

---

---

---

---

---

**Presidente del jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Bogotá, 29 de Agosto de 2011**

*A los generadores y creadores de la idea general, mis Padres Oscar y Claudia, a toda mi familia y a la continuadora de la idea mi hija Valeria.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis agradecimientos a:

Principalmente a la Universidad de San Buenaventura por brindarme todo el conocimiento necesario para poder realizar mí proyecto de grado.

Expreso un gran agradecimiento al Ing. Ricardo Quintana quien fue coautor del método propuesto en esta investigación, y me ayudo en la comprensión de temas y teorías que no tenía claras y fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

Al Profesor Aníbal Ferreira de la Universidad de Porto en Portugal por su asistencia en todas las inquietudes acerca del tema, a pesar de la diferencia de lengua y la distancia entre países.

A mi madre Claudia Quiroga por apoyarme en todos los proyectos que emprendo, por la paciencia, el ánimo y comprensión también, y por su interés en que las cosas se den de la mejor manera posible.

Muchísimas Gracias a Todos.

## CONTENIDO

GLOSARIO .....	8
INTRODUCCION .....	11
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.1 ESTADO DEL ARTE : ANTECEDENTES .....	13
1.1.1 50 Years of Acoustic Feedback Control.....	13
1.1.2 An Accurate Method of Detection and Cancellation of Multiple Acoustic Feedbacks .....	19
1.2 DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA .....	20
1.3 JUSTIFICACION .....	20
1.4 OBJETIVO DE LA INVESTIGACION.....	22
1.4.1 OBJETIVO GENERAL .....	22
1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	22
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO.....	22
1.5.1 ALCANCES.....	22
1.5.2 LIMITACIONES.....	23
2 METODOLOGIA .....	23
3 LINEA DE INVESTIGACION DE LA UNIVERSIDAD .....	24
4 MARCO DE REFERENCIA .....	25
4.1 MARCO TEORICO- CONCEPTUAL .....	25
4.1.1 Señales y Sistemas Discretos .....	26
4.1.2 Transformaciones de la Variable Independiente .....	26
4.1.3 Sistemas Lineales.....	27
4.1.4 Transformada de Fourier .....	28
4.1.5 Transformada Z .....	29
4.1.6 Función de Transferencia .....	30
4.1.7 Estabilidad e Inestabilidad .....	30
4.1.8 Respuesta al Impulso .....	32
4.2 La Retroalimentación Acústica .....	32
4.2.1 Causas de la Retroalimentación Acústica .....	35
4.2.2 Control de Retroalimentación Acústica.....	36
4.2.3 Supresión de Acoples con Filtros Ranura.....	37
5 DESARROLLO INGENIERIL .....	40
5.1 Demostración Matemática de un filtro IIR Ranura de Segundo Orden.....	40
5.2 Demostración Matemática de la Retroalimentación Acústica.....	43
5.3 Sistema Lazo Cerrado con Sistema de Control de Retroalimentación Propuesto .....	49
5.4 Análisis Espectral : Transformada de Fourier.....	53
5.5 Detección de Picos .....	53
5.6 Implementación Filtro Notch de Segundo Orden.....	56
5.7 SIMULACION DE RETROALIMENTACION ACUSTICA.....	58
6. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	61
6.1 PRUEBAS CON MUSICA.....	61
6.1.1 PRUEBAS DE MUSICA CON SINUSOIDAL DE 500 HZ .....	62
6.1.2 PRUEBA DE MUSICA CON SINUSOIDAL DE 7500 HZ.....	64
6.1.3 PRUEBA DE MUSICA CON SINUSOIDAL DE 3850 HZ.....	66
6.2 PRUEBAS DE DIALOGO .....	68
6.2.1 PRUEBA DE DIALOGO CON SINUSOIDAL DE 2000 HZ .....	68

6.2.2 PRUEBA DE DIALOGO CON SINUSOIDAL DE 4800 HZ .....	70
6.2.3 PRUEBA DE DIALOGO CON SINUSOIDAL DE 5100 HZ .....	72
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
8 BIBLIOGRAFIA .....	77
ANEXOS .....	80
ALGORITMO DEL FILTRO NOTCH DISEÑADO EN MATLAB.....	80
ALGORITMO DEL METODO PROPUESTO PARA EL CONTROL DE RETROALIMENTACION...	81

## GLOSARIO

**Acople Acústico:** Sonido de los altavoces que vuelve a los micrófonos, a un nivel lo suficientemente alto para hacer que la señal pueda seguir aumentando. Esto produce un acople acústico como la ronda de la señal de los ciclos y en torno al sistema.

**A/D:** Análogo a Digital

**Algoritmo:** Es una lista bien definida, ordenada y Finita de operaciones que permite hallar la solución a un problema. Dado un estado Inicial y una entrada, a través de pasos sucesivos y bien definidos se llega a un Estado final, obteniendo una solución.

**Aliasing:** Impide recuperar correctamente la señal cuando las muestras de ésta se obtienen a intervalos de tiempo demasiado largos. La forma de la onda recuperada presenta pendientes muy abruptas.

**Análisis Espectral:** Es una medida de la distribución de amplitudes de cada frecuencia.

**Calidad Sonora:** Grado de exactitud con que un dispositivo graba o emite ondas sonoras. También es un valor subjetivo definido como el placer o fatiga física experimentada por un oyente.

**dB:** Decibel

**dBV:** Decibel (voltaje de referencia = 1V)

**Eco:** Es un fenómeno acústico producido cuando una onda se refleja y regresa hacia su emisor. Puede referirse tanto a ondas sonoras como a electromagnéticas

**Fase:** Es la diferencia temporal que existe entre dos ondas sinusoidales o la Situación instantánea de un ciclo periódico

Filtrado Adaptativo: Proceso que implica que los parámetros que caracterizan al filtro, tales como ancho de banda, frecuencias de los ceros, Cambian con el tiempo.

Filtrado Espacial: Modelado de las señales sonoras como haces o rayos para procesas arreglos de micrófonos, con el fin de extraer interferencias.

Hz: Hertz

Interferencia: Resultado de la superposición de dos o más ondas, resultando En la creación de un nuevo patrón de ondas. Aunque la acepción más usual para Interferencia se refiere a la superposición de dos o más ondas de frecuencia Idéntica o similar. Matemáticamente, la onda resultante es la suma algebraica de Las ondas incidentes, de tal forma que la función de onda en un punto es la suma De todas las funciones de onda en ese punto.

Modulación de Fase: Se obtiene variando la fase de una señal portadora de amplitud constante, en forma directamente proporcional a la amplitud de la señal modulante.

Muestreo: Número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continúa para producir una señal discreta, durante el proceso necesario para convertirla de analógica en digital

Potencia: En física, potencia es la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo.

Reducción de Ganancia: Reducción del valor de amplificación que una señal obtiene al ser procesada por un sistema.



Respuesta al impulso de un sistema: Es la que se presenta en la salida Frente a una señal muy breve, o impulso unitario, en la entrada. Mientras que un Impulso es un concepto difícil de imaginar, y es imposible en la realidad, éste Representa el caso límite de un pulso infinitamente corto en el tiempo pero que Mantiene su área o integral (por lo cual tiene un pico de amplitud infinitamente Alto).

Señal: Es una función matemática que describe algún fenómeno físico.

Señal Sonora: Cualquier fenómeno que involucre la propagación en forma de ondas elásticas (sean audibles o no), generalmente a través de un fluido (u otro medio elástico) que esté generando el movimiento vibratorio de un cuerpo.

Señal Sinusoidal: onda regularmente curvada que describe el comportamiento de los tipos más simples de sistemas oscilantes. Los tonos musicales puros o las señales eléctricas producen ondas sinusoidales.

Valor RMS: Raíz Media Cuadrada, lo cual significa que las presiones sonoras instantáneas en un intervalo de tiempo son primero elevadas al cuadrado luego promediadas y finalmente extraída la raíz cuadrada del promedio.

Respuesta en Frecuencia: característica de un sistema que tiene una respuesta medida que es el resultado de una entrada conocida

## INTRODUCCIÓN

La importancia de las señales sonoras en la comunicación e interacción humana siempre ha sido subestimada en vista de que el ser humano se encuentra rodeado de estas, tales como el ruido del tráfico, las señales de las alarmas, los sonidos del clima etc. [1] todas influyentes e interferentes en nuestra comunicación e interacción que se basa mayormente en el diálogo y la música. Las expresiones corporales hacen parte también de este conjunto pero solamente acompañan y complementan el mensaje que las 2 aplicaciones mencionadas intentan transmitir.

En primera instancia el diálogo o discurso oral puede ser visto como una de las herramientas fundamentales en la comunicación de los seres humanos, es un acto de habla y un razonamiento dirigido por una persona a otra u otras, es también una exposición oral de alguna extensión hecha generalmente con el fin de persuadir, y se encuentra conformada por tres aspectos que son: Tema o contenido del discurso, Orador y Auditorio. El diálogo lleva no solamente un mensaje lingüístico si no también expresiones emocionales, Por otro lado la música es según el compositor Claude Debussy, "un total de fuerzas dispersas expresadas en un proceso sonoro que incluye: el instrumento, el instrumentista, el creador y su obra, un medio propagador y un sistema receptor". La Música se ha convertido en una fuente diaria de empatía y entretenimiento para muchas personas, a través de las grabaciones, emisoras radiales o shows en vivo donde los oyentes o receptores reciben el mensaje enviado por el artista o creador quien es el mismo emisor.

Para poder interpretar los mensajes enviados a través del diálogo y la música adecuadamente, una buena calidad sonora es de mayor importancia para poder percibir las señales sonoras contenedoras de mensajes, sin embargo estas son usualmente distorsionadas en su camino desde la fuente al receptor por interferencias externas como por ejemplo el ruido de un carro interfiriendo en una conversación entre pasajeros, ecos irrumpiendo en las llamadas de celulares, aviones pasando mientras se observa televisión, se habla o se escucha música etc.

Es aquí donde inicia el tema principal de esta investigación llamado feedback o retroalimentación acústica como un efecto interferente en las señales de audio, que afecta directamente un proceso de comunicación compuesto usualmente por sistemas de refuerzo sonoro, entendiéndose estos como sistemas que realizan la amplificación de sonido en vivo, y se componen de una entrada de transductores (micrófonos), que convierten la energía del sonido en una señal eléctrica, los procesadores de señales que alteran las características de la señal, amplificadores, lo que añade potencia a la señal de otro modo sin cambiar su contenido, y los transductores de salida (altavoces), que convierten la señal de vuelta a la energía del sonido. Estas partes principales incluyen cantidades variables de los componentes individuales para lograr el objetivo deseado de reforzar y aclarar el sonido a la audiencia, los artistas, o de otras personas. también hace que el sonido en directo sea más fuerte y se pueda distribuir a un público más amplio o más lejano. [6]

En un sistema de refuerzo sonoro el feedback se produce cuando el sonido reproducido por los altavoces (salida) es captado de nuevo por el micrófono (entrada) para ser amplificado nuevamente y reproducido por el parlante, generando así un ciclo en el proceso que resulta completamente perturbador e irritante, emitiendo pitos de una frecuencia singular que crecen rápidamente en magnitud y que siempre han sido y serán un objeto de distracción en cualquier evento que incluya refuerzo sonoro, disminuyendo completamente la calidad sonora.

El proceso feedback va más allá de la emisión de dichos pitos, es parte de un conjunto de sistemas y subsistemas e indica que una transformación de la señal de salida de un sistema se redirige de nuevo a la entrada, no solo en sistemas de audio sino también en la mayoría de sistemas complejos, tales como la biología, la economía y la arquitectura.[2]

El feedback no es algo actual a pesar de que la mayor parte de las investigaciones se encuentran en los últimos 10 años, la investigación del tema lleva 50 años e históricamente ha existido una ambigüedad con respecto a la terminología, encontrando diferentes nombres como acople acústico, efecto "howling" o efecto

“Larsen” debido a que el físico Danes Soren Larsen [3] fue uno de los primeros investigadores en la problemática del feedback acústico y sus principios, y es el pionero de entre muchos investigadores en las pasadas 5 décadas, donde varias soluciones automáticas y manuales se han propuesto con el fin de eliminar los acoples acústicos, dichas teorías se reúnen en un solo término llamado control de retroalimentación acústica que se divide en 2 categorías: manual y automático.

El control de retroalimentación acústica manual se refiere directamente a la buena configuración de los niveles de ganancia, al uso de micrófonos direccionales y al acondicionamiento acústico de la sala, ya que el feedback puede producirse por los modos acústicos del recinto como también por su reverberación. Un método muy usado por los ingenieros de sonido es utilizar un ecualizador gráfico y subir las ganancias de los canales de audio, en cuanto aparezca el primer feedback bajar esta frecuencia y luego volver a subir los niveles de audio para detectar el siguiente feedback. [4]

El control de la retroalimentación acústica Automático se refiere al proceso de intentar solucionar el problema del feedback acústico completa o parcialmente sin la interacción de un operador - lo que sería un método de eliminación manual - y que se enfatiza en la implementación de algoritmos en un procesador digital de señal que detecta la frecuencia a la cual se produce el feedback y crea un filtro para ella.

En este trabajo se abordarán solamente los métodos automáticos de control de feedback, además el énfasis se realizará en métodos de tiempo discreto que puedan ser simulados en un procesador digital de señal. Un nuevo método será propuesto y simulado, basado en la investigación realizada.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La retroalimentación acústica es un fenómeno físico que aparece en diversas aplicaciones de dialogo (speech) y audio, principalmente en sistemas de refuerzo sonoro, o en ingles, el también llamado Public Adress (PA), donde encontramos salas de conciertos, sistemas de información en aeropuertos, sistemas de conferencias a gran escala etc., el feedback también se produce en audífonos para personas con perdida auditiva, donde se encuentra un gran campo de investigación en control de retroalimentación acústica.

El diseño de un algoritmo para atenuar o cancelar la retroalimentación ha sido tarea de investigadores en las pasadas 5 décadas, que han propuesto diversos métodos digitales y electrónicos, surge entonces la necesidad de proponer una nueva solución a la problemática y abrir el campo del conocimiento e investigación en el area que reúne diferentes asignaturas tales como el procesamiento digital de señal , acustica y la teoria de señales y sistemas, y es necesario el conocimiento de todas las asignaturas para el adecuado entendimiento de la retroalimentacion acustica.

### 1.1 ESTADO DEL ARTE : ANTECEDENTES

#### 1.1.1 50 Years of Acoustic Feedback Control: State of the Art and Future Challenges por Toon van Waterschoot y Marc Moonen.

Desde el año 2007 al 2011 los autores de este documento realizaron una investigación de todos los métodos existentes para el control de retroalimentación acústica desde la época de los sesentas aproximadamente, a su vez los autores implementaron y simularon los métodos mas relevantes a lo largo de la historia del control de retroalimentación acústica, dentro de los cuales podemos discriminar 6 clases , que en resumen serian los siguientes:

- **Control de Retroalimentación con Modulación de Fase**

Uno de los primeros acercamientos al control de retroalimentación acústica consiste en el desplazamiento de frecuencia (DF) de las señales del micrófono antes de que estas sean amplificadas y enviadas a los parlantes. Este acercamiento puede ser atribuido a Schroeder quien publicó varios papers en el tema a principios de los sesentas [7], [8]. Según Schroeder, debido a que la distancia promedio entre 2 magnitudes pico en la respuesta al impulso en una sala es de alrededor 10 Hz el valor óptimo de DF debería estar alrededor de los 5Hz. [7] afirmando que un desplazamiento de frecuencia de 5 Hz, es inaudible en las señales de diálogo y música. En los primeros ensayos realizados con DF se mostraron buenos resultados sin embargo se resalta la desventaja de que el método no preserva las relaciones armónicas entre los componentes tonales de diálogo y música.

Otro método reciente es un método que emplea la modulación de fase (MF) en el camino electro - acústico, este consiste en controlar la fase de la señal del micrófono de tal manera que cada componente en la frecuencia en la señal retroalimentada tenga diferente fase cada vez que llegue al micrófono después de haber recorrido un ciclo alrededor del loop o lazo cerrado [9] de esta forma se garantiza que la fase no sea la misma en un mismo instante logrando mejorar la estabilidad del sistema. El Control de Retroalimentación por Modulación de Fase (CRMF) se logra insertando un filtro de modulación de fase (MF) en el camino electro - acústico, el filtro opera directamente en la señal del micrófono y entrega una señal de salida procesada.

Como conclusión el autor afirma que La principal fortaleza del CRMF es básicamente su simplicidad tanto conceptual como computacional. El diseño de un sistema de este tipo requiere poco esfuerzo debido a que solo se requiere la selección de una técnica de modulación (DF, MF, entre otras) y el ajuste de unos pocos parámetros. Además el método no requiere de ningún aprendizaje o proceso adaptativo. [5]

Una desventaja muy importante en el método CRMF es que insertar un filtro MF en el camino electro - acústico inmediatamente conduce a la distorsión de la señal. [5]

- **Control de retroalimentación con Reducción de Ganancia**

El método más directo en cuanto a control de retroalimentación acústica es automatizar las acciones que un operador humano realizaría para prevenir o eliminar dichos picos y pitidos en un sistema de refuerzo sonoro, reduciendo la ganancia del camino electro-acústico.

De aquí podemos discriminar 3 métodos:

- Control Automático de Ganancia
- Ecuación Automática
- Supresión de acoples en base a filtros ranura o filtros notch.

Cada método de reducción de ganancia debe ser activado de alguna manera cuando una inestabilidad en el lazo cerrado, o alguna tendencia hacia la inestabilidad es detectada, para ello se realiza una medición de la respuesta en magnitud de la retroalimentación o una detección temprana de la acumulación del efecto en su análisis espectral que puede ser observado en los componentes de la frecuencia crítica en la señal del micrófono [10]. La mayoría de métodos de reducción de ganancia son reactivos, entendiéndose por esto que el acople puede ser percibido antes de ser detectado. En estos métodos la detección del acople se basa en una combinación de análisis temporal y espectral de la señal del micrófono. Debido a la naturaleza sinusoidal del acople, los componentes frecuenciales de la señal del micrófono con mayor amplitud son considerados candidatos a ser componentes del acople. Los verdaderos candidatos a ser acople dentro del grupo de candidatos pueden ser los componentes de la señal de la fuente, usando varios criterios que se pueden basar en las siguientes características: la relación de potencia entre el componente candidato y el espectro total, la relación de potencia entre el candidato y sus sub - armónicos y la relación de potencia entre el candidato y sus componentes frecuenciales vecinos. [5].

Los métodos de supresión de acoples en base a filtros ranura o notch (SAFR) son los métodos de reducción de ganancia más populares y se pueden dividir en 2 categorías: los métodos de una etapa y de 2 etapas dependiendo de cómo se haga la detección y si los filtros ranura actúan juntos o separadamente. Los primeros métodos SAFR que aparecieron fueron los de una etapa los cuales usan el algoritmo de mínimos cuadrados LMS para adaptar los coeficientes del filtro de banda estrecha que detecta y cancela un componente en la señal del micrófono [12].

El método de 2 etapas se origina del trabajo de Lewis y Er a principios de los años noventas [13], [14]. Se trata de un análisis frecuencial de la señal del micrófono usando la transformada de Fourier donde el componente candidato es detectado usando un algoritmo de selección de picos.

Los autores concluyen que los métodos SAFR tienen muchas fortalezas en especial su propiedad de estabilizar un sistema inestable sin la necesidad de reducir la ganancia del ancho de banda. En cuanto a requerimientos computacionales el método es moderadamente complejo. La principal carga computacional es el análisis de frecuencia. [5]

Una dificultad que posee el método es la multitud de parámetros del algoritmo que deben ser ajustados, el número de candidatos seleccionados, los umbrales para la selección del acople, el número de filtros ranura variables etc.

- **Control de retroalimentación con Filtrado Espacial**

Los métodos de filtrado espacial apuntan a alterar la respuesta del sistema en lazo cerrado usando arreglos de micrófonos o parlantes (arrays) donde las señales recibidas/emitidas son procesadas por unos filtros especiales. El arreglo de micrófonos debe tener su lóbulo principal en dirección de la fuente (micrófono) y tener un cero en dirección del parlante, y el arreglo de parlantes debe dirigir su lóbulo principal hacia la audiencia y tener un vacío o cero en dirección del micrófono. Se dice que este método es algo impráctico para aplicaciones de refuerzo sonoro debido a que los arreglos del micrófono y el parlante deben tener el mismo centro y deben estar ortogonalmente el uno del otro. [5]

- **Control de retroalimentación con Modelado de Sala**

En estos métodos el objetivo principal es identificar un modelo del proceso de retroalimentación acústica. Aquí se encuentra otro de los métodos más populares para el control de retroalimentación acústica llamado cancelación adaptativa de retroalimentación acústica (CAR). El modelo del camino o sendero de retroalimentación acústica puede ser exactamente identificado entonces el método logra muy cercanamente la completa eliminación del acople acústico. Más específicamente el sistema estima la señal retroalimentada que de ahora en adelante se llamara  $x(t)$  detectando la Función de Transferencia FT (que es desconocida). Luego la interferencia es cancelada substrayendo  $x(t)$  de la señal de entrada [11].

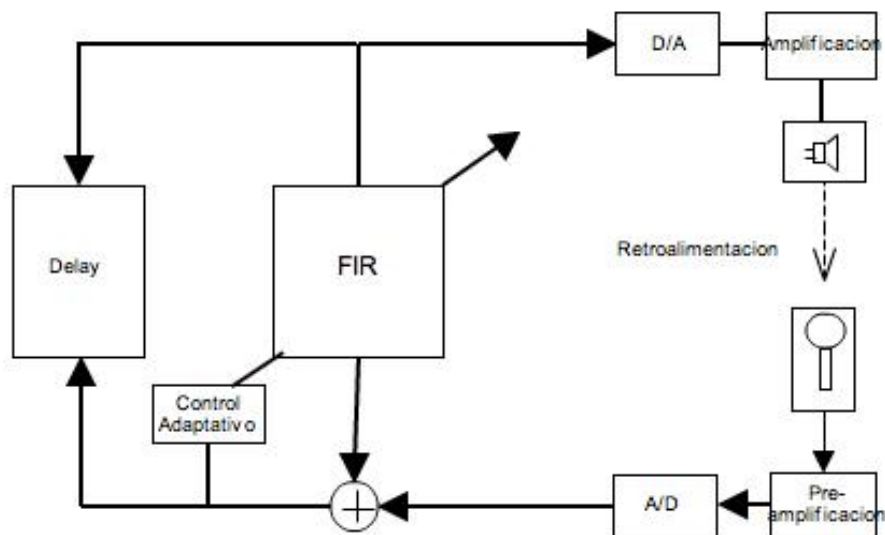


Principalmente se usan dos estructuras de filtros, los de respuesta al impulso finita FIR y los de respuesta al impulso infinita IIR, para determinar la conexión al sistema de refuerzo sonoro y la forma en que se presenta la interferencia.

- **Filtrado adaptativo con filtros de respuesta al impulso finita (FIR)**

Este método trata con el problema de retroalimentación acústica de la misma manera que la cancelación adaptativa de eco (CAE) usando un filtro FIR. La meta principal es generar una FT opuesta a la que es producida por la interacción locutor-micrófono, con el fin de cancelar el componente interferente recibido por el micrófono. [11]

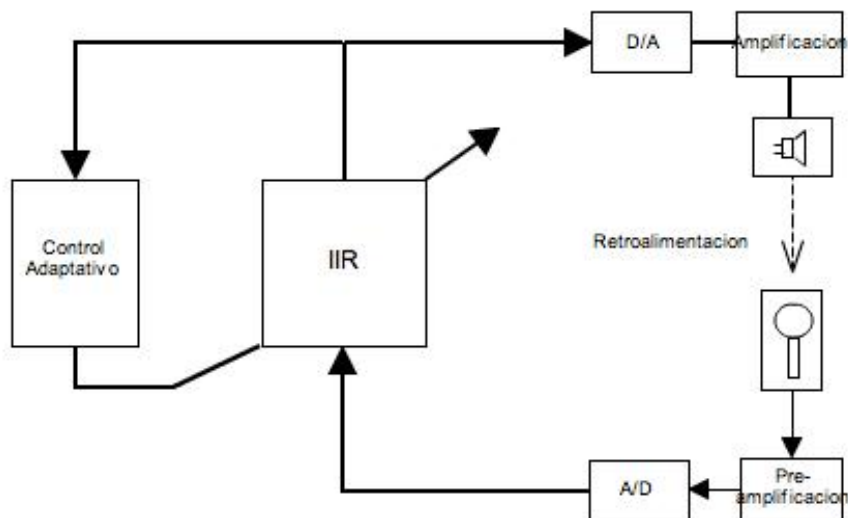
Ilustración 1 Filtrado Adaptativo FIR para la cancelación de retroalimentación acústica [11]



- **Filtrado adaptativo con filtros de respuesta al impulso infinita. (IIR)**

Este método combina la aplicación de un filtro ranura que detecta la interferencia y la suprime, una estructura IIR de segundo orden es usada para implementar el filtro. [11]

Ilustración 2 Filtrado Adaptativo IIR para la cancelación de retroalimentación acústica. [11]



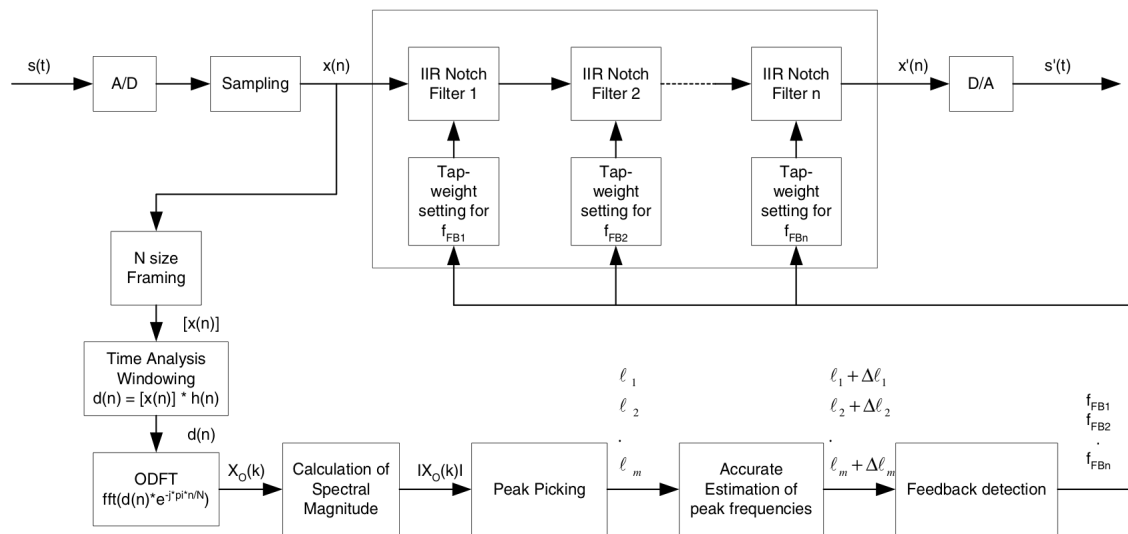
La cancelación adaptativa de retroalimentación CAR es considerada la solución más prometedora al problema de la retroalimentación acústica, su propiedad más atractiva puede ser el hecho de que el efecto de la retroalimentación puede ser cancelado completamente. Como consecuencia de esto un sistema de refuerzo sonoro equipado con el sistema CAR puede operar con largo margen de ganancia y por lo tanto los acoples, pitos y reverberación pueden ser evitados resultando en una excelente calidad sonora [5].

La principal desventaja del método CAR es su complejidad computacional que es mucho mas alta que la complejidad de los métodos mencionados anteriormente, principalmente por la necesidad de usar una tasa de muestreo bastante alta con el fin de obtener una buena calidad sonora, especialmente en aplicaciones de audio.[5]

### 1.1.2 An Accurate Method of Detection and Cancellation of Multiple Acoustic Feedbacks por Ariel F. Rocha y Aníbal J. S. Ferreira.

Los autores proponen un nuevo método de cancelación adaptativa de feedbacks acústicos, usando un análisis de frecuencia de alta resolución y filtros notch para detectar exactamente las perturbaciones y cancelarlas sin afectar notablemente el espectro del audio, el algoritmo detecta los picos espectrales basándose en la forma geométrica de su espectro, luego aplica un criterio con el fin de decidir si dichos picos corresponden a acoples o a componentes deseados de la señal acústica, usando un filtro notch IIR de segundo orden, se efectúa la cancelación de las perturbaciones ubicándose en la frecuencia central de cada feedback.

Ilustración 3 Diagrama del Algoritmo Cancelador de Múltiples Feedbacks



El algoritmo toma muestras de 1024 segmentos, aplica un proceso de ventaneo y una transformada de fourier impar, tras el calculo de la magnitud espectral y la

detección de feedbacks , al algoritmo calcula la frecuencia de las perturbaciones a las cuales aplica un banco de filtros notch con el fin de suprimir las interferencias.

Los autores concluyen que el algoritmo propuesto es capaz de detectar rápidamente 2 picos simultáneos aplicando un filtro notch a cada uno y exhibiendo una atenuación notable de la perturbación.

Es importante aclarar que este documento es uno de los aportes más importantes a la tesis , en vista de que la primera fase del método de cancelación de múltiples feedbacks es similar al implementado en el nuevo método, a excepción de que los procesos de ventanao y transformada impar son ajenos al algoritmo y el criterio de detección de picos es completamente diferente ya que para la detección de picos los autores proponen el cálculo de la energía a través de una relación de Parseval.

## **1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo puede ser atenuada la retroalimentación acústica en sistemas de audio sin afectar la señal original a través del procesamiento digital ?

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Hoy en día, la comunicación audiovisual es un medio muy importante en cuanto a la transmisión de la información ya sea a nivel educativo, laboral o en el campo del entretenimiento, por ser un intercambio de mensajes entre personas a través de un sistema tecnológico sonoro y/o visual.

En la realización de eventos como conferencias, conciertos o la simple exposición de videos en recintos con refuerzo sonoro al aire libre y en dispositivos como audífonos para personas con discapacidad auditiva, los altoparlantes y emisores, miembros de estos sistemas, pueden verse afectados por el problema de la retroalimentación produciendo retrasos de tiempo en las actividades como también

daños en el oído humano, causando pérdida auditiva, daños en los sistemas electro - acústicos , que en su mayoría son los daños en los altavoces y en general una indisposición del público y los oyentes , encontrando una gran problemática en cuanto a que lo ideal sería detectar a tiempo el acople y cancelarlo en el menor tiempo posible sin necesidad de mover los instrumentos , micrófonos y altoparlantes, o variar el valor de ganancia .

La tecnología en la actualidad apunta a facilitar y simplificar los procesos de tal manera que la mano del hombre no intervenga y en este caso, ese sería un objetivo también, La cancelación del feedback realizada por un procesador digital de señal de manera automática.

El problema de la retroalimentación puede ser considerado uno de los más antiguos problemas en el procesamiento de señales acústicas junto con el eco [1], por lo cual es un campo en constante investigación.

Un nuevo método será propuesto con el hilo principal de la investigación que siempre será el mejoramiento de la calidad sonora, teniendo en cuenta que en los pasados 50 años se han propuesto muchas técnicas con el fin de solucionar el problema pero en todas se han encontrado limitaciones operacionales o de otro tipo [15], Centrando el tema en un sistema de transmisión de información.

El método de control de retroalimentación propuesto implementará un algoritmo de detección automática rápida de retroalimentación acústica, detectará la frecuencia de retroalimentación, fijando un filtro sumamente estrecho para destruirla sin afectar el resto de la señal, el algoritmo puede ser utilizado en los 2 entornos más comunes donde se produce la retroalimentación que son:

- Mezcla de Sala o Front of House : que es aquella que sale de la mesa de mezclas principal para alimentar los amplificadores de potencia y altavoces destinados al público.
- Mezcla de monitores, que es aquella que sale de la mesa de mezclas principal, o de la mesa de mezclas para monitores, para alimentar los

amplificadores de potencia y monitores sobre el escenario destinados a los músicos.

El principal beneficio que se puede obtener del proyecto es la solución al problema de la retroalimentación sin la distorsión de la señal y del espectro, la estabilización del sistema , además de la automatización de un proceso que sin duda agiliza las actividades y el desempeño de un evento.

Adicionalmente , la proposición del método puede ser base e hilo conductor para futuros proyectos , dentro de los cuales se podrían proponer dispositivos canceladores de feedback en tiempo real , que requerirían del estudio de la implementación en una tarjeta dsp del algoritmo propuesto , y la adición de algunos elementos con el fin de hacer más exacta la detección de múltiples feedbacks en sistemas de refuerzo sonoro con múltiples canales, y que a su vez - de acuerdo al desempeño estudiado y observado - podría llegar a ser un producto comercializable.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseño de un algoritmo de detección y atenuación de feedback.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Aplicar la transformada de Fourier con el fin de analizar los componentes en frecuencia de la señal que simulara el proceso de retroalimentación.

- Realizar un criterio de discriminación de frecuencias pico con el fin de encontrar el componente candidato a feedback o retroalimentación.
- Después de la detección del pico, aplicar la teoría de filtrado notch a través del diseño del mismo, con el fin de extraer la señal interferente del espectro total.
- Realizar la simulación del algoritmo y su respectivo análisis de resultados.

## **1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO**

### **1.5.1 ALCANCES**

El alcance principal del proyecto es mostrar a través del procesamiento digital de señal un algoritmo diseñado para la supresión de la retroalimentación acústica que logra detectar y atenuar el acople acústico a través de una simulación de dicho algoritmo, gracias a la investigación y estudio de casi todos los métodos existentes, un conjunto de teorías se colectaron para obtener el método, muchas de estas provenientes de proyectos de maestría y doctorado.

### **1.5.2 LIMITACIONES**

En un principio uno de los objetivos principales fue el de realizar la implementación del algoritmo diseñado en una tarjeta DSP para así poder observar la supresión de retroalimentación en tiempo real sin embargo esto fue prácticamente imposible, principalmente por razones de tiempo ya que la colección de teorías y selección del criterio utilizado en el algoritmo requirió bastante tiempo, estudio y entendimiento, además de pruebas y ensayos fallidos, referencias y consejos de profesores e investigadores, e incluso el retorno a temas de Calculo Diferencial hasta lograr la simulación que es el paso anterior a la implementación en tiempo real.

## 2. METODOLOGIA

Para poder realizar el algoritmo cancelador de feedback es necesario estudiar varias técnicas y procesos. Lo primero es el entendimiento profundo del proceso de retroalimentación y los métodos de control de retroalimentación, donde se reúnan las diferentes teorías y estudios propuestos dentro de los cuales se pueden encontrar:

- Sistemas de lazo cerrado
- Función de transferencia de retroalimentación acústica
- Métodos de control de retroalimentación acústica

Los cuales se derivan a su vez en diferentes tópicos y temas de otras áreas como señales y sistemas y dsp, siendo estos también técnicas para la implementación del algoritmo.

Tras el estudio e investigación de la teoría existente acerca del tema, una demostración matemática del sistema lazo cerrado que representa el feedback acústico es necesaria con el fin de demostrar la procedencia de su función de transferencia que va a ser la base sobre la cual se trabajará el método propuesto para la retroalimentación.

En vista de que el método propuesto implementará un filtro IIR la demostración de su función de transferencia también es necesaria para la comprensión de su funcionamiento ya que no es suficiente solo con plantear su función de transferencia. Una vez estudiados y demostradas las ecuaciones y funciones de transferencia respectivas, se planteará un método nuevo cuyo objetivo principal será la estabilización del sistema y la atenuación de la frecuencia interferente. La técnica utilizada para ello será una programación en el software Matlab, que realizará la simulación del proceso de retroalimentación en base a una señal sinusoidal como se explicará más adelante, la idea básicamente es procesar una señal que incluya un pico en frecuencia, Matlab lee la señal de audio y el filtro programado procesará la señal detectando el pico y atenuándolo reescribiendo una señal nueva donde la presencia del pico habrá disminuido notablemente del espectro de la señal.

La técnica para poder realizar el análisis del espectro de la señal mediante el cual se detectará el feedback incluye una transformada rápida de Fourier que mostrará que está pasando en el dominio de la frecuencia, así como también el cálculo de la magnitud espectral en base a la sumatoria de la energía total de la señal, la estrategia siguiente será calcular el método que me permita discriminar el pico



feedback acertadamente y como paso final la aplicación del filtro notch a la señal con la frecuencia detectada, que como se mencionó anteriormente, atenúa la señal.

### **3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD / LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD / NÚCLEOS PROBLÉMICOS**

El problema de retroalimentación acústica está afiliado a 3 núcleos problemáticos: Control, Acústica y Audio y Automatización, la investigación es el control del proceso de retroalimentación acústica, el solo título incluye los primeros 2 núcleos, y en cuanto a automatización, se busca principalmente un método automático de eliminación de acoples, donde los sistemas varían sus coeficientes de acuerdo a la información obtenida por los análisis de señal. Entendiendo esto la investigación se encontraría en la línea de investigación de la facultad suscrita como Análisis y Procesamiento de Señales (APS) al poseer un juego de instrucciones en un software que realiza operaciones numéricas a alta velocidad. En la línea de investigación Tecnologías Actuales y Sociedad.

### **4. MARCO DE REFERENCIA**

El soporte teórico - conceptual del proyecto se encuentra compuesto de diversas materias y áreas de investigación desplegándose estos principalmente en la teoría de sistemas de retroalimentación y sistemas inestables, lo cual requiere un estudio previo de temas como la Transformada de Fourier, la función de transferencia, Transformada Z y Diseño de filtros (IIR y FIR). A los temas anteriores se les suma todos los antecedentes e investigaciones en el campo del control de retroalimentación acústica, donde cada método propone nuevas fórmulas con

diferentes criterios como la modulación de frecuencias, modulación de amplitud, filtrado espacial etc.

La realización del algoritmo también requirió de bastante estudio en vista de que no se tenían las herramientas de programación de MATLAB muy claras, así que dentro del soporte también encontramos la manera de programar el algoritmo, y las diversas formas de aplicar los filtros que posee este software como sucedió con el diseño del filtro notch que se observara mas adelante.

Otro concepto aunque básico pero muy importante es el del análisis espectral y la detección de picos y los métodos estudiados para llegar a la realización de estos.

Es importante aclarar que la investigación fue mas allá del estudio de procesamiento digital de señales impartido en la universidad, básicamente por el vocabulario desconocido encontrado en los documentos de referencia , que en su mayoría fueron papers de doctorados y maestrías en universidades extranjeras.

#### **4.1 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL**

Para entender todo el proceso de retroalimentación y el método propuesto es necesario un estudio de varios tópicos que ayudan al entendimiento matemático del problema empezando por la teoría de sistemas y sistemas inestables desencadenando una serie de conceptos que se verán a continuación.

Un sistema es un conjunto de objetos que interactúan entre si o que son interdependientes entre si para lograr un objetivo, de forma tal que un cambio en un elemento afecta al conjunto de todos ellos. Los sistemas reciben (entrada) datos, energía o materia del ambiente y proveen (salida) información, energía o materia.

Cada sistema existe dentro de otro más grande, por lo tanto un sistema puede estar formado por subsistemas y partes, y a la vez puede ser parte de un super sistema [16].

### 4.1.1 Señales y Sistemas Discretos

Las señales se representan matemáticamente como funciones con una o más variables independientes. Las señales discretas solo están definidas en tiempos discretos y en consecuencia para estas señales la variable independiente toma solamente un conjunto discreto de valores. Una señal discreta  $x[n]$  puede representar un fenómeno para el cual la variable independiente es intrínsecamente discreta, pero por otro lado se encuentran otra clase de señales muy importantes llamadas muestreo de señales continuas, que se usaran principalmente en esta investigación. En este caso la señal discreta  $x[n]$  representa muestras sucesivas de un fenómeno subyacente para el cual la variable independiente es continua.

Un sistema discreto es uno que transforma entradas de tiempo discreto en salidas de tiempo discreto y se representa matemáticamente como:

$$x[n] \rightarrow y[n] \quad (1) [17]$$

### 4.1.2 Transformaciones de la Variable Independiente

Un concepto central en el análisis de señales y sistemas es el de la transformación de una señal. Por ejemplo en un sistema de audio de alta fidelidad una señal de entrada que representa la música grabada en un disco compacto se modifica para enriquecer las características deseables, eliminar el ruido de la grabación o balancear los diversos componentes de la señal a través de procesos que se implementan como desplazamientos de tiempo representado por una señal  $x[n-n_0]$ , inversiones de tiempo  $x[-n]$ , escalamiento de tiempo entre otros, mejor llamados delays, reverberación filtros y otra cantidad de procesos adicionales que se usan en procesamiento de audio [17].

### 4.1.3 Sistemas Lineales

Un sistema lineal, en tiempo continuo o tiempo discreto es aquel que posee la importante propiedad de superposición: si una entrada consiste en la suma ponderada de varias señales, entonces la salida es simplemente la superposición es decir la suma ponderada de las respuestas del sistema a cada una de estas señales. Matemáticamente sea  $y(t)$  la respuesta del sistema continuo a una entrada  $x(t)$ , y sea  $y_2(t)$  la salida correspondiente a la entrada  $x_2(t)$ . Entonces el sistema es lineal si:

1. La respuesta a  $x_1(t) + x_2(t)$  es  $y_1 + y_2$
2. La respuesta a  $ax_1$  es  $ay_1$  donde  $a$  es una constante compleja cualquiera [17].

La primera de estas propiedades se conoce como la propiedad de aditividad, la segunda se conoce como la propiedad de escalamiento u homogeneidad. Aunque se han escrito estas propiedades usando señales continuas, la misma definición se cumple para las discretas.

Las propiedades que definen a un sistema lineal pueden combinarse en un solo enunciado:

$$\text{Tiempo discreto: } ax_1[n] + bx_2[n] \rightarrow ay_1[n] + by_2[n] \quad (2)$$

Aquí  $a$  y  $b$  son constantes complejas cualquiera. Mas aun se puede demostrar directamente a partir de la definición de linealidad que si  $x_k[n], k = 1, 2, 3, \dots$  son un conjunto de entradas a un sistema lineal discreto son las correspondientes salidas  $y_k[n], k = 1, 2, 3, \dots$  entonces la respuesta a una combinación lineal de entradas esta dada por:

$$y[n] = \sum_k a_k x_k[n] = a_1 x_1[n] + a_2 x_2[n] + a_3 x_3[n] + \dots (3)$$

A este hecho tan importante se le conoce como la propiedad de superposición la cual se cumple para sistemas lineales tanto continuos como discretos. Una consecuencia directa de la propiedad de superposición es que para sistemas

lineales una entrada que sea cero en todo tiempo da una salida cero en todo tiempo.

#### 4.1.4 Transformada de Fourier.

Las ondas y las señales armónicas representan un rol clave en la acústica a pesar de que las señales sonoras reales casi nunca son armónicas pero muestran una dependencia del tiempo mucho más complicada. La razón de esta aparente contradicción es el hecho de que todas las señales pueden ser consideradas como una superposición de señales armónicas, siendo esto el estamento fundamental del famoso teorema de Fourier [18].

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite obtener el espectro de una señal por medio de la siguiente fórmula:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

Lo que indica que la TF (Transformada de Fourier) de una determinada frecuencia  $f$  es la integral de la multiplicación de la señal de entrada  $x(t)$  por el tono puro  $e^{-j\omega t}$ . El espectro de frecuencias entre 0 Hz hasta infinito con su correspondiente imagen especular en el eje negativo de frecuencias es  $X(f)$ , es la notación empleada para representar la TF.

Los sistemas digitales tratan con señales discretas, por esa razón es necesaria una representación en tiempo discreto de la TF (señal en tiempo continuo); dicha solución viene dada por la Transformada Discreta de Fourier TDF.

Si se muestrea una señal  $x(t)$  con una frecuencia de muestreo  $f_s$  obtenemos la señal discreta  $x[n]$ . El periodo de muestreo  $T$  es igual a  $1/f_s$  por lo que la señal resultante es  $x(nT)$ . La transformada de Fourier en tiempo discreto TDF puede denotarse como  $X(e^{j\theta})$ , donde  $\theta$  es la fase que toma valores positivos y negativos.

La TDF revela el espectro continuo de frecuencias de la señal  $x[n]$ , que sólo está definida para valores de la variable entera  $n$ , pero que está compuesta por un número infinito de muestras. Si tenemos en cuenta que una exponencial compleja es idéntica a otra que difiere de ella en frecuencia en múltiplos de  $2\pi$ , entonces

podemos representarla hasta el infinito en intervalos de  $2\pi$  correspondientes a múltiplos de la velocidad de muestreo  $f_s$ . La TDF puede ser representada como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi j}{N} kn}$$

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi j}{N} kn} \quad (5)$$

Donde  $k$  es un múltiplo arbitrario. En la práctica sólo es necesario considerar los valores de la TDF en un periodo de  $2\pi$ , y se asume que la TDF  $X(e^{j\omega})$  entre  $-\pi$  y  $\pi$  está libre de aliasing, pero  $X(e^{j\omega})$  es un espectro infinito y una computadora puede calcular solamente cantidades discretas, por lo que necesitamos una técnica de análisis que trabaje con espectros discretos de señales discretas.

La Transformada Rápida de Fourier FFT no es más que una implementación eficiente de la TDF para conseguir un rendimiento computacional aceptable. La TDF tiene un orden de  $N^2$  multiplicaciones complejas, mientras que el orden de la FFT es de  $N \log(N)$  operaciones, lo cual es una importante optimización en el rendimiento, si tenemos en cuenta además la gran cantidad de datos que intervienen en el análisis de audio.

#### 4.1.5 Transformada Z.

La transformada  $z$  convierte una señal real o compleja definida en el dominio del tiempo discreto en una representación en el dominio de la frecuencia compleja [17]. La transformada  $Z$  constituye una generalización de la transformada de Fourier, Resulta de más Utilidad en algunos casos, dado que es más manejable analíticamente y además converge para un mayor conjunto de secuencias que la transformada de Fourier.

La transformada  $z$  para una señal de tiempo discreto  $x[n]$  se define como:

$$X[z] = \sum_{-\infty}^{\infty} x[n] z^{-n} \quad (6)$$

Donde  $z$  es una variable compleja. Cuando  $z^{-n}$  es remplazada con  $e^{-j\omega n}$  la transformada  $Z$  se convierte en la transformada de Fourier. Cuando la transformada de Fourier existe entonces  $z = e^{-j\omega}$ , la cual debe de tener la magnitud unitaria para  $z$ .

#### 4.1.6 Función de Transferencia.

La Función de Transferencia es la representación Matemática, en términos espaciales y temporales de la relación entre la entrada y la salida de un sistema lineal.

Su formula para tiempo continuo se basa en una entrada  $x(t)$  y una salida  $y(t)$ . Uno de los primeros matemáticos en describir estos modelos fue Laplace, a través de su transformación matemática [19].

Por definición una función de transferencia se puede determinar según la expresión:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (7)$$

Donde  $H(s)$  es la función de transferencia (también notada como  $G(s)$ ).

En sistemas discretos la función se escribe de manera similar como:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (8)$$

#### 4.1.7 Estabilidad e Inestabilidad.

Desde un punto de vista matemático la estabilidad en un sistema es puramente análisis: Un sistema es estable si cada entrada limitada produce una salida limitada, en otros términos cuando una entrada es finita su salida es finita, aquel donde entradas pequeñas conducen a respuestas que no divergen.[17]

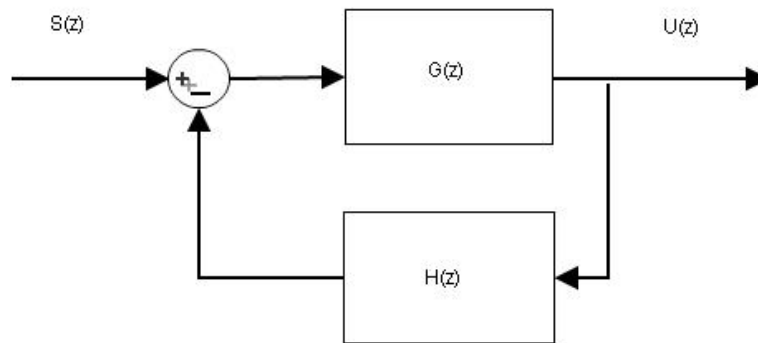
Uno de los criterios de estabilidad de sistemas mas populares el criterio Nyquist donde La estabilidad esta relacionada con la propiedad de un sistema entrada-salida.

El criterio Nyquist propone que Para un sistema lazo cerrado, es decir un sistema donde todas o alguna de sus salidas es usada como entrada, en términos de transformada Z, se tiene una función de transferencia de la siguiente forma [20]:

$$\frac{U(z)}{S(z)} = \frac{G(z)}{1 + G(z)H(z)} \quad (9)$$



Ilustración 4 Sistema de Lazo Cerrado



Se tendrá estabilidad cuando todas las raíces de la ecuación característica cumplan la siguiente ecuación:

$$1 + G(z)H(z) = 0 \quad (10)$$

#### 4.1.8 Respuesta Al Impulso.

La respuesta de impulso es exactamente lo que su nombre implica, la respuesta de un sistema Lineal, como por ejemplo un filtro, cuando la señal de entrada del sistema es un impulso unitario (o muestra unitaria). Se trata simplemente de una señal con un valor determinado seguido por puros ceros.

## 4.2 La Retroalimentación Acústica.

Antes de llegar al término de retroalimentación acústica es importante entender el fenómeno físico de la primera parte del término total con el fin de encajar los conocimientos de una manera adecuada.

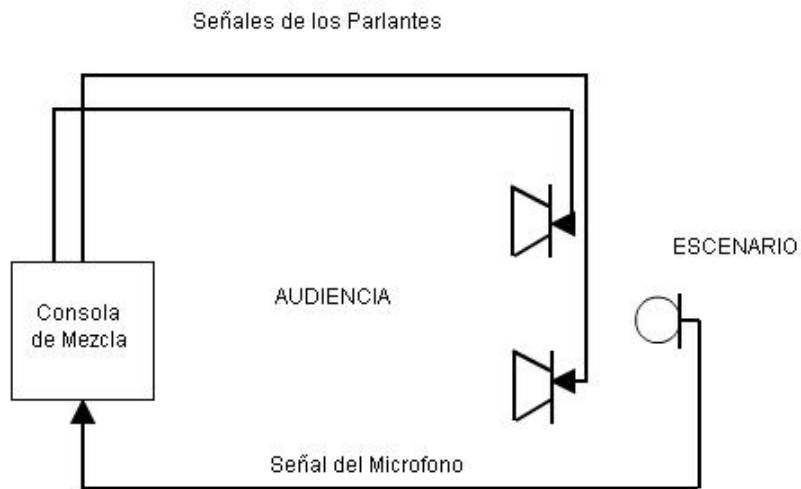
Podríamos encontrar un primer encuentro con el término durante la segunda guerra mundial, cuando el matemático Norbert Wiener, más conocido como el padre de la cibernética, trajo a la luz un principio que resultó ser antiguo pero relativamente ignorado llamado feedback, cuyo significado real empezó a sospecharse con el crecimiento de la radio en los años 1920, específicamente con el desarrollo del tubo en vacío y el control de volumen automático. Una primera definición en teoría de sistemas y cibernética fue la que afirma que la retroalimentación es un proceso por el que una cierta proporción de la señal de salida de un sistema se redirige de nuevo a la entrada [2] o como un dispositivo que vuelve a hacer un efecto sobre uno de sus causas capacitándose así para cumplir con una determinada finalidad [22]. Wiener define los feedbacks positivos como mecanismos que tienden a destruir el equilibrio de un sistema y conducen al cambio, y a los feedbacks negativos como mecanismos que tienden a estabilizarse, encontrando allí el nombrado feedback acústico, como un mecanismo de retroalimentación positiva en cuanto a que se habla sin duda alguna de un sistema inestable.

El problema de la retroalimentación acústica se refiere al efecto causado por el acople acústico entre un micrófono y un parlante en un sistema de amplificación. [11]. Cuando un micrófono captura una señal sonora deseada, que luego es procesada (amplificada) y reproducida por el parlante en un mismo entorno como sucede en los sistemas de refuerzo sonoro, la señal del parlante es inevitablemente realimentada en el micrófono [5]. Así se crea un lazo cerrado entre dichas señales que afecta el desempeño del sistema deteriorando la calidad sonora y limitando la buena amplificación, convirtiendo el circuito en un oscilador de frecuencias audibles y puede producir pitidos de altas frecuencias que interfieren con el sonido deseado y puede dañar el equipo de audio físicamente.[11]

En la ilustración 4 un micrófono está situado en una posición donde puede capturar una fuente sonora de interés. Las señales del micrófono son enviadas a la consola de mezcla donde son procesadas adicionalmente con efectos como reverberación artificial o con procesos de rango dinámico entre otros, lo cual se

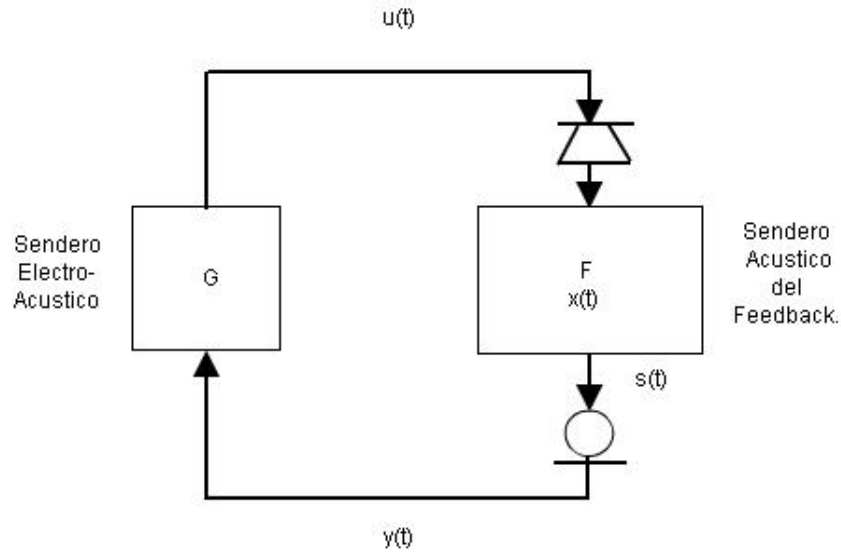
efectúa de manera digital. La señal mezclada es amplificada y enviada a los parlantes. Usualmente los micrófonos y parlantes están ubicados de tal manera que, de acuerdo a su directividad, el sonido del parlante no llegue al micrófono, es decir que no existe un acople acústico directo entre los parlantes y el micrófono. Sin embargo en casi todas las aplicaciones de sistemas de refuerzo sonoro es inevitable que el sonido del parlante sea reflejado por los límites (paredes, piso...) del entorno acústico (denotado como “sala”) y por los sujetos y objetos dentro del entorno. Estas reflexiones constituyen un acople indirecto entre los parlantes y el micrófono del sistema [5].

Ilustración 5 Escenario Típico de un Sistema de Refuerzo Sonoro.



El escenario típico de un sistema de refuerzo sonoro puede ser modelado en un contexto de tiempo discreto como se mostrara en la siguiente ilustración 5.

Ilustración 6 Modelo en tiempo discreto de un sistema de refuerzo sonoro produciendo retroalimentación



Donde  $y(t)$  es la señal capturada por el micrófono, esta formada por la señal sonora deseada  $s(t)$  o de la fuente y la perturbación audible generada por el sendero de la retroalimentación  $x(t)$ . La señal amplificada en la salida de un sistema de refuerzo sonoro es  $u(t)$  [11].

Siguiendo el análisis,  $G$  es la ganancia independiente del amplificador y  $F(\Omega)$  la Función de Transferencia del sendero acústico de la retroalimentación. Consecuentemente, la función de transferencia del lazo cerrado Fuente-Parlante puede ser escrita como:

$$\frac{U(\Omega)}{S(\Omega)} = \frac{G}{1 - GF(\Omega)}$$

El factor  $GF(\Omega)$  es llamado la ganancia de lazo abierto del sistema. [11]

De acuerdo a el criterio de estabilidad de Nyquist, El sistema lazo cerrado va a permanecer estable si la ganancia del lazo abierto es  $|GF(\Omega)| < 1$  en todas las frecuencias angulares, si la ganancia del amplificador es gradualmente incrementada entonces la cantidad  $|1 - GF(\Omega)|$  puede convertirse muy pequeña para ciertas frecuencias en las cuales el valor absoluto de la función de transferencia del lazo cerrado será significativamente aumentado. Entonces el sistema se tornara inestable generando oscilaciones que resultaran en “silbidos” caracterizados por un estrecho ancho de banda y un pico prominente en el espectro. [11]

El sendero de la retroalimentación acústica se asume lineal, variable en el tiempo y de orden finito  $nf$ . Esto es razonable ya que los efectos de la propagación del sonido en un entorno acústico son casi independientes en nivel. El orden finito del sistema contrasta con la respuesta al impulso infinita (IIR) (que se explicara mas adelante), de la acústica de la sala, y puede ser justificado por la observación de una típica respuesta al impulso (RI) donde se muestra un decaimiento exponencial teniendo  $nf + 1 < \infty$  coeficientes. [5]

En el sendero electro-acústico la señal del micrófono S es mezclada y amplificada para obtener la señal del parlante y además un procesamiento de señal adicional es realizado.

#### **4.2.1 Causas de la Retroalimentación Acústica.**

Algunas consideraciones cuantitativas de la producción de acoples acústicos podrían ser [23]:

- Nivel de ganancia acústica: Cuanto más nivel de ganancia se le aplique al sistema mayor será la probabilidad de acople.
- Nivel de la fuente: Cuanto más sople el saxo o más alto se cante, menor será la ganancia necesaria y menores las posibilidades de que ocurra un acople.
- Reverberación: Cuanto mayor sea la reverberación, mayor será el nivel de presión, y por tanto la probabilidad de acople.
- Distancia de los micrófonos a las cajas acústicas: Cuanto más lejos, mejor.
- Distancia de las fuentes a los micrófonos: Cuanto más cerca esté el saxo o el cantante u orador del micrófono, mayor será el nivel registrado por el micrófono, y por tanto será menor la ganancia necesaria y la probabilidad de acople.
- Directividad y angulación de los micrófonos: Cuanto más directivos sean, menor reverberación recogerán, y por ello menor será el nivel general recogido y la probabilidad de acople. En la medida que sean más directivos y sus ángulos de

mínima captación estén apunten a las cajas acústicas, menor será la posibilidad de acople.

- Directividad y angulación de las cajas acústicas: Cuanto más directivos sean, menos señales se dirigirán hacia los micrófonos de escenario, y por ello menor será la probabilidad de acople. En la medida que sean más directivas y estén enfocadas lo menos posible a los micrófonos, menor será la posibilidad de acople.
- Respuesta en frecuencia de micrófonos y cajas acústicas: Si existen picos en la respuesta en frecuencia de cualquiera de ellas, esas frecuencias tenderán a mostrar acoples las primeras.
- Posición y Agrupamiento: Los modos acústicos de una sala, o las interferencias entre altavoces, pueden causar acoples en unas posiciones y en otras no.

La retroalimentación se ubica usualmente en frecuencias estrechas y algunas veces en armónicos de dichas frecuencias sin embargo se dice que la retroalimentación tiene 2 frecuencias dominantes, entre 100 y 300 Hz para frecuencias bajas y entre 3 a 5 Khz para frecuencias altas [24], esta crece exponencialmente hasta alcanzar el límite de ganancia del sistema, en este punto continua sonando hasta que el ingeniero de sonido disminuye la ganancia o el artista mueve el micrófono lejos de los parlantes. Cada sistema acústico tiene diferentes regiones de frecuencias resonantes, o de frecuencias que están dispuestas a acoplarse y producir retroalimentación. Dichas frecuencias son características de la sala donde se encuentre el sistema de refuerzo sonoro.

#### **4.2.2 Control de retroalimentación acústica.**

Ya se había mencionado anteriormente el termino Control de Retroalimentación acústica definido como un intento de resolver los acoples acústicos parcial o completamente abordando únicamente los métodos automáticos, que son explicados mas profundamente en el estado del arte del tema a investigar, sin embargo un repaso de diferentes tópicos fue necesario para poder entender las conclusiones y resultados obtenidos de las simulaciones de dichos métodos.

En el paper que lleva por nombre “50 years of acoustic feedback control: state of the art and future challenges” [5] mencionado en los antecedentes se encuentra una comparación de todos los métodos existentes y ya abordados en esta investigación de la cual extraen conclusiones de las principales 4 categorías de control de retroalimentación acústica: Métodos de modulación de fase, métodos de reducción de ganancia, métodos de filtrado espacial y métodos de modelado de sala, que a su vez se dividen en otras categorías (Como la 5ta y 6ta en el estado del arte). De acuerdo a las simulaciones realizadas en dicho paper el método de

cancelación adaptativa de retroalimentación (CAR) dentro de los métodos de modelado de sala, aparece como superior a las otras categorías que son control de retroalimentación por modulación de fase (CRMF) y supresión de acoples con filtros ranura (SAFR), en términos de amplificación y calidad sonora, logrando una mejor detección y atenuación del pico. Los investigadores le ven poco futuro al método CRMF y proponen el uso combinado de detección de acoples y de filtros ranura bicuadráticos para el método SAFR con el fin de lograr mejores resultados, que será lo que se realizara en esta investigación, por lo cual mas adelante se profundizara en los métodos SAFR.

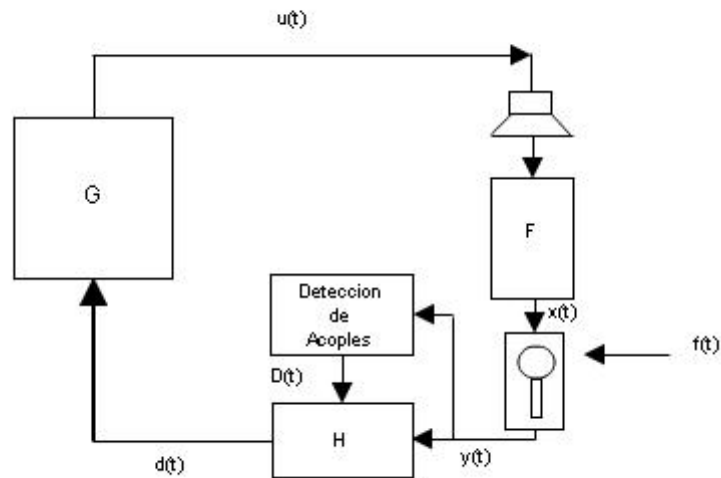
El método CAR parece tener resultados prometedores, sin embargo el principal reto de este es lograr reducir su complejidad computacional, ya que la necesidad de modelar el sendero acústico de la retroalimentación requiere de un número bastante alto de coeficientes.

Otro gran reto, y tal vez más importante que el anterior es generalizar los métodos que están propuestos solo para un canal, con el fin de que funcionen en sistemas multicanal. Debido a que el numero de senderos acústicos de retroalimentación en un sistema multicanal es igual al numero de parlantes y micrófonos, la complejidad computacional para todos los métodos aumentaría rápidamente.

#### **4.2.3 Supresión de Acoples con Filtros Ranura.**

El objetivo de este método puede ser prevenir que el sistema lazo cerrado se torne inestable reduciendo la ganancia del lazo IGFI en las frecuencias criticas cercanas o estabilizar el sistema y suprimir el acople después de que las oscilaciones hayan ocurrido. El objetivo se puede dividir en 2 fases, será proactivo por requerir una detección de inestabilidad y después será reactivo ya que los filtros ranura o notch serán activados solamente después de la detección del acople. Por lo pronto se hablara solamente de la fase reactiva que es mucho más compleja que la parte proactiva. Se hará énfasis también en los métodos de 2 fases donde la señal del micrófono y ( $t$ ) es primeramente procesada por un algoritmo de detección de acoples, que luego dirige un juego de parámetros  $D$  a un banco de filtros ranura ajustables  $H$  que se insertan en el sendero electro-acústico. [5]

Ilustración 7 SAFR de 2 fases alimentando la señal del micrófono a un algoritmo de detección que envía un set de parámetros  $D$  a un banco de filtros ajustables  $H$ . [5]



La detección de acoples es la parte mas critica de los métodos SAFR de 2 fases, por los componentes sinusoidales típicos del acople, su detección se basa en un análisis frecuencial de la señal del micrófono a partir de la transformada discreta de Fourier, la cual arroja un numero de picos espectrales  $N$  llamados “candidatos componentes de acople” por tener mayor amplitud en el dominio de frecuencia, para lo cual existen 4 criterios principales para determinar cual de esos candidatos efectivamente corresponde a un componente de la señal del acople:

- La relación pico – potencia límite: es una característica espectral que determina la relación de la potencia del candidato  $|Y|^2$  y un límite de potencia absoluto ajustado llamado  $P_0$ .

$$RPPL [dB] = 10 \log_{10} \frac{|Y|^2}{P_0} \quad (12)$$

El acople será detectado en aquella frecuencia donde se cumpla la condición  $RPPL > 0$ . [5]



- La relación pico – potencia promedio: es una característica espectral que determina la relación de la potencia del candidato componente  $|Y|^2$  y la potencia promedio de la señal del micrófono  $P_y(t)$

$$RPPP [dB] = 10 \log_{10} \frac{|Y|^2}{P_y(t)} \quad (13)$$

El candidato componente verdadero es identificado cuando RPPP excede un limite o treshold predeterminado es decir si  $RPPP > T$ , diferentes valores para este treshold han sido propuestos  $T = 6$  dB,  $T = 10$  dB. [5]

- La relación pico – potencia armónica: es una característica espectral que determina la relación de la potencia del candidato componente  $|Y|^2$  y su potencia sub armónica  $|Y(m)|^2$ .

$$RPPA [dB] = 10 \log_{10} \frac{|Y|^2}{|Y(m)|^2} \quad (14)$$

El acople es detectado cuando RPPA excede un limite predeterminado para el segundo, tercero y cuarto sub armónicos.

- La relación pico – potencia vecina: es una característica espectral que determina la relación de potencia del candidato componente  $|Y|^2$  y la potencia de las frecuencias cercanas a este  $|Y(w + 2\pi m)/M|^2$

$$RPPV [dB] = 10 \log_{10} \frac{|Y|^2}{|Y(w + 2\pi m)/M|^2} \quad (15)$$

El componente candidato es detectado si RPPV es consiste en 2 limites predeterminados en 2 frecuencias adyacentes o a cada lado del componente candidato. [5]

Cuando el acople ha sido detectado un filtro ranura debe activarse para suprimir el acople y estabilizar el sistema lazo cerrado. La estructura común es un filtro ranura IIR de segundo orden que será explicada mas adelante en el desarrollo ingenieril.

## **5. DESARROLLO INGENIERIL.**

### **5.1 Demostración Matemática de un Filtro IIR Ranura de Segundo Orden.**

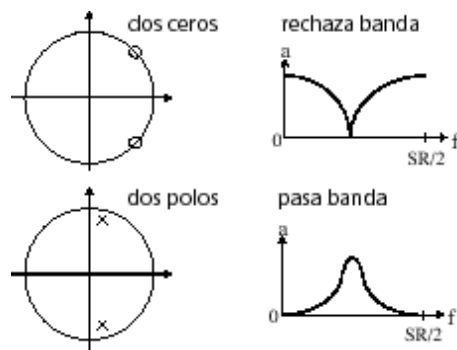
Los filtros IIR son sistemas genéricos de procesamiento de señales. Su principal ventaja es que pueden realizar cualquier transformación lineal y discreta con un número finito de parámetros, resultando más eficientes que los filtros FIR. Por otro

Lado, tienen inconvenientes importantes, como la falta de garantía en su estabilidad o los problemas derivados de la cuantización y redondeo de sus coeficientes, mucho mayores que en el caso de los filtros FIR.

Los filtros IIR, de respuesta impulsiva infinita, deben su nombre al hecho de que su salida depende tanto de la entrada como de la propia salida del filtro, de forma que el efecto de un impulso en la entrada puede no extinguirse en tiempo finito.

Al disponer de dos polos y dos ceros el filtro involucra 2 retrasos por lo cual se habla de un filtro de segundo orden o bicuadrático.

Ilustración 8 Filtro de segundo orden de 2 polos y dos ceros.



En la siguiente ecuación se puede observar como la salida  $y(k)$  se compone de las entradas previas  $x(k-n)$  y de las salidas previas  $y(k-m)$ , en cada caso las funciones multiplicadoras se convierten en los coeficientes del filtro  $a_n$  y  $b_m$ . [25]

$$y(k) = \sum_{n=0}^N a_n x(k-n) + \sum_{m=1}^M b_m y(k-m) \quad (16)$$

Una forma simplificada y en tiempo discreto de la estructura del filtro IIR sería:

$$y[n] = x[n] + \alpha y[n-k] \quad (17)$$

Reacomodando la ecuación al lado izquierdo:

$$y[n] - \alpha y[n - k] = x[n] \quad (18)$$

Tomando la transformada Z:

$$(1 - \alpha z^{-k})Y(z) = X(z) \quad (19)$$

Entonces su función de transferencia sera [26]:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - \alpha z^{-k}} \quad (20)$$

El filtro es estable solamente si  $\alpha$  es menor que 1 [26]

Un filtro notch ideal elimina completamente un pequeño rango de frecuencias dejando inalterado el resto de la banda, En la practica su respuesta en frecuencia presenta uno o más valles profundos (idealmente, ceros perfectos). Son útiles en muchas aplicaciones donde deben eliminarse frecuencias específicas como componentes que contaminan señales específicas en este caso los acoples acústicos.

De acuerdo a la teoría de los filtros IIR, vista en el párrafo anterior para crear un filtro ranura o notch IIR se necesita crear un cero en la respuesta a la frecuencia  $w_0$ , con el fin de crear un valle, ubicando un par de ceros complejos sobre el circulo unitario que representa la función de transferencia de filtro  $H(z)$  cuya fase sera  $w_0$ :

$$z_{0,1} = e^{\pm jw_0} \quad (21)$$

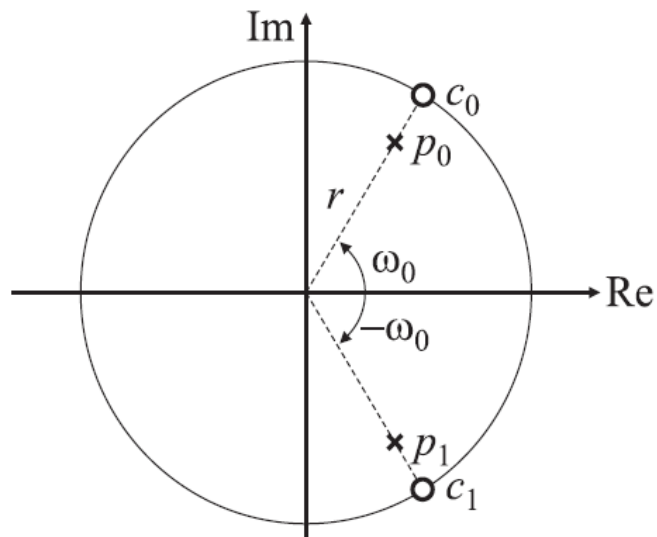
Por lo tanto la función del sistema para el filtro notch o ranura es:

$$H(z) = b_0 (1 - e^{j\omega_0} z^{-1})(1 - e^{-j\omega_0} z^{-1}) \quad (22)$$

$$H(z) = b_0 (1 - 2 \cos \omega_0 z^{-1} + z^{-2}) \quad (23)$$

Esta sería la estructura de un filtro FIR que solamente depende de las entradas, para deducir la función de transferencia de un filtro ranura IIR se necesita ubicar un par de polos  $p_0 = re^{j\omega_0}$  con el fin de introducir resonancia en la vecindad de los ceros como se muestra en la ilustración 7. Al introducir los polos en las cercanías de cero se logra el ancho de banda angosto.

Ilustración 9 Diagrama de polos y ceros de un filtro ranura IIR



Es posible, entonces implementar un filtro notch que se caracterice por tener la siguiente función de transferencia en el dominio  $z$ .

$$H(z) = b_0 \frac{1 - 2 \cos(w_0) z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2r \cos(w_0) z^{-1} + r^2 z^{-2}} \quad (24)$$

$$H(z) = b_0 \frac{1 - 2 \cos(w) z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2r \cos(w) z^{-1} + r^2 z^{-2}}$$

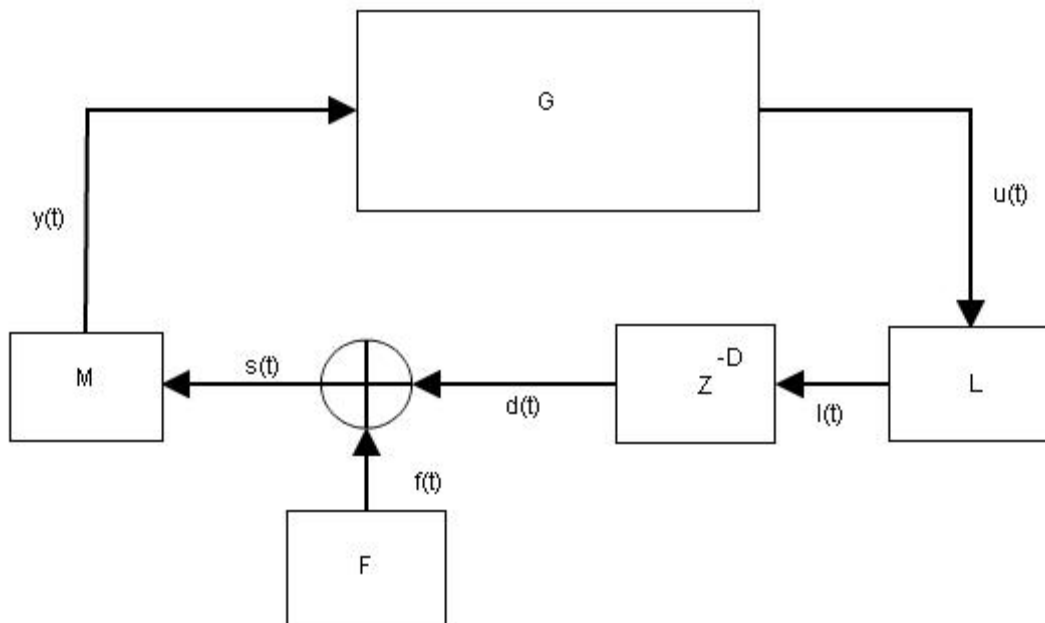
De las previas ecuaciones podemos observar que  $r$  establece el radio entre los módulos del polo y el cero de  $H(z)$ , por lo tanto ese parámetro tiene una influencia directa en el ancho de banda y en la profundidad del filtro. Consecuentemente si el parámetro  $r$  aumenta, el ancho de banda del filtro se torna mas estrecho y la profundidad disminuye.

## 5.2 Demostración Matemática de la Retroalimentación Acústica.

Para comenzar con el desarrollo del prototipo de cancelador de feedback, un entendimiento matemático de cómo se da el fenómeno de la retroalimentación acústica y de cómo se llega a la ecuación función de transferencia fue necesario reunir las ecuaciones que forman el sistema total.

El sistema total de lazo cerrado que produce retroalimentación acústica es un conjunto de subsistemas como se muestra en la siguiente ilustración:

Ilustración 10 Diagrama del lazo cerrado con retroalimentación acústica.



De acuerdo a la grafica anterior:

- G es el proceso de amplificación de la señal.
- L es el parlante que se comporta a su vez como un sistema.
- $Z^{-D}$  es el retraso de tiempo existente mientras el sonido emitido por el parlante L llega al micrófono M.
- El micrófono M también se comporta como otro sistema.
- Todas las transformaciones G, L y M son transformaciones de sistemas LINEALES por lo que la salida de cada uno no es más que la suma ponderada de las señales entrantes para cada uno, como lo dice su definición en el marco teórico.
- F es la fuente sonora es decir el emisor o fuente que habla en el micrófono.

El sistema es una superposición de señales cuyo análisis empieza por la señal que hace parte del primer proceso, cuándo el emisor habla hacia el micrófono  $f(t)$  y a su vez el micrófono es alimentado por la señal del parlante que viene retrasada en el tiempo  $d(t)$ , proceso descrito en la siguiente ecuación:

$$S(t) = f(t) + d(t) \quad (25)$$

Como se va a trabajar el sistema en dominio de frecuencia mayormente las señales mostradas en la ilustración 6 de ahora en adelante serán  $S(w), f(w), d(w), l(w), y(w), l(w)$  al igual que los subsistemas  $M(w), G(w)$  y  $L(w)$ .

, entonces la ecuación 12 puede ser reescrita como:

$$S(w) = f(w) + d(w) \quad (26)$$

A su vez  $d(w)$  es una señal conformada por la señal del parlante  $l(t)$  o  $l(w)$  con un retraso de tiempo  $e^{-j\omega(-D)}$  :

$$d(w) = l(w) * e^{-j\omega(-D)} \quad (27)$$

Por una notación más sencilla y De acuerdo a la teoría vista en la transformada Z y su equivalencia con la transformada de Fourier esta misma ecuación con dominio Z y desglosando  $p(z)$  sería:

$$d(z) = l(z) * z^{-D} \quad (28)$$

Las señales  $l(z), u(z)$  y  $y(z)$  provendrán de:

$$l(z) = u(z) * L(z) \quad (29)$$

Que es la señal que viene amplificada  $u$  y es transformada por el parlante  $L$  en una señal análoga.

$$u(z) = y(z) * G(z) \quad (30)$$

Que equivale a la señal del micrófono  $y$  que es amplificada por  $G$ .



$$y(z) = S(z) * M(z) \quad (31)$$

Que equivale a la transformación de análogo a digital de la señal análoga de entrada  $S$  efectuada por el micrófono  $M$ .

De acuerdo a las ecuaciones anteriores podemos determinar la ecuación diferencial del sistema lazo cerrado o del sistema retroalimentado, reemplazando y despejando coeficientes de la ecuación en dominio  $z$ ,  $S(z) = f(z) + d(z)$  de la siguiente manera (retomar ecuaciones 28 a 31):

$$S(z) = f(z) + p(z) * z^{-D} \quad (32)$$

Acá se tienen la fuente sonora con el retraso  $z^{-D}$ .

$$S(z) = f(z) + u(z) * L(z) * z^{-D} \quad (33)$$

En este paso se despeja  $u(z)$ , escribiéndose este como la señal amplificada  $u(z)$  por la transformación del parlante  $L$  más el retraso de tiempo que traía anteriormente.

$$S(z) = f(z) + y(z) * G(z) * L(z) * z^{-D} \quad (34)$$

$u(z)$  equivale a la señal que viaja del micrófono  $y(z)$  y es procesada por  $G(z)$  el proceso de amplificación

Las transformaciones  $M$ ,  $G$  y  $L$  se asumen como una sola variable llamada  $Sis(z)$  al todas constituir el sistema de amplificación, por lo tanto la ecuación quedara de la siguiente manera:

$$S(z) = f(z) * S(z) * Sis(z) * z^{-D} \quad (35)$$

En tiempo discreto se tendrá que:

$$S(n) = f(n) + [S(n - D) * \alpha] \quad (36)$$

Se asume que las transformadas mencionadas ( $M$ ,  $G$  y  $L$ ) tienen como respuesta al impulso un impulso, por lo tanto la respuesta al impulso de la variable  $Sis$  es un impulso también por lo que la señal  $S(n - D)$  queda multiplicada entonces por un escalar de la siguiente manera:

$$S(n) = f(n) + [S(n - D) * \alpha] \quad (37)$$

Volviendo al dominio  $Z$  tenemos que:

$$S(z) = f(z) + \alpha * S(z) (z^{-D}) \quad (38)$$

De donde se puede determinar la función de transferencia del sistema de lazo cerrado entendida esta como la señal de salida del sistema  $S(t)$  sobre la señal de entrada  $f(z)$ :

$$FT = \frac{S(z)}{f(z)} \quad (39)$$

Se despeja  $f(z)$ :

$$f(z) = S(z) - \alpha * S(z) * (z^{-D}) \quad (40)$$

$$f(z) = S(z) (1 - \alpha * z^{-D}) \quad (41)$$

Entonces la función de transferencia queda denotada como:

$$\frac{S(z)}{f(z)} = \frac{1}{1 - \alpha * z^{-D}} \quad (42)$$

Si bien es un análisis diferente al propuesto en la ecuación 11 por Aníbal Ferreira, es importante tener en cuenta que allí usaron el factor  $GF$  como ganancia del sistema lazo abierto que no se toca en esta demostración, además de que en el paper de Ferreira “Accurate cancellation of acoustic feedback” [11] solo denotan la ecuación de función de transferencia sin mostrar el proceso entero de cómo llegaron hasta allí.

La ecuación 42 no es más que la estructura de un filtro IIR de acuerdo a la ecuación estudiada anteriormente (20) entendiéndose este como un sistema genérico de procesamiento de señales, cuando el denominador es igual a 0, el sistema encuentra los polos, cuando los polos tiene raíces mayores a 1 el sistema se torna inestable, entonces:

$$1 - \alpha z^{-D} = 0 \quad (43)$$

$$z^{-D} = \frac{1}{\alpha} \quad (44)$$

$$z^D = \alpha \quad (45)$$

$$z = \sqrt[D]{\alpha} \quad (46)$$

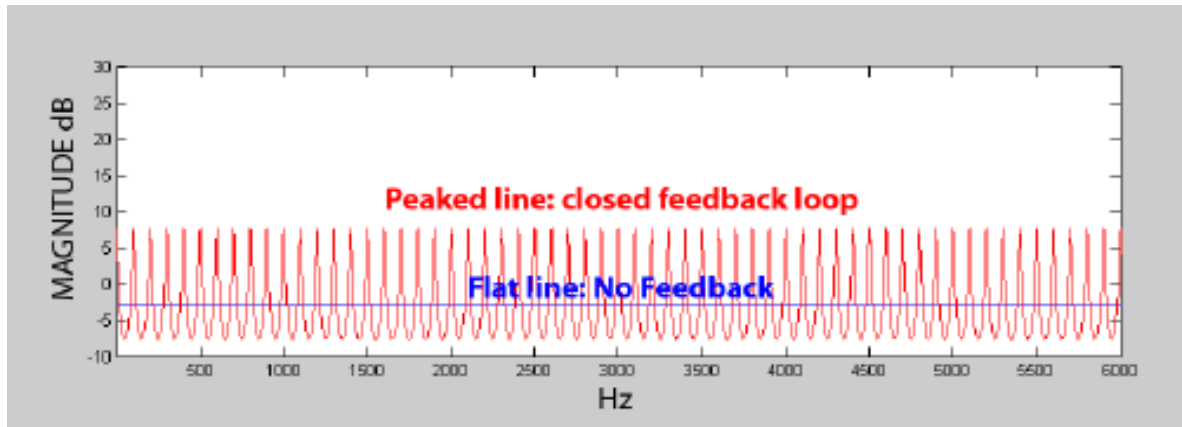
Si  $z = \sqrt[D]{\alpha} > 1$  el sistema es inestable, para estabilizarlo es necesario que  $\alpha$  sea menor que 1, como se vio anteriormente en la demostración de los filtros IIR.

Por la analogía entre la transformada Z con la transformada de Fourier la función de transferencia del sistema lazo cerrado puede también ser escrita como:

$$\frac{S(z)}{f(z)} = \frac{1}{1 - \alpha * z^{-D}} \rightarrow \frac{S(w)}{f(w)} = \frac{1}{1 - \alpha * e^{-jwD}} \quad (47)$$

Entonces cuando el denominador es igual a 0, el sistema tiende a infinito, lo que significa que va a tener unos picos en frecuencia como se observa en la siguiente ilustración:

Ilustración 11 Respuesta en frecuencia del sistema lazo cerrado [25]



Para solucionar la problemática entonces es necesario detectar dichos picos, cancelándolos con otro sistema que solucionara el problema y tornara el sistema estable.

### **5.3 Sistema Lazo Cerrado con Sistema de Control de Retroalimentación Propuesto**

Es importante aclarar que el sistema propuesto no se trata de un atenuador de señal en vista de que se cancelaría el total de la señal, lo que se realizara es la cancelación de la frecuencia que genera inestabilidad a través de un filtro notch o ranura adaptativo que va actualizando sus coeficientes de acuerdo a un análisis de la señal de entrada del micrófono *M*.

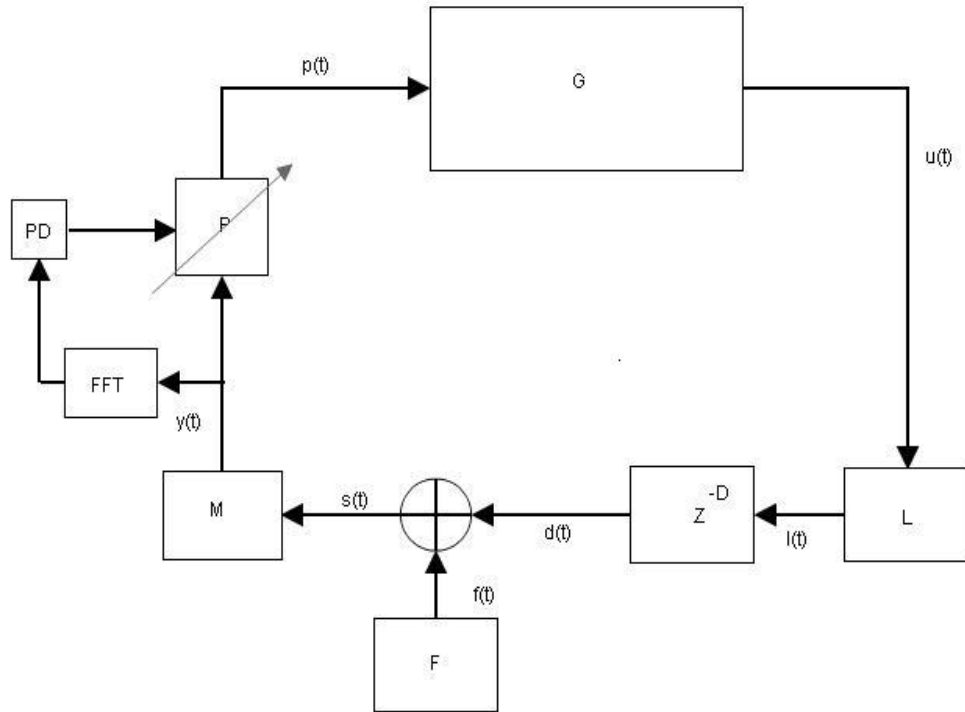
El primer objetivo del método requiere de una aplicación proactiva que detecta la inestabilidad mientras que la segunda aplicación debe de ser reactiva en el sentido de que el filtro notch o ranura es activado solo después de la detección del acople.

De acuerdo a lo anterior estaríamos hablando de un método de supresión de acoples en base a filtros Ranura o notch SAFFR de 2 fases, ya que incluye detección de acoples (primera fase) y filtrado notch (segunda fase).

La detección del acople es tal vez la parte mas critica del proceso de 2 fases, debido a que el acople consiste en una señal de componentes sinusoidales, la detección esta basada en un analisis de frecuencia de la señal del micrófono. Entre la característica de magnitud del acople, se incluye el hecho de que el acople no tiene componentes armónicos ni sub armónicos. Una característica temporal típica del acople es su poca duración - en un escenario real - y su magnitud que aumenta con el tiempo también en situaciones reales.

A continuación el método de control de retroalimentación propuesto.

Ilustración 12 Método De Control De Retroalimentación Propuesto



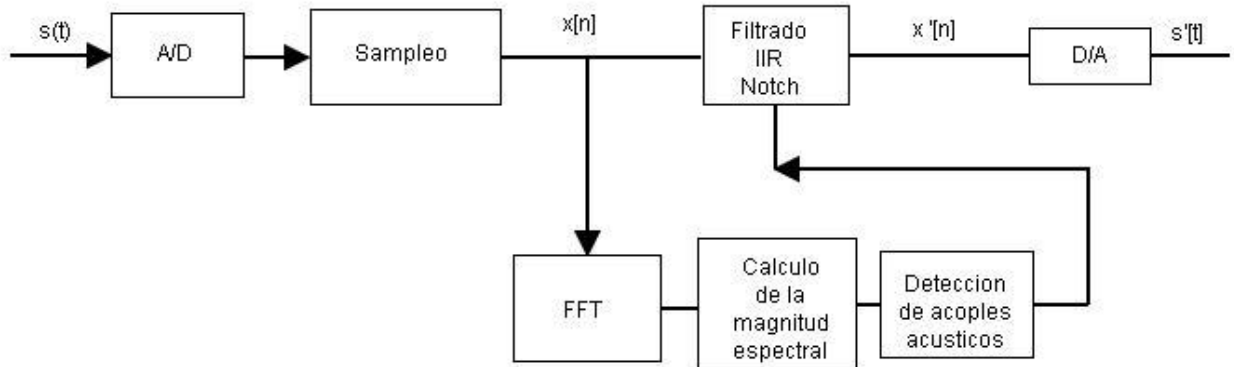
En la ilustración 11 se puede observar la forma en que se introducirá el método propuesto en el sendero electro – acústico del sistema lazo cerrado. FFT representa la transformada de Fourier de la señal de entrada del micrófono  $M$ ,  $PD$  representa la detección de picos que enviarán un set de parámetros al filtro  $P$  que consiste en el filtro notch IIR de segundo orden.

Tras obtener una representación espectral de la señal acústica digitalizada a través de la FFT, se diseñó un detector de picos espectrales  $PD$  que indica la presencia de retroalimentación acústica. Estos picos son identificados de acuerdo a la forma geométrica del espectro de la señal. Luego un criterio especial se aplicó con el fin de decidir si dichos picos corresponden a acoples acústicos o a componentes deseados de la señal acústica. Para cancelar la perturbación se hizo el uso de filtros notch de alto  $Q$  (high- $Q$ ), usando modelos de segundo orden IIR. Cuando los picos son detectados se hace una estimación exacta de frecuencia y los coeficientes de los filtros son ajustados a los valores de dichas frecuencias. El filtro notch o ranura se ubica en la frecuencia central de la retroalimentación.

En el diagrama del proceso general, se observa el sendero de la señal digital, el filtro ranura o notch, la técnica aplicada para detección de retroalimentación

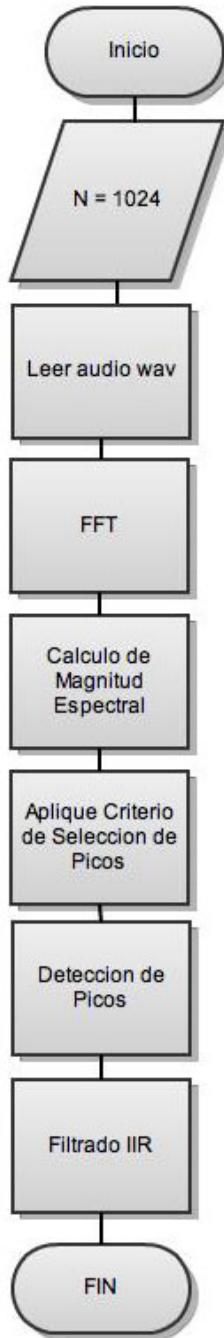
y el ajuste de los filtros. Tan pronto la señal proveniente del micrófono es muestreada, se obtiene la señal en tiempo discreto  $x(n)$ .

Ilustración 13 Algoritmo General del cancelador de feedback



El algoritmo toma segmentos de  $N=1024$  (en vista de que esta resolución provee una mejor resolución en frecuencia, lo cual es necesario cuando se trabaja con filtros notch o ranura), aplicando la transformada discreta de Fourier para representar el espectro. Como resultado del proceso de detección de retroalimentación realizada en el espectro discreto, se calcula la frecuencia del acople y se aplica el filtro notch a  $x(n)$  con el fin de suprimir la interferencia. La señal discreta filtrada  $x'(n)$  es regresada al algoritmo y puesta en el dominio de tiempo continuo por un conversor A/D. la señal de la salida análoga es identificada en el diagrama de bloque como  $s'(t)$ .

Ilustración 14 Diagrama de flujo del algoritmo propuesto





## 5.4 Análisis Espectral: Transformada de Fourier

Como previamente se menciona la transformada discreta de Fourier es aplicada en la señal de entrada en tiempo discreto  $x[n]$  con el fin de realizar su conversión del dominio de tiempo al dominio en frecuencia, hay muchas razones que justifican el uso de esta transformada relacionados con:

- Eficiencia computacional
- Simetría de la transformada

La expresión de la FFT es:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi j}{N} kn} \quad (48)$$

Con el fin de obtener los coeficientes de la FFT, el segmento total es multiplicado por la función exponencial  $e^{-j\omega t}$  y la transformada es aplicada. Este proceso permite obtener el espectro real en frecuencia de la señal de entrada.

## 5.5 Deteccion de Picos

Para detectar picos en el espectro de la señal de audio ,se realiza el calculo de la magnitud en dB del espectro de la FFT para cada segmento.

Retomando los metodos de supresion de acoples con filtros ranura SAFR mencionados en el criterio Relacion pico – potencia promedio es aplicado para la deteccion de picos con una direccion difrente, usando la señal total de entrada del microfono  $x[n]$  y no solo el componente candidato, donde la potencia promedio de la señal de entrada es  $|x|^2$  y el limite será L. resultando en una ecuación que relaciona la potencia promedio de la señal con un limite L que se calculo usando teoría estadística entendiendo el sistema como un conjunto de datos, entonces RPPL será igual a:

$$RPPL = 10 \log_{10} \frac{|X|^2}{L} \quad (49)$$

L relaciona la potencia promedio de la señal de entrada  $P_x$  más 3 veces la desviación estándar:

$$L = P_x + 3\sqrt{\sigma^2} \quad (50)$$

Con

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X|^2 \quad (51)$$

y

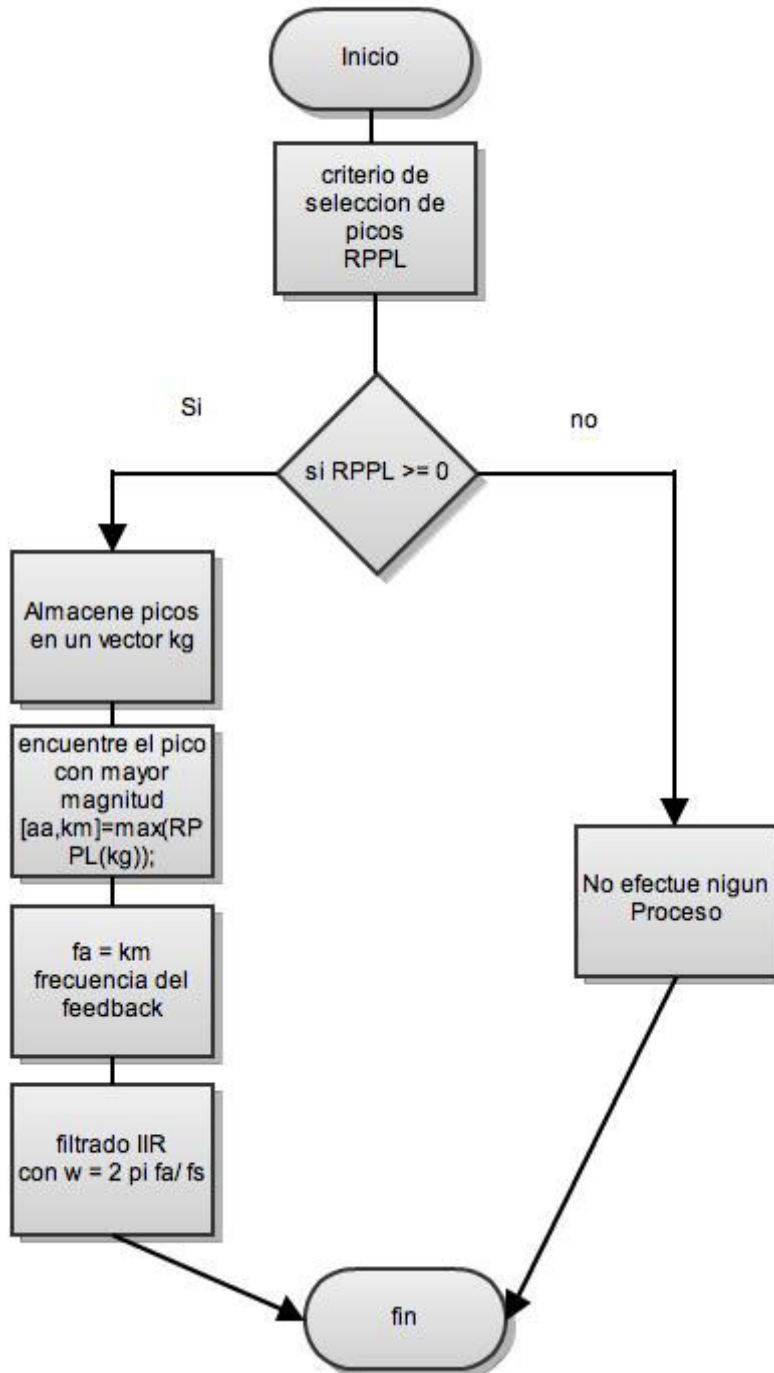
$$\sigma^2 = \sum \frac{(X_m - P_x)^2}{N} \quad (52)$$

$$X_m = |X|^2 \quad (53)$$

La desviación estándar por su parte es la raíz cuadrada de la varianza  $\sigma^2$ , donde se restan la potencia de la señal de entrada  $X_m$  y la potencia promedio  $P_x$ , al cuadrado sobre el número de datos  $N$ . En estadística descriptiva para determinar los valores máximos de una distribución es necesario sumarle a la media ( en nuestro caso  $P_x$  ) 3 veces la desviación estándar [27] , lo que equivale a nuestro límite  $L$ , que es el valor máximo permitido , valores fuera de este límite denotarían irregularidad en el proceso es decir que cualquier valor encima de este límite será discriminado como componente de retroalimentación acústica, en términos más claros si la potencia del pico espectral es tan fuerte , el algoritmo decide que el pico es sospechoso de ser acople, de otra manera el pico es considerado como un componente normal de la señal de audio.

Ya teniendo el componente de retroalimentación acústica y su frecuencia central  $f$  el paso a seguir es enviar el parámetro  $f$  al filtro notch que cancelará el acople, tornará el sistema estable, y atenuará la interferencia.

Ilustración 15 Diagrama de flujo del proceso de detección de feedback



## 5.6 Implementación Filtro Notch o Ranura de Segundo Orden.

Con el fin de remover el acople detectado un filtro ranura es aplicado a la señal procesada. Su alta selectividad permite que el filtro sea aplicado en la frecuencia exacta sin degradar altamente el espectro del audio, teniendo cuidado en cuanto a que al tratarse de filtros IIR un control equivocado de los coeficientes del filtro podría inestabilizar el sistema y cambiar su respuesta en frecuencia.

El proceso de filtrado es adaptativo en cuanto a que el filtro irá actualizando sus coeficientes, más exactamente el valor de la frecuencia central  $f$  detectada en el proceso explicado anteriormente, el restante de coeficientes como  $f_s$  y  $r$  se mantendrán fijos. El valor que siempre se actualizará será:

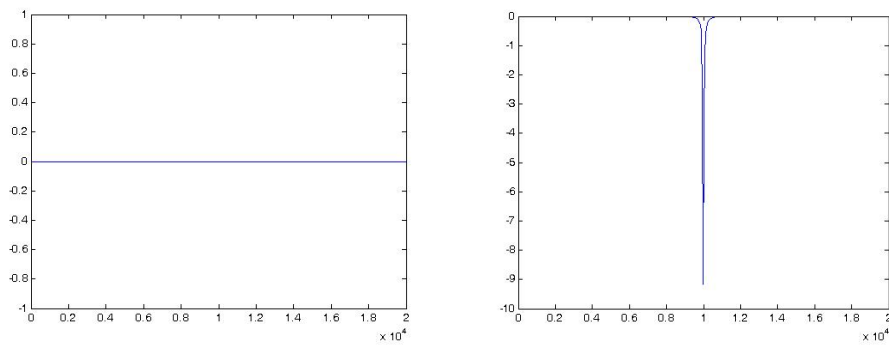
$$w_0 = 2\pi \frac{f}{f_s} \quad (54)$$

Digitalmente el algoritmo almacenará la frecuencia pico  $f$  en un vector que el filtro notch retomará para variar su frecuencia central.

Se diseñó un filtro IIR de prueba de acuerdo a su función de transferencia  $H(z)$  expresada en (24) para remover una frecuencia de 1000 Hz dada, (sin el proceso de análisis FFT y detección de picos) de un vector aleatorio, con los siguientes parámetros:

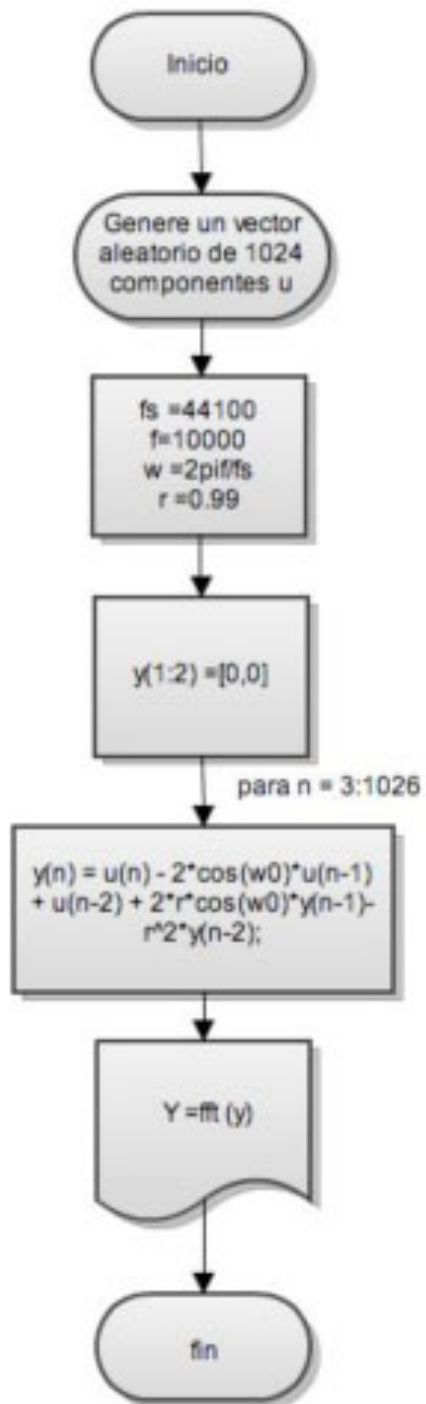
- $f_s = 44100$ ;
- $f = 10000$ ;
- $w_0 = 2\pi \cdot 10000 / f_s$ ;
- $r = 0.90$ ;

### Ilustración 16 Diseño del filtro notch o ranura IIR



De acuerdo a las ilustraciones anteriores podemos observar como el filtro atenúa en la señal aleatoria la frecuencia de 10000 Hz, dejando el rango de frecuencias restantes intactas, por lo cual dicho diseño fue implementado al sistema de control de retroalimentación.

Ilustración 17 Diagrama de Flujo del filtro Notch



## 5.7 SIMULACION DE RETROALIMENTACION ACUSTICA

Una forma de simular el fenómeno de la retroalimentación acústica es simular su respuesta en frecuencia, se pueden simular dichos picos generando los mismos picos en frecuencia, a partir de señales sinusoidales que se le suman a la señal de entrada del sistema.

Las señales sinusoidales son la mejor opción para simular el fenómeno de retroalimentación acústica porque cuando el efecto ocurre en la práctica, es decir en una situación real, toma forma de una frecuencia singular que, debido a las condiciones de la retroalimentación acústica, incrementa en magnitud sin límite, y es por eso que se escucha una señal altamente perturbadora además es claro que los acoples acústicos son de naturaleza sinusoidal [11]. De hecho todos los papers estudiados en esta investigación realizan simulaciones de retroalimentación de esta manera ver, [5] y [11].

Las siguientes ilustraciones muestran una simulación hecha en el paper “An Accurate Method of Detection and Cancellation of Multiple Acoustic Feedbacks” [11] de Ariel Rocha y Anibal Ferreira, quien fue colaborador de este proyecto en cuanto a la resolución de preguntas y dudas profundas acerca del tema.

Ilustración 18 Espectro de la señal de entrada con 2 frecuencias sinusoidales de prueba [11]

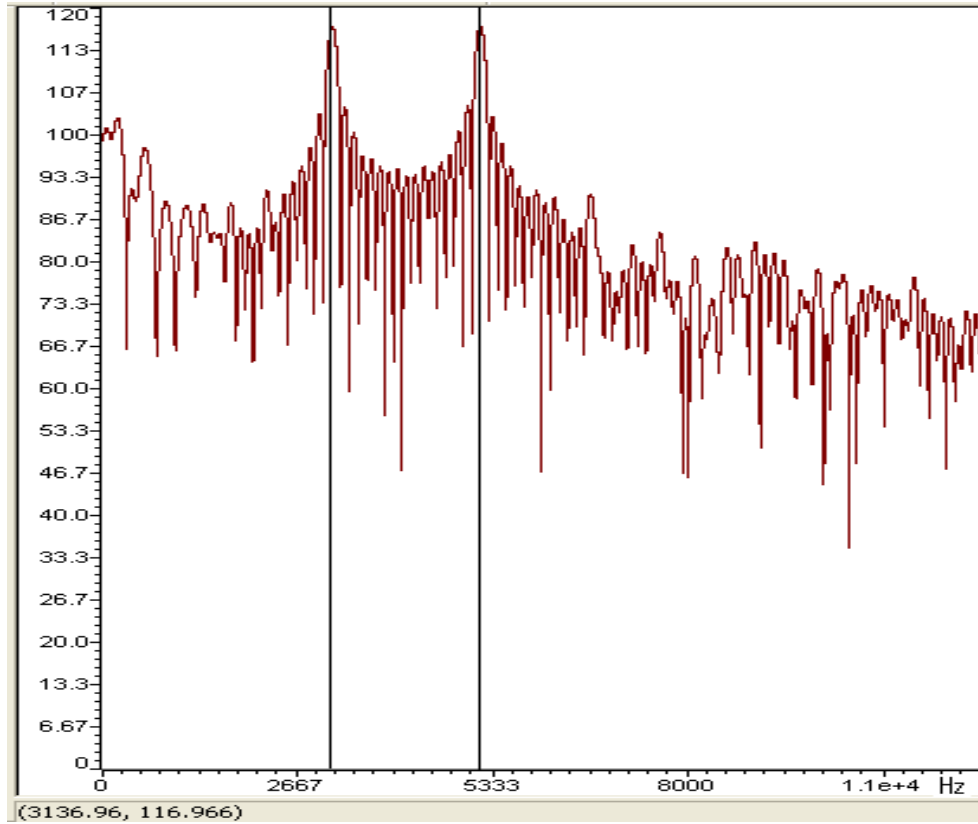
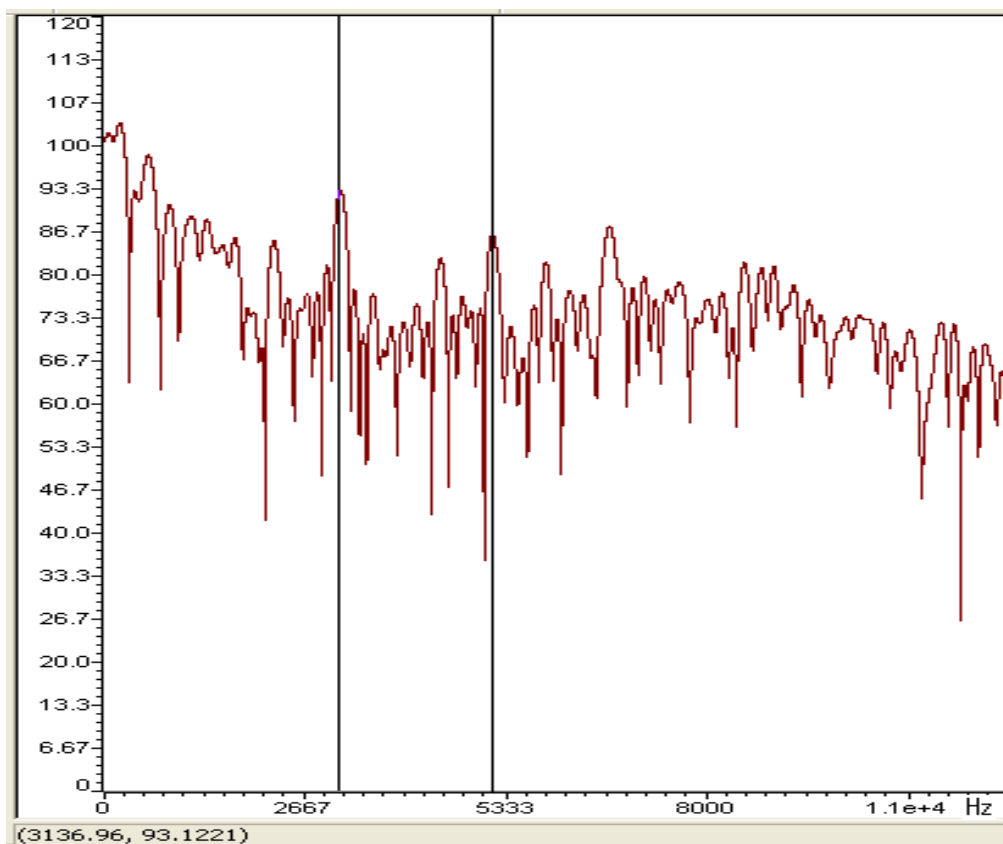




Ilustración 19 Espectro de la señal filtrada para 2 frecuencias de prueba simultaneas.



Para esta simulación Ferreira adiciono a la señal de entrada del sistema 2 señales sinusoidales adicionales, en vista de que el algoritmo propuesto en [11] implementa un banco de filtros notch en este caso, se utilizaron 2 filtros en cadena para realizar la atenuación de ambas señales sinusoidales, en vista de que el paper aborda la cancelación de multiples feedbacks, en este caso nos ocuparemos solamente de un feedback.

Con el fin de tener una evidencia concreta de la habilidad del algoritmo propuesto en identificar y cancelar la frecuencia interferente, se realizó la simulación con varias muestras de audio, de música y diálogo.

En primera instancia una señal de audio fue aplicada a la señal de entrada del sistema compuesta de un tono puro adicionado a un fondo musical. Este fondo sirve para evaluar la influencia del cancelador en el principal espectro audible.

Se realizaron las pruebas con el siguiente escenario: música en un 20 % del rango dinámico total con la señal sinusoidal en un 80% del rango dinámico total. Esto es suficiente para los propósitos de la demostración y la duración de los audios WAV de prueba fue siempre de 30 segundos.

Los tonos puros, fondos musicales y diálogos fueron generados digitalmente en un PC, y fueron escalados con un valor de RMS de  $-55$  dBV, lo que corresponde al voltaje de salida típica de un micrófono usado en sistemas de refuerzo sonoro. [5]

## **6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

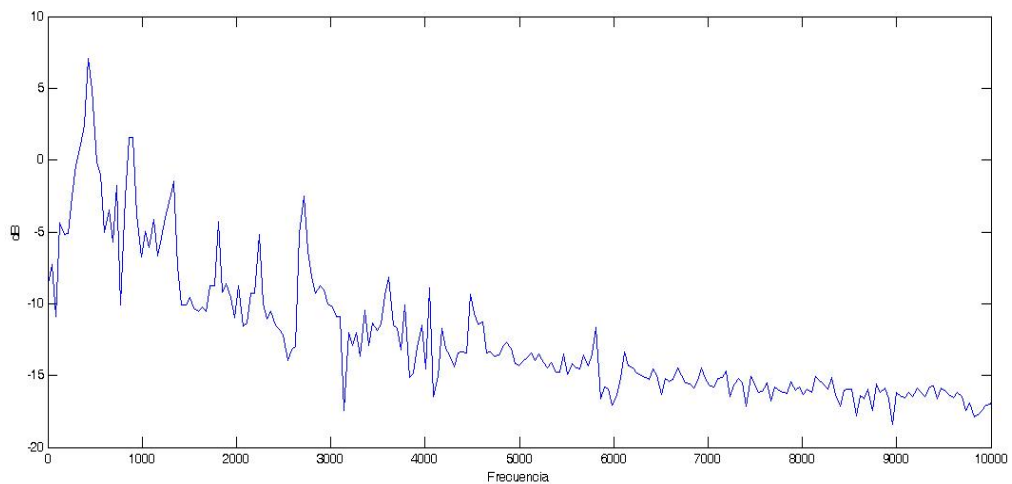
### **6.1 PRUEBAS CON MUSICA.**

En las pruebas con música se utilizó una frecuencia de muestreo de 44100 Hz. La señal de audio es una extracción de la partitura no 2 en D menor para violín de J.S. Bach.

### 6.1.1 PRUEBA DE MUSICA CON SINUSOIDAL DE 500 HZ :

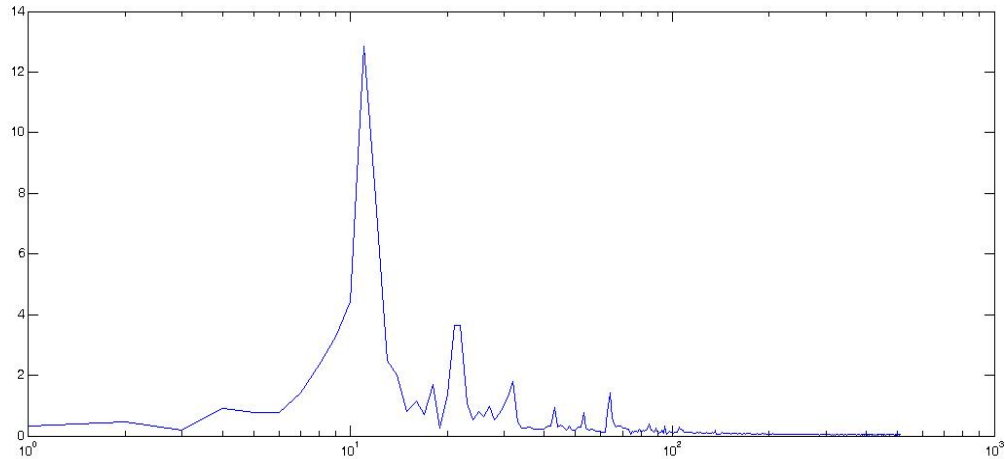
En este paso, se realizo la simulación con un audio .wav que contiene música clásica, y se le adiciono un tono puro de 500 Hz.

Ilustración 20 Espectro de la señal de entrada con una sinusoidal de 500 Hz.



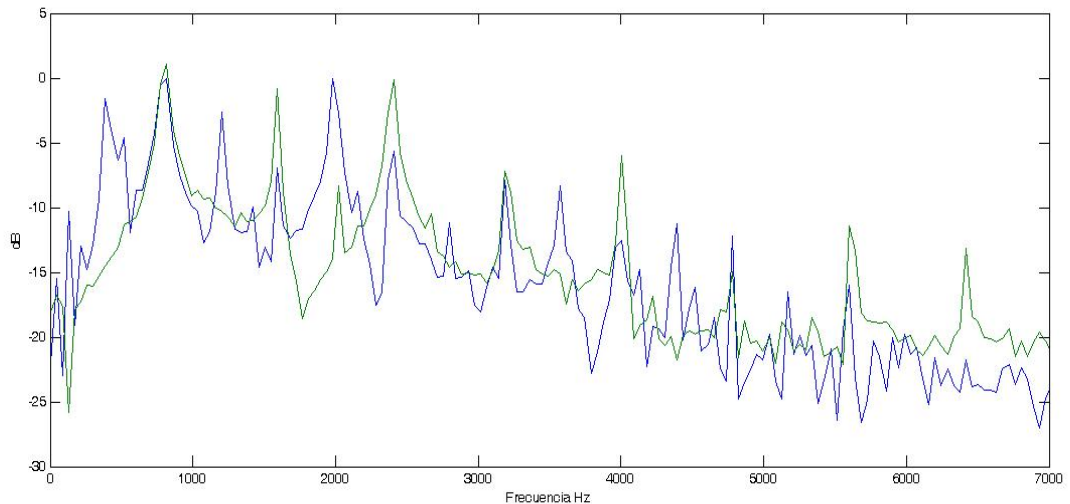
En la ilustración 16 se observa el espectro de la señal con fondo musical más la sinusoidal de 500 Hz adicionada para la simulación del fenómeno de retroalimentación acústica, obtenida a través de aplicar la FFT y el cálculo de su magnitud. Según los pasos mencionados lo siguiente fue la detección y discriminación del pico que puede ser observado en la siguiente ilustración:

Ilustración 21 Pico Detectado.



De acuerdo a las ecuaciones mencionadas y al límite establecido en el proceso de detección de picos, la energía que supera dicho límite es la frecuencia interferente, por lo tanto lo que vemos en la ilustración 17 es el componente feedback de 500 Hz.

Ilustración 22 Espectro de la señal filtrada con una frecuencia de 500 Hz.



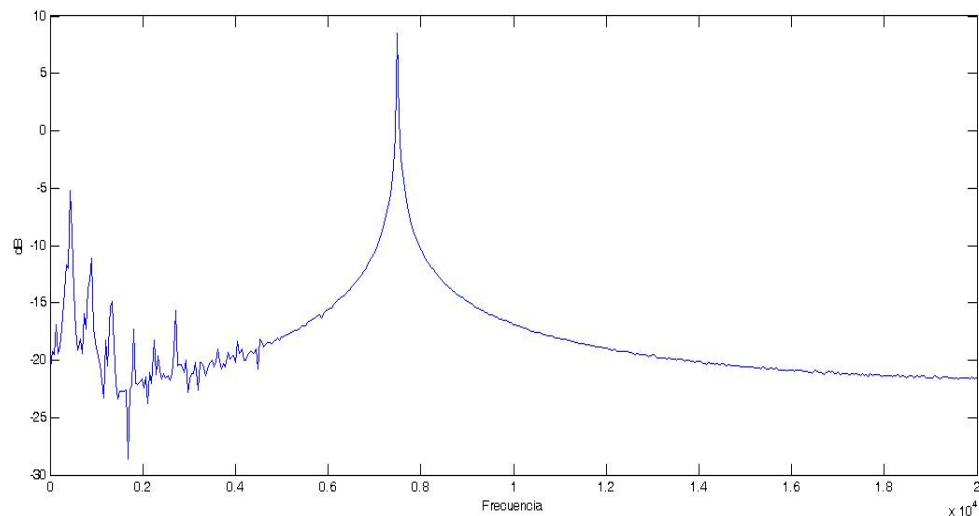
Tras el proceso de filtrado, en la ilustración 18 - que contiene la señal de entrada con la adición de un pico de trazo azul y la señal filtrada de trazo verde -, se puede observar la atenuación de la frecuencia central del pico interferente de 500 Hz (que se puede estimar en aproximadamente 8 dB, mas no es un valor exacto si no aproximado). Con respecto al espectro total se ve alterado en algunas frecuencias que resultan amplificadas, lo cual resulta normal por la respuesta en frecuencia del filtro notch y además por la condición artificial creada para simular el proceso.

A continuación se observaran 2 pruebas con música y 3 con dialogo exhibiendo un comportamiento similar, en vista de que siempre la frecuencia central del pico interferente es detectada y atenuada en diferentes valores, lo que se asume normal por las condiciones explicadas en el párrafo anterior.

### 6.1.2 PRUEBA DE MUSICA CON SINUSOIDAL DE 7500 HZ

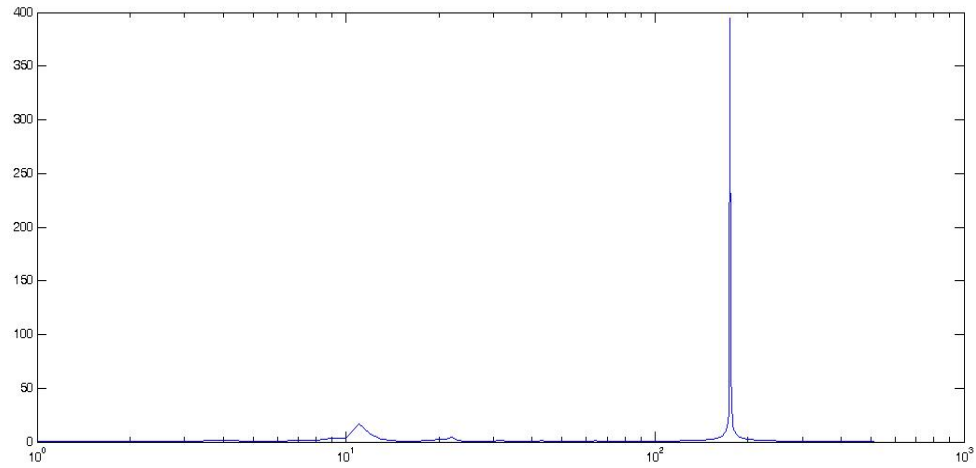
A continuación la ilustración que denota la magnitud de la seña de entrada con un pico de la sinusoidal aplicada de 7500 Hz.

Ilustración 23 Espectro de la señal de entrada con una sinusoidal de 7500 Hz.



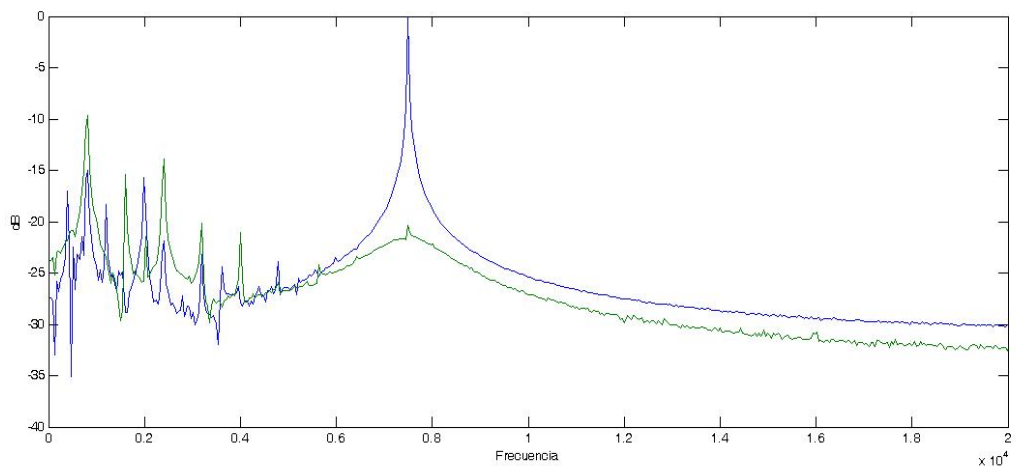
la ilustracion 21 muestra el espectro de la señal de entrada con la sinusoidal adicionada de 7500 Hz, el pico alcanza una magnitud de 10 dB, y visualmente se destaca en el espectro total .

Ilustración 24 Pico Detectado



la ilustración 22 muestra el pico discriminado por el algoritmo, que representa el feedback acustico , la energía que supero el limite propuesto por el criterio de discriminacion de picos.

Ilustración 25 Espectro de la señal filtrada con una frecuencia de 7500 Hz.

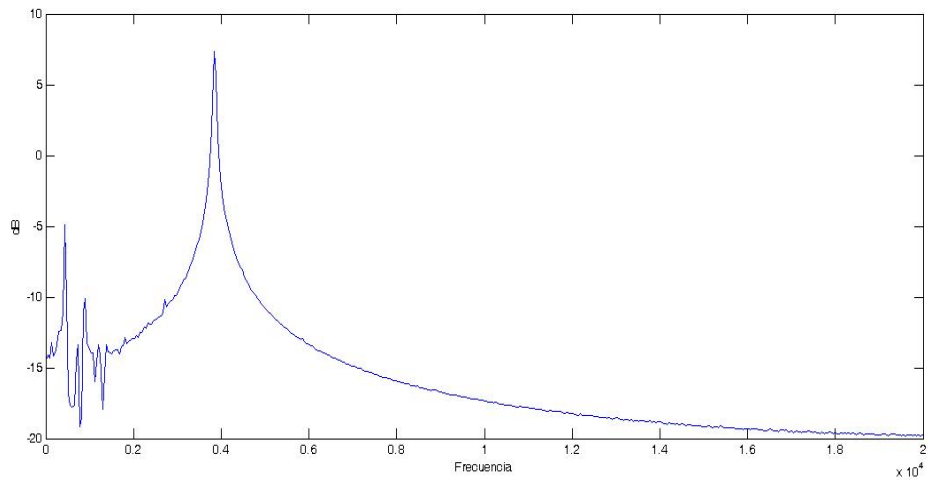


En la ilustración 21 se puede observar una atenuación estimada de la frecuencia central de 7500 Hz, de 22 dB en el espectro de trazo verde, Igualmente el resto del espectro sufre alteraciones en todo el espectro, sin embargo este conserva su forma. También se puede observar la amplificación de aproximadamente 5 dB en frecuencias bajas, mas específicamente en las frecuencias de 1000 Hz y 2300 Hz. Desde la frecuencia de 5000 Hz el

espectro conserva su forma pero con una reduccion de 3 dB aproximadamente en todas las frecuencias hasta 20.000 Hz.

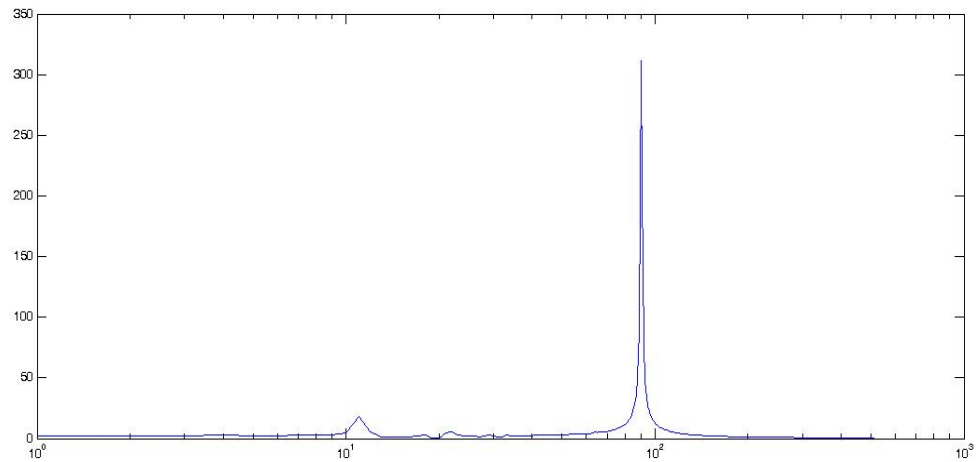
### 6.1.3 PRUEBA DE MUSICA CON SINUSOIDAL DE 3850 HZ.

Ilustración 26 Espectro de la señal de entrada con una sinusoidal de 3850 Hz.



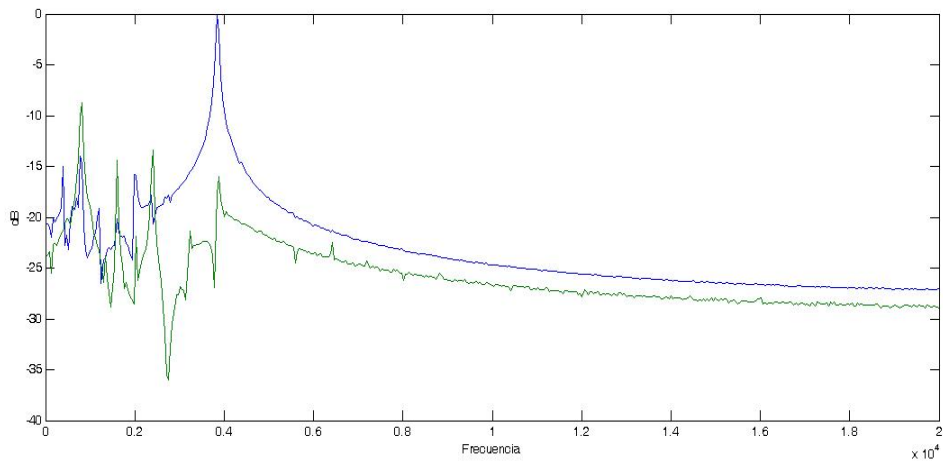
la ilustracion 24 muestra el espectro de la señal de entrada con la adición de la sinusoidal de 3850 Hz, el pico alcanza una amplitud de 8 dB aproximadamente ,espectro obtenido por la aplicación de la transformada de Fourier y el calculo de su magnitud espectral.

Ilustración 27 Pico Detectado



la ilustracion 25 muestra el pico de 3850 Hz detectado, cuya frecuencia central se actualizara en el filtro notch para su respectiva atenuacion. Toda la energia observada se encuentra por encima del limite propuesto.

Ilustración 28 Espectro de la señal filtrada con una frecuencia de 3850 Hz.



La atenuación estimada en este caso se estima en 16 dB, y la alteracion del espectro es mayor que en las pruebas anteriores, en la frecuencia de 2800 Hz , se refleja una atenuacion de 22 dB por propiedades del filtro, de acuerdo a esta ilustracion y las anteriores se puede concluir que el filtro refleja un comportamiento irregular para las frecuencias bajas o en general para todas las frecuencias anteriores al pico feedback.

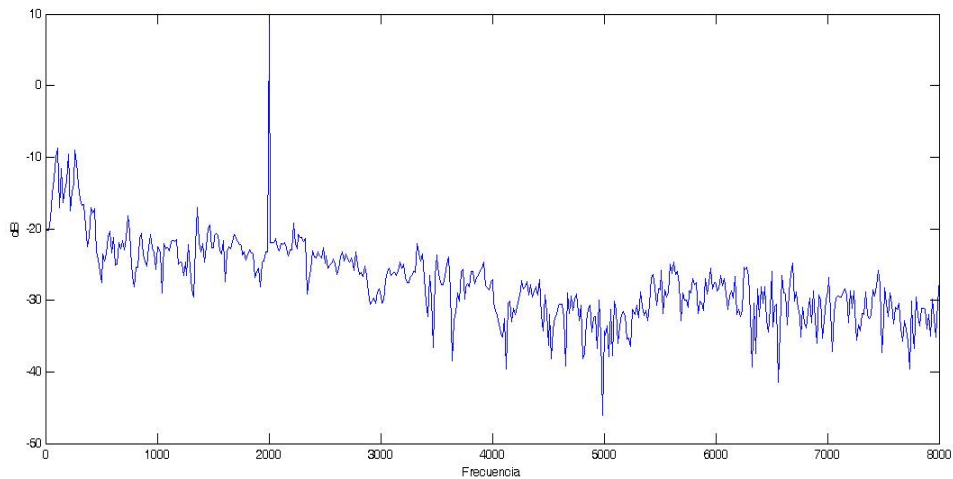


## 6.2 PRUEBAS DE DIALOGO SPEECH

Para las pruebas de dialogo la frecuencia de sampleo empleada fue de 16.000 Hz y se trata de una entrevista entre 2 hombres alemanes tomada de una entrevista en la red de radio y televisión Flamenca.

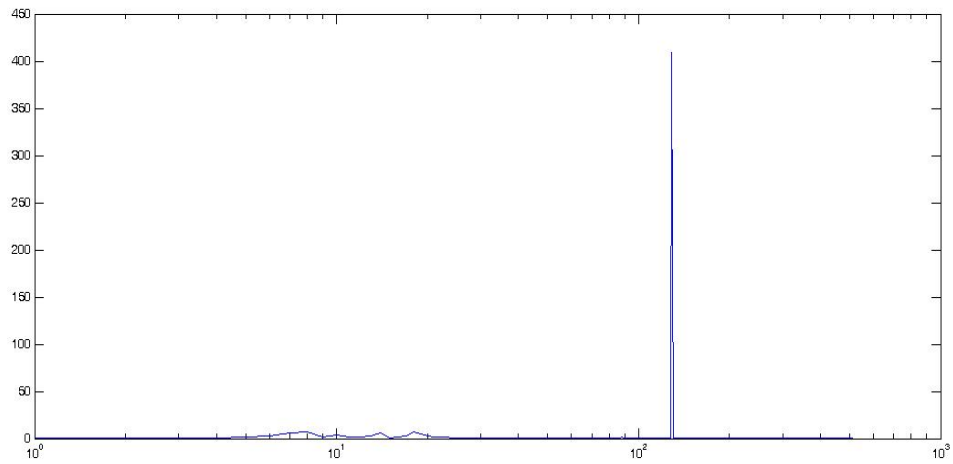
### 6.2.1 PRUEBA DE DIALOGO CON SINUSOIDAL DE 2000 HZ

Ilustración 29 Espectro de la señal de entrada con una sinusoidal de 2000 Hz



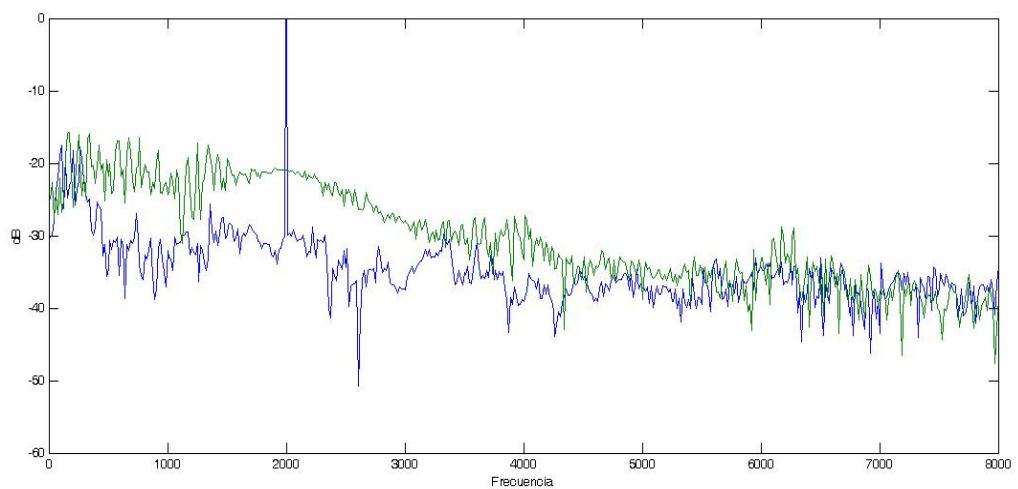
la ilustracion 27 muestra una señal de dialogo con la adicon de una señal sinusoidal de 2000 Hz, que alcanza una amplitud de 10 dB.

Ilustración 30 Pico Detectado.



la ilustracion 28 muestra el pico de 2000 Hz detectado y discriminado por el criterio de deteccion de picos.

Ilustración 31 Espectro de la señal filtrada con sinusoidal de 2000 Hz.

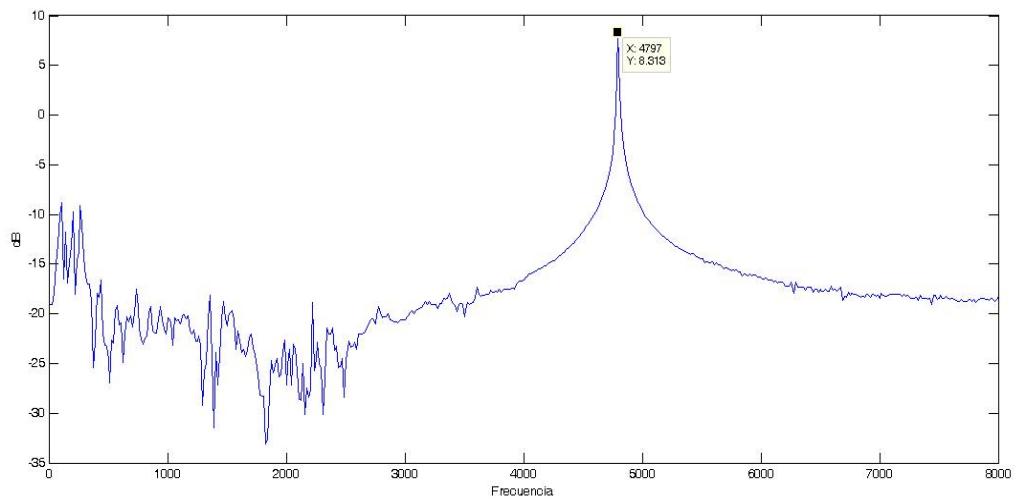


La atenuación estimada es de 20 dB en el espectro de trazo verde , el espectro de la señal filtrada muestra la misma dinamica de las pruebas anteriores , en

frecuencias bajas el espectro sufre una amplificación que varía entre 5 dB y 2 dB, pero tras la señal pico mantiene su forma en general amplificando levemente las frecuencias alrededor de los 6000 Hz.

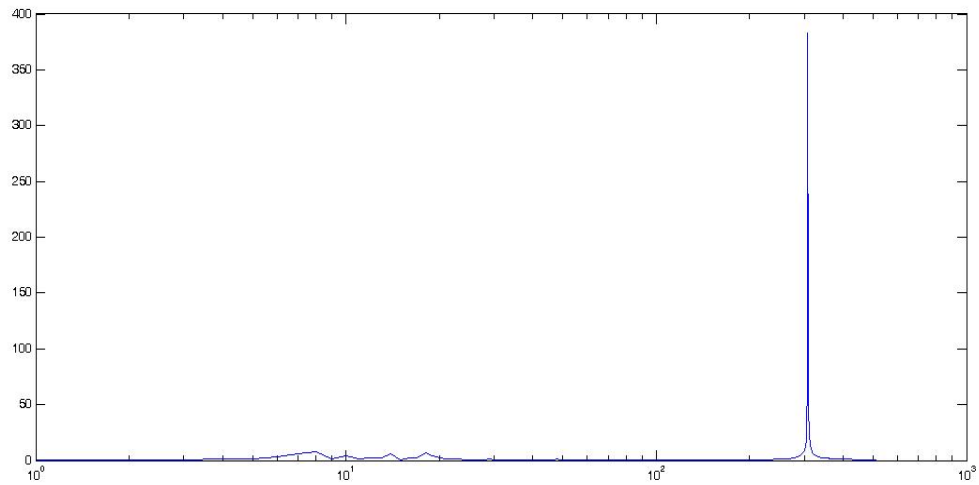
### 6.2.2 PRUEBA DE DIALOGO CON SINUSOIDAL DE 4800 HZ.

Ilustración 32 Espectro de la señal de entrada con una sinusoidal de 4800 Hz.



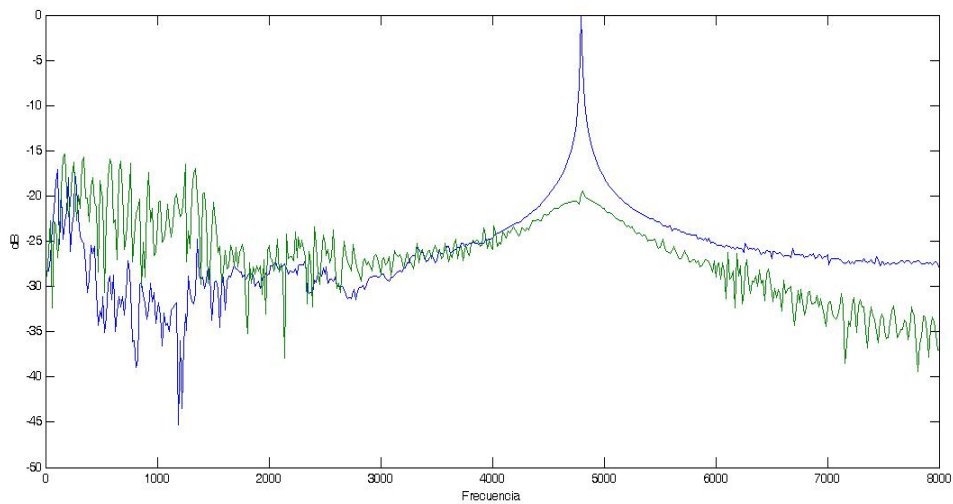
la ilustración 30 muestra el espectro de la señal de dialogo con una sinusoidal de 4800 Hz, el pico intriducido alcanza una amplitud estimada de 10 dB.

Ilustración 33 Pico Detectado



La ilustración 31 muestra el pico discriminado por el algoritmo, esta sería la frecuencia de 4800 Hz detectada por el algoritmo que sería la frecuencia central del filtro notch.

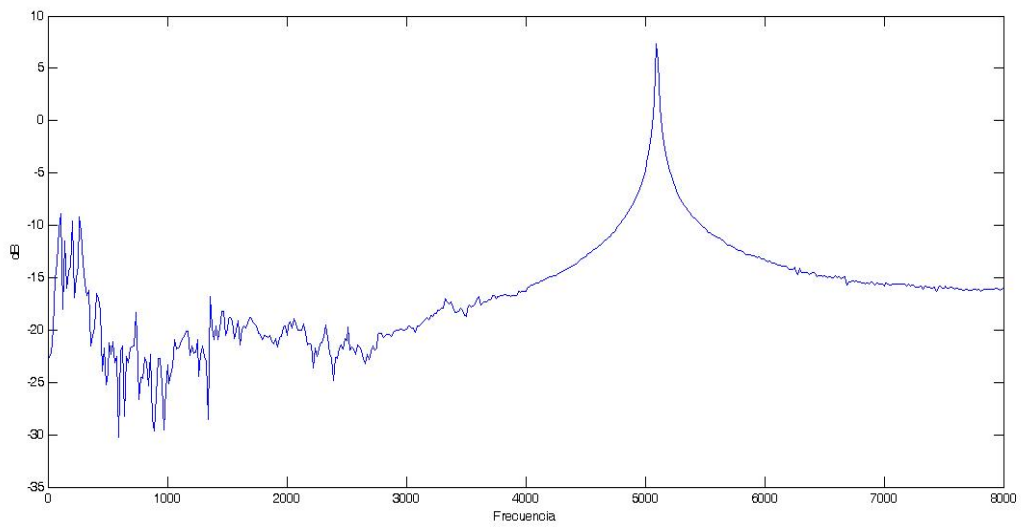
Ilustración 34 Espectro de la señal filtrada con sinusoidal de 4800 Hz.



la ilustración 32 muestra el espectro de la señal filtrada con trazo verde, la frecuencia de 4800 Hz se atenúa en aproximadamente 25 dB, el espectro anterior al pico se ve afectado básicamente por propiedades y comportamientos de los filtros notch generando una amplificación de 10 dB para frecuencias cercanas a los 1300 Hz. El espectro también sufre una reducción de amplitud en las frecuencias mayores al pico, que varía entre 2 y 5 dB aproximadamente

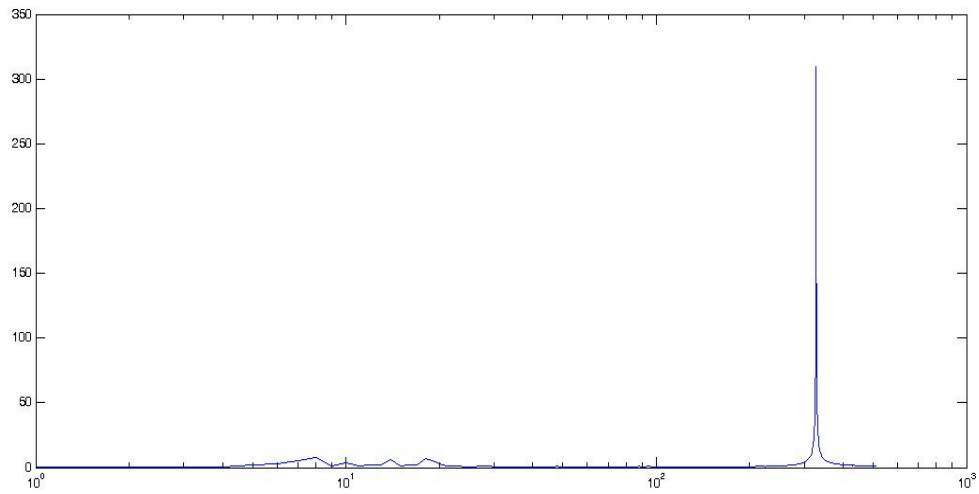
### 6.2.3 PRUEBA DE DIALOGO CON SINUSOIDAL DE 5100 HZ

**Ilustración 35** Espectro de la señal de entrada con una sinusoidal de 5100 Hz.



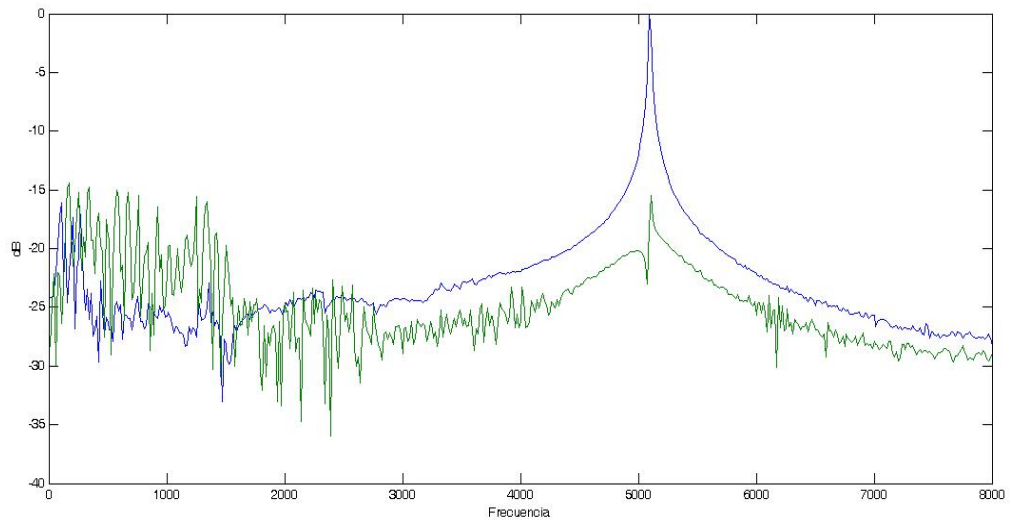
la ilustracion 33 muestra el espectro de la señal de dialogo con una sinusoidal de 5100 Hz, el pico alcanza una magnitud estimada de 9 dB .

**Ilustración 36 Pico Detectado.**



la ilustracion 34 muestra el pico discriminado por el algoritmo de deteccion de picos con frecuencia de 5100 Hz.

**Ilustración 37 Espectro de la señal filtrada con sinusoidal de 5100 Hz.**



La ultima prueba muestra el espectro de la señal filtrada en trazo verde , la atenuacion estimada es de 15 dB, y muestra el mismo comportamiento para frecuencias bajas, amplificando las frecuencias desde los 0 a los 1500 Hz aproximadamente. El resto del espectro desde el pico en adelante se muestra uniforme con un reduccion en amplitud de 3 dB aproximadamente.

En todas las pruebas es notable que el algoritmo identifique de forma muy acertada las alteraciones de frecuencia y las atenúa considerablemente, además de que se mantiene la forma del espectro.

La mayor atenuación efectuada es de 25 dB la prueba de diálogo con una frecuencia sinusoidal de 4800 Hz.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En esta investigación se realizó un estudio profundo de la teoría existente en cuanto a control de retroalimentación acústica, de donde se pudo determinar y crear un nuevo método, sin embargo es importante aclarar que se profundizó en los métodos de SAFR supresión de acoples en base a filtros ranura o notch en vista de que el método propuesto se compuso de esta teoría y profundizar fue algo obligatorio. Un profundo desarrollo matemático del proceso de retroalimentación permitió entender y aclarar los métodos investigados en el estado del arte.

Se presentó un nuevo método para la detección y cancelación de la retroalimentación acústica que combina técnicas de identificación espectral de interferencias y filtros notch o ranura, donde la evaluación de contenido espectral es fundamental para la evaluación del espectro de la señal entrante, así como el cálculo de la magnitud espectral.

El filtro notch IIR de segundo orden se eligió por poseer moderada carga computacional y también porque el método propuesto tiene sus bases en los métodos de supresión de acoples en base a filtros ranura, que tras el análisis espectral empleó un criterio de detección de picos efectivo que discrimina la frecuencia interferente y ajustó el parámetro del filtro para su debida

atenuación, de lo anterior se puede concluir que el método propuesto es de 2 fases .

el criterio de detección de picos es completamente nuevo , emplea técnicas estadísticas para el análisis y promedio de la señal de entrada, y a su vez crea un limite o treshold a partir de la varianza y desviación estándar encontradas con sus respectivas ecuaciones. De los resultados obtenidos se puede concluir que el criterio es capaz de discriminar de entre varios picos máximos la frecuencia feedback , sin atenuar otros picos que son componentes deseados del espectro de la señal. Por lo cual puede ser considerado como el proceso mas relevante de todo el desarrollo del proyecto.

El filtro notch implementado no usa una estructura predeterminada , se realizo a partir de la ubicación de los polos y ceros de acuerdo a la teoria estudiada , los polos deben ser ubicados en las cercanias de cero para lograr el ancho de banda angosto, a su vez el filtro demostro su alta capacidad de atenuacion en el diseño de prueba que puede ser observado en la ilustracion 16.

Es importante concluir tambien que el algoritmo no realiza una adaptacion iterativa de los pesos del filtro, como usualmente sucede en los filtros adaptativos , sin embargo el filtrado implementado es adaptativo en cuanto a que la actualizacion y modificacion de los parametros dependen del analisis del espectro efectuado en la primera fase.

↑

De la simulación podemos concluir que el algoritmo diseñado tiene una alta capacidad de detectar de picos, de estimar su frecuencia y atenuarla en diferentes valores que pueden ser observados en las pruebas. Auditivamente, el pico interferente se sigue sintiendo levemente, lo cual también se debe a la condición artificial creada para simular el proceso de retroalimentación ya que el pico o sinusoidal es aplicado a la señal de entrada de forma permanente, para un efecto real de retroalimentación acústica la situación seria completamente diferente. En dichas condiciones reales, cuando el filtrado notch sea aplicado en la frecuencia central detectada, el sistema lazo cerrado que es la retroalimentación acústica, se vería interrumpido y la perturbación desaparecería completamente mientras el filtro se mantuviese activo.

En términos de calidad sonora y percepcion subjetiva , la distorsión de la señal debida al filtrado es completamente razonable por el pequeño ancho de banda del filtro, de hecho, la mayor disminucion de calidad sonora es debida a



la naturaleza reactiva del método por lo que los acoples son únicamente percibidos auditivamente antes de ser atenuados.

Por el comportamiento del filtro también, se observa un efecto en las frecuencias anteriores al pico en la señal filtrada, este consiste en la amplificación de entre 2 dB y 5dB en las frecuencias bajas, y la conservación del espectro en las frecuencias mayores con una atenuación más leve.

La principal carga computacional que posee el método es el análisis espectral que puede manejarse variando el número de segmentos  $N$ , sin embargo la segmentación de  $N = 1024$  es la más adecuada para el análisis del espectro total.

Debido a los resultados satisfactorios obtenidos con el método desarrollado una recomendación para desarrollos futuros a corto tiempo es ajustar el algoritmo actual de tal manera que un mayor número de acoples puedan ser cancelados (por ejemplo, más de 10 interferencias simultáneas) aplicando un banco de filtro notch, con el fin de mejorar los estándares de los equipos comerciales existentes.

La implementación en tiempo real del algoritmo realizado requerirá la transferencia a una tarjeta DSP, esta deberá estar ubicada después del proceso de conversión A/D y después de esta irá el proceso de conversión D/A que amplificara la señal procesada según el algoritmo diseñado.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] VAN WATERSCHOOT. Toon. Design and evaluation of digital signal processing algorithms for acoustic feedback and echo cancellation. 2009. 381 p.
- [2] COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Retroalimentación. Wikipedia, La enciclopedia libre, <<http://es.wikipedia.org/wiki/Realimentaci%C3%B3n>>. 2011.
- [3] COLABORADORES DE WIKIPEDIA Audio Feedback. Wikipedia, La enciclopedia libre, <[http://en.wikipedia.org/wiki/Audio\\_feedback](http://en.wikipedia.org/wiki/Audio_feedback)>.2011.
- [4] EARGLE. John. Manual de Referencia para el Diseño de Sistemas de Sonido.1999. 99p.
- [5] VAN WATERSCHOOT. Toon 50 years of Acoustic Feedback Control: State of the Art and Future Challenges. 2011. 78 p.
- [6] SONIDO Y ELECTROACUSTICA.  
<[http://www.4shared.com/get/Yhx4f9Cq/SONIDO\\_y\\_electroacustica.html](http://www.4shared.com/get/Yhx4f9Cq/SONIDO_y_electroacustica.html)>
- [7] SCHROEDER .M. R., "Improvement of acoustic-feedback stability by frequency shifting," J. Acoust. Soc. Amer., vol. 36, no. 9. 1964. 1728 p.
- [8] SCHROEDER .M. R., "Improvement of acoustic feedback stability in public Address systems, 3rd Congr. Int. Acoust. (ICA '59), Stuttgart, 1959, 775 p.

- [9] VAN WATERSCHOOT. Toon, G. ROMBOUTS, P. VERHOEVE, and M.MOONEN, "Doubletalk-robust prediction error identification algorithms for acoustic echo cancellation,"IEEE Trans. Signal Process. vol. 55, no. 3, 2007.p. 846,
- [10] R. HASTINGS-JAMES y MW SAGE. Recursive generalized least squares procedure for online identification of process parameters. Proc IEE VOL 116 NO 12. 1969. 205 p.
- [11] ROCHA Ariel. FERREIRA Aníbal , An Accurate Method of Detection and Cancellation of Multiple Acoustic Feedbacks, University of Porto, Portugal, INESC Porto, Porto, Portugal, Presentado en la convención AES 118th Barcelona, Spain 2005.
- [12] FOLEY, J. B. Adaptive periodic noise cancellation for the control of acoustic howling. En Proc. IEE Colloq. Adaptive Filters, Londres, UK 1989, p. 7/1–7/4.
- [13] M. P. LEWIS, T. J. TUCKER, y D. M. OSTER. Method and apparatus for adaptive audio resonant frequency filtering. U.S. Patent 5, 245, 665, 1993.
- [14] M. H. ER, T. H. OOI, L. S. LI, y C. J. LIEW. A DSP-based acoustic feedback canceller for public address systems. En Proc. Int. Conf. Signal Process. (ICSP '93), Beijing, China, 1251–1254.p. 1993
- [15] MAPP. Peter. EILIS. Christien. Improvements in Acoustic Feedback Margin in Sound Reinforcement Systems Presentado en la convención AES 106<sup>th</sup> Munich, Germany 1999.
- [16] ALEGSA.COM. <<http://www.alegsa.com.ar/Dic/sistema.php>>

- [17] OPPENHEIM. Alan. WILSKY. Alan. Señales y Sistemas. 2da edición. Prentice Hall.992 p.
- [18] HEINRICH KUTTRUFF. Room Acoustics. Quinta Edicion. Taylor & Francis, 2000 . 349 p
- [19] COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Transfer Function. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Transfer function](http://en.wikipedia.org/wiki/Transfer_function)>. 2011.
- [20] MONOGRAFIAS.COM .Criterio de estabilidad de Nyquist. <<http://www.monografias.com/trabajos12/cristestb/cristestb.shtml>>. 2011.
- [21] WEINBERG HARRY. La Cibernética, El Arte del Timonel. <[http://pwp.etb.net.co/ferqui/lec\\_ciber\\_arte\\_timonel.htm](http://pwp.etb.net.co/ferqui/lec_ciber_arte_timonel.htm)>. 1959.
- [22] DOCTOR PROAUDIO. Acople Acústico. <<http://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/acoples.htm>>. 2011.
- [24] W. LEOTWASSANA, R. PUNCHALARD, y K. SIAPHAN. Adaptive Howling Cancellor Using Adaptive IIR Notch Filter: Simulation and Implementation. IEEE Int. Conf. Neural Networks. Signal Processing. 2003.
- [24] BORES Signal Processing. <[http://www.bores.com/courses/intro/iir/5\\_resp.htm](http://www.bores.com/courses/intro/iir/5_resp.htm)>. 2011.
- [25] TROXEL. Dana. Understanding Acoustic Feedback and Supresors. Rane Corporation. 2005.
- [26] COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Infinite Impulse Response.Wikipedia, La enciclopedia libre. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Infinite\\_impulse\\_response](http://en.wikipedia.org/wiki/Infinite_impulse_response)>.2011.

[27] MAILXMAIL.COM. <<http://www.mailxmail.com/curso-estadistica-basica-supervisores-aplicada-control->

Procesos/estadistica-descriptiva-aplicaciones-media-desviacion-estandar>.2009.

## ANEXOS

### ALGORITMO DEL FILTRO NOTCH DISEÑADO EN MATLAB

```
clc,clear all, close all;
```

```
u=[0 0 1 zeros(1,1023)];
```

```
fs = 44100;
```

```
f =10000;
```

```
w0 = 2*pi* f/ fs;
```

```
r = 0.99;
```

```
y(1:2)=[0 0];
```

```
for n = 3:1026;
```

```
y(n) = u(n) - 2*cos(w0)*u(n-1) + u(n-2) + 2*r*cos(w0)*y(n-1)- r^2*y(n-2);
```

end

```
U=fft(u(3:1026));
```

```
Uw= 10*log10(abs(U)/max(abs(U)));
```

```
Y=fft(y (3:1026));
```

```
Yw= 10*log10(abs(Y)/max(abs(Y)));
```

figure

```
plot(0:((fs))/1024:(fs-1),Uw);
```

```
xlim([0 20000])
```

figure

```
plot(0:((fs))/1024:(fs-1),Yw);
```

```
xlim([0 20000])
```

## ALGORITMO DEL METODO PROPUESTO PARA EL CONTROL DE RETROALIMENTACION ACUSTICA

```
clc,clf,clear all,close all;
```

```
% input audio file (raw PCM)
```

```
N = 1024;
```

```
[y,fs] =wavread('speech7000');
```

```
Y=fft(y(400*N+1:401*N));
```

```
Ym=abs(Y);
```

```
semilogx(Ym(1:length(Ym)/2))
```

```
figure (1)
```

```
Py = 1/N*sum (Ym(1:N));
```

```
varYm = (sum ((Ym - Py).^2))/(N-1);
```



```
T = Py + 3*sqrt(varYm);
```

```
PAPR = 10*log10(Ym/T);
```

```
figure(2)
```

```
plot(PAPR)
```

```
kg=[];
```

```
for k=1:N/2
```

```
    if PAPR(k)>=0
```

```
        kg=[kg k];
```

```
    end
```

```
end
```

```
[aa,km]=max(PAPR(kg));
```

```
plot(0:(fs)/N:(fs-1),PAPR)
```

```
vf=0:(fs)/N:(fs-1);
```

```
vf(kg);
```

```
fa=vf(kg(km));
```

```
w0=2*pi*fa/fs;
```

```
r=0.90;
```

```
yf(1:2)=[0 0];
```

```
a=[1 -2*r*cos(w0) r^2];
```

```
b=[1 -2*cos(w0) 1];
```

```
yf=filter(b,a,y(3+(16000*15):(16000*15)+(16000*15)));
```

```
% for n = 3:44100*11;
```

```
%
```

```
% yf(n) = y(n+(44100*11)) - 2*cos(w0)*y((n-1)+(44100*11)) + y((n-2)+(44100*11)) + 2*r*cos(w0)*yf(n-1) - r^2*yf(n-2);
```

```
%
```

```
% end
```

```
U=fft(y(3+(400*N):1026+(400*N)));
```

```
Uw= 10*log10(abs(U)/max(abs(U)));
```

```
Y=fft(yf (3:1026));
```

```
Yw= 10*log10(abs(Y)/max(abs(U)));
```

```
figure (3)
```

```
plot(0:(fs)/1024:(fs-1),Uw,0:(fs)/1024:(fs-1),Yw);
```

```
xlim([0 20000])
```

```
figure
```

```
plot(0:(fs)/1024:(fs-1),Yw);
```

```
xlim([0 20000])
```

```
yfn = yf;
```

```
wavwrite(yfn,16000, 'pru.wav');
```

```
wavwrite(y(3+(16000*15):(16000*15)+(16000*15)),16000, 'in.wav');
```



