



**TECNOLOGICO
DE MONTERREY®**

Campus Ciudad de México

Escuela de Graduados en Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Administración de las Telecomunicaciones

*“Sistema Híbrido para Cancelación Activa de Eco en
Líneas Telefónicas”*

**Autor:
Adriana Pavón Navarrete**

**Director de la tesis:
Dr. Edgar Omar López Caudana**

2011

Resumen

El presente proyecto es una aplicación directa de la Cancelación Activa de Ruido enfocado a la Cancelación de eco en líneas telefónicas. Se presenta como una alternativa para disminuir el eco generado durante una llamada telefónica debido a la disparidad de impedancias de dos a cuatro hilos. La solución presentada está basada en la implementación de un sistema híbrido cancelador de ruido que utiliza un algoritmo adaptativo *Least Mean Square*; aplicados al escenario de single talk o bien de double talk. En esta investigación se incluye la presentación de resultados obtenidos al evaluar el sistema propuesto, obtenidos por la interfaz desarrollada con el fin de facilitar al usuario la manipulación de las condiciones de prueba.

Índice

Resumen.....	1
Introducción	6
Generalidades	7
Objetivos	8
Objetivo General	8
Objetivos Particulares.....	8
Alcance	8
Justificación.....	9
Organización del escrito	9
Capítulo I	11
Antecedentes y Características del Problema de Eco en Líneas Telefónicas.....	11
1.1 El problema del eco	11
1.1.1 Generalidades	11
1.1.2 Tipos de eco	12
1.1.3 Tipos de señales en las líneas telefónicas.....	13
1.1.4 Posibles soluciones para disminuir el efecto del eco.....	14
1.2 Escenarios de Eco	16
1.2.1 <i>Single Talk</i>	16
1.2.2 <i>Double Talk</i>	16
1.3 Estado del arte de canceladores de eco	17
1.4 Cancelación adaptativa de eco.....	19
1.4.1 Algoritmos adaptativos	19
1.4.2 Análisis y selección.....	20
Capítulo II	23
Panorama General de la Cancelación Activa de Ruido	23
2.1 Filtros adaptativos	23
2.1.1 Filtros Wiener	23
2.1.2 Algoritmo <i>Least Mean Square</i>	25
2.2 Sistemas de Cancelación Activa de Ruido	28
2.2.1 Sistema <i>Feedforward</i>	29
2.2.2 Sistema <i>Feedback</i>	32
2.2.3 Sistema híbrido	33
2.3 Aplicaciones de Cancelación Activa de Ruido.....	35
2.4 Cancelación de eco	36
Capítulo III	39
Sistema propuesto	39
3.1 Descripción del escenario de análisis	39
3.2 Incorporación del sistema híbrido de Cancelación Activa al problema del eco	40
Capítulo IV	44
Simulación.....	44
4.1 Condiciones generales de simulación	44
4.2 Parámetros de análisis.....	47

4.3 Señales de prueba.....	48
4.4 Presentación y análisis de las simulaciones realizadas.....	54
4.4.1 Entrenamiento del sistema con escenario <i>Single-Talk</i>	54
4.4.2 Pruebas para Escenarios de <i>Double-Talk & Single-Talk</i>	59
4.4.3 Pruebas del sistema propuesto en un caso de conversación telefónica.....	74
Capítulo V	78
Conclusiones y trabajo futuro	78
5.1. Conclusiones.....	78
5.2. Trabajo futuro.....	81
Bibliografía	82
Anexo A.....	87
Guía de interfaz de usuario	87
Anexo B	90
Artículo propuesto	90
Anexo C	95
Nomenclatura de los archivos generados por el código en Matlab®.....	95

Índice de Tablas

Tabla 4.1 Señales de prueba empleadas para el análisis del sistema	49
Tabla 4.2 Parámetros seleccionados para el análisis del sistema $\mu=0.01$ y planta de Paleologu	54
Tabla 4.3 Comparación de resultados (ERLE) para diversos valores de μ_{fwd} y μ_{bck} el sistema propuesto	59
Tabla 4.4 Parámetros seleccionados para el análisis del sistema $\mu = 0.1$ y planta de Paleologu	64
Tabla 4.5 Parámetros seleccionados para el análisis del sistema $\mu = 0.01$ y planta de Celis.....	69

Índice de Figuras

Figura 1.1 Presencia de eco en una conversación.....	11
Figura 1.2 Diagrama de Eco Eléctrico	12
Figura 1.3 Señales de eco presentes en una llamada telefónica	14
Figura 1.4 Circuito supresor de eco.....	15
Figura 1.5 Circuito cancelador de eco	15
Figura 1.6 Señales de eco presentes en una llamada telefónica.....	16
Figura 1.7 Filtro Transversal	19
Figura 1.8 Filtro Transversal FIR.....	21
Figura 2.1 Diagrama de Bloques de un Filtrado estadístico	23
Figura 2.2 Superficie del Mean Square Error	26
Figura 2.3 Diagrama de Bloques de un Filtrado estadístico	29
Figura 2.4 Diagrama de bloques de un filtro transversal con identificación del dominio acústico y eléctrico.....	30
Figura 2.5 Diagrama de bloques de un sistema <i>feedforward</i> considerando retroalimentación acústica..	31
Figura 2.6 Diagrama de Bloques de un sistema <i>feedback</i> en un ducto acústico.....	32
Figura 2.7 Diagrama de Bloques de un sistema <i>feedback</i>	33
Figura 2.8 Diagrama de Bloques de un sistema híbrido	34
Figura 2.9 Proceso de Cancelación Activa de Ruido Acústico de un sistema híbrido en un ducto Acústico	34
Figura 2.10 Filtro adaptativo y DTD en una aplicación de AEC.....	37
Figura 3.1 Escenarios de eco en una llamada telefónica	39
Figura 3.2 Descripción del escenario propuesto.....	40
Figura 3.3 Sistema híbrido propuesto para la Cancelación Activa de Eco	42
Figura 4.1 Interfaz desarrollada para la implementación del sistema híbrido para la cancelación de eco	45
Figura 4.2 Etapas de la simulación empleando la interfaz gráfica de usuario desarrollada	47
Figura 4.3 Caracterización de la señal de "4 Tonos"	50
Figura 4.4 Caracterización de la señal de "aspiradora"	51
Figura 4.5 Caracterización de la señal de "Voz femenina"	52

Figura 4.6 Caracterización de la señal de "Voz masculina 1"	52
Figura 4.7 Caracterización de la señal de "Voz masculina 2"	53
Figura 4.8 Caracterización de la señal de "Ladrido"	53
Figura 4.9 Parámetros de análisis con señal de voz femenina en near-end y señal de silencio far-end...	54
Figura 4.10 Señal eco $d(n)$ de voz femenina en near-end	55
Figura 4.11 Señal de cancelación $d(n)$, señal de voz femenina en near-end y señal de silencio far-end..	56
Figura 4.12 Salida del sistema $e(n)$, señal de voz femenina en near-end y señal de silencio far-end.....	56
Figura 4.13 Respuesta sin aplicación del sistema propuesto	57
Figura 4.14 Comparación de la salida del sistema y sin sistema, señal de voz femenina en near-end y señal de silencio far-end. Espectro de frecuencia. Verde: señal de salida del sistema, Rojo: sin implementar el sistema	57
Figura 4.15 ERLE resultante de señal de voz femenina en near-end y señal de silencio far-end con el filtro adaptativo $W(z)$:	58
Figura 4.16 ERLE con señal de voz femenina en near-end y señal de 4 Tonos far-end	60
Figura 4.17 Señal de cancelación $d(n)$, señal de voz femenina en near-end y señal de 4 Tonos en far-end	60
Figura 4.18 Salida del sistema $e(n)$, señal de voz femenina en near-end y señal de 4 Tonos far-end.....	60
Figura 4.19 Señal de eco de voz femenina en near-end más la señal de 4 Tonos far-end.....	61
Figura 4.20 Correlación de la señal de voz femenina en near-end y señal de 4 Tonos far-end.....	61
Figura 4.21 Comparación de la salida del sistema y sin sistema, señal de voz femenina en near-end y señal de silencio far-end.....	62
Figura 4.22 ERLE con señal de voz femenina en near-end y señal de aspiradora far-end	63
Figura 4.23 Correlación de la señal de voz femenina en near-end y señal de aspiradora en far-end.....	63
Figura 4.24 Señal de cancelación $d(n)$, señal de voz femenina en near-end y señal de aspiradora en far-end	64
Figura 4.25 ERLE con señal de voz femenina en near-end y	65
Figura 4.26 ERLE con señal de voz femenina en near-end y señal de voz masculina en far-end.....	66
Figura 4.27 Correlación de la señal de voz femenina en near-end y señal de voz masculina en far-end...	67
Figura 4.28 Señal de cancelación $d(n)$ con señal de voz femenina en near-end y señal de voz masculina en far-end	67
Figura 4.29 ERLE con señal de voz femenina en near-end y señal de voz masculina 1 en far-end.....	68
Figura 4.30 Señal de cancelación $d(n)$ con señal de voz femenina en near-end y señal de voz masculina 1 en far-end	68
Figura 4.31 Señal de eco $d(n)$ de voz femenina en near-end con planta Celis	69
Figura 4.32 ERLE con señal de voz femenina en near-end, voz masculina en el far-end, $\mu = 0.01$ y planta Celis	70
Figura 4.33 Señal de cancelación generada por el sistema empleando señal de voz femenina en near-end, voz masculina en el far-end y planta Celis	70
Figura 4.34 Señal de salida generada por el sistema empleando señal de voz femenina en near-end, voz masculina en el far-end y planta Celis.....	71
Figura 4.35 Señal de eco de voz femenina en near-end más la voz masculina en el far-end y planta Celis	71
Figura 4.36 ERLE con señal de voz femenina en near-end, voz masculina en el far-end, $\mu = 0.001$ y planta Celis	72
Figura 4.37 ERLE con señal de voz femenina en near-end y señal de ladrido en far-end.....	73
Figura 4.38 Correlación de la señal de voz femenina en near-end y señal de ladrido en far-end	73
Figura 4.39 Señal de cancelación $d(n)$ con señal de voz femenina en near-end y señal de ladrido en far-end	73
Figura 4.40 Señales empleadas de evaluación y ejemplos	77

Introducción

Ha existido un gran avance tecnológico en las redes telefónicas lo cual incluye el desarrollo de *tecnologías* móviles, accesorios inalámbricos, etc. Las redes telefónicas se componen de los aparatos telefónicos conectados mediante cableado urbano a las centrales telefónicas locales, éstas a su vez conectadas con centrales intermedias de tránsito.

Las redes telefónicas se han modificado mediante el uso de nueva tecnología y constantes innovaciones permitiendo automatizar el proceso de interconexión de abonados, así como la incorporación de distintos medios de transmisión. "La consecución de un servicio telefónico universal ha sido un reto tecnológico único" (Pierce, 2002). A pesar de esta evolución tecnológica existen diversos problemas que degradan la calidad del servicio un ejemplo de ello es el eco en las líneas telefónicas (Carballar, 2007).

El eco se define como la repetición de una señal retrasada con respecto a la original (Vaseghi, 2008). El problema del eco está presente durante el proceso de comunicación desde la comunicación interpersonal directa hasta las conversaciones telefónicas. En los sistemas telefónicos de 2 a 4 hilos, principalmente en transmisiones de larga distancia, presentan problemas de eco (Huidobro, 2006). Es por ello que se han desarrollado dos tipos de sistemas principales para tratarlo: los supresores de eco y sistemas canceladores de eco.

Los canceladores de eco restan la señal de eco que retorna a la fuente mediante el uso de filtros adaptativos que se adecuan por sí mismos a los distintos cambios que se presenten en el sistema (Pierce, 2002). Estos canceladores emplean una forma activa de control de ruido la cual incluye el uso de una segunda fuente de sonido que genera una señal de iguales características al eco pero con fase distinta. Lo anterior permite anular dicha señal debido a que las ondas de sonidos se propagan de forma lineal, esto se conoce como efecto de superposición (Kipersztok, 1993). Así mismo, debido a que las características de la señal a cancelar cambian constantemente, en este caso el eco, el sistema requiere una gran capacidad de adaptación (Flockton, 1990). Los canceladores gracias a su bajo costo en comparación con otros sistemas y

amplia capacidad de procesamiento representan una gran alternativa para la Cancelación de Eco en las líneas telefónicas.

Adicionalmente se emplearon investigaciones desarrolladas previamente por diversos autores (Celis, 2008; López, 2010 & Betancourt 2007).

Generalidades

El presente trabajo plantea un sistema híbrido para Cancelación Activa de Eco en las líneas telefónicas, considerando los elementos planteados por Flotte (2006):

- La planta que se refiere al sistema físico a controlar
- Dispositivos de entrada que permiten al sistema monitorear la señal de entrada
- Actuadores que se refieren a todos los dispositivos encargados de modificar la respuesta de la planta
- Procesador de señales encargado de controlar a los actuadores en base a las señales de entrada

La planta en este caso particular se refiere al conjunto de elementos que provocan una señal de eco durante las llamadas telefónicas, en el siguiente capítulo se incluye un desarrollo más extenso sobre su origen. Los dispositivos de entrada que participan en el sistema de cancelación son micrófonos de referencia para cada abonado. A partir de ello se considera un sistema cancelador para cada interlocutor de la llamada telefónica. Específicamente la Cancelación Activa del Eco presentada, incluye filtros adaptativos con una configuración híbrida, es decir, la adaptación de un sistema *feedforward* y un sistema *feedback*; dichas configuraciones están detalladas en el capítulo dos.

Para poder llevar a cabo la presente propuesta de solución se desarrollaron los siguientes aspectos principales:

- Análisis de los componentes del Sistema Híbrido de Cancelación Activa de Ruido
- Análisis de parámetros y variables a controlar

- Análisis del funcionamiento del algoritmo LMS
- Caracterización del procesamiento de las señales de prueba a través de parámetros propuestos en la literatura
- Propuesta final del Sistema Híbrido de Cancelación Activa de Ruido para la reducción del eco en llamadas telefónicas

Objetivos

Objetivo General

Analizar y evaluar un Sistema de Cancelación Activa de Ruido, para disminuir el eco en una conversación telefónica, mediante la simulación del sistema híbrido propuesto y el análisis de los resultados bajo un escenario de conversación telefónica convencional

Objetivos Particulares

- Investigar los tipos de cancelación de eco y sus características generales
- Adaptar un sistema híbrido de cancelación activa de ruido para cancelación de eco
- Analizar el desempeño del sistema cancelador de eco, con diferentes señales de prueba
- Comprobar la eficiencia del sistema híbrido en el escenario propuesto

Alcance

El sistema propuesto se limita a la adaptación de un Sistema Híbrido de Cancelación Activa para la reducción de eco en un solo par de hilos, es decir, dentro de una llamada telefónica. Así mismo se limita al escenario "*double talk*" que se refiere a que ambos interlocutores hablan al mismo tiempo.

Justificación

El eco en las conversaciones telefónicas suele ser molesto para los interlocutores, por lo que es necesario realizar una cancelación del mismo para un escenario de conversación simultánea. En particular los sistemas de Cancelación Activa de Ruido, en específico los sistemas híbridos, han demostrado resultados satisfactorios para la cancelación de ruido; pero aún no ha sido ampliamente explorada la implementación de los mismos a un problema de cancelación de eco eléctrico.

Organización del escrito

En el primer capítulo se presenta un panorama general de la generación del eco en líneas telefónicas a larga distancia, describiendo tanto las fuentes que lo generan y la forma en la que se suprimen.

El capítulo II describe el Sistema Cancelador Activo de Ruido, los filtros adaptativos, el sistema híbrido y las partes que lo componen. Así mismo, se aborda el algoritmo LMS (*Lean Mean Square*) que se emplea para el desarrollo del presente trabajo y criterios que se emplearán para el análisis como lo son ERLE y MSE.

En el capítulo III se describe el sistema híbrido de Cancelación Activa de Eco propuesto, acotando las condiciones generales de los escenarios a analizar: *double-talk* y *single-talk*.

El capítulo IV se presentan los parámetros y señales de prueba empleados para analizar el sistema propuesto. Así mismo, se incluyen las condiciones a considerar y que tienen impacto sobre el desempeño del algoritmo LMS. Adicionalmente se incluyen los resultados obtenidos con las señales y parámetros de prueba acotados previamente.

En el capítulo V se incluyen las conclusiones obtenidas por el presente trabajo, así como, las perspectivas para continuar esta línea de investigación.

Finalmente, el Anexo A muestra a detalle una guía para la interfaz de usuario desarrollada en Matlab® para simular el sistema propuesto. Así mismo, en el Anexo C se incluye un artículo, en etapa de revisión, basado en el presente trabajo con la finalidad de ser publicado posteriormente. En el Anexo c se incluyen diversas señales de voz que permiten la simulación de una conversación telefónica.

Capítulo I

Antecedentes y Características del Problema de Eco en Líneas Telefónicas

1.1 El problema del eco

1.1.1 Generalidades

Las conversaciones prácticamente en su totalidad cuentan con la presencia de un eco, el cual se debe al efecto de las ondas de voz reflejadas en distintos objetos del ambiente, si la onda reflejada ocurre poco después que la señal original puede ser percibida solo como una distorsión del espectro. Por el contrario cuando la onda reflejada ocurre decenas de milisegundos después que la original, puede ser percibido como eco (Benesty, 2001). La percepción del eco puede ser molesta para los interlocutores e incluso crear confusión al mezclarse ambas señales de voz, la reflejada y la original, como se muestra en la Figura 1.1

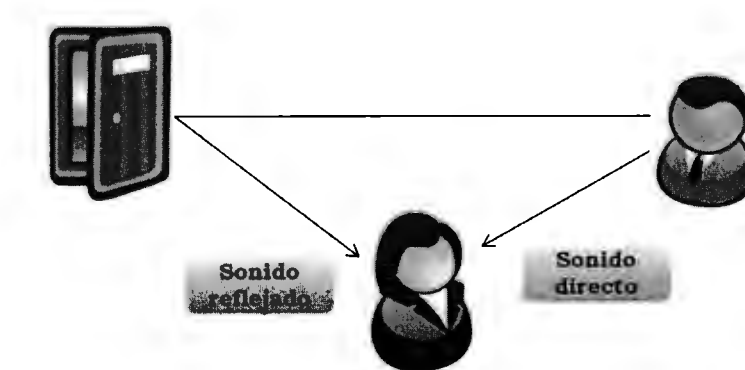


Figura 1.1 Presencia de eco en una conversación

1.1.2 Tipos de eco

Existen dos tipos de eco los cuales debido a sus características y origen se clasifican en: eléctrico y acústico.

El eco eléctrico está presente primordialmente en las redes de telefonía tradicionales, debido a la disparidad de impedancias de 2 a 4 hilos en las redes telefónicas, Figura 1.2. Lo anterior se debe a las conexiones realizadas entre el par de abonado y los dos canales de comunicación, un receptor y un transmisor para cada interlocutor de la conversación. A este tipo de eco también se le denomina eco de líneas telefónicas (Vaseghi, 2008).

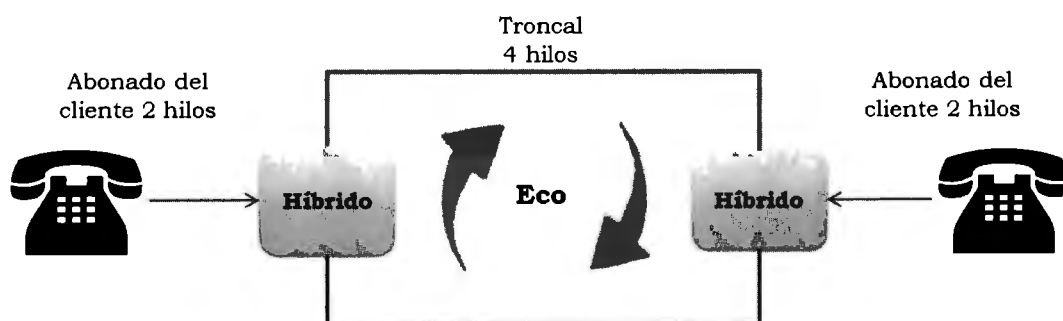


Figura 1.2 Diagrama de Eco Eléctrico

Fuente: Adaptación de (Wallace, 2011) p.124

El eco acústico se refiere a la retroalimentación directa o indirecta de señales reflejadas al micrófono durante una conversación. En la actualidad el eco acústico puede producirse durante una conversación telefónica al emplear el uso de altavoces y micrófonos denominados manos libres (Figueiras, 2002) los cuales al estar presentes en la misma sala se retroalimentan; otros ejemplo es la comunicación por videoconferencia.

1.1.3 Tipos de señales en las líneas telefónicas

Dentro de los sistemas telefónicos se producen tres tipos de señales principales:

- Señal del voz o "*Speech*": Caracterizada por segmentos de voz casi periódicos y pausas, es una señal dinámica a la cual se le aplica una frecuencia de muestreo estándar para telefonía de 8kHz (Hänsler,2004).
- Señal de ruido de fondo o "*background noise*" (Hänsler,2004): Se refiere al sonido proveniente del ambiente en el que se encuentra cada interlocutor, generalmente es estable con excepción de ruidos impulsivos (Waibel, 1990).
- Señal de eco: Al realizarse la interconexión para una llamada telefónica es necesario realizar una conversión de dos a cuatro hilos esto se debe a que un gran número de abonados están conectados a las troncales de la red telefónica. Los cuatros hilos permiten la comunicación bidireccional simultánea, durante una llamada telefónica, cuando el acoplamiento de la impedancia de la red se asemeja a la impedancia del circuito de dos hilos se realiza dicha conversión. La presencia del eco se debe que cuando se envían señales por una línea de transmisión se retorna parte de la misma debida a una reflexión de energía eléctrica. La causa más común es un desacoplamiento de impedancias de un híbrido de 4 a 2 pares de cables (Bellamy, 2000).

El eco presente durante una conversación telefónica puede clasificarse en dos tipos:

- Cuando solo ocurre una reflexión en el sistema se le llama eco primario, en inglés conocido como "*talker echo*", en la Figura 1.3 representado por la señal de eco de A. Este tipo de eco genera molestias al ser percibido por el receptor y es el más común (Bellamy, 2000 y Bigelow 1991).
- Cuando ocurre la segunda reflexión se denomina eco secundario, en inglés conocido como "*listener echo*" (Bellamy, 2000 y Bigelow 1991), mostrado en la Figura 1.3 como la señal de eco de B.

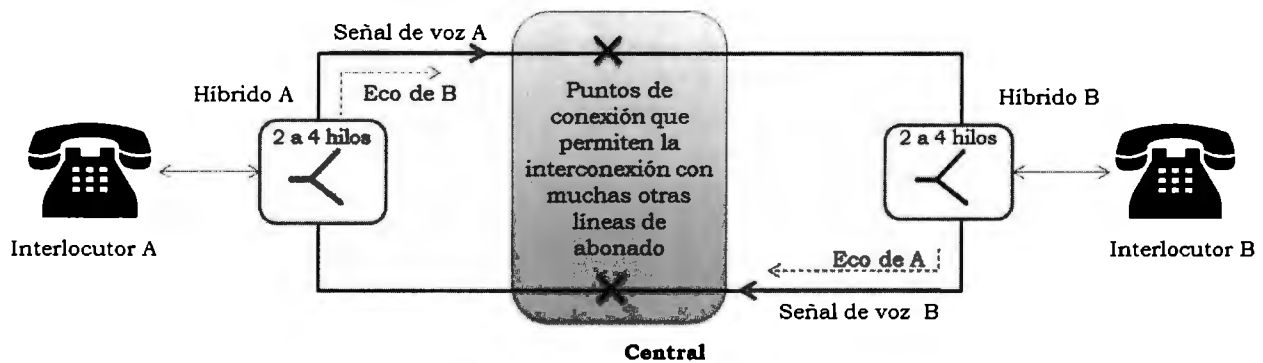


Figura 1.3 Señales de eco presentes en una llamada telefónica

Fuente: Adaptación de Saeed (2009) p.376 y Herrera (2004) p.38

La percepción del eco es dependiente de la magnitud de la señal de retorno y del retraso de misma (Members, 1971 y Huntley, 1953). El retraso tiene gran impacto y éste se incrementa a lo largo del circuito.

1.1.4 Posibles soluciones para disminuir el efecto del eco

Deben controlarse aquellas señales de eco que cuenten con un retraso mayor a 45 milisegundos, para lo cual se consideran dos tipos de controladores:

- Cancelador de eco
- Supresor de eco

El supresor de eco cuenta con un sensor que mide la potencia de la señal de voz en cada parte del circuito para poder disminuir la señal mediante controles hasta en 35dB típicamente al otro lado del circuito. Cuando el detector mide un valor mayor al del umbral predefinido esta señal es suprimida (Figura 1.4). El supresor de eco convierte un circuito bidireccional (*full duplex*), en uno unidireccional (*half duplex*), lo cual representa una desventaja para este tipo de control ya que podrían eliminarse segmentos de la conversación si el circuito no tiene tiempo para revertir las direcciones (Lee, 1993 y Murano, 1990).

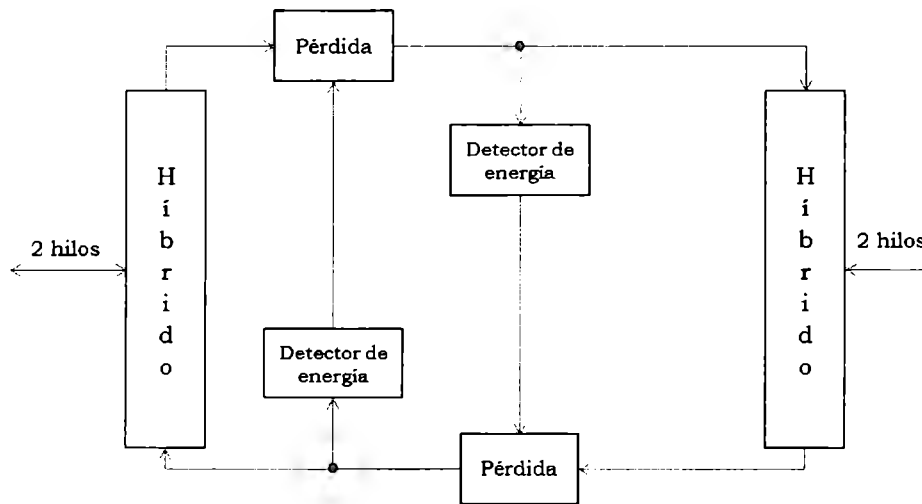


Figura 1.4 Circuito supresor de eco

Fuente: Bellamy, 2000 p. 40

El cancelador de eco emplea el principio de superposición que se refiere a la simulación de la trayectoria del eco para contrarrestar adecuadamente el retraso y atenuación de la señal transmitida y de esta forma eliminar la mayor parte de las componentes del eco. Es necesario entrenar el sistema para determinar el retraso y atenuación, Figura 1.5. Para el diseño de este controlador es necesario ubicar el cancelador de eco cercano a la fuente para maximizar sus efectos de cancelación.

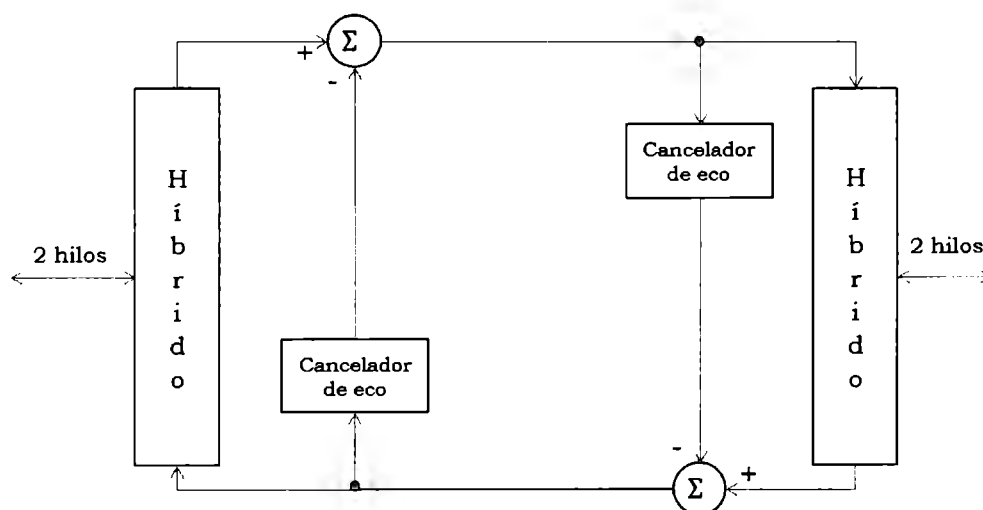


Figura 1.5 Circuito cancelador de eco

Fuente: Bellamy (2000) p. 41

Existen otros métodos para el control del eco los cuales incluyen el acoplamiento de impedancias de híbridos para reducir su magnitud, pero para su implementación se basan en los métodos antes mencionados. En la sección 2.3 se incluye la descripción de Canceladores Activos de Eco.

1.2 Escenarios de Eco

1.2.1 *Single Talk*

Este escenario se refiere cuando en una conversación sólo un interlocutor emite señal de voz y el otro permanece en silencio, por lo cual el eco generado será sobre esta señal de voz, como se muestra en la Figura 1.6 Señales de eco presentes en una llamada telefónica

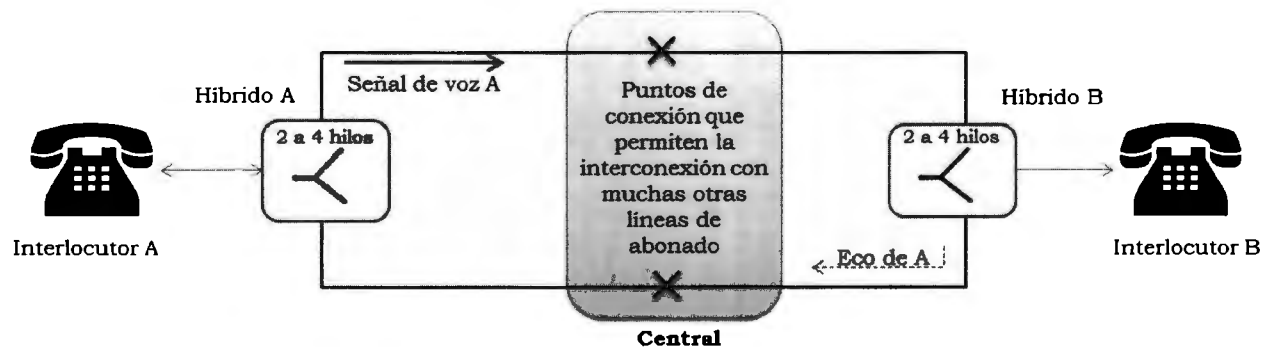


Figura 1.6 Señales de eco presentes en una llamada telefónica

Fuente: Adaptación de Saeed (2009) p.376 y Herrera (2004) p.38

1.2.2 *Double Talk*

Este escenario se refiere a la existencia de señales de voz por ambos interlocutores, lo cual se denomina "double talk" o "double says", este escenario cuenta con un 20% de probabilidad de ocurrencia (Sondhi, 1980). En este caso se produce una señal de eco para ambos interlocutores, Figura 1.3.

1.3 Estado del arte de canceladores de eco

Anteriormente se empleaban los supresores de eco que se empleaban para eliminar señales de eco presentes con un retraso menor a 100ms (Holman, 1966 y Richards, 1969). Con el avance de la tecnología satelital comercial para usos telefónicos, debido a las largas distancias, se incrementó el retraso de las señales aproximadamente de 500 a 600 ms (Sondhi, 1980) y los supresores de eco no son capaces de trabajar adecuadamente bajo estas características (Benesty, 2001).

El concepto de cancelación de ruido fue introducido por Thomson en 1878, aunque finalmente fue el sistema de cancelación de sonido basado en interferencia destructiva presentado y patentado por P. Lueg (1936). A partir de ello se han desarrollado distintas propuestas mediante el uso de canceladores adaptativos de eco, un ejemplo es el cancelador de eco con un filtro adaptativo digital presentado por Sondhi en 1966. A diferencia del supresor de eco este sistema permite conservar la bidireccionalidad del circuito (Lee, 1993 y Murano, 1990). Posteriormente se implementó el uso de filtros y algoritmos adaptativos empleando las soluciones de los filtros Wiener para la cancelación de eco (Widrow, 1975).

Posteriormente a la Cancelación de Eco se incorporó un detector de *double talk* para realizar el control de estas señales (Yoo, 1997 y Shi 2008), su principio de operación se basa en el monitoreo de la señal si se percibe el eco o la señal de *double talk* el sistema mantiene estáticos los coeficientes del filtro adaptativo durante su proceso. Lo anterior debido a que la mayoría de los algoritmos desarrollados no cuentan con la capacidad de distinguir entre ambas señales (Ye, 1991 y Gäsler, 1996), para evitar la divergencia del sistema. Esto aunado al largo periodo de decisión que se requiere representan las principales desventajas de este sistema (Jung, 2002). Es por ello que una de las principales aportaciones del proyecto es la actualización de los coeficientes del filtro aún en periodos de *double talk*.

Adicionalmente se han desarrollado diversos sistemas que permiten la cancelación de eco, aquellos que usan filtros adaptativos emplean en su mayoría detectores de *double-talk*, un ejemplo de ello es el trabajo presentado por Benesty (2006) en el cual se emplean filtros con multiretardos empleando el algoritmo *Least Mean Square*, sección 1.4, en su variante recursiva. En otras variantes de este algoritmo se han desarrollado trabajos para mejorar la respuesta de sistemas canceladores como lo son el trabajo presentado por Homana (2011) y Xu (2011).

Una tendencia mayoritaria para la cancelación de eco se refiere a la cancelación del eco acústico específicamente. Se han dado diversas soluciones a este problema como lo son el sistema propuesto por Loganathan (2011) para señales impulsivas o el uso de redes neuronales para disminuir la degradación de la señal proveniente de la fuente original (Bekrani, 2011).

Así mismo, se ha tratado el eco cuando éste toma características no lineales como el sistema propuesto por Mossi (2011), que divide los elementos para su procesamiento de forma lineal o no lineal dependiendo de sus características. Las aplicaciones incluyen el desarrollo de celulares (Ansari, 2010), videoteléfono (Fukui, 2009), mejoramiento en señales de televisión (Su, 2011).

Desde la perspectiva comercial se han desarrollado distintos canceladores de eco para su uso en redes de cableado terrestre, inalámbricas, VoIP y comunicaciones satelitales y por radio. Estos sistemas están configurados para capacidades predeterminadas, dependiendo del canal a utilizar. Algunas empresas que ofrecen estos productos son Orion Telecom Networks INC. quien abarca todos los canceladores mencionados y CISCO Systems y Polycom que cuentan con equipos para la cancelación de eco de VoIP.

1.4 Cancelación adaptativa de eco

1.4.1 Algoritmos adaptativos

El filtro adaptativo cuenta con un mecanismo iterativo que le permite ajustar sus propios parámetros en cada paso para obtener un funcionamiento óptimo, denominados algoritmos adaptativos (Haykin, 2004). Estos algoritmos modifican sus parámetros a partir de las condiciones de entrada, las cuales, son dinámicas en el tiempo.

Los algoritmos adaptativos son utilizados para permitir la convergencia del valor esperado, el cual permite analizar el desempeño del sistema (Kuo, 1996). El algoritmo adaptativo debe converger en régimen permanente hacia soluciones óptimas, en caso de existir perturbaciones el sistema debe ser capaz de recuperarse y regresar a un estado estable en un tiempo mínimo (Riera, 1986).

El sistema está compuesto por el filtro transversal $W(z)$, la planta $P(z)$ y la señal de entrada $x(n)$ que es procesada por ambos dando una salida resultante representada por $e(n)$, lo anterior se muestra en la Figura 1.7.

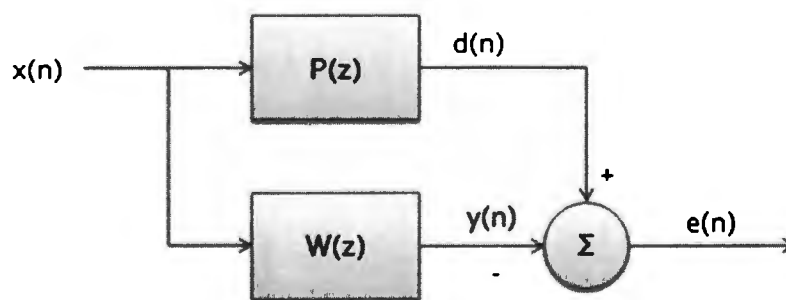


Figura 1.7 Filtro Transversal

Fuente: Celis, 2008 pp. 12

La relación de la salida con respecto a las señales que la conforman se encuentra expresada en la ecuación (1.1).

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (1.1)$$

Donde:

$e(n)$: error estimado por el filtro

$d(n)$: respuesta deseada

$y(n)$: salida del procesamiento del filtro

El algoritmo *Least Mean Square* (LMS) emplea un paso constante α . Este tamaño de paso está relacionado con el error de salida en el algoritmo $e(n)$ y la rapidez de adaptación del filtro que permite la convergencia del sistema.

Los sistemas que emplean filtros convencionales de LMS cuentan con gran estabilidad, aunque en la práctica presentan deficiencias ocasionadas por señales no estacionarias e impulsivas presentes en el ambiente (Celis 2008).

Adicionalmente existen diversas variaciones del algoritmo LMS, una de ellas es el Algoritmo LMS Normalizado NLMS el cual cuenta con un factor que controla la estabilidad y velocidad de convergencia, es por ello que elimina la dependencia con la potencia de la señal de entrada (Casco, 1997). Existen algoritmos de paso variable como lo son VSLMS (*Variable Step LMS*) en los cuales el tamaño de paso es variable lo que está relacionado con la salida (Casco, 1997). El algoritmo LMS se presenta más detallado en el siguiente capítulo.

1.4.2 Análisis y selección

Para el caso del análisis y selección de un algoritmo adaptativo debe considerarse el uso de un filtro Wiener. El cual depende de la respuesta al impulso la cual puede ser finita, es decir, filtros FIR (por sus siglas en inglés) o infinita Filtros IIR (por sus siglas en inglés) y los criterios evaluados para determinar la optimización y desempeño.

Los filtros FIR al someter una señal de impulso como entrada obtienen un número limitado de términos distintos a cero, tras cierto número de intervalos de muestras este filtro converge a cero, en comparación con los filtros IIR que continúan indefinidamente (López, 2010).

Debido a su estructura los filtros FIR son incondicionalmente estables por lo que son empleados en el filtrado adaptable, por lo cual éste fue seleccionado para su implementación en este proyecto. La forma más sencilla es el filtro transversal mostrado en la Figura 1.8 (Haykin, 1984).

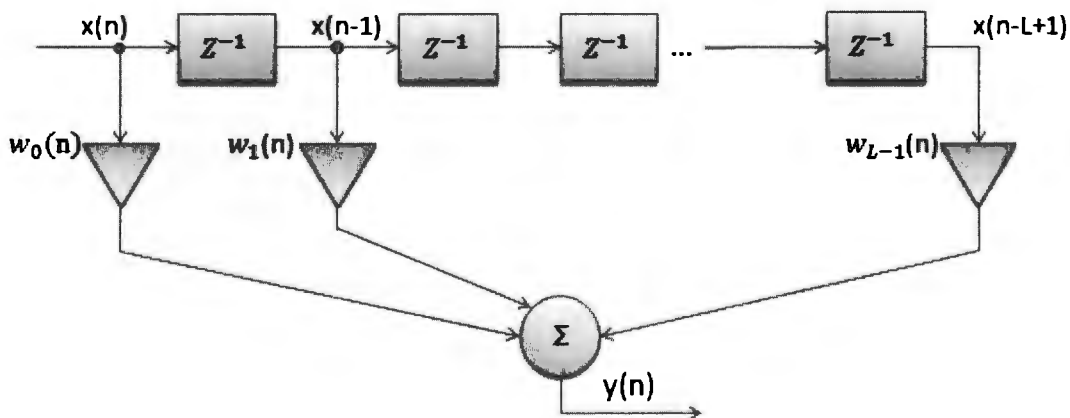


Figura 1.8 Filtro Transversal FIR

Fuente: Casco, 1997 pp. 20

El filtro transversal cuenta con una serie de retardos Z^{-1} , una serie de multiplicadores $w_k(n - k)$ y un sumador, donde el número total de elementos de retardo están definidos por el orden del filtro, es decir, $L - 1$. Cada multiplicador del filtro produce una versión escalar del producto interior de cada coeficiente del filtro $w_l(n)$ y la entrada relacionada $x(n - l)$.

La salida puntualizada de este filtro está definida por la ecuación (1.2), esta ecuación se denomina convolución finita ya que representa la respuesta al impulso finita del filtro $w_1(n)$ en convolución con la entrada del filtro $x(n)$ para producir $y(n)$ (Betancourt, 2007).

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l) \quad (1.2)$$

Esta estructura transversal tiene valores anteriores a la misma entrada, en instantes diferentes por medio de los retardos existentes, por lo que la señal de entrada está definida por la ecuación (1.3), los coeficientes de dicho filtro están definidos por la ecuación (1.4).

$$x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T \quad (1.3)$$

$$w(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{L-1}(n)]^T \quad (1.4)$$

En contraste los filtros IIR son recursivos y al tener una entrada de impulso tiene un número ilimitado de términos no nulos y debido a la retroalimentación no regresa al estado de reposo. Es de gran importancia evitar la inestabilidad que pueden generar los polos de retroalimentación, lo anterior es una desventaja para su implementación (López, 2010).

Se seleccionó el uso de filtros con respuesta al impulso finito (FIR) ya que estos filtros son estables. Adicionalmente deben considerarse los siguientes factores: la rapidez de convergencia del algoritmo y el tamaño de paso a emplear. Lo anterior se debe a que una rápida convergencia en el algoritmo implica un error de salida grande y un tamaño de paso menor requiere de un tiempo mayor de procesamiento (Haykin, 1984). Algunos algoritmos disponibles para estos fines fueron presentados por Sondhi en el 2001, uno de ellos el LMS que presenta simplicidad, precisión y poder de procesamiento razonables. Por ello se utilizará el algoritmo LMS con el uso de un filtro FIR de estructura transversal, descritos a profundidad en el capítulo siguiente.

Capítulo II

Panorama General de la Cancelación Activa de Ruido

2.1 Filtros adaptativos

El uso de filtros adaptativos se debe a la no linealidad del sistema en cuestión, así como la variación de los parámetros del sistema con el tiempo como perturbaciones aplicadas en el sistema (Haykin, 2004). Están diseñados para modificar el contenido espectral de una señal de entrada de forma específica (Celis, 2008).

2.1.1 Filtros Wiener

Los filtros Wiener son aquellos filtros lineales óptimos de tiempo discreto, los cuales, permiten la estimación de las variables de estado en sistemas de tiempo continuo (Ollero, 1991), tal y como se muestra en la Figura 2.1.

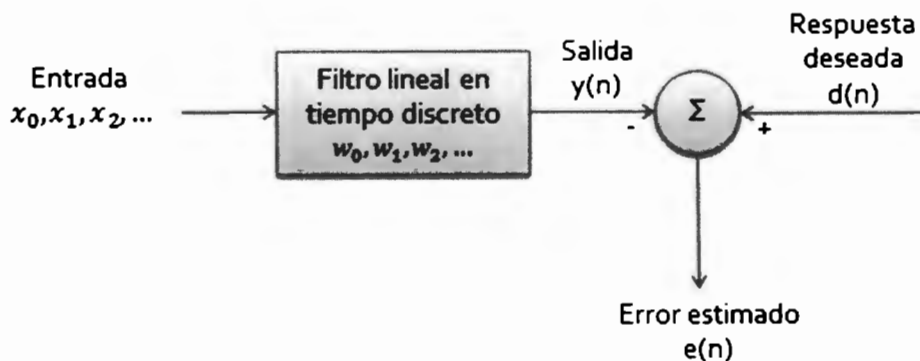


Figura 2.1 Diagrama de Bloques de un Filtrado estadístico

Fuente: Haykin (1984), pp.195

El error estimado $e(n)$ depende de la salida $y(n)$, resultado del procesamiento de la entrada por el filtro lineal en tiempo discreto, y de la respuesta deseada $d(n)$. Lo anterior permite obtener una estimación del error respecto a la respuesta deseada $d(n)$ (López, 2010). Dicha relación está representada en la ecuación (2.1).

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.1)$$

Donde:

$e(n)$: error estimado por el filtro Wiener

$d(n)$: respuesta deseada

$y(n)$: salida del procesamiento del filtro Wiener

El objetivo de los filtros Wiener es hacer el error estimado lo más pequeño posible en sentido estadístico. Estos filtros son lineales lo que permite un análisis matemático más sencillo, así mismo, operan en tiempo discreto lo que permite realizar su implementación mediante el uso de hardware y software digital (Betancourt, 2007).

Se emplea la notación matricial para estos filtros, de lo cual se define la matriz de autocorrelación \bar{R} para los valores de entrada, la cual se expresa en la ecuación (2.2) y está conformada por $L - 1 \times L - 1$ términos.

$$\bar{R} = E[\bar{x}(n) \bar{x}^T(n)] \quad (2.2)$$

A partir de ello se define el vector de correlación cruzada \bar{p} entre la entrada $x(n)$ y la señal deseada $d(n)$, ecuación (2.3).

$$\bar{p} = E[d(n)x(n)] \quad (2.3)$$

Así mismo puede reescribirse la ecuación (2.2) como la ecuación (2.4) considerando que \bar{w}_0 es el vector de pesos óptimo de $L \times 1$ valores del filtro transversal de la figura 1.8.

$$\bar{R}w_0 = \bar{p} \quad (2.4)$$

Para dar solución a la ecuación anterior se consideran las siguientes características para la matriz de autocorrelación \bar{R} (Haykin, 1989 y Haykin, 1996):

- Es una matriz real
- Se define como una matriz positiva, donde todos sus elementos son simétricos y reales.

2.1.2 Algoritmo *Least Mean Square*

Dentro de la Cancelación Activa de Ruido existe una gran variedad de algoritmos que permiten al sistema converger en el valor esperado. Uno de ellos es el LMS (*Least Mean Square*) que en su versión más simple cuenta con una señal de referencia $x(n)$. Dicha señal es procesada con un filtro adaptable $W(z)$, en el cual los coeficientes se actualizan a partir de los coeficientes obtenidos más un gradiente de la potencia de la señal de error $e(n)$ que se genera, mostrado en la ecuación (2.5).

$$\bar{w}(n+1) = \bar{w}(n) - \frac{\mu}{2} \bar{\nabla} \xi(n) \quad (2.5)$$

Donde:

μ : es el factor de convergencia que controla la estabilidad del sistema, así como la tasa de descenso hacia el fondo de la superficie.

$\frac{\mu}{2} \bar{\nabla} \xi(n)$: es el vector gradiente de estimación de error con respecto a $\bar{w}(n)$

El error medio cuadrático (MSE) está representado por la ecuación (2.6), el cual representa una cantidad real positiva.

$$\xi(n) = E[e^2(n)] \quad (2.6)$$

Sustituyendo la ecuación (1.2) en (2.1) y considerando la ecuación (1.4) se obtiene la ecuación (2.7),

$$e(n) = d(n) - w^T x(n) \quad (2.7)$$

entonces, se obtiene la ecuación (2.8)

$$\nabla e(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial w_i} = -x(n) \quad (2.8)$$

Considerando el método de descenso pronunciado del MSE, donde su superficie está definida por la Figura 2.2, para más detalles consultar (Saeed, 2009).

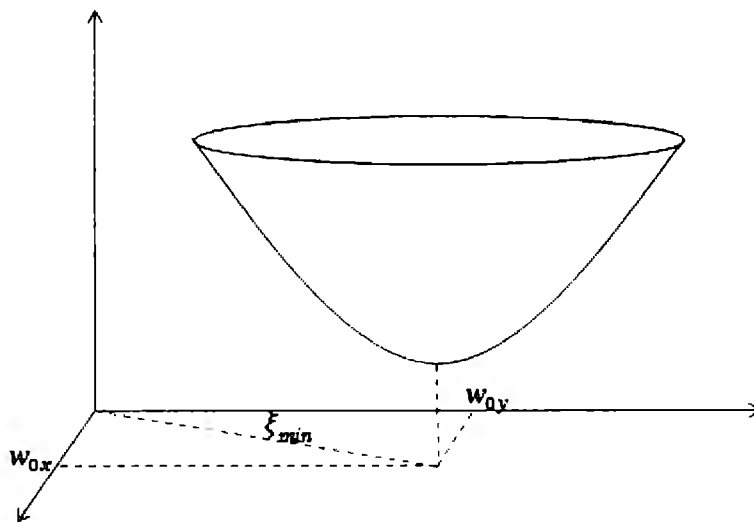


Figura 2.2 Superficie del Mean Square Error

Fuente: Hansen (2001)

Lo cual expresa la función $\xi(n)$ para obtener coeficientes Wiener óptimos, se puede obtener la ecuación (2.9) para su análisis (Widrow, 1970).

$$w(n + 1) = w(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \xi(n) \quad (2.9)$$

Donde:

$w(n + 1)$: valor de vector w en el tiempo $n + 1$

μ : tamaño de paso con valor positivo, controla la estabilidad y tasa de descenso al fondo de la superficie.

—: incremento en dirección negativa del vector del coeficiente

$\frac{1}{2}$: factor empleado para simplificar

$\nabla \xi(n)$: gradiente de la superficie de error

El gradiente estimado del algoritmo LMS es muestra de un solo error cuadrático del cual se obtiene la ecuación (2.10):

$$\nabla \xi(n) = 2[\nabla e(n)e(n)] \quad (2.10)$$

Sustituyendo la ecuación (2.8) en (2.10) se obtiene la ecuación (2.11)

$$\nabla \xi(n) = -2x(n)e(n) \quad (2.11)$$

Al sustituir la ecuación (2.11) en (2.9) se obtiene un algoritmo simple representado por la ecuación (2.12). Se dice que el sistema gradiente $\nabla \xi(n)$ converge cuando toma el valor de cero. Dicho algoritmo entrega un alto desempeño en el proceso de adaptación pero depende de μ para controlar la estabilidad y velocidad de convergencia del sistema (Popularikas, 2006).

$$w(n + 1) = w(n) + \mu x(n)e(n) \quad (2.12)$$

En la literatura (Kuo, 1996), se presenta como criterio estadístico el MSE (*Mean Square Error*) para encontrar el punto de convergencia del sistema. Este algoritmo presenta una relación de segundo orden con respecto a la función del costo y los valores del coeficiente del

filtro. Así mismo evita valores negativos del mismo y permite la existencia de un solo mínimo que caracteriza la función (Betancourt, 2007).

La efectividad de un sistema cancelador de eco es medida con respecto al ERLE (*Echo Return Loss Enhancement*) la cual se expresa en la ecuación (2.13).

$$ERLE = 10 \log \left\{ \frac{E[f^2(n)]}{E[g^2(n)]} \right\} \quad (2.13)$$

Donde:

$f(n)$: es la señal deseada

$g(n)$: es la señal de salida del eco residual.

Algunos aspectos que afectan el ERLE son el tamaño de paso μ y la longitud de los filtros adaptativos, así como el contenido espectral de la señal de prueba. Si se incrementa el orden de los filtros puede obtenerse una mejora con respecto a este parámetro. El tamaño de paso μ controla la velocidad de convergencia y estabilidad del algoritmo (López, 2010).

Para el presente proyecto se considerará que $f(n)$ es la señal posterior a la planta que se desea cancelar $d(n)$ y $g(n)$ es la señal de eco residual más la señal de voz correspondiente al segundo interlocutor $e(n)$. Debido a lo anterior se reescribe la ecuación (2.13) como la ecuación (2.14), el sistema se describe en el capítulo siguiente.

$$ERLE = 10 \log \left\{ \frac{E[d^2(n)]}{E[e^2(n)]} \right\} \quad (2.14)$$

2.2 Sistemas de Cancelación Activa de Ruido

Existen tres tipos de sistemas canceladores Activos de Ruido: el sistema *feedforward*, *feedback* y el sistema híbrido que está compuesto por los sistemas anteriores. Estos sistemas están

compuestos por filtros adaptables que a partir de micrófonos de referencia analizan las señales de entrada para procesarlas mediante un algoritmo que elimina ciertas componentes de la señal de ruido.

2.2.1 Sistema *Feedforward*

Este sistema denominado como identificador, mostrado en la Figura 2.3, es un sistema de Cancelación Activa de Ruido Acústico para un ducto. En este sistema se cuenta con una fuente emisora de ruido en un extremo así como un micrófono de referencia que transmite la señal detectada al módulo de Cancelación Activa de Ruido Acústico. Este módulo suma dicha señal con la señal producida por el micrófono de error para transmitirla por medio de la bocina de cancelación. Lo anterior genera que el micrófono de referencia detecte tanto la señal primaria como la generada por el micrófono de error.

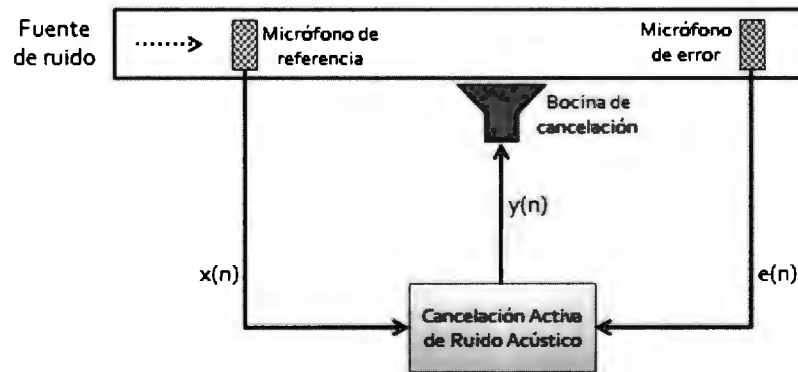


Figura 2.3 Diagrama de Bloques de un Filtrado estadístico

Fuente: Betancourt (2008), pp.28

Cuando este sistema se emplea en el dominio acústico es necesario considerar el efecto de la retroalimentación acústica que se define como el retraso existente al realizar una conversión acústica a digital o viceversa, para contrarrestar este efecto deben adicionarse bloques adicionales que compensen esta función que "incluye un convertidor digital-analógico, filtro de reconstrucción, amplificador de potencia, bocina, preamplificador y convertidor analógico-digital" (Celis, 2008). La efectividad de dicho controlador está medida por el sensor

de error que al producir una señal que permite al algoritmo ajustar los valores de forma tal que el error del micrófono se minimice.

La representación de un sistema con retroalimentación acústica mediante un diagrama de bloques se muestra en la Figura 2.4, su representación en transformada Z se muestra en la ecuación (2.15).

$$E(z) = D(z) - Y(z) \quad (2.15)$$

En la Figura 2.4 $W(z)$ es el Filtro Digital el cual actualiza sus coeficientes debido a la retroalimentación del error $e(n)$.

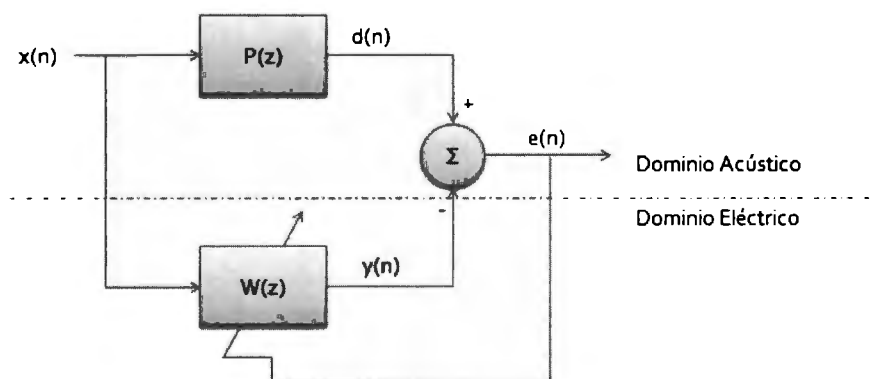


Figura 2.4 Diagrama de bloques de un filtro transversal con identificación del dominio acústico y eléctrico

Fuente: Bermejo (2005), pp.5

A partir de ello el filtro adaptativo $W(z)$ será igual a la señal producida por la planta $P(z)$ y la salida del filtro adaptable $y(n)$ será idéntica a la señal deseada $d(n)$, esto resulta en una cancelación completa de ambas señales por el principio de superposición (Bermejo, 2005). Sustituyendo las trayectorias de la entrada se obtiene la ecuación (2.16).

$$E(z) = P(z)X(z) - W(z)X(z) \quad (2.16)$$

En caso de que el sistema converja $E(z) = 0$ surge la ecuación (2.17) (Betancourt, 2010).

$$P(z) = W(z) \quad (2.16)$$

El sistema *feedforward* está representado mediante un diagrama de bloques en la Figura 2.5. Para este sistema se considera el efecto de la retroalimentación acústica $S(z)$ de forma tal que el filtro $W(z)$ es actualizado en base a los coeficientes de error e e incluye un módulo adicional $F(z)$ que se refiere a la función de transferencia de la trayectoria de retroalimentación de la salida de $W(z)$.

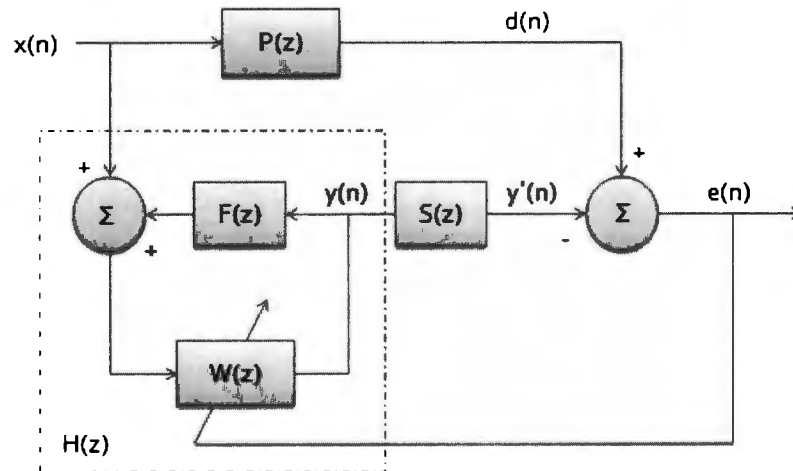


Figura 2.5 Diagrama de bloques de un sistema *feedforward* considerando retroalimentación acústica

Fuente: Bermejo (2005), pp.5

Para efectos del presente trabajo no se empleará el uso de la retroalimentación acústica debido a que el escenario a tratar y condiciones del mismo para la cancelación, se realizan en el dominio eléctrico.

Estos sistemas tienen mejores resultados, comparados con los *feedback*, en la reducción de la respuesta en estado estable de las señales de entrada (Hansen, 2006).

Para la neutralización de la retroalimentación acústica existen diversas alternativas (Akhtar, 2007 , Kuo,1996 & Zahid,2009) , las cuales, son de costo elevado y con resultados limitados:

- Uso de filtros fijos de neutralización con estimación fuera de línea
- Neutralización activa
- Uso de sensores de referencia no acústicos
- Micrófonos y bocinas direccionales con ubicación específica y ajustada dentro del sistema

2.2.2 Sistema *Feedback*

Este sistema denominado como predictor, mostrado en la Figura 2.6, el cual está conformado por un sensor de error y una fuente secundaria en el medio acústico. En el diagrama de bloques de este sistema, también conocido como retroalimentado, se emplea la estimación del error para modificar los coeficientes del filtro adaptativo (Betancourt, 2008).

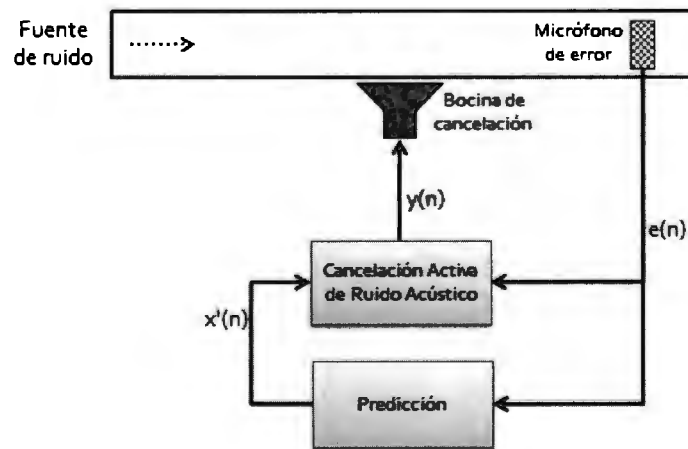


Figura 2.6 Diagrama de Bloques de un sistema *feedback* en un ducto acústico.

Fuente: Betancourt (2008), pp.28

En este sistema se requiere estimar una señal propia de referencia la cual se predecirá a partir de la interacción de la señal de salida con el filtro adaptativo $W(z)$, quien a su vez genera

una señal $y(n)$ que se asemeja a la señal de referencia. Una vez generada la señal $y(n)$, ésta se resta a la señal deseada $d(n)$ y por efecto de superposición se realiza la cancelación de ambas señales y reducir la señal de error $e(n)$, lo anterior se muestra en la Figura 2.7.

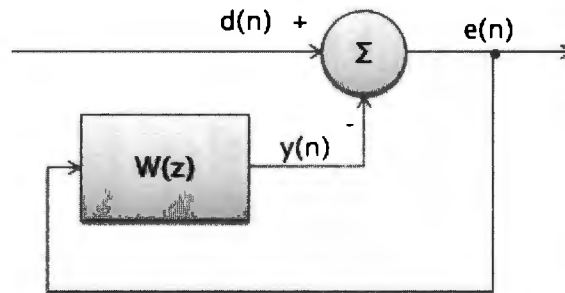


Figura 2.7 Diagrama de Bloques de un sistema *feedback*

Fuente: Betancourt (2008), pp.28

Estos sistemas se emplean para reducir el ruido de bajas frecuencias (menores a 500Hz) de 10 a 15 *dB* principalmente en cabinas de aviones y audífonos (Kuo, 1996). La estabilidad de este sistema depende del retraso de la señal secundaria al sensor de error, lo anterior ocasiona que sólo puedan cancelarse completamente señales periódicas (Celis, 2008). Es por ello que estos sistemas tienen mejores resultados, comparados con los *feedforward*, en la reducción de la respuesta transitoria de las señales de entrada (Hansen, 2006). Una limitación de este sistema es que añade ruido en la banda de frecuencia media (McKinley, 1993 & Ward, 1997). El funcionamiento del controlador *feedback* puede oscilar o convertirse inestable cuando se emplean ruidos de alta frecuencia (Hansen, 2006).

2.2.3 Sistema híbrido

Un sistema híbrido está compuesto tanto por un sistema identificador (*feedforward*) como por un sistema predictor (*feedback*), mostrado en la Figura 2.8.

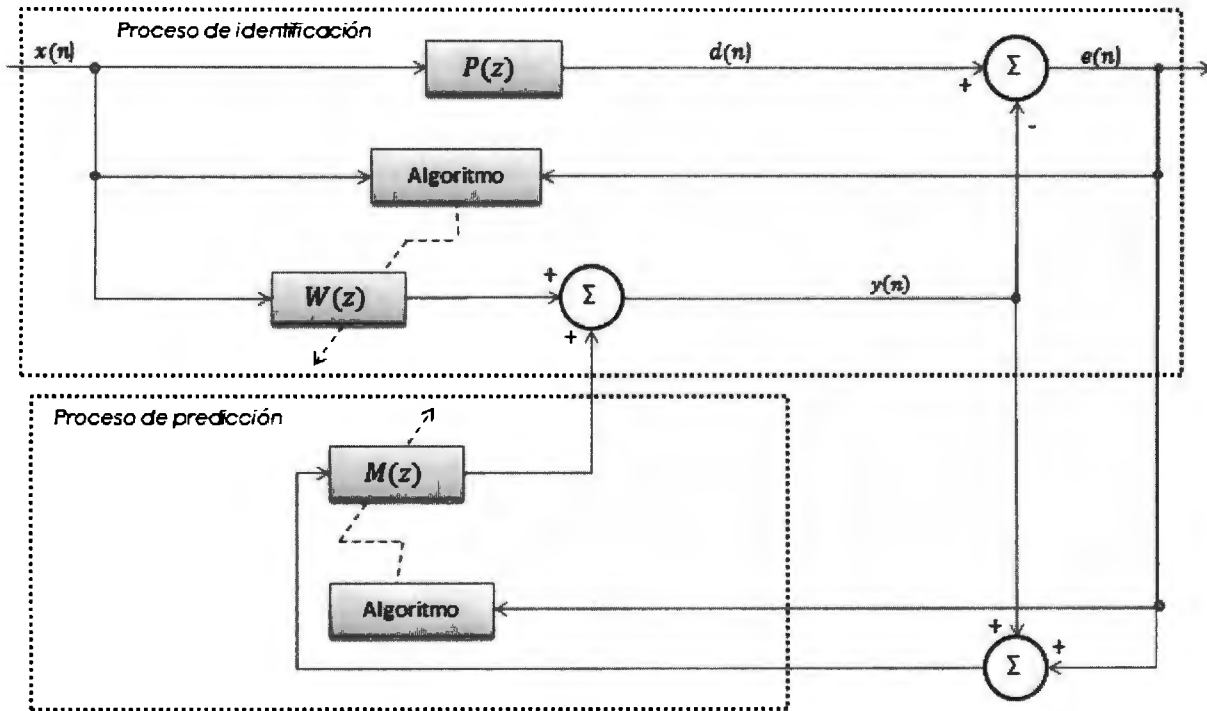


Figura 2.8 Diagrama de Bloques de un sistema híbrido

Fuente: López (2010)

Este sistema incorpora dos micrófonos de referencia: uno asociado a la fuente primaria (correspondiente al sistema *feedforward*), y otro a la señal residual de error (correspondiente al sistema *feedback* y *feedforward*). Este sistema se muestra en la Figura 2.9.

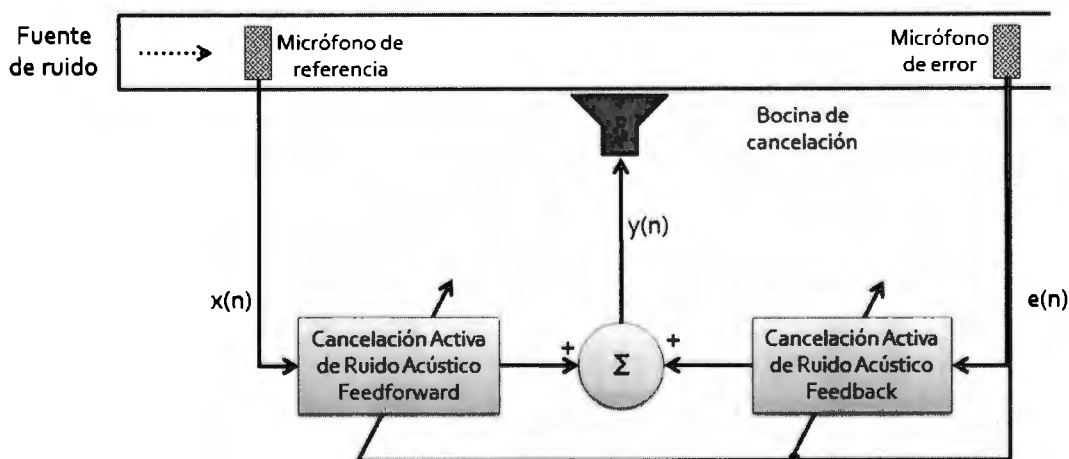


Figura 2.9 Proceso de Cancelación Activa de Ruido Acústico de un sistema híbrido en un ducto Acústico

Fuente: Betancourt (2008), pp.28

Este sistema incorpora la etapa del identificador relacionado con el micrófono de referencia y la señal de error $e(n)$, esta etapa permite atenuar las componentes de banda angosta de la fuente primaria de ruido. La señal de salida del sistema ajusta los coeficientes del filtro adaptativo de cada sistema.

La presencia de retroalimentación acústica degrada el funcionamiento del sistema de Cancelación Activa de Ruido, algunos métodos para reducir este efecto (Kuo, 1996) son:

- Micrófonos y bocinas direccionales
- Dos micrófonos de referencia
- Sensores de referencia no acústica

2.3 Aplicaciones de Cancelación Activa de Ruido

La complejidad del campo del sonido, la dificultad de registrar señales de referencia previas al ruido en el sistema de control y las características propias de las señales se han traducido en un problema complejo en especial cuando esto es en espacio abierto. Los resultados exitosos principales en escenarios de estas características son principalmente con el fin de cancelar señales periódicas (Hansen, 2001).

En espacios semicerrados como por ejemplo un ducto, permite que al ser caracterizado el ducto pueda lograrse la cancelación de señales no sólo periódicas sino señales no periódicas de baja frecuencia donde no se pueden emplear elementos pasivos o es muy costoso (Kuo, 1999).

Para los espacios completamente cerrados pueden cancelarse con mayor facilidad las señales no deseadas a través del principio de superposición de forma más efectiva (Hansen, 2001). Algunos desarrollos de sistemas canceladores fueron desarrollados por Burgess (1981) y por Warnaka (1981).

Los sistemas de Cancelación Activa de Ruido requieren la integración de múltiples disciplinas como la acústica, el procesamiento de señales y la vibración (Shoureshi, 1994) que requieren del uso de canceladores preferentemente digitales para realizar el muestreo, procesamiento y en tiempo real. Algunas de las aplicaciones que se han desarrollado se ubican en los siguientes campos (Kuo, 1999, Song 2005):

- **Automóviles:** para ruidos mecánicos en los sistemas de inducción, cabina de pasajeros y motor
- **Elementos industriales:** incluyen ductos, chimeneas, transformadores, etc.
- **Transportes:** control de sonidos en cabinas de aviones, botes, motocicletas entre otros
- **Electrodomésticos:** lavavajillas, refrigeradores, extractores de cocina, etc.
- **Audífonos**

Los sistemas activos de control tienen un gran costo de implementación, lo cual se ha visto reflejado en el reducido número de aplicaciones comerciales en la actualidad, así como una gran exigencia en el entendimiento de quien lo desarrolla e instala (Celis, 2008).

2.4 Cancelación de eco

Los canceladores acústicos de eco son elementos importantes para la transportación y recepción en los sistemas de voz. Su función es identificar el eco entre las terminales y removerlo del sistema.

La cancelación acústica de eco (*Active Echo Cancellation*) cuenta con dos problemas principales:

- La identificación de la señal de eco

- La adaptación del detector de *double-talk* (*Double Talk Detector*, DTD por sus siglas en inglés) de manera efectiva que garantice la convergencia del sistema (Benesty, 2006)

El sistema que incluye el DTD y los filtros adaptativos, que emplean algoritmos de procesamiento, se muestra en la Figura 2.10.

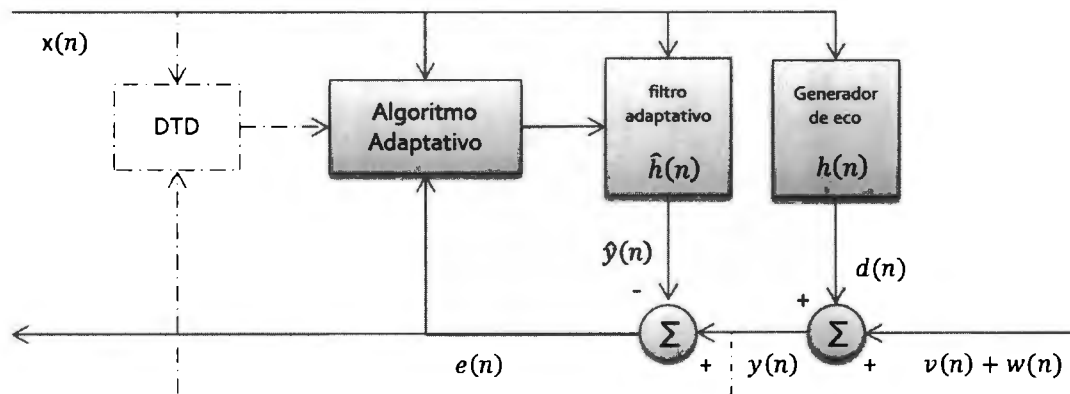


Figura 2.10 Filtro adaptativo y DTD en una aplicación de AEC

Fuente (Benesty, 2006). pp. 1633

Donde:

$x(n)$: se refiere a la suma de la señal que originará eco

$v(n)$: se refiere a la señal de voz

$w(n)$: ruido del ambiente

$y(n)$: es la suma de la señal de eco con la señal de voz y el ruido del ambiente

$d(n)$: es la señal de eco presente en el sistema

$h(n)$: es la planta que genera el eco

$\hat{h}(n)$: es el filtro adaptativo

$\hat{y}(n)$: se refiere a la señal generada por el algoritmo con el fin de cancelar el eco acústico

$e(n)$: es la salida del sistema

Para evitar que el sistema deteriore la señal $v(n)$ por el efecto de superposición, el sistema detiene el proceso de estimación cuando el DTD detecta esta señal. Lo anterior implica que no se actualizan los coeficientes ni actúen el algoritmo y filtros adaptativos; es necesaria la detección rápida y exacta para implementar adecuadamente este sistema (Oka, 2008).

Capítulo III

Sistema propuesto

3.1 Descripción del escenario de análisis

Para el presente proyecto se simulará un sistema de Control Activo de Ruido empleando un sistema de cancelación híbrida de ruido. Para ello se parte de la premisa de que ambas señales de entrada $x(n)$, señal correspondiente al primer interlocutor (*near-end*), y $d_{in}(n)$, señal correspondiente al segundo interlocutor (*far-end*), pueden estar presentes en el sistema tanto individual como simultáneamente. Se considera que el escenario principal es un sistema que cuenta con dos señales, preferentemente de voz, lo cual se denomina efecto de *double-talk* (Figura 3.1c). Cuando solo existe una única que representa *single-talk* (Figura 3.1a y b). Se consideraron para el análisis, señales tanto señales de voz como señales con otras características, pero conservando la frecuencia de muestreo a 8000Hz.

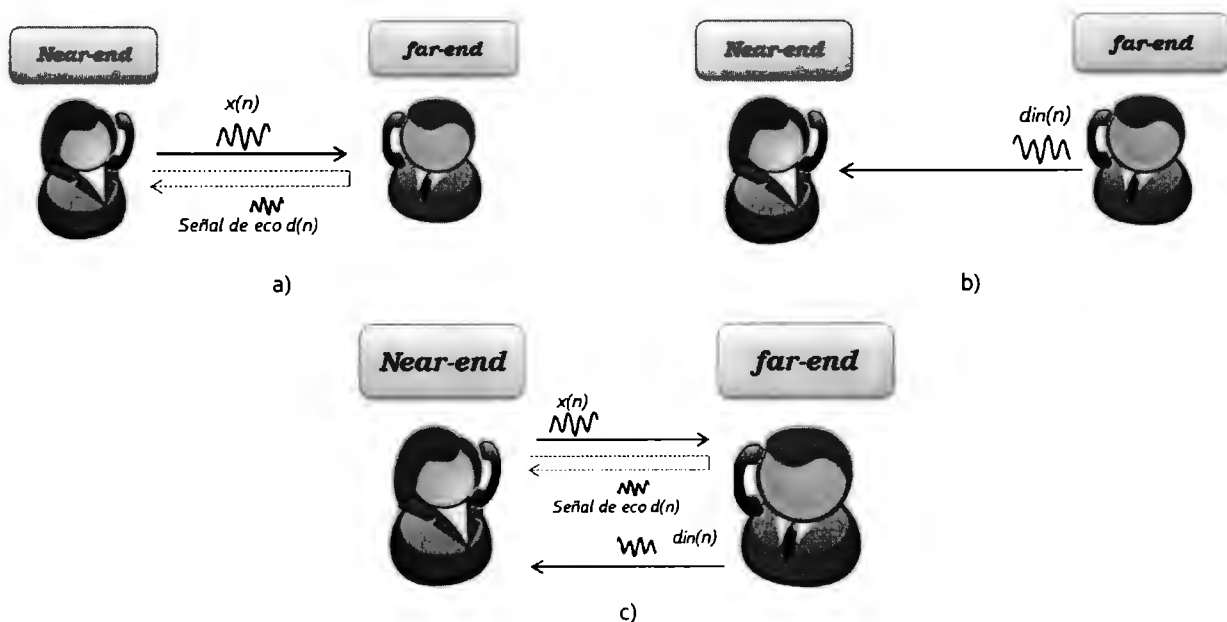


Figura 3.1 Escenarios de eco en una llamada telefónica

- a) *Single Talk* con señal de entrada exclusivamente en el *near-end* b) *Single Talk* con señal de entrada exclusivamente en el *far-end* c) *Double Talk* con señal de entrada en *near-end* y *far-end*

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama correspondiente al escenario con generación de eco únicamente para la señal de voz del interlocutor A y en el cual el interlocutor B puede generar también su señal de voz, representación genérica de la Figura 3.1c. Para tratar el eco del interlocutor B que este mismo pudiera escuchar debe implementarse un sistema híbrido de Cancelación Activa de Eco para eliminarlo.

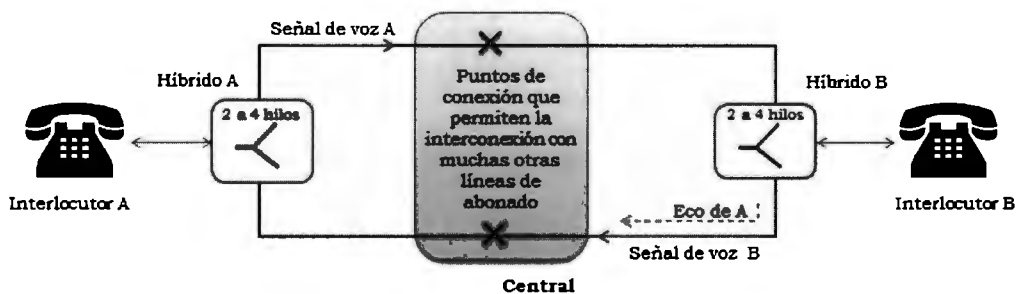


Figura 3.2 Descripción del escenario propuesto

Fuente: Adaptación de Saeed (2009) p.376 y Herrera(2004) p.38

Para las pruebas realizadas únicamente se considerará el escenario de *double-talk* para las pruebas, ya que este escenario es el que representa de forma más precisa una conversación telefónica real, Figura 3.1c y Figura 3.2. El escenario correspondiente a la Figura 3.1a es considerado para el entrenamiento del sistema ya que presenta únicamente la señal de entrada en el *near-end* y se genera el eco de dicha señal. La Figura 3.1b no es considerada en este trabajo ya que no presenta señal de eco desde la perspectiva del interlocutor A o *near-end*.

3.2 Incorporación del sistema híbrido de Cancelación Activa al problema del eco

Para el efecto del presente trabajo se modificó la propuesta presentada por Celis en 2008, figura 2.10, en la cual se presenta un modelo híbrido de Cancelación Activa de Ruido Acústico con retroalimentación acústica y estimación de trayectoria secundaria.

El sistema propuesto, mostrado en la Figura 3.3, está conformado por una estructura híbrida pero con cancelación en el dominio eléctrico, debido a esto no existe retroalimentación acústica ni estimación de trayectoria secundaria. Cuenta con una señal de entrada $x(n)$ la cual al ser afectada por la planta $P(z)$ se transforma en una señal de eco $d(n)$. La planta considerada para este diseño replica el efecto del eco, generado por el desacoplamiento de 2 a 4 hilos presente en la red telefónica. Adicionalmente se conservan ambos filtros adaptativos $W(z)$ y $M(z)$, correspondientes al sistema *feedforward* y *feedback* respectivamente y se incorporó una señal de entrada $d_{in}(n)$ correspondiente al segundo interlocutor (*far-end*). La señal creada por el sistema híbrido $\hat{d}(n)$, semejante a la señal de eco, está conformada por la suma de la señal proveniente del sistema *feedforward* $\hat{y}(n)$ y por la del sistema *feedback* $y_p(n)$. El sistema se retroalimenta con la señal de salida $e(n)$ para poder ajustar los coeficientes de $W(z)$ y $M(z)$, esta señal se asemeja a la señal del segundo interlocutor $d_{in}(n)$.

Se considera que las señales de voz están normalizadas. Una desventaja del sistema *feedback* es que la señal de entrada en el *far-end* $d_{in}(n)$ y la señal resultante de la planta $d(n)$ están altamente correlacionadas lo cual ocasiona la cancelación de la señal $d_{in}(n)$ aun cuando el sistema ya convergió, lo que se refleja como una distorsión en la señal de salida (Zahid, 2009). Es por ello que para el sistema desarrollado en caso de que el efecto del sistema *feedback* $y_p(n)$ supere el valor máximo de las señales de entrada, el interruptor se desconecta e interrumpe el paso de la salida proveniente del sistema predictor y de esta forma sólo permanece el sistema identificador.

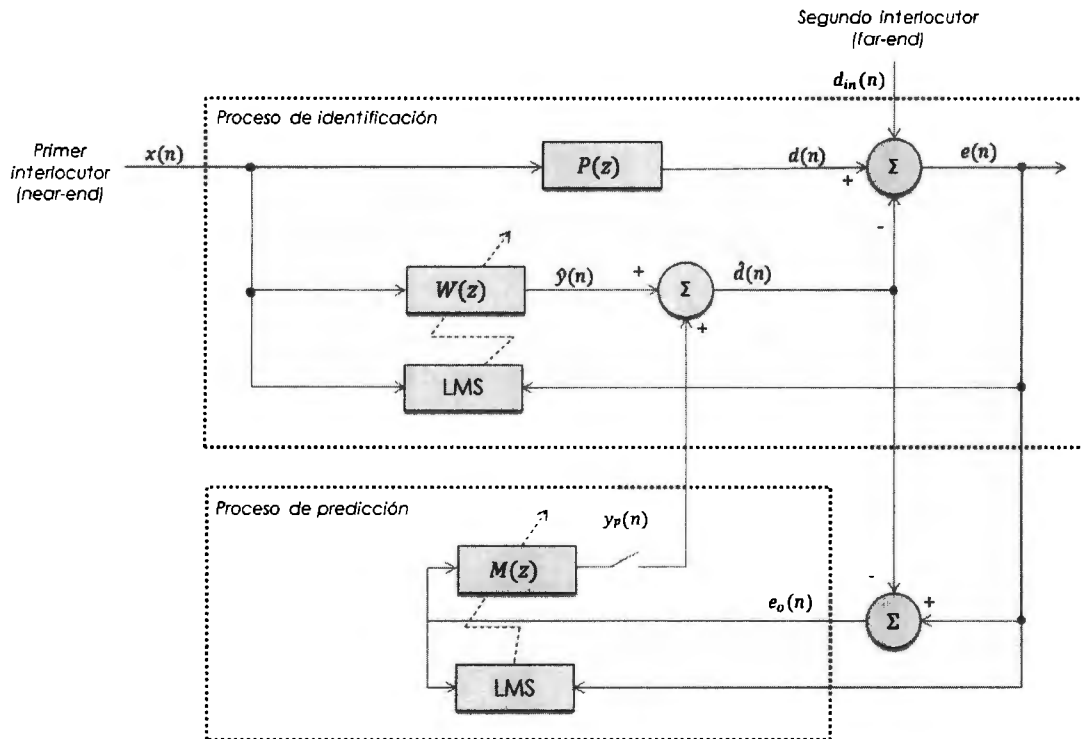


Figura 3.3 Sistema híbrido propuesto para la Cancelación Activa de Eco Para redes telefónicas, con presencia de dos interlocutores (*double-talk*)

Donde:

$x(n)$: señal que originará eco, preferentemente una señal de voz

$d(n)$: es la señal de eco presente en el sistema

$d_{in}(n)$: señal de entrada correspondiente al segundo interlocutor

$e(n)$: salida del sistema con características similares a d_{in} , retroalimenta tanto al predictor como al identificador

$e_o(n)$: señal que retroalimenta tanto al predictor

$P(z)$: es la planta que genera el eco

$W(z)$: es el filtro adaptativo correspondiente al sistema *feedforward*

$M(z)$: es el filtro adaptativo correspondiente al sistema *feedback*

$\hat{d}(n)$: se refiere a la señal generada por el algoritmo con el fin de cancelar el eco acústico

$\hat{y}(n)$: señal generada por el filtro adaptativo del sistema identificador

$y_p(n)$: señal generada por el filtro adaptativo del sistema predictor

Este sistema propuesto permite la entrada simultánea de dos señales de entrada, es decir, permite analizar el escenario de *double talk*. La forma en que se genera este escenario permite al sistema procesar la señal de entrada $x(n)$ con la planta seleccionada para simulación del efecto de eco. Finalmente el resultado del procesamiento obtenido $e(n)$ se refiere al eco residual generado por la superposición de la señal de eco con la señal de cancelación generada por el sistema $\hat{d}(n)$, las cuales en caso de que el sistema converja tienen características similares, más la señal del interlocutor presente en el *far-end* $d_{in}(n)$; permitiendo la actualización de coeficientes en los filtros adaptativos $W(z)$ y $M(z)$.

Capítulo IV

Simulación

4.1 Condiciones generales de simulación

El sistema híbrido fue implementado mediante una interfaz en Matlab® desarrollada con este fin Figura 4.1 (Ver Anexo A para la guía de la interfaz y el Anexo B para el código desarrollado), que emplea como algoritmo al LMS. La aplicación de este método permite analizar el funcionamiento del sistema en la existencia de *double-talk* y *single-talk*. A su vez permite estimar los valores de los coeficientes del filtro adaptativo del sistema híbrido de forma recursiva e ininterrumpida. El propósito de uso de filtros adaptativos del sistema propuesto es para lograr minimizar el MSE y aumentar el ERLE, parámetros de medición recíprocos.

Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario para el control y experimentación del sistema propuesto con el objetivo de facilitar la modificación de parámetros por el usuario sin necesidad de modificar directamente el código de Matlab®. Además permite seleccionar las señales de entrada, tamaño de paso para el sistema feedforward y feedback, número de bloques y de iteraciones así como la planta, este último parámetro cuenta con dos valores posibles que se muestran en la siguiente sección.

Esta interfaz representa una herramienta de simulación para los distintos escenarios posibles dentro de una conversación telefónica:

- *Single talk* con señal de entrada en el *far-end*, en este caso si contará con presencia de eco (Figura 3.1 a)). Para el caso específico de este trabajo se analiza brevemente este escenario con fines de entrenamiento del sistema (Sección 4.4.1).

- *Single talk* con señal de entrada en el near-end, en este caso no cuenta con presencia de eco (Figura 3.1 b)). Es necesario considerar que este escenario no forma parte del campo de estudio de este proyecto ya que no cuenta con la señal de eco a cancelar.
- *Double talk* que incluye ambas señales de entrada y por ende presencia de eco para el *near-end*. Este escenario como se mencionó en la sección 3.1 es la principal fuente de estudio para el trabajo desarrollado.

El uso de esta interfaz permite al usuario seleccionar diversos parámetros lo cual facilita el uso del sistema reduciendo la interacción del usuario con el desarrollo y modificación directa del código principal y las funciones que lo involucran. El código principal permite la modificación de la interfaz de usuario, adicionalmente se desarrollaron funciones que se pueden alterar de forma individual sin afectar la estructura del código principal. Otra funcionalidad que incluye para guiar al usuario es que sólo cuenta con los parámetros necesarios para la etapa en curso, es decir, una vez que se ha realizado la selección deseada se habilitan las casillas de selección de parámetros de la siguiente etapa.

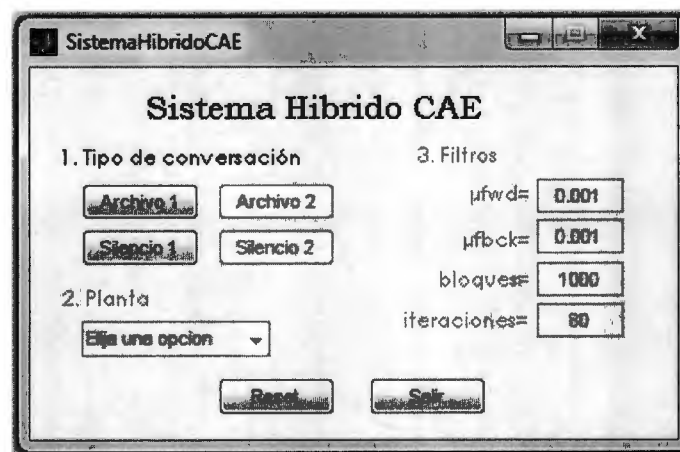


Figura 4.1 Interfaz desarrollada para la implementación del sistema híbrido para la cancelación de eco

La interfaz permite la selección de dos señales de audio con extensión “.wav” (Waveform Audio Format) cada una relacionada con un interlocutor de la conversación, o bien, una señal de silencio para la simulación de *near-end*.

A partir de ellas se selecciona la planta que representa el medio de generación de eco y los factores de convergencia que se emplearán para el procesamiento, se elige uno para el identificador y otro para el predictor. Posteriormente se eligen el número de bloques y de iteraciones en los cuales se evaluará el sistema.

Una vez finalizado el procesamiento se despliegan las gráficas de salida que incluyen las distintas señales involucradas en el sistema, tanto en formato compatible con audio “.wav” y para su manejo como imagen en formato “.jpg”, incluyendo los resultados del ERLE y MSE. Para facilitar el análisis de los parámetros relacionados con la prueba en curso éstos se almacenan en un archivo “.mat”. Los archivos mencionados se generan de forma automática con un nombre que permite identificar los parámetros usados para el análisis así como las señales de entrada seleccionadas.

El proceso para la obtención de resultados se muestra en la Figura 4.2, para más detalles sobre el código se puede consultar el Anexo B. Está dividido en tres etapas principales:

- *Selección de señales de entrada:* permite elegir entre señales con distintas características, incluso si éstas no son de voz. A partir de esta selección la interfaz define automáticamente el escenario a analizar ya que si una de las señales de entrada es de silencio se presentará un escenario de *single talk* y si el usuario seleccionó dos señales de entrada el sistema identifica este escenario como *double talk*.
- *Selección de variables de análisis:* incluye un módulo específico para el procesamiento de la planta, con dos plantas preseleccionadas de 20 coeficientes cada una. Estas plantas se muestran a detalle en el Anexo B.
- *Presentación de resultados:* facilita al usuario el almacenamiento automático de las señales generadas en formato de audio y de las gráficas de estas señales en formato de imagen. Así mismo almacena automáticamente la gráfica correspondiente los niveles de cancelación de eco ERLE, para las pruebas en

curso, en formato de imagen y también genera un archivo que contiene todas las variables consideradas, señales procesadas y resultados obtenidos en caso de que el usuario desee consultarlas posteriormente. Este sistema asigna una nomenclatura específica que permite identificar los parámetros y señales de entrada empleados para el análisis, para los distintos escenarios posibles en una conversación telefónica.

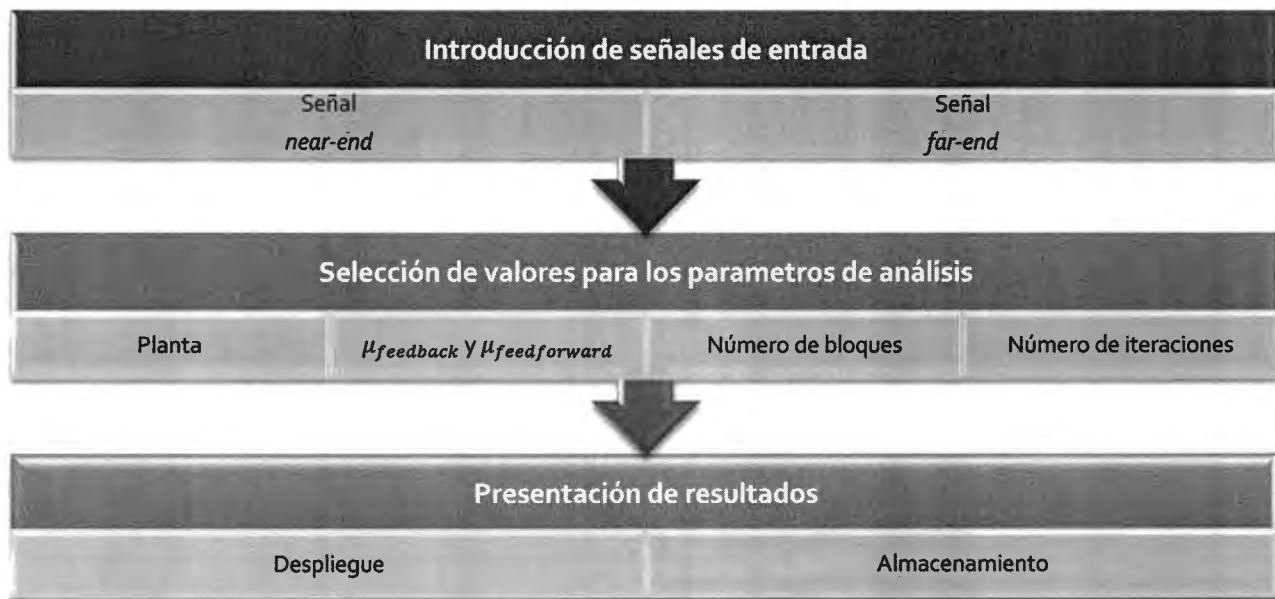


Figura 4.2 Etapas de la simulación empleando la interfaz gráfica de usuario desarrollada

4.2 Parámetros de análisis

Para el sistema híbrido aplicado a la cancelación de eco se consideraron los siguientes parámetros:

- *Planta:* una reducción de la planta presentada por Paleologu (2008) a 20 coeficientes normalizados y la planta presentada en Celis (2008).
- Filtro digital adaptativo del identificador $W(z)$.
- *Señales de entrada:* señal de voz para el interlocutor que presenta eco (*near-end*) y señal de entrada del otro interlocutor (*far-end*).

- *Número de bloques y de iteraciones*: los cuales están directamente relacionados con el número de muestras a emplear durante el análisis.
- *Tamaño de paso para el sistema identificador y predictor*: determina la convergencia o divergencia del sistema, así como la velocidad de la misma.

4.3 Señales de prueba

El ruido puede clasificarse de acuerdo al origen de éste respecto al sistema, puede ser:

- **Endógeno**: aquel que es producido por variables propias del sistema de telecomunicaciones
- **Exógeno**: aquel que es producido por elementos externos al sistema de comunicaciones (Castro, 1999)

A su vez el ruido de acuerdo a sus características se clasifica en (Hansen, 2001):

- **Continuo**: su nivel de presión sonora permanece con pequeñas fluctuaciones o sin ellas a lo largo del tiempo. Estos cambios deben ser menores de 5dB durante el periodo de observación
- **Intermitente**: su nivel de presión sonora fluctúa a lo largo del tiempo, señales periódicas o aleatorias
- **Impulsivo**: su nivel de presión sonora está representada por impulsos

Para el presente trabajo se considera que la señal del primer interlocutor (*near-end*) es exógena al sistema, aunque la generación de eco de la misma forma es endógena ya que se forma dentro del propio sistema de telecomunicaciones. Así mismo, las señales consideradas por el análisis se muestran en la Tabla 4.1.

Continuas	Intermitente	Impulsiva
Señal de 4 Tonos	Voz femenina	Ladrado
Aspiradora	Voz masculina 1	
Silencio	Voz masculina 2	

Tabla 4.1 Señales de prueba empleadas para el análisis del sistema

Si bien el enfoque es el procesamiento de señales de voz, se extendió el uso de otras señales de prueba para ampliar la validez del sistema. Adicionalmente se consideró una señal constante de Silencio para simular el efecto de *single-talk* y poder caracterizar el funcionamiento de cada señal de forma individual.

Las señales seleccionadas para las pruebas, mostradas en la tabla 4.1 permiten observar el funcionamiento del sistema propuesto con los tres tipos de señales definidos por Hansen en 2001.

A continuación, en las Figura 4.3 a Figura 4.8, se incluye la caracterización de las señales de prueba a emplear en ambas entradas para el *near-end* como *far-end* tanto el espectro como en tiempo. Debido a que la aplicación del sistema propuesto es sobre la red telefónica, se considera una frecuencia de muestreo de 8000Hz , ya que esta es la frecuencia de muestreo establecida para este fin. Así mismo, las señales están normalizadas y evaluadas en un periodo de 10 segundos, a excepción de la señal de 4 Tonos que se muestran sólo 62ms para poder apreciar sus características específicas.

Como puede observarse de la Figura 4.3 a Figura 4.8 las componentes principales del contenido espectral en frecuencia se encuentra en la banda inferior a los 3000Hz . Estas señales fueron seleccionadas con el fin de incluir los tres tipos de señales presentados por Hansen (2001).

El análisis del espectro temporal y en frecuencia permite definir las características de las señales para rectificar la clasificación de dichas señales en la Tabla 4.1.; debido a la tasa de muestreo empleada para las líneas telefónicas (8000Hz) el espectro de la señal se encuentra

concentrado en este rango, de las Figura 4.3 a Figura 4.8 las componentes principales del espectro de las señales se encuentran contenidas en la región de frecuencia menor por lo que las componentes descartadas no aportan gran energía a la señal.

Así mismo, se observa que la señal de 4 tonos es periódica, Figura 4.3 a), y la señal correspondiente a la aspiradora si bien no es periódica muestra una variación poco significativa en el espectro temporal Figura 4.4 a). Con respecto al espectro en frecuencia ambas señales muestran tener componentes predominantes Figura 4.3 b) y Figura 4.4 a), impulsos con menor definición para la señal de aspiradora y con una completa definición para la señal de cuatro tonos. A partir de ello se confirma que estas señales se consideran dentro de la clasificación de constantes.

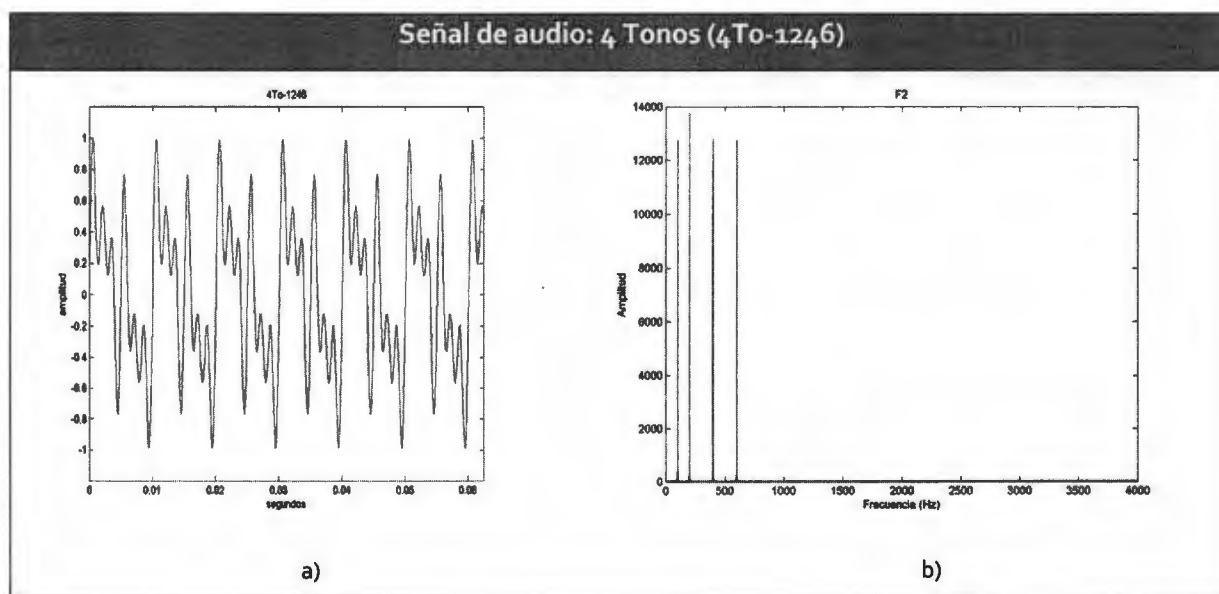


Figura 4.3 Caracterización de la señal de "4 Tonos"

a) Espectro temporal b) Espectro de frecuencia

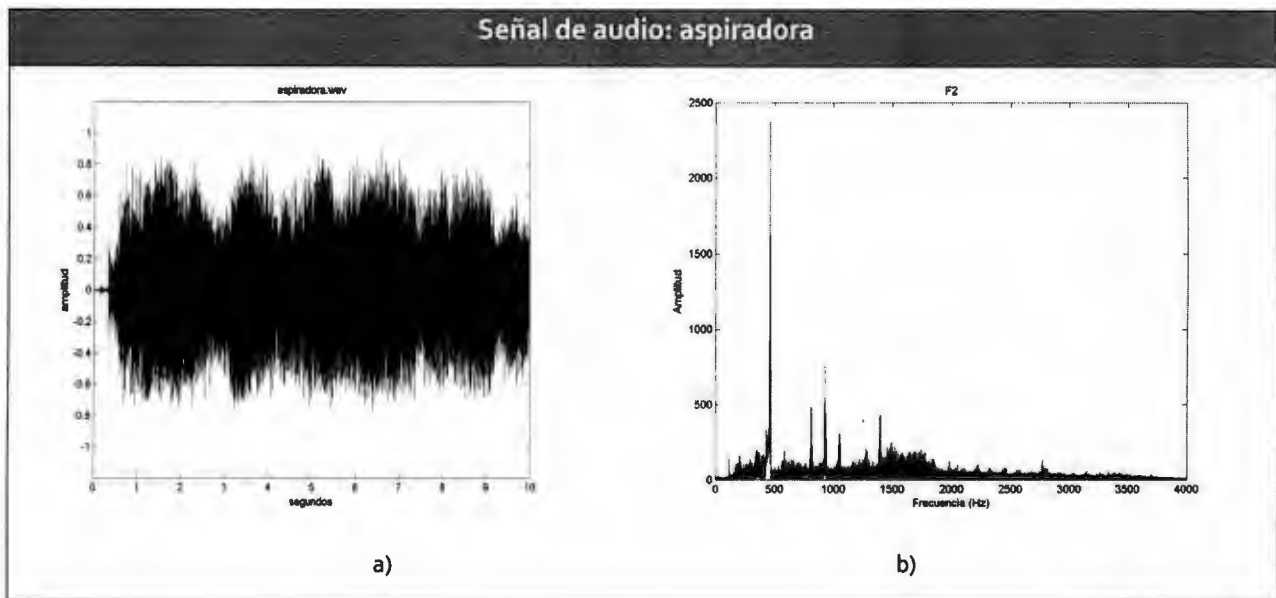


Figura 4.4 Caracterización de la señal de "aspiradora"

a) Espectro temporal b) Espectro de frecuencia

Las señales correspondientes a voz: femenina , masculina 1 y masculina 2 muestran características particulares como lo son que contienen componentes en la parte inferior del espectro de frecuencia y que estas componentes no son uniformes (Figura 4.5 b), 4.6 b) y 4.7 b)), es decir, no se muestran impulsos definidos como el caso de las señales continuas. En el caso temporal se pueden apreciar periodos de pausa, correspondientes al periodo de escucha del interlocutor durante una llamada telefónica y periodos con señal de voz que simulan la conversación. En caso de que estos periodos de habla sean simultáneos en el proceso de pruebas, se considera que el escenario es *double talk*.

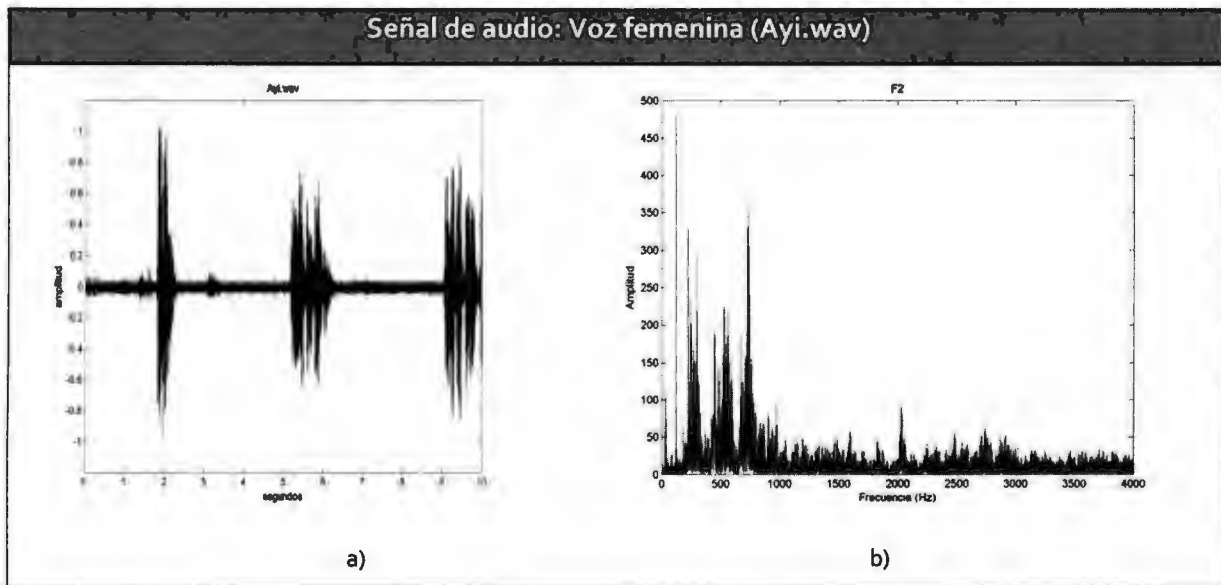


Figura 4.5 Caracterización de la señal de "Voz femenina"
 a) Espectro temporal b) Espectro de frecuencia

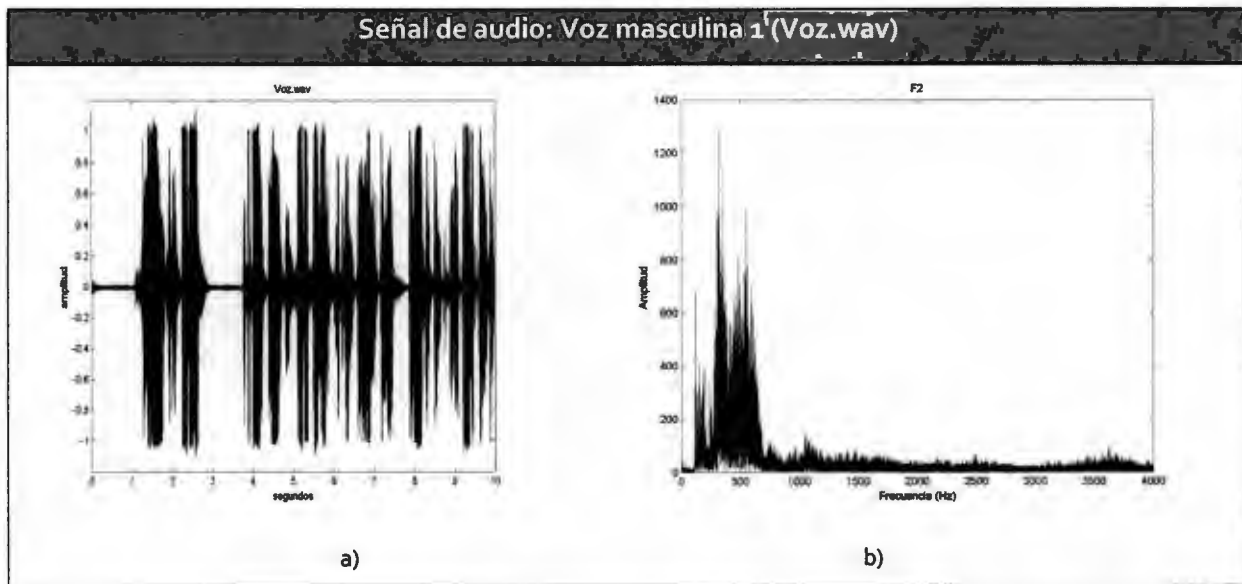


Figura 4.6 Caracterización de la señal de "Voz masculina 1"
 a) Espectro temporal b) Espectro de frecuencia

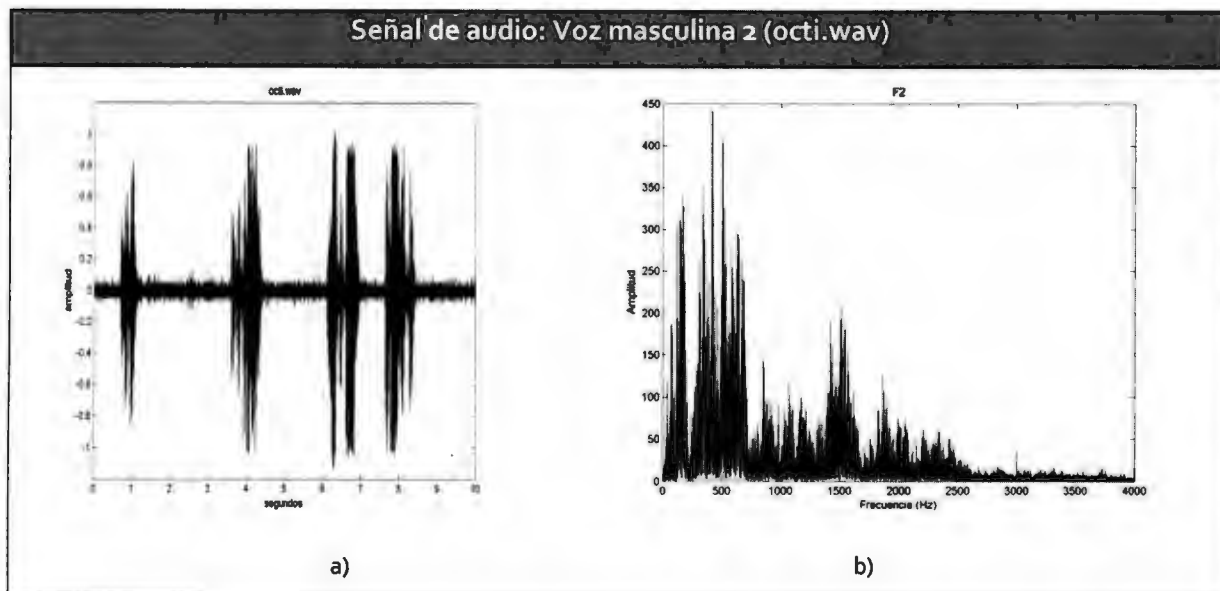


Figura 4.7 Caracterización de la señal de "Voz masculina 2"

a) Espectro temporal b) Espectro de frecuencia

Específicamente para la señal de ladrido que es considerada intermitente se observa en el espectro temporal cambios abruptos en la señal, Figura 4.8 a) dando como resultante impulsos poco definidos seguidos de periodos de silencio, carentes de señal de audio. Para dicha señal el espectro en frecuencia las componentes con mayor aportación están en la parte media a diferencia de los tipos anteriores.

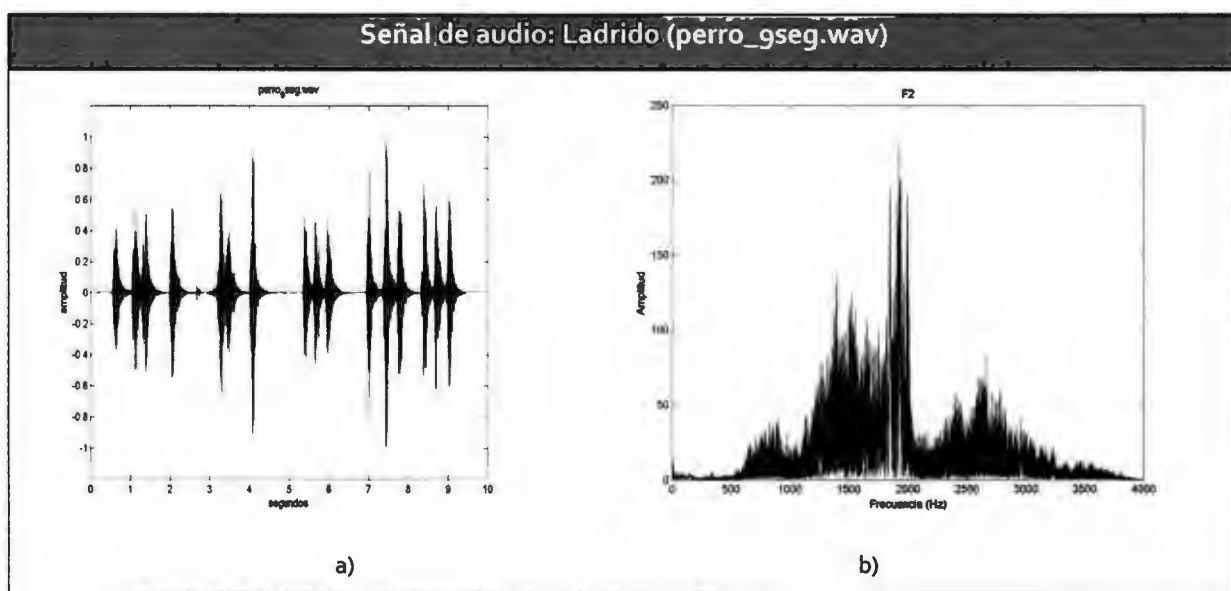


Figura 4.8 Caracterización de la señal de "Ladrido"

a) Espectro temporal b) Espectro de frecuencia

4.4 Presentación y análisis de las simulaciones realizadas

4.4.1 Entrenamiento del sistema con escenario *Single-Talk*

Para realizar el análisis se tomó como primera señal de prueba en el *near-end* la señal de voz femenina, se consideró como la señal del *far-end* la señal de silencio con el fin de caracterizar el sistema. Los parámetros de análisis están concentrados en la Tabla 4.2.

Parámetro	Valor para el análisis
μ_{fwd}	0.01
μ_{bck}	0.01
Planta	Adaptación de Paleologu (2008)
Bloques	1000
Iteraciones	80

Tabla 4.2 Parámetros seleccionados para el análisis del sistema $\mu=0.01$ y planta de Paleologu

Al procesar esta señal de entrada con el sistema se obtienen el MSE y ERLE correspondiente, donde el ERLE corresponde al inverso del MSE, mostrados en la Figura 4.9. En los análisis posteriores sólo se incluirá el ERLE como parámetro de desempeño del sistema.

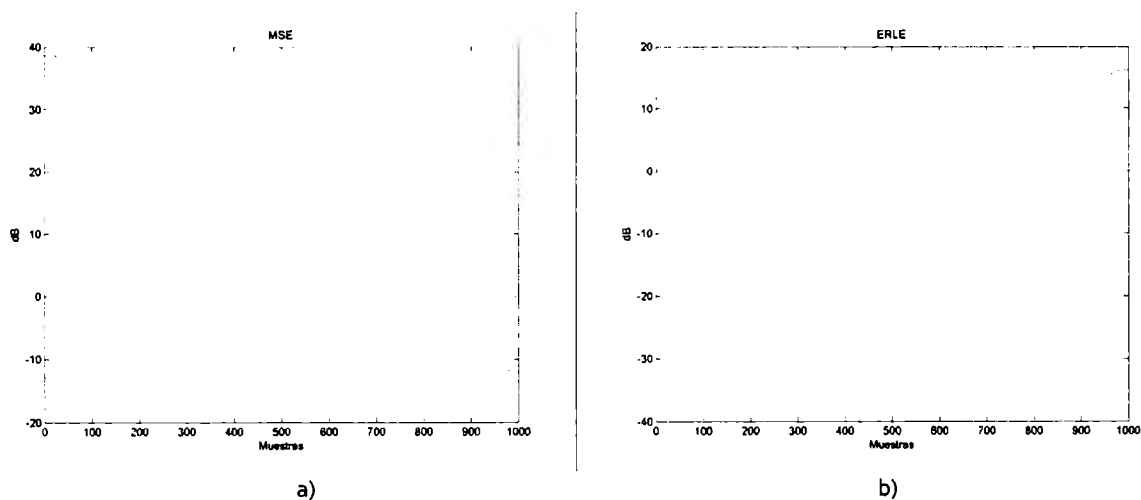


Figura 4.9 Parámetros de análisis con señal de voz femenina en *near-end* y señal de silencio *far-end*
a) MSE, b) ERLE

La señal de eco $d(n)$ se muestra en la Figura 4.10, procedente de que la señal de entrada $x(n)$, caracterizada en la Figura 4.5, atraviese la planta $P(z)$.

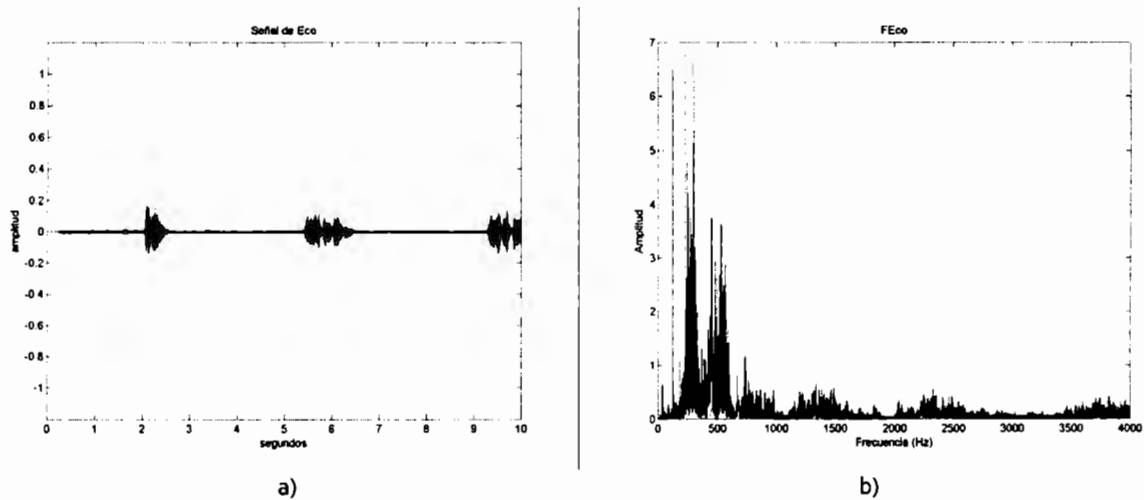


Figura 4.10 Señal eco $d(n)$ de voz femenina en *near-end*

a) Espectro temporal, b) Espectro de frecuencia

Basado el principio de superposición, el sistema genera una señal $\hat{d}(n)$ con características parecidas a la señal de eco $d(n)$; es por ello que ambas señales deben tener atributos espectrales semejantes. Específicamente, para esta prueba la señal que genera el sistema para la cancelación es $\hat{d}(n)$, Figura 4.11, la cual debe asemejarse en magnitud y frecuencia a la señal de eco $d(n)$ mostrada en la Figura 4.10. Para poder observar el funcionamiento del sistema se empleara para esta y otras pruebas posteriores la comparación entre la señal a superponer $\hat{d}(n)$, la cual es distinta para cada prueba, con la señal de eco $d(n)$ que permanece es la misma para las distintas pruebas que comparten la misma planta; para el caso de la adaptación de la planta propuesta por Paleologu (2008) está representada por la Figura 4.10.

Debe tomarse en cuenta que el espectro temporal y en frecuencia del eco es menor que el de la señal de voz femenina sin procesamiento de la planta Figura 4.5, debido a la atenuación correspondiente a la planta que simula el efecto de generación.

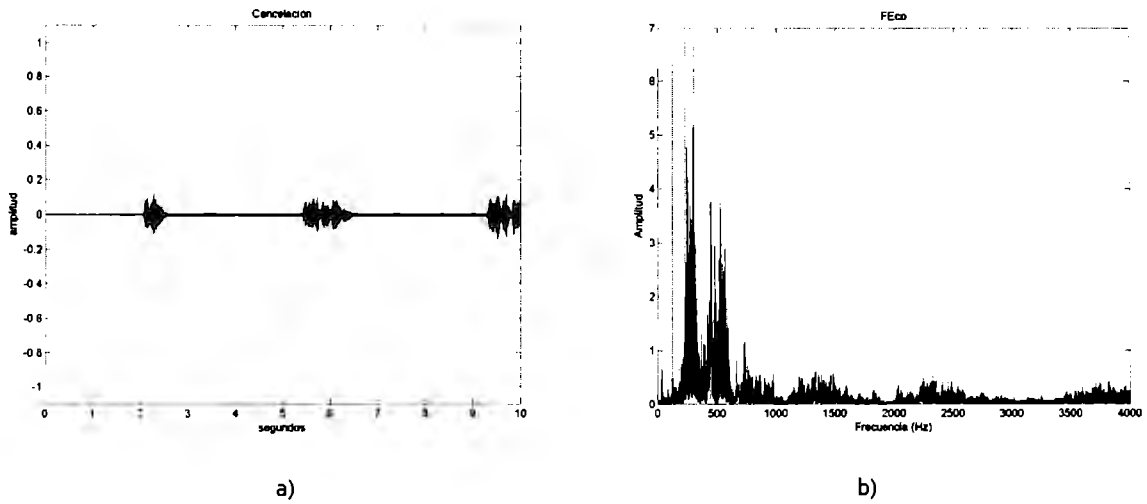


Figura 4.11 Señal de cancelación $\hat{d}(n)$, señal de voz femenina en *near-end* y señal de silencio *far-end*
 a) Espectro temporal, b) Espectro de frecuencia

La salida del eco residual, hace referencia a la señal posterior al sistema cancelador (Martin, 2008), más la señal proveniente del *far-end*, en este caso corresponde únicamente al eco residual $e(n)$ que genera sistema, mostrado en la Figura 4.12. La amplitud de dicha señal, tanto en el espectro de frecuencia como de tiempo es mucho menor en comparación con el que se obtendría si no se aplicara el sistema, Figura 4.13.

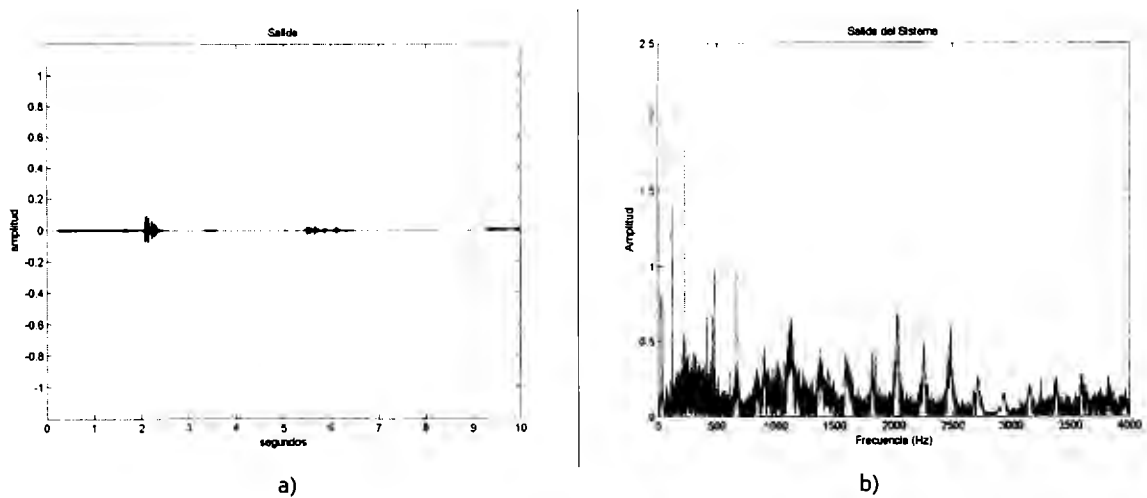


Figura 4.12 Salida del sistema $e(n)$, señal de voz femenina en *near-end* y señal de silencio *far-end*
 a) Espectro temporal, b) Espectro de frecuencia

Para poder comprobar el correcto funcionamiento del sistema se compara la salida del sistema Figura 4.12 con la señal que existe cuando no se emplea el sistema propuesto, Figura 4.13. Al aplicar el sistema puede apreciarse una disminución progresiva en la amplitud de la señal de salida $e(n)$ en el espectro temporal y en el espectro de frecuencia Figura 4.12.

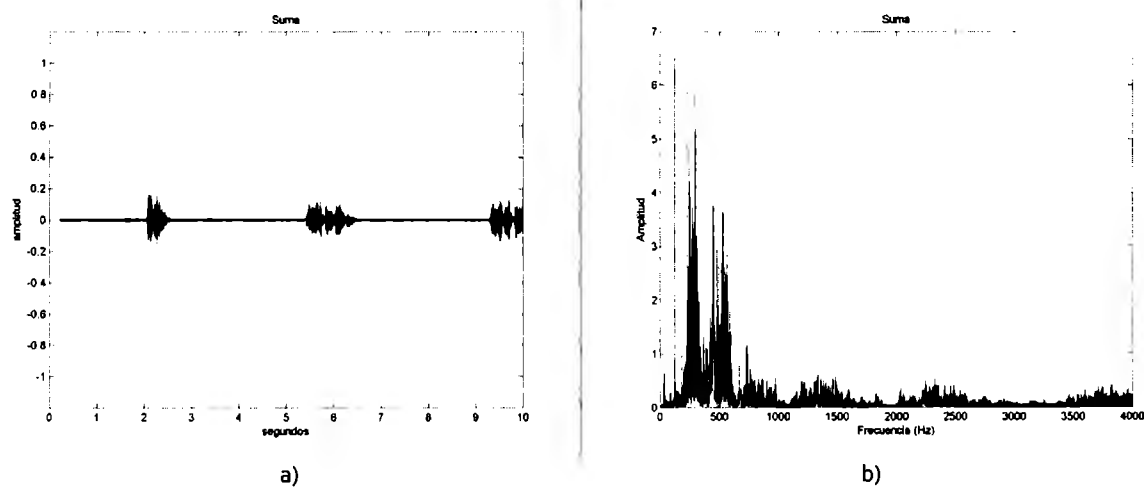


Figura 4.13 Respuesta sin aplicación del sistema propuesto
a) Espectro temporal, b) Espectro de frecuencia

En la Figura 4.14 se muestra la comparación de espectros de frecuencia tanto al implementar el sistema como sin implementarlo, esto para apreciar el impacto en la diferencia de escalas.

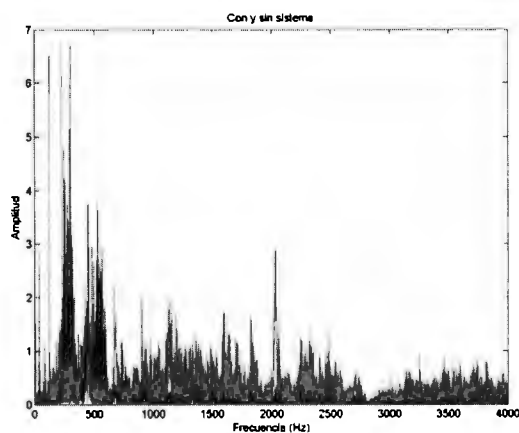


Figura 4.14 Comparación de la salida del sistema y sin sistema, señal de voz femenina en near-end y señal de silencio far-end.
Espectro de frecuencia. Verde: señal de salida del sistema, Rojo: sin implementar el sistema

Una vez obtenidos estos resultados, los cuales son aceptables ya que logran una cancelación de aproximadamente $40dB$, se retoman los coeficientes del filtro del sistema *feedforward* $W(z)$ y se emplearon como valores de entrada para evaluar nuevamente el sistema con la misma señal de voz femenina y señal de silencio. El parámetro empleado para la comparación es el ERLE, donde se pueden observar mejores resultados para el filtro adaptativo $W(z)$ entrenado con la señal de voz femenina. Cabe mencionar que el filtro adaptativo $M(z)$ correspondiente a la parte predictor se mantuvo inicializada en ceros. En la figuras 4.15 a) y b) se muestran los resultados de ambas pruebas.

Para el caso en que se inicializa el filtro adaptativo $W(z)$ en ceros se obtiene un cambio de $-38.68 dB$ y asciende hasta $12.06 dB$. Una vez entrenado el filtro adaptativo se mejora la respuesta de $-43.81 dB$ y aumenta hasta alcanzar $16.66 dB$ por lo que se tiene una mejora de $4.6 dB$ con respecto al umbral anterior.

Cabe mencionar que la diferencia de decibeles en el primer caso es de $50.74 dB$ y del segundo es de $60.47 dB$, Figura 4.15, por lo que se puede apreciar una mejora al emplear el filtro adaptativo entrenado para el identificador. Adicionalmente en la Tabla 4.3 se muestran los resultados al procesar la misma señal con el filtro entrenado, la comparación entre los resultados muestra que el tamaño de paso recomendado es 0.1.

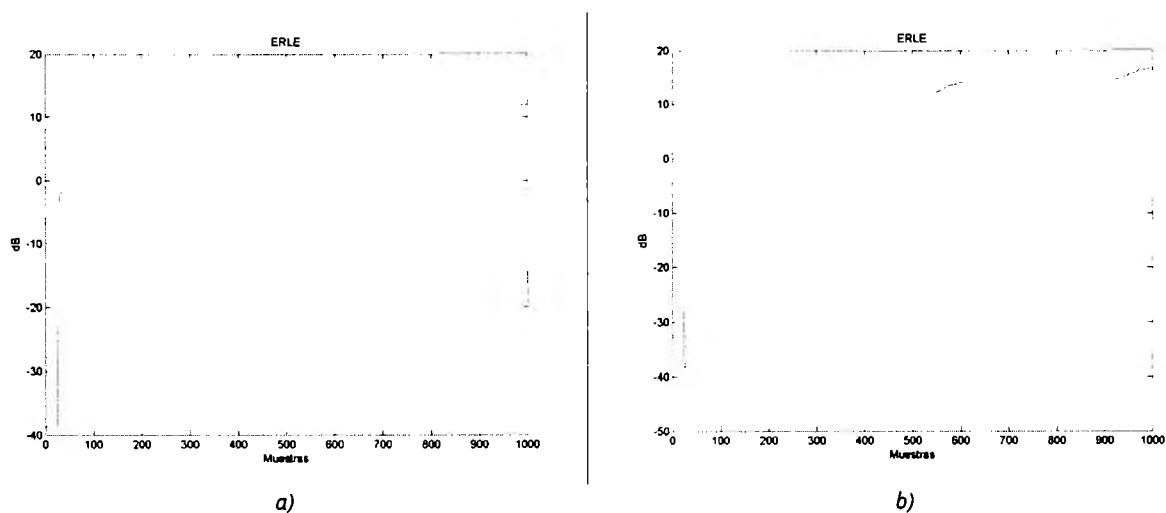


Figura 4.15 ERLE resultante de señal de voz femenina en *near-end* y señal de silencio *far-end* con el filtro adaptativo $W(z)$:

a) Inicializado en ceros b) Entrenado

μ_{fwd} y μ_{fbc}	0.001	0.01	0.1	0.42	0.5	0.55
ERLE (dB)	(Homana, 2010)					
Máximo	9.66	16.87	25.71	21.62	19.13	Diverge
Mínimo	-52.15	-33.42	-37.87	-50.69	-53.25	Diverge
Rango	61.81	50.29	63.58	72.31	72.38	NA

Tabla 4.3 Comparación de resultados (ERLE) para diversos valores de μ_{fwd} y μ_{bck} el sistema propuesto

4.4.2 Pruebas para Escenarios de *Double-Talk* & *Single-Talk*

Para evaluar el escenario de *double-talk* se emplearán las señales mostradas en la Tabla 4.1 y se empleará como señal de *far-end* la señal de voz femenina. La tabla 4.2 muestra los parámetros de evaluación empleados para las siguientes pruebas. Para las señales que no son continuas se presentarán también intervalos de *single-talk* durante la evaluación del sistema.

La siguiente prueba se desarrolla mediante el uso de 4 Tonos en el *far-end*, dando como resultado una cancelación mostrada en la Figura 4.16 mediante el ERLE. Las Figura 4.17 a Figura 4.19 la señal de entrada del interlocutor correspondiente del near-end la señal femenina, tienen como señal en el *far-end* la señal de 4 Tonos cuyos espectros temporal y en frecuencia se muestran en la Figura 4.3. Debido a que la señal en el *far-end* es la misma que en la prueba anterior al igual que las condiciones de prueba, la señal de eco está descrita por la Figura 4.10. Puede apreciarse una baja correlación entre ambas señales que no supera las 30 unidades y un gran nivel de cancelación de 45dB.

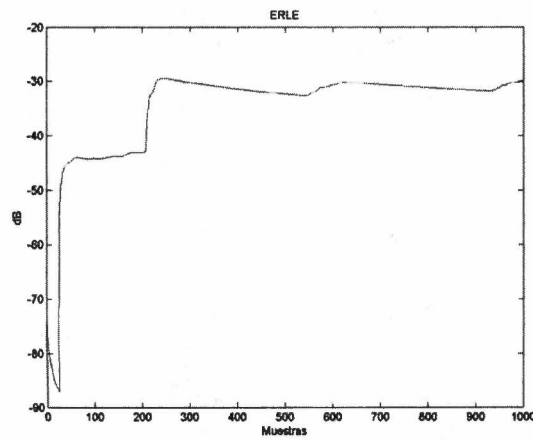
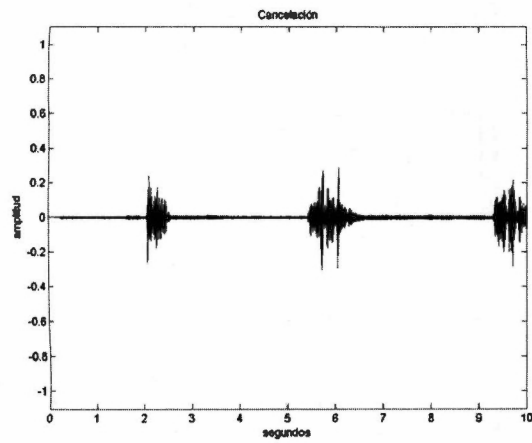
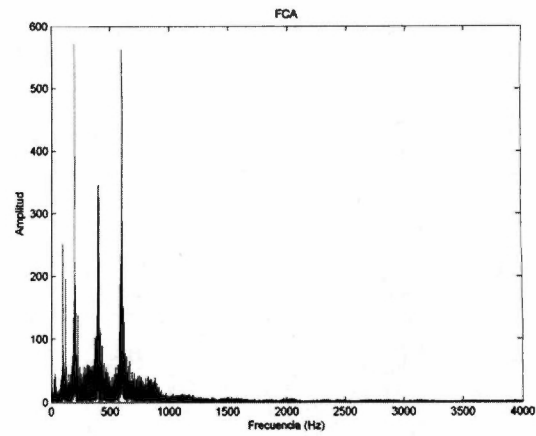


Figura 4.16 ERLE con señal de voz femenina en *near-end* y señal de 4 Tonos *far-end*

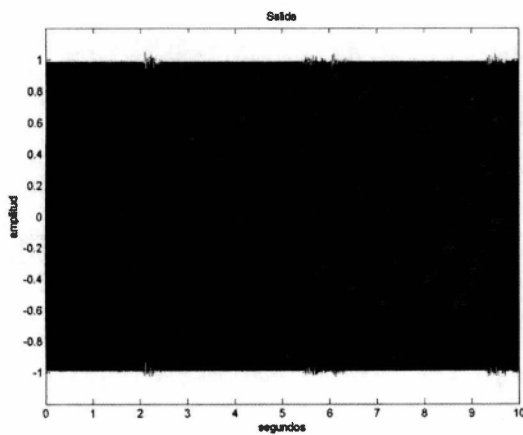


a)

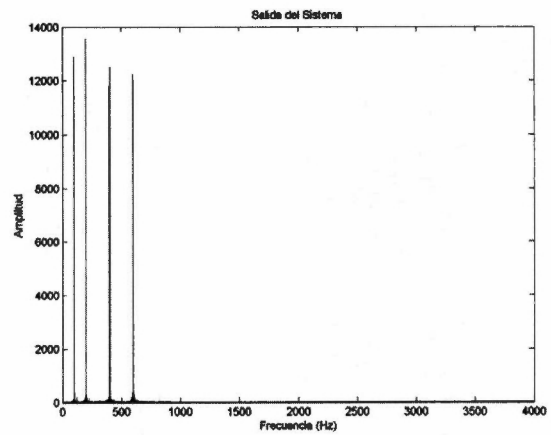


b)

Figura 4.17 Señal de cancelación $\hat{d}(n)$, señal de voz femenina en *near-end* y señal de 4 Tonos en *far-end*
a) Espectro temporal, b) Espectro de frecuencia



a)



b)

Figura 4.18 Salida del sistema $e(n)$, señal de voz femenina en *near-end* y señal de 4 Tonos *far-end*
a) Espectro temporal, b) Espectro de frecuencia

La amplitud de la señal resultante al usar el sistema proveniente mayoritariamente de la señal de entrada $d_{in}(n)$ es mucho mayor, mostrado en la Figura 4.3 b) (amplitud máxima de 14000), en comparación con la señal de eco $d(n)$ (amplitud máxima de 7). Esta disparidad entre la amplitud de las señales en ambos espectros hace que sea prácticamente imperceptible la adición del eco a la señal de entrada del *far-end*, Figura 4.19. Al comparar la Figura 4.18 se observa que la señal resultante cuenta con un ligero detrimento en la amplitud en comparación de la Figura 4.19, que se refiere a que no se aplique el sistema; es decir se aprecia la cancelación de la señal de eco.

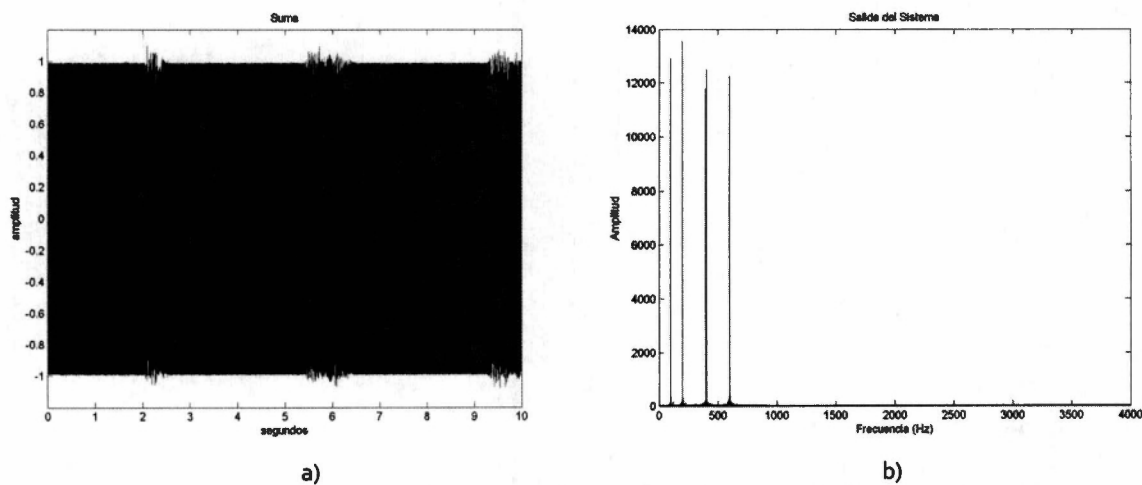


Figura 4.19 Señal de eco de voz femenina en *near-end* más la señal de 4 Tonos *far-end*
a) Espectro temporal, b) Espectro de frecuencia

Adicionalmente se incluye la correlación entre 4 Tonos y voz femenina se muestran en la Figura 4.20.

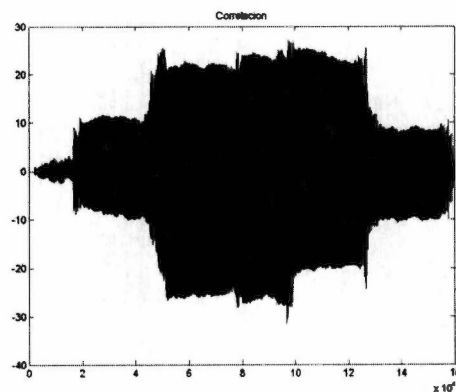


Figura 4.20 Correlación de la señal de voz femenina en *near-end* y señal de 4 Tonos *far-end*

De igual forma al comparar el espectro en frecuencia de la señal resultante $e(n)$ del uso del sistema, Figura 4.21, no se observan diferencias significativas debido a la amplitud reducida que aporta la señal de eco por lo que no se incluirá el espectro de frecuencia en las pruebas posteriores. En el caso del espectro temporal dependiendo de las señales de entrada, si la señal de entrada en el *near-end* es constante si se puede apreciar directamente el efecto del sistema en la señal resultante en su espectro temporal pero para otro tipo de señales es difícil percibir este cambio.

Para facilitar el análisis, a partir de este punto, se muestra la señal de eco generada por la planta $d(n)$ y se realiza la comparación con la señal de cancelación generada por el sistema híbrido $\hat{d}(n)$.

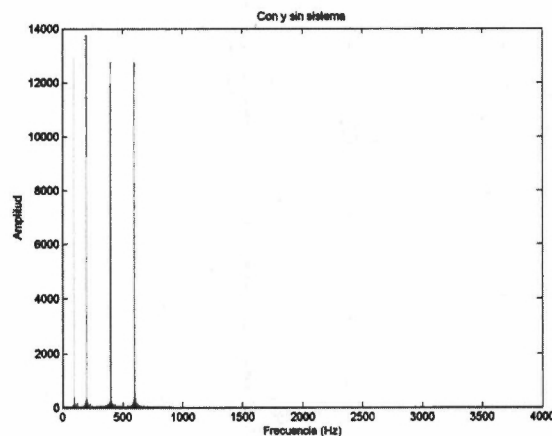


Figura 4.21 Comparación de la salida del sistema y sin sistema, señal de voz femenina en *near-end* y señal de silencio *far-end* Espectro de frecuencia. Verde: señal de salida del sistema, Rojo: sin implementar el sistema.

Se realizaron más pruebas con la señal de aspiradora en el *far-end* y voz femenina en el *near-end*, nuevamente la señal de eco se muestra en la Figura 4.10. La caracterización de la señal de aspiradora se muestra en la Figura 4.4. En Figura 4.22 se muestran los niveles de cancelación alcanzados en el sistema mediante el ERLE que superan los $40dB$.

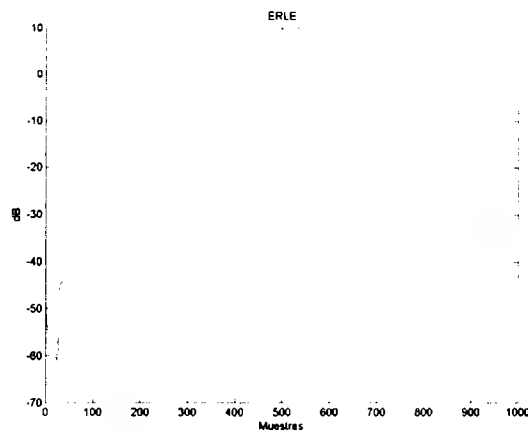


Figura 4.22 ERLE con señal de voz femenina en *near-end* y señal de aspiradora *far-end*

En la Figura 4.23 se muestra la correlación entre las señales de entrada: la voz femenina en el *near-end* y la señal de aspiradora en el *far-end*, se aprecia este parámetro alcanza un orden aproximado de 60. En contraste, la correlación de la señal 4 Tonos con la señal de voz femenina, Figura 4.23, alcanza un nivel aproximado de 30. De estas observaciones se puede deducir que las señales que muestran una correlación menor entre ellas alcanzan niveles de cancelación mayores, esto se comprueba al comparar el ERLE de la señal de 4 Tonos en el *near-end*, Figura 4.16, con el ERLE de la señal de aspiradora en el *far-end*, Figura 4.22.

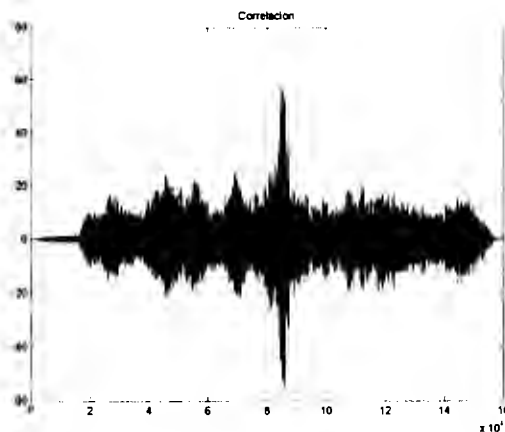


Figura 4.23 Correlación de la señal de voz femenina en *near-end* y señal de aspiradora en *far-end*

Adicionalmente para mostrar el efecto del sistema en el resultado se observa de cancelación generada $\hat{d}(n)$ es la Figura 4.24, la cual muestra características muy semejantes a la señal de eco, Figura 4.10.

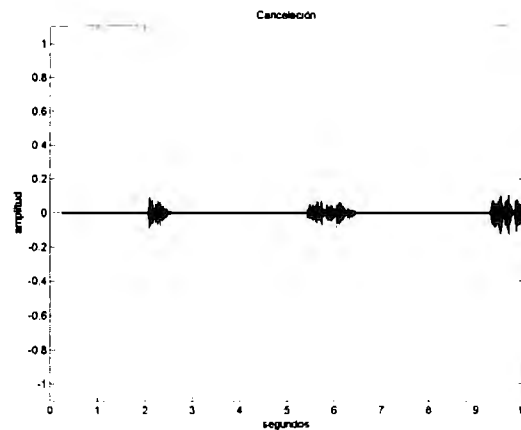


Figura 4.24 Señal de cancelación $\hat{d}(n)$, señal de voz femenina en *near-end* y señal de aspiradora en *far-end*

Se repitieron las pruebas empleando los valores de la Tabla 4.4 voz femenina en el *near-end* y para la señal de 4 Tonos en el *far-end* y, así como la señal de aspiradora en el *far-end* y voz femenina en el *near-end*, el ERLE se encuentra en la Figura 4.25 a) y b) respectivamente.

Parámetro	Valor para el análisis
μ_{fwd}	0.1
μ_{bck}	0.1
Planta	Adaptación de Paleologu (2008)
Bloques	1000
Iteraciones	80

Tabla 4.4 Parámetros seleccionados para el análisis del sistema $\mu = 0.1$ y planta de Paleologu

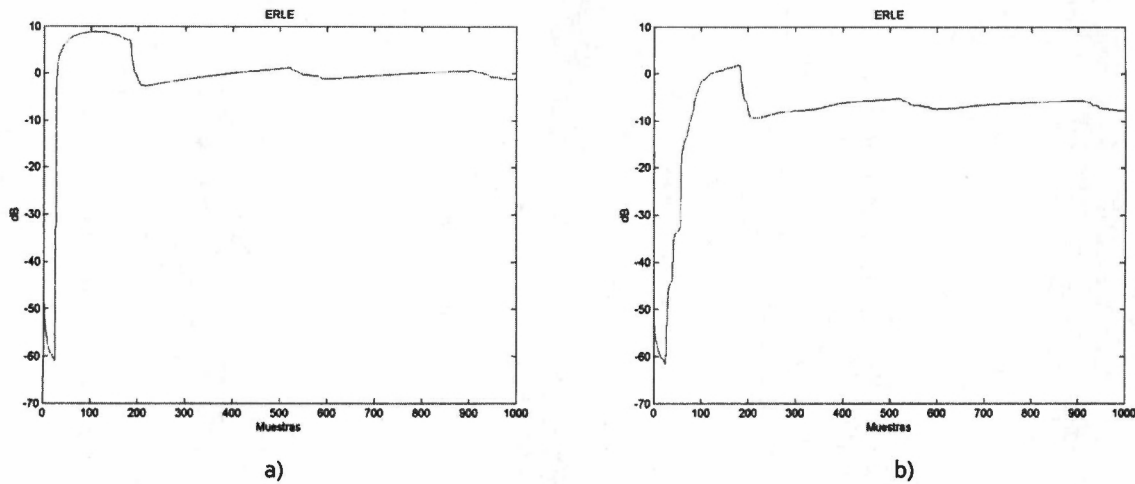


Figura 4.25 ERLE con señal de voz femenina en *near-end* y
 a) señal de 4 Tonos far-end b) señal de aspiradora far-end

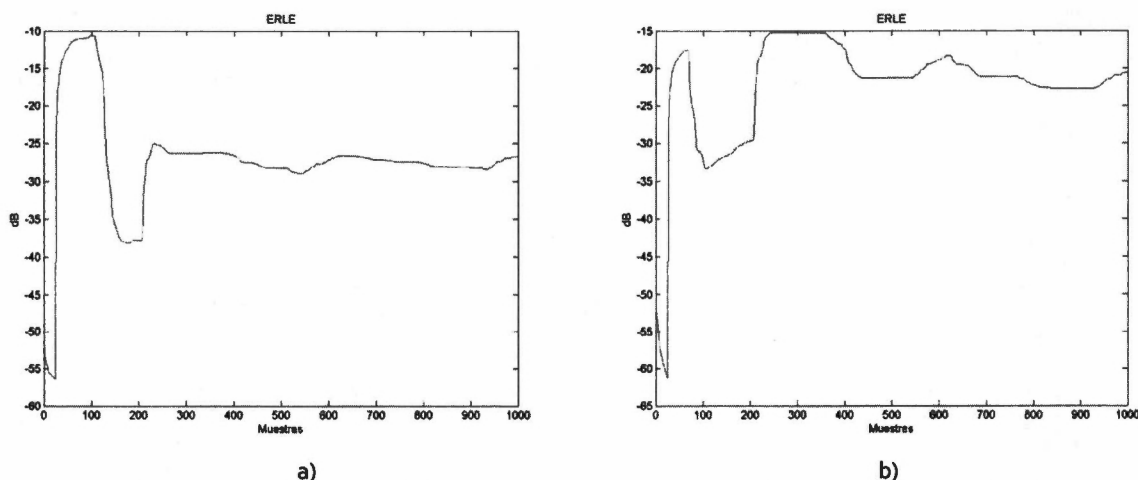
A partir de los resultados obtenidos para la señal de 4 Tonos y aspiradora como la señal $d_{in}(n)$ se puede observar que el sistema cuenta con una mejor respuesta si el tamaño de paso (μ) para ambos filtros adaptativos es de 0.1. Lo anterior considerando como señal $x(n)$ la señal de voz femenina en un escenario de *double-talk*.

Este tamaño de paso es el mismo obtenido experimentalmente y registrado en la tabla 4.3 donde el tamaño de paso de 0.1 generó mejores resultados en un escenario *single-talk*, en el que la señal $x(n)$ es la voz femenina y no se introduce una señal correspondiente a $d_{in}(n)$. Para el escenario de *double-talk*, con la señal de voz en $x(n)$ y $d_{in}(n)$ para señales continuas funciona adecuadamente con este tamaño de paso para la adaptación de la planta Paleologu (2008) ya que se aumenta la cancelación de eco de 5 a 10 dB dependiendo de la señal continua empleada.

Debido a que la amplitud de la señal de eco, con amplitud reducida debido al efecto de la planta, tiene una amplitud mucho menor en comparación la señal de entrada en el *far-end*, esta última está normalizada. Al adicionar ambas señales la que predomina por su amplitud es la señal en el *far-end* $d_{in}(n)$, es por ello que al reproducir la señal de audio el eco es prácticamente imperceptible. Al implementar el sistema Cancelador Activo de Eco realiza la cancelación de la señal de eco, mostrado en el espectro temporal y de frecuencia, en los cuales

se aprecia que la señal de eco es muy semejante a la que produce el sistema para superponerla. Lo anterior también se observa en los niveles de cancelación de eco medidos por el ERLE, aunque en el ámbito auditivo es prácticamente imperceptible.

Posteriormente se desarrollaron pruebas con la señal de voz femenina en el *near-end* y la señal de voz masculina 1 en *far-end*, manteniendo los parámetros de la Tabla 4.2. Los niveles de cancelación se muestran en la Figura 4.26 a) y la correlación entre ambas señales en la Figura 4.27 a). Así mismo se repitió este proceso pero con la señal de voz masculina 2 en *far-end*, mostrando sus niveles de cancelación en la figura Figura 4.26 b) y la correlación con la señal de voz femenina en la figura Figura 4.27 b). Las señales de cancelación generadas por el sistema, Figura 4.28 a) y b), muestran características similares a la señal de eco de la Figura 4.10.



a) b)
Figura 4.26 ERLE con señal de voz femenina en *near-end* y señal de voz masculina en *far-end*
a) señal de voz masculina 1 b) señal de voz masculina 2

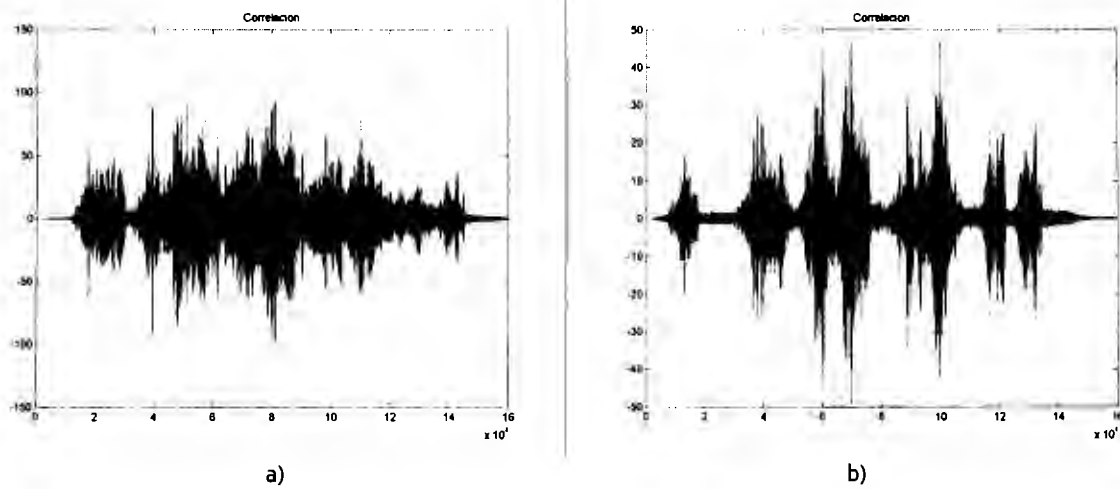


Figura 4.27 Correlación de la señal de voz femenina en *near-end* y señal de voz masculina en *far-end*
 a) señal de voz masculina 1 b) señal de voz masculina 2

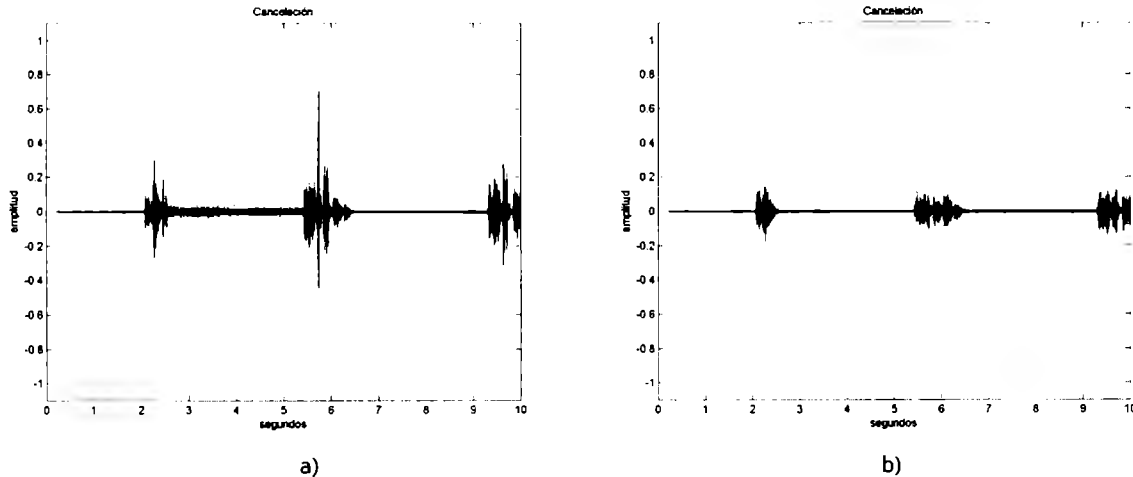


Figura 4.28 Señal de cancelación $\hat{d}(n)$ con señal de voz femenina en *near-end* y señal de voz masculina en *far-end*
 a) señal de voz masculina 1 b) señal de voz masculina 2

Este tamaño de paso empleado es el obtenido experimentalmente y registrado en la Tabla 4.3. El tamaño de paso de 0.1 generó mejores resultados cuando la correlación entre ambas señales se mantiene por debajo de 50 unidades, para la señal de voz masculina 1 el sistema comienza a divergir con este tamaño de paso. Lo anterior se muestra en la señal que tiene amplitud mayor a la señal de eco mostrada en la Figura 4.10.

Para la primera señal de voz masculina hay una cancelación de 25 dB, en contraste con la segunda voz que tiene una cancelación de 30dB. En caso de que la correlación supere las 50 unidades se recomienda un factor de tamaño de paso $\mu = 0.001$, esto se ve reafirmado por la

Figura 4.30 en las que la señal de cancelación se asemeja más a la señal de eco, aunque al reducir el tamaño de paso también se reduce la eficiencia del sistema pero este no diverge, a un nivel de cancelación de 20 dB, Figura 4.29.

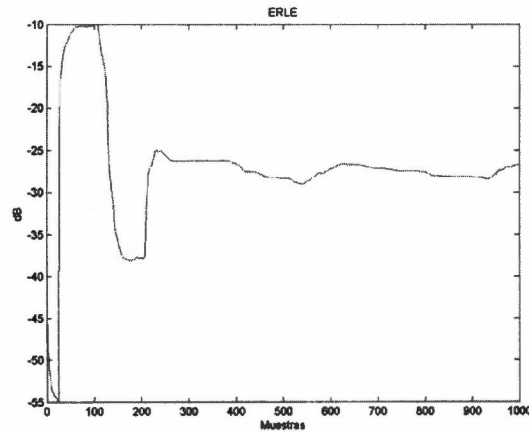


Figura 4.29 ERLE con señal de voz femenina en *near-end* y señal de voz masculina 1 en *far-end*

Tamaño de paso $\mu = 0.001$

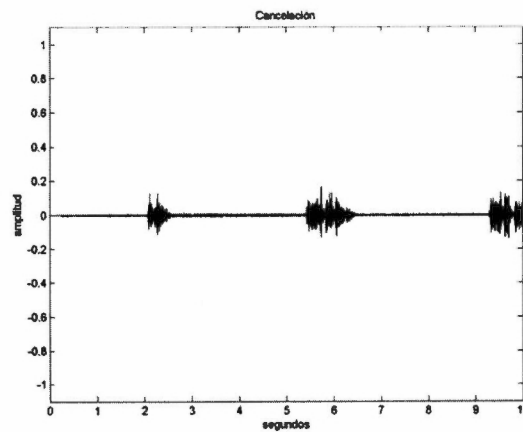


Figura 4.30 Señal de cancelación $\hat{d}(n)$ con señal de voz femenina en *near-end* y señal de voz masculina 1 en *far-end*

Tamaño de paso 0.001

Adicionalmente se realizaron pruebas con la planta presentada por Celis de 20 coeficientes, considerando como la señal de voz femenina en el *near-end* y las voces masculinas en el *far-end*, evaluadas una a la vez con los parámetros empleados se muestran en la Tabla 4.5.

Parámetro	Valor para el análisis
μ_{fwd}	0.01
μ_{bck}	0.01
Planta	Celis (2008)
Bloques	1000
Iteraciones	80

Tabla 4.5 Parámetros seleccionados para el análisis del sistema $\mu = 0.01$ y planta de Celis

En la Figura 4.31 se muestran las características del eco, espectro temporal y de frecuencia, las cuales se redefinen debido a que la planta es distinta.

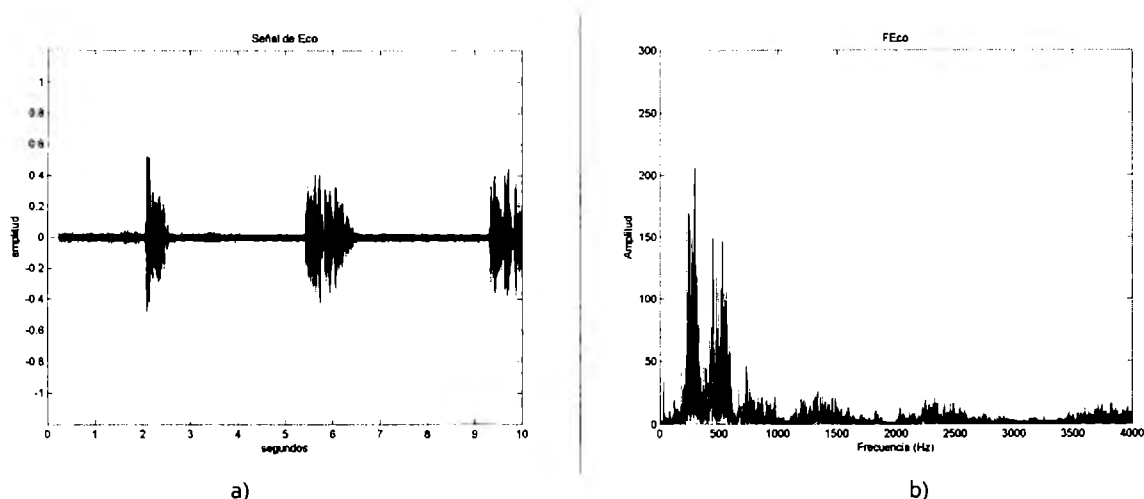


Figura 4.31 Señal de eco $d(n)$ de voz femenina en *near-end* con planta Celis
a) espectro temporal b) espectro en frecuencia

Se presentan los resultados de las señales de voz ya que son las que corresponden al escenario de una conversación telefónica en un escenario *double-talk*. Los niveles de cancelación de error se muestran en la Figura 4.32 en el cual para el mismo tamaño de paso se muestran niveles de cancelación menores de la Planta de Celis en comparación con la de Paleologu Figura 4.26.

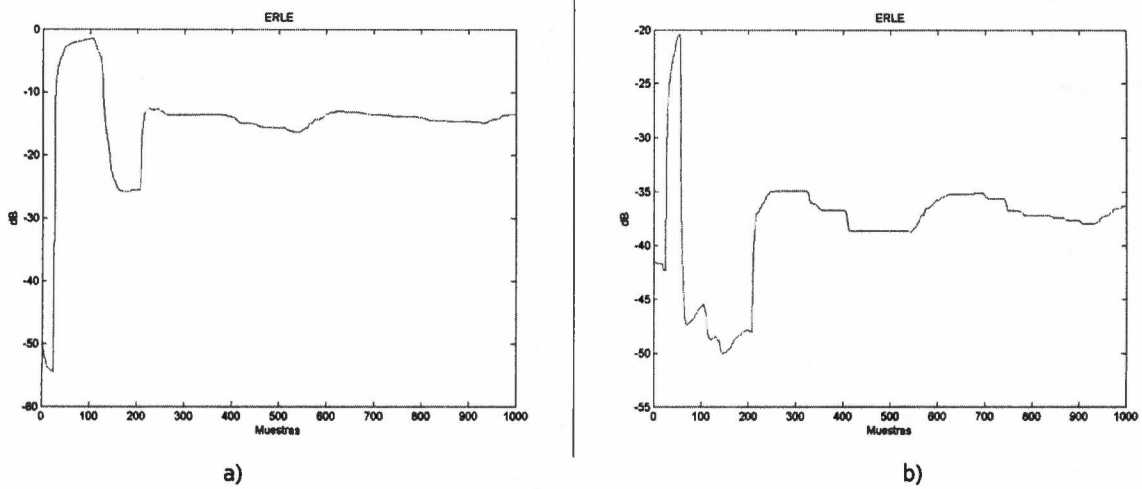


Figura 4.32 ERLE con señal de voz femenina en *near-end*, voz masculina en el *far-end*, $\mu = 0.01$ y planta Celis
 a) señal de voz masculina 1 b) señal de voz masculina 2

En la Figura 4.33 se muestra la señal de cancelación generada por el sistema para ambas señales de voz masculina en el *far-end*, cada una analizada con la señal de voz femenina en el *near-end*. En este caso se observa que la magnitud de la señal de cancelación supera a la de la señal de eco, de lo cual se concluye que el factor de paso empleado es superior al requerido para esta planta, esto también puede apreciarse en la Figura 4.34 aunque si mejora la cancelación de la señal respecto del caso en que no se emplea el sistema, Figura 4.35.

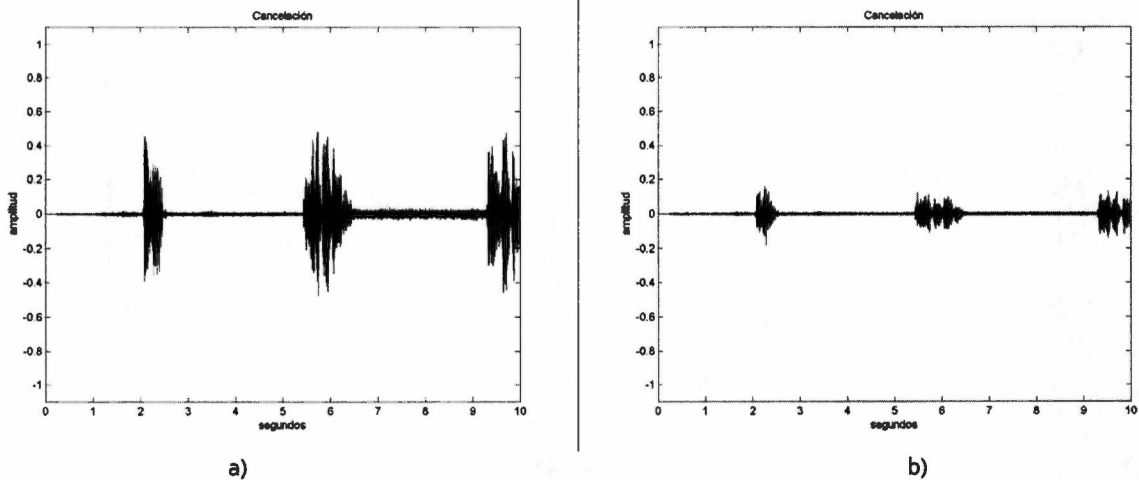


Figura 4.33 Señal de cancelación generada por el sistema empleando señal de voz femenina en *near-end*, voz masculina en el *far-end* y planta Celis
 a) señal de voz masculina 1 b) señal de voz masculina 2

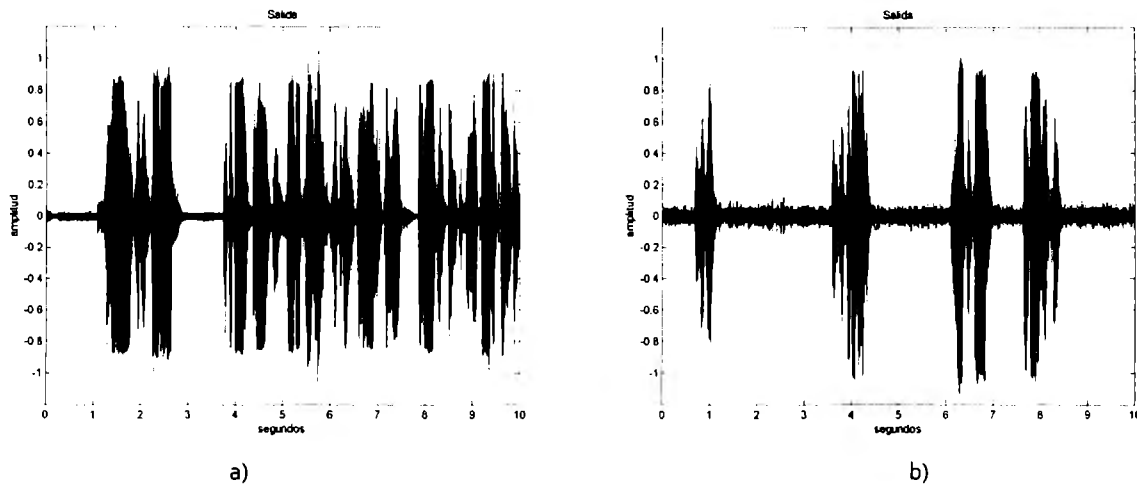


Figura 4.34 Señal de salida generada por el sistema empleando señal de voz femenina en *near-end*, voz masculina en el *far-end* y planta Celis
 a) señal de voz masculina 1 b) señal de voz masculina 2

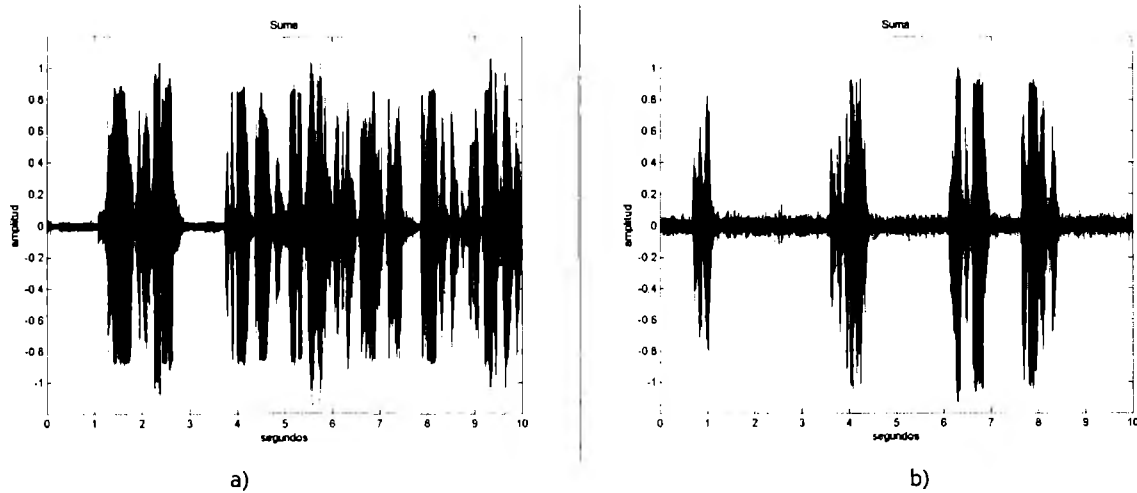


Figura 4.35 Señal de eco de voz femenina en *near-end* más la voz masculina en el *far-end* y planta Celis
 a) señal de voz masculina 1 b) señal de voz masculina 2

Los resultados obtenidos con la planta de Celis son similares a los obtenidos con la planta de Paleologu. Adicionalmente al realizar la disminución en el tamaño de paso, Figura 4.36, aumenta la cancelación del eco en contraste con la Figura 4.32 para esta misma planta.

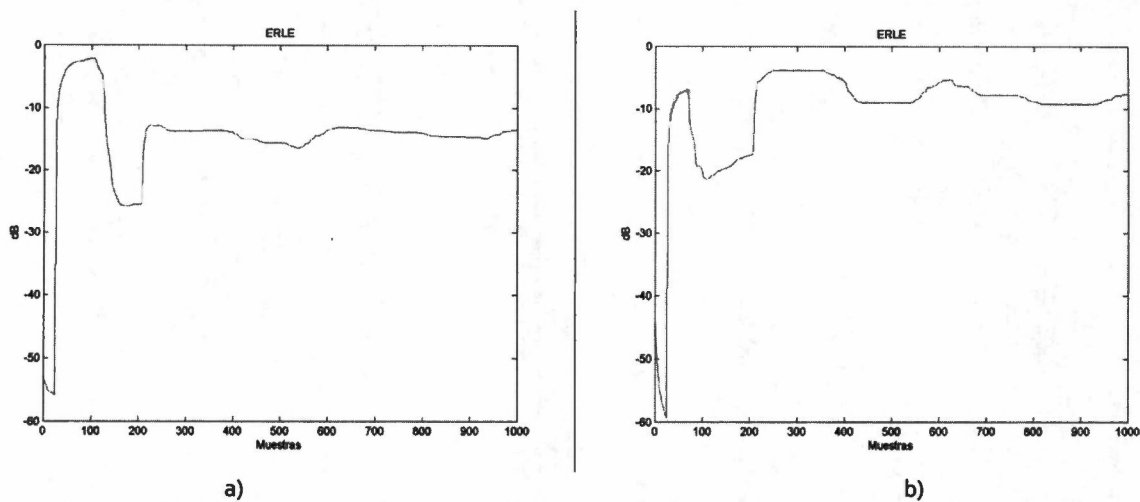


Figura 4.36 ERLE con señal de voz femenina en *near-end*, voz masculina en el *far-end*, $\mu = 0.001$ y planta Celis
 a) señal de voz masculina 1 b) señal de voz masculina 2

Así mismo, para ambas señales cuando se emplea un la planta presentada por Celis (2008) se tiene un mejor funcionamiento empleando el tamaño de paso sugerido por el autor ($\mu = 0.001$) aun cuando el escenario de prueba es distinto al desarrollado por éste. Lo anterior se observa en el aumento en los niveles de cancelación de eco mostrados por el ERLE para este tamaño de paso, Figura 4.36, en comparación con los obtenidos para un factor de paso mayor Figura 4.32.

Se concluye que la selección de distintas plantas no impide el correcto funcionamiento del sistema. Si bien se obtienen niveles de cancelación mayores para la planta de Celis se recomienda realizar las pruebas de simulación empleando la adaptación de la planta de Paleologu ya que ésta simula un efecto semejante al fenómeno de eco, lo cual está directamente relacionado con el objetivo del presente proyecto.

Finalmente se desarrollaron pruebas con la señal de voz femenina en el *near-end* y la señal de ladrido en *far-end*, manteniendo los parámetros de la Tabla 4.2. Los niveles de cancelación se muestran en la Figura 4.37 y la correlación entre ambas señales en la Figura 4.38. La señal de cancelación generada por el sistema bajo estas condiciones se muestra en la Figura 4.39.

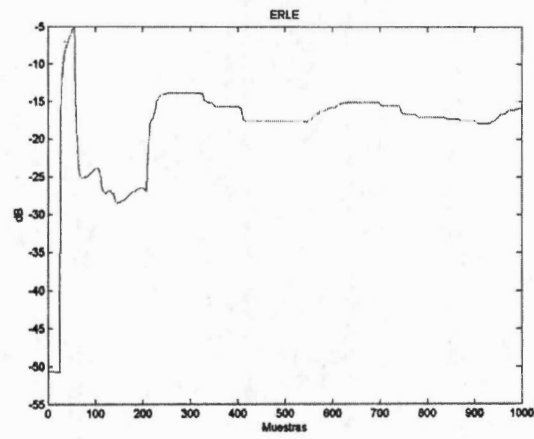


Figura 4.37 ERLE con señal de voz femenina en *near-end* y señal de ladrido en *far-end*

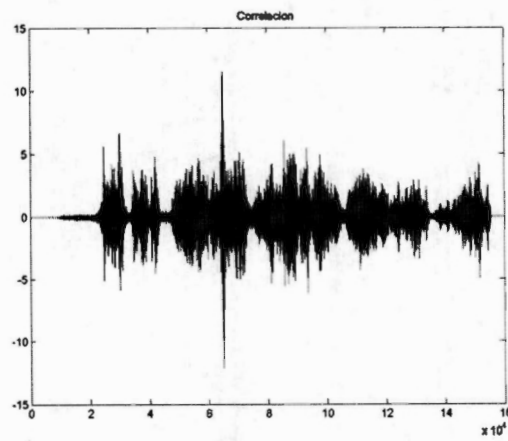


Figura 4.38 Correlación de la señal de voz femenina en *near-end* y señal de ladrido en *far-end*

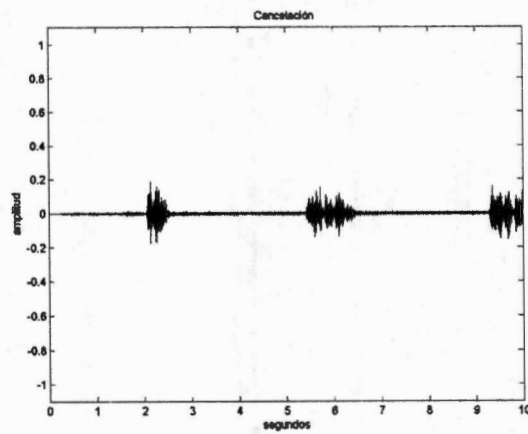


Figura 4.39 Señal de cancelación $\hat{d}(n)$ con señal de voz femenina en *near-end* y señal de ladrido en *far-end*

Nuevamente al implementar el tamaño de paso experimental de 0.1 con la planta Paleologu (2008) se cuenta con una cancelación de 35 dB con esta señal impulsiva, la cual tiene una correlación muy baja con respecto a la señal de voz femenina.

Auditivamente se aprecia la cancelación de la señal de voz femenina para las señales intermitentes e impulsivas. Si bien se reduce un poco la intensidad del sonido de la segunda señal de entrada si se muestra el efecto de Cancelación Activa de Eco. En el espectro temporal se aprecia que la señal de eco es muy semejante a la que produce el sistema para superponerla y lograr la cancelación del eco, esto también se observa un ascenso en los niveles de cancelación de eco medidos por el ERLE.

4.4.3 Pruebas del sistema propuesto en un caso de conversación telefónica

En el caso de una conversación telefónica se tienen presentes dos señales de voz, una para el *near-end* y otra para el *far-end*. Las señales empleadas para la evaluación del sistema incluyen el uso de la señal femenina en el *near-end* y de voz masculina en el *far-end*, mostradas en la sección anterior.

Así mismo, se incluye el resultado de pruebas adicionales en el CD anexo en el cual puede apreciarse auditivamente el resultado exitoso al emplear el sistema de cancelación de eco propuesto. En este caso las pruebas contienen tiene periodos en que ambos interlocutores hablan al mismo tiempo y se presenta el escenario *double-talk* que es el interés del presente trabajo, estas señales avalan el correcto funcionamiento del sistema. Las señales incluidas son aquellas relacionadas con las pruebas obtenidas, tanto en espectro de frecuencia, temporal y en formato de audio:

- Señal de entrada en el *near-end* $x(n)$
- Señal de entrada en el *far-end* $d_{in}(n)$
- Señal de eco generada $d(n)$

- Señal de salida del sistema $e(n)$
- Señal generada por el identificador $\hat{y}(n)$
- Señal generada por el predictor $y_p(n)$
- Señal de cancelación generada por el sistema $\hat{d}(n)$
- Señal correspondiente a la suma de la señal de entrada en el *near-end* y en el *far-end* sin implementar el sistema

La amplitud de la señal de eco está relacionada con la amplitud de la planta que lo genera; si el eco generado tiene una amplitud reducida en comparación con la señal en el *far-end*. Es por ello que auditivamente predomina la señal de *far-end* pero si se puede apreciar de forma práctica la cancelación de eco para señales no continuas.

Se logró una cancelación significativa, principalmente perceptible auditivamente, por lo que se recomienda incluir este análisis para apreciar el funcionamiento del sistema cancelador propuesto. La cancelación de eco se puede escuchar aún en periodos de *double talk* en los cuales se aprecia auditivamente una disminución de la señal de eco pero se conserva la señal del *far-end*. El funcionamiento del sistema para un escenario *single-talk* también se aprecia auditivamente de forma significativa, por lo que el análisis de escucha es altamente recomendado para ambos escenarios.

Para las señales de entrada empleadas para la evaluación y algunos ejemplos de las obtenidas durante el procesamiento se incluye una breve descripción de las mismas en la Figura 4.40. La interfaz gráfica de usuario diseñada para simular el sistema genera un nombre específico para cada prueba, la nomenclatura a la que se refiere cada componente del nombre se muestra en el Anexo D.

Archivo	Descripción
4To-1246.wav	Señal de cuatro tonos
Aspiradora.wav	Señal de audio de aspiradora
Ayi.wav	Señal de voz femenina

perrogseg.wav	Señal de ladrido
Octi.wav	Señal de voz masculina 2
Voz.wav	Señal de voz masculina 1
AyOcPcW01B01Q1000l8o.mat	Variables y parámetros empleados durante la simulación del sistema con señal de voz femenina en el <i>near-end</i> y señal de voz masculina 2 en el <i>far-end</i> , planta de Celis, tamaño de paso de 0.01, 1000 bloques, 80 iteraciones. Para su reproducción auditiva.
AyOcPcW01B01Q1000l8oCA.wav	Señal de cancelación $\hat{d}(n)$ generada por el sistema con señal de voz femenina en el <i>near-end</i> y señal de voz masculina 2 en el <i>far-end</i> , planta de Celis, tamaño de paso de 0.01, 1000 bloques, 80 iteraciones. Para su reproducción auditiva.
AyOcPcW01B01Q1000l8oSA.wav	Señal de salida $e(n)$ generada por el sistema con señal de voz femenina en el <i>near-end</i> y señal de voz masculina 2 en el <i>far-end</i> , planta de Celis, tamaño de paso de 0.01, 1000 bloques, 80 iteraciones. Para su reproducción auditiva.
AyOcPcW01B01Q1000l8oEC.wav	Señal de salida eco $d(n)$ generada por el sistema con señal de voz femenina en el <i>near-end</i> y señal de voz masculina 2 en el <i>far-end</i> , planta de Celis, tamaño de paso de 0.01, 1000 bloques, 80 iteraciones; para su reproducción auditiva.
AyOcPcW01B01Q1000l8oCA.jpg	Representación gráfica de la señal de cancelación $\hat{d}(n)$ generada por el sistema con señal de voz femenina en el <i>near-end</i> y señal de voz masculina 2 en el <i>far-end</i> , planta de Celis, tamaño de paso de 0.01, 1000 bloques, 80 iteraciones.
AyOcPcW01B01Q1000l8oSA.jpg	Representación gráfica de la señal de salida $e(n)$ generada por el sistema con señal de voz femenina en el <i>near-end</i> y señal de voz masculina 2 en el <i>far-end</i> , planta de Celis, tamaño de paso de 0.01, 1000 bloques, 80 iteraciones.
AyOcPcW01B01Q1000l8oEC.jpg	Representación gráfica de la señal de salida eco $d(n)$

	generada por el sistema con señal de voz femenina en el <i>near-end</i> y señal de voz masculina 2 en el <i>far-end</i> , planta de Celis, tamaño de paso de 0.01, 1000 bloques, 80 iteraciones.
AyOcPcWo1Bo1Q1000l8oFEC.jpg	Espectro en frecuencia de la señal de salida eco $d(n)$ generada por el sistema con señal de voz femenina en el <i>near-end</i> y señal de voz masculina 2 en el <i>far-end</i> , planta de Celis, tamaño de paso de 0.01, 1000 bloques, 80 iteraciones

Figura 4.40 Señales empleadas de evaluación y ejemplos

Capítulo V

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

La simulación del sistema de Control Activo de Ruido empleando un sistema de cancelación híbrido de ruido de diseño propio aplicado a un escenario de *double talk* en una conversación telefónica es exitosa debido a que en las pruebas se puede apreciar que la señal de cancelación generada por el sistema $\hat{d}(n)$ cuenta con características muy similares a las de la señal de eco originada por las dos plantas empleadas para la simulación Figura 4.10.

Sobre el rendimiento del sistema propuesto para la cancelación de eco en las líneas telefónicas se obtuvieron niveles satisfactorios de cancelación, siendo el menor de ellos de 20 dB para la planta Paleologu (2008). Es necesario considerar para el éxito del sistema:

- La planta que se utilizará
- Entrenamiento del filtro adaptativo del sistema identificador $W(z)$ con respecto a la señal que se va a cancelar
- Correlación entre las señales a considerar y el tamaño de paso relacionado.
- Escenario a analizar ya sea *single-talk* o *double-talk*

Dentro del análisis obtenido se comprobó que el sistema diseñado tiene niveles de cancelación mayores para el mismo periodo de tiempo, cuando éste cuenta con un entrenamiento previo, en comparación cuando se inicializa en ceros el sistema. El sistema es capaz de adaptarse a los distintos cambios que presenten las señales de entrada, así como los dos escenarios existentes mediante la utilización del tamaño de paso que se requiere.

La selección del tamaño de paso adecuado requiere de repetidas pruebas que lleven a la selección del parámetro más adecuado. Para ello se recomienda observar la correlación entre

señales de entrada para poder obtenerlo; a mayor correlación de la señales implementar un tamaño de paso menor.

El sistema muestra niveles de cancelación más altos para las señales continuas cercanas a los $50dB$, si bien no son el objeto principal de estudio el analizar el desempeño del sistema con señales distintas de voz permite establecer un marco de referencia para caracterizar el funcionamiento del sistema con señales periódicas y comprobar la validez del sistema.

Con respecto a las señales de voz evaluadas se alcanzan diversos niveles de cancelación en este punto el tamaño de paso es clave para obtener la cancelación de la señal de eco. A partir de este punto se reconoce que es de vital importancia realizar un análisis, semejante al propuesto, que incluya no sólo el indicador de cancelación de eco ERLE sino también se analice la semejanza de la señal generada por el sistema para la cancelación con la señal de eco producida por la planta elegida. Lo anterior debido a que si bien se pueden alcanzar niveles superiores de cancelación, mostrados por el aumento en magnitud del ERLE, puede ser que estos niveles se deban a la cancelación de la señal original del *far-end*, lo cual es indeseable ya que se desea preservar dicha señal.

Muestra de que el tamaño de paso adecuado marca una diferencia en la obtención de los resultados es que para la señal de voz masculina 1, al seleccionar un tamaño de paso menor en el que el sistema aún no diverge se obtienen niveles semejantes de cancelación de eco alrededor de $40dB$. Nuevamente resulta importante mencionar que hay que considerar la señal de cancelación generada que es la que tiene mayor impacto en la comparación y la correlación entre las señales de entrada la cual impacta directamente el tamaño de paso como se mencionó anteriormente.

Las pruebas realizadas con las señales de voz demuestran el correcto funcionamiento del sistema para el escenario de *double talk* en una conversación telefónica, ya que al evaluar la

simulación se logra cancelar la señal de eco generada por la planta, que es el principal objetivo del trabajo realizado.

Con respecto a las señales intermitentes se observa que también se logra la señal de cancelación de eco, para las pruebas realizadas se alcanzaron niveles de $35dB$ aproximadamente, por lo que se puede concluir que las distintas señales de entrada si tienen un impacto directo sobre el sistema pero este converge si se eligen los valores adecuados para el factor de paso.

Adicionalmente la interfaz gráfica de usuario desarrollada en Matlab® para simular el sistema propuesto se presenta como una aportación que facilita el uso del sistema y la selección de parámetros de análisis. Este sistema permite al usuario conservar no sólo las gráficas en formato de imagen sino permite el almacenamiento de todas las variables para su consulta futura y análisis más detallado en caso que se desee.

Finalmente se considera como que el sistema propuesto cumple con los objetivos planteados originalmente por las razones antes mencionadas, es una nueva aplicación para el sistema de cancelación híbrido de ruido. Así mismo, presenta la novedad de que toda la cancelación y procesamiento de señales se realiza en el dominio eléctrico lo cual permite simplificar el modelo. Esta aportación facilitará el desarrollo del trabajo futuro a los interesados en ampliar las aportaciones realizadas. En la bibliografía consultada no se encuentra documentada la utilización de un sistema híbrido para la cancelación de eco; es por ello que esta propuesta es una aportación específica para este campo.

5.2. Trabajo futuro

Dentro de las posibles líneas de investigación futuras se plantea la modificación del número de coeficientes a utilizar dentro de los filtros adaptativos, así como el uso completo de los 1000 coeficientes presentados por Paleologu (2008). También se propone el desarrollo de una planta experimental que simule el efecto de eco, desarrollada por el usuario.

Otra línea que se propone es ampliar el uso de otras señales para la validación del sistema en una variedad más amplia. Así como el uso de alguna de las vertientes del algoritmo LMS para mejorar los efectos de cancelación del sistema.

Adicionalmente se propone la implementación formal de un sistema de simulación que ejecute en tiempo real la cancelación de eco, aplicando los principios desarrollados durante el presente trabajo, mediante un procesador de señales digitales (DSP por sus siglas en inglés).

Bibliografía

Ansari, A. (2010). Echo cancellation in cellphone using neurofuzzy filter. IEEE. International conference in computer engineering (ACE). USA.

Akhtar, M. (2007). On active noise control Systems with online acoustic feedback path modeling. IEEE. Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, Volume 15, Issue 2.

Bekrany, M. (2011). A clipping-based selective tap adaptive filtering approach to stereophonic acoustic echo cancellation, IEEE. Transactions on audio, speech, and language processing, vol.19. nº 6.

Bellamy, J. (2000). Digital Telephony, John Wiley & Sons, Third edition, Canada.

Benesty, J. (2001). Advances in network acoustic echo cancellation, Digital signal Processing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Alemania.

Benesty, J. (2006). Robust extended multidelay filter and Double-Talk Detector for Acoustic Echo Cancellation. IEEE Transactions on audio, speech and language processing, vol. 14, nº 5.

Bermejo, E. (2005). Implementación de un sistema modificado de Cancelación Activa de Ruido. IPN. México.

Betancourt, P.(2007). Sistema Híbrido de Cancelación Activa de Ruido Acústico. ITESM CCM. México.

Bigelow (1991). Understanding Telephone Electronics. SAMS, Third Edition, USA. p.18.

Burgess, J. (1981). Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation, J. Acoust. Soc. Amer., vol 70, pp. 715-726.

Carballar, J. (2007). VoIP La telefonía de Internet. Editorial Thomson. España.

Casco, F. (1997). Algoritmo LMS de paso variable. Universidad Autónoma Metropolitana. México.

Castro, A. (1999) Teleinformática para ingenieros en sistemas de información. Editorial reverté, 2ª edición. España.

Celis, A. (2008). Análisis y Ecaluación de un Sistema Híbrido de Cancelación Activa de Ruido Acústico con Retroalimentación Acústica y Estimación de Trayectoria Secundaria en Línea con un Algoritmo Adaptable Modificado. ITESM CCM. México.

Figueiras, A. (2002). Una panorámica de las telecomunicaciones. Pearson Educación, Madrid.

Flockton, S. (1990). The use of fir and iir adaptive filtering algorithms in the active control of acoustic noise, IEEE signal processing magazine, pp 887-890, 1990.

Flotte, O. (2006). Desarrollo de un sistema de control activo de ruido. Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey. México.

- Fukui, M: (2009). New Acoustic echo canceller for videotelephony-enabled wideband business phone. IEEE. 13th International symposium on Consumer Electronics. USA.
- Gäsler, T. (1996). A double talk detectors based on coherence. IEEE Transactions on Communications, Vol. 44, No.11, pp. 1421-1427.
- Gibson, J. (1980). Adaptive Prediction in Speech Differential Encoding Systems, IEEE vol 68, p 488-535.
- Hansen, C. (2006). Understanding Active Noise Cancellation. Taylor & Francis. USA.
- Hänsler E. (2004). Acoustic echo and noise control: a practical approach. John Wiley & Sons. Canada.
- Haykin, S. (1984). Introduction to Adaptive Filters, Macmillan, USA.
- Haykin, S. (2004). Señales y Sistemas, Limusa Wiley, México.
- Herrera, W. (2004). Introducción a las telecomunicaciones modernas. Editorial Limusa, México.
- Holman, E. (1966). A new echo supresor. Bell Lab. Rec., vol. 44, pp. 139-142.
- Homana, I. (2010). Adaptive Algorithms for Double-Talk Echo. IEEE. USA.
- Huidobro, J. (2006). Sistemas de Telefonía. Thomson. España.
- Huntley, H. (1953). Transmission Design of Intertoll Telephone Trunks, Bell System Technical Journal, Sept 1953, p. 1019-1036.
- Jung, H. (2003). A new double talk detector using echo path estimation. IEEE. International conference on Acoustics, speech and signal processing, vol. 2, p. 1897-1990.
- Kipersztok O. (1993). Active control of broadband noise ussing fuzzy logic, second IEEE international conference on fuzzy logic, Vol. II, pp. 906-911, USA.
- Kuo, S. (1996). Active Noise Control Systems, Algorithms and DSP Implementations. Wiley. USA.
- Kuo, S. (1999). Active Noise Control: a Tutorial Review. IEEE. Proceedings of the IEEE, Vol.87, No. 6. USA.
- Kuo, S. (2001). Real- Time Digital Signal Processing. Implementations, Applications and Experiments with the TMS320C55X. Wiley. USA.
- Lee E. and Messerschmitt D. (1993). Digital Communication, Kluwer Academic Publisher, Norwell, MA.
- Loganathan, P. (2011). A proportionate adaptive algorithm with variable partitioned block length for acoustic echo cancellation. IEEE. International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), pp.73-76.

- López, E. (2010). Optimización de sistemas canceladores de ruido acústico. IPN. México.
- Lucky, R. (1973). A survey of the Communication in Time-Frequency Spread Media Using Adaptive Equalization IEEE, vol 56, USA, p. 1653-1679.
- Lueg, P. (1936). Process of silencing sound oscillations. Patente 1 043 416, USA.
- Martin, R. (2008). Advances in digital speech transmission. John Wiley & Sons. England.
- McKinlwy, R. (1993). Active Noise Reduction Headsets, Proc. 6th Int. Conf. on noise as public health hazard, vol. 2, Italy.
- Members of Technical Staff (1971). Bell Telephone Laboratories, Transmission Systems for Communicacions, 4th ed., Western Electric Company, Winston-Salem, USA.
- Mossi, M. (2011). Robust and low-cost cascaded non-linear acoustic echo cancellaiton. IEEE. International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP).
- Murando, K., Unagami S. and F. Amano (1990). Echo cancellation and applications, IEEE communications Magazine, pp.49-55.
- Oka, R. (2008). A step size control method steadily reducing acoustic echo even during double-talk. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Tailandia.
- Ollero, A. (1991). Control por computador: descripción interna y diseño óptimo. Marcombo. España.
- Paleologu, C. (2008). Variable Step-Size NLMS Algorithm for Under –Modeling Acoustic Echo Cancellation. IEEE Signal processing letters, vol. 15.
- Pierce, J. (2002). Señales: ciencia de la telecomunicación. Editorial Reverté. España.
- Popularikas, A. (2006). Adaptive Filtering Primer with Matlab, CRC-Taylor&Francis. USA.
- Richards, D. (1969). Echo suppressors for telephone connections having long propagation times. Proceedings of IEEE, vol. 116, pp. 955-964.
- Riera, J. (1986). Teleinformática y redes de computadora. Marcombo. Segunda edición, España.
- Saeed V. (2009). Advanced digital signal processing and noise reduction. Wiley & Sons, 4th Edition. Singapore.
- Shi, K (2008). A double-talk detector based on generalized mutual information for stereophonic acoustic echo cancellation systems with nonlinearity. IEEE, Conference on Signals, Systems and Computers 2008, p. 2161-2164.
- Shoureshi, R. (1994). Active noise control: a marriage of acoustics and control. Proceedings of the American control Conference Baltimore, Maryland. USA.

- Sondhi M. (1966). An adaptive echo canceller. Bell Syst. Tech. Journal vol. 46, No.3, pp.497-511.
- Sondhi M. (1980). Silencing echoes on the telephone network, Proceedings of the IEEE, vol 68(8) p. 948-963.
- Sondhi M. (2001). Advances in network and acoustic echo cancellation. Alemania.
- Song, Y. (2005). A robust hybrid feedback active noise cancellation headset. IEEE Transactions on speech and audio processing, Vol. 13, No. 4.
- Streeter, A. (2004). Hyrid Feedforward-Feedback Active Noise Control. IEEE, Proceedings of the 2004 American Control Conference. USA.
- Su, R. (2011). Implementation of the echo cancellation for DTMB repeater. IEEE. International conference on mechatronic science, electric engineering and computer (MEC). USA.
- Vaseghi, S. (2008). Advanced digital signal processing and noise reduction, John Wiley & Sons, Singapore.
- Waibel, A. (1990). Readings in speech recognition. Morgan Kaufmann publishers, Library of Congress Cataloging. USA.
- Wallace, K. (2011). Implementing Cisco Unified Communications Voice over IP and QoS (CVOICE) Foundation Learning Guide.
- Ward, W. (1997). Effects of high intensity sound, Chapt. 11p. Encyclopedia of acoustics, ed. Malcolm J. Crocker, John Wiley & Sons, USA.
- Warnaka, G. (1981). Improvements in adaptive active attenuators. Proc. Inter-noise, pp.307-310.
- Widrow, B. (1985). Adaptive Signal Processing. Prentice Hall, USA.
- Wiener, N. (1949). Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series, MIT Press, USA.
- Widrow, B. (1975). Adaptive Noise Cancelling: principles and Applications. IEEE, Proceedings of the IEEE, vol. 63, No. 12.
- Xu, L. (2011). Improving convergence of the MPNLMS algorithm for echo cancellation. 3rd international conference on Advanced computer control (ICACC), pp.198-201.
- Ye, H (1991). A new double-talk algorithm based on the orthogonality theorem. IEEE transactions on Communications, vol. 39, No. 11, pp. 1542-1545.
- Yoo, J. (1997). A new double talk detector using the lattice predictors for an acoustic echo canceller. IEEE, Annual Conference TENCON '97, Speech and Image Techonologies for computing and Telecommunications, vol 2, p. 483-486.

Zahid, M. (2009). A new variable step size method for online feedback path modeling in active noise control systems. IEEE. 13th International Multitopic Conference INMIC. Pakistan.

Anexo A

Guía de interfaz de usuario

Se recomienda eliminar las variables existentes mediante el uso del comando "clear all" antes de inicializar la interfaz. Se debe inicializar el programa denominado "SistemaHibridoCAE" y se despliega automáticamente la Figura A.1 en la cual se debe seleccionar primeramente el escenario a implementar, *single-talk* si se selecciona "Silencio 1" y "Archivo 1" para un posible escenario *double-talk*, en ese caso la señal que se seleccione será la que presentará eco.

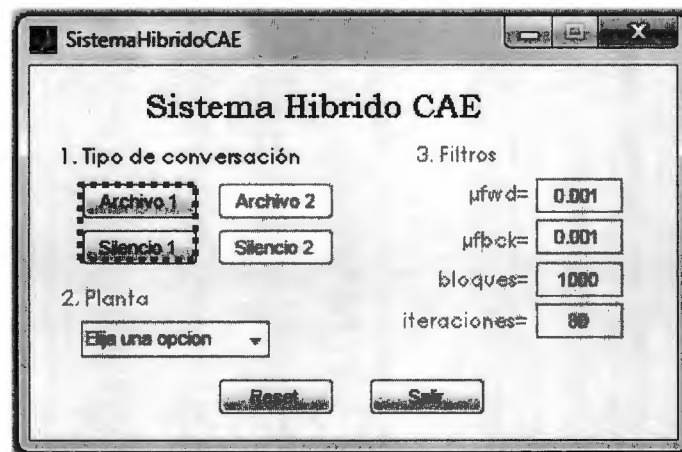


Figura A.1 Selección del escenario

En caso de que se seleccione "Archivo 1" se desplegará una pantalla, Figura A.2, que permite seleccionar el archivo de audio para analizar en el *near-end*. Una vez seleccionado el archivo puede darse doble clic sobre el nombre del mismo, o bien, dar clic en el botón "open"

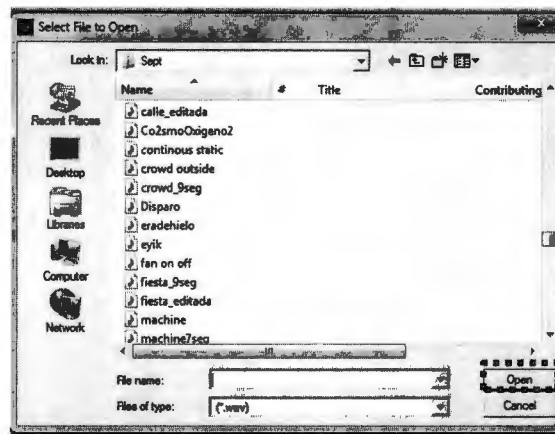


Figura A.2 Selección de señal de audio

Posteriormente se puede seleccionar el escenario, al elegir "Archivo 2" si se eligió previamente una señal de audio se empleará el escenario *double-talk*, para el caso de Silencio 2, se considerará un escenario *single-talk*, Figura A. 3. La pantalla que se despliega al seleccionar "Archivo 2" se muestra en la figura A.2.

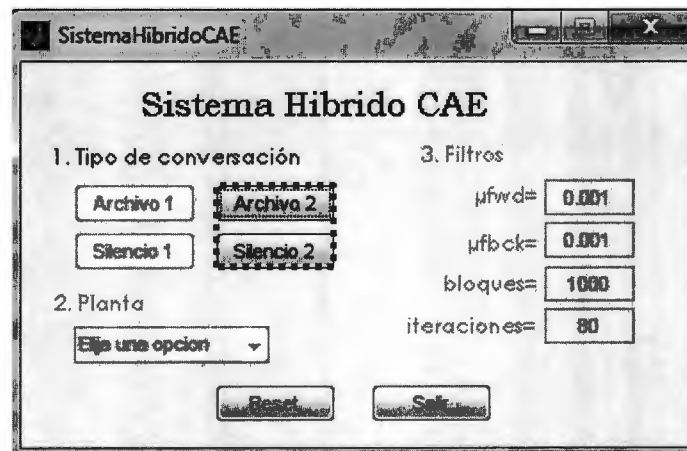


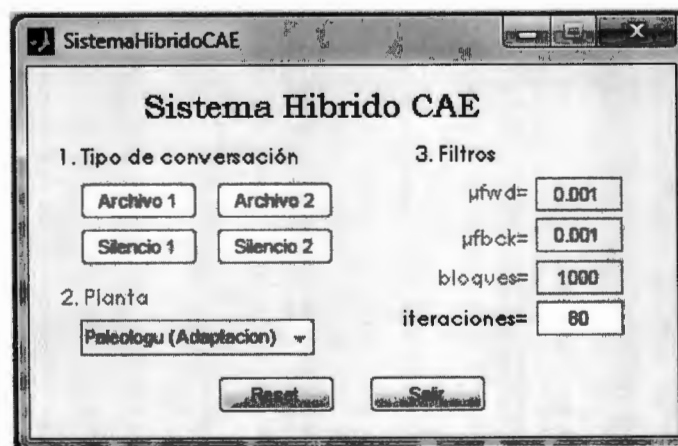
Figura A.3 Selección de escenario

Posteriormente se puede seleccionar la planta, Figura A.4, modificación de Paleologu (2008) y Celis (2008).



Figura A.4 Selección de planta

Finalmente el sistema permite seleccionar el tamaño de paso para cada etapa del sistema, la identificadora y predictora y los bloques e iteraciones que se deseen utilizar, Figura A. 5.

Figura A.5 Selección del tamaño de paso para el *feedforward* y *feedback*, bloques e iteraciones

Anexo B

Artículo propuesto

Active Echo Cancellation in Telephone Lines Using A Hybrid System

Pavón Navarrete A.¹, López Caudana E. ¹, Bustamante Bello R. ¹ and Perez Meana H. ²

¹Tecnológico de Monterrey CCM

adriana_pavnav@hotmail.com; edlopez@itesm.mx; rbustama@itesm.mx

² Mechanical and Electrical Engineering School, National Polytechnic Institute
hmpm@prodigy.net.mx

Abstract

Abstract- This paper presents a direct application of Active Noise Cancellation (ANC) to increase Echo Cancellation in telephone lines even during double talk periods. This represents an alternative to eliminate the perceived echo in the near-end during a telephone call originated because of the impedance mismatch in the telephone network. This solution is based on the use of an adaptive filter system with hybrid configuration and the Least Mean Square algorithm (LMS). Also presents simulation results that show the hybrid system and parameters used provide an effective Echo Cancellation in the double talk and single talk scenarios.

I. INTRODUCTION

In the field of Active Noise Cancellation (ANC) there have been developed different systems of controls like feedback [1], feedforward [2] and hybrid [3]. These systems require an integration of different disciplines such as acoustics, signal processing and vibration [4]. ANC systems have different applications which include development in the automobile, industrial applications, transportation, headphones [5]. There are two kinds of echo: electric and acoustic. The electric echo is present in traditional telephony lines because of the impedance mismatch of the conversion from two to four wires. The acoustic echo is the direct or indirect feedback of reflected signals to the microphone during a conversation. There are two controls applied to echo: suppressor and canceller systems.

Echo Cancellation systems need to consider the disturbances in the far-end talker's signal and the superposition of the near-end talker's that generates

double-talk[8]. Two general approaches are the use of suppressors and the use of cancellers. The echo suppressor has a sensor that measures the voice signal power in each part of the circuit to decrease the impact of the echo. The echo suppressor change the full duplex channel to a half duplex channel[6]-[7]. This characteristic is a disadvantage of this type of control because it cancel part of the speech. Echo cancellers use the superposition principle that means this system generates a similar signal with delay and attenuation similar to the transmitted signal. It is recommended to train the system to approach to the characteristics of the echo signal. For this problem some authors [9]-[10] offered different solutions based on Double-Talk Detector (DTD) [11]; this principle detect the presence of simultaneous speech of both talkers and pause the coefficient updating of the adaptive filter. It's know that the adaptive filter is the key to treat echo problems. It is necessary to consider the speed of convergence and robustness of the system. Most of echo cancellation systems use transversal filters and the LMS [12] algorithm or variations of this to adjust the coefficients.

The result is an error signal named as residual echo signal due to estimation of the adaptive filter [11], this scenario is shown in Fig 1.

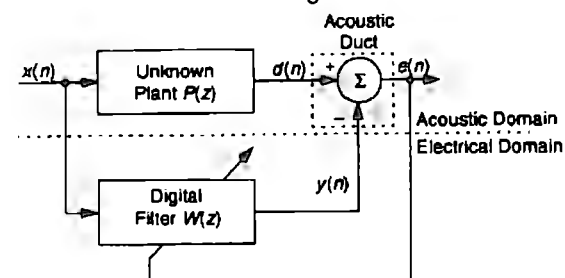


Fig. 1 System identification viewpoint of ANC [5]

From Fig.1 the residual echo $e(n)$ is defined as followed:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (1)$$

Where $d(n)$ is the echo signal and $y(n)$ is the response generated by the adaptive filter after processing the algorithm.

Also [5] presents the criteria of the Mean Square Error (MSE) to find the convergence point of the system. To analyze the performance of the Echo Cancellation system was develop the (Echo Return Loss Enhancement) ERLE criteria shown in equation (2)

$$ERLE = 10 \log \left\{ \frac{E[d^2(n)]}{E[e^2(n)]} \right\} \quad (2)$$

This parameter was used to evaluate the present proposed system.

II. PROPOSED SYSTEM

The hybrid ANC contain the advantages of feedback and feedforward systems, also it has shown good results according. The model presented by [3] was modified to adapt the system for a specific objective: reduce the residual echo.

This system use two signal of entrance $x(n)$ and $d_{in}(n)$, one for each talker. The plant to model echo refers to the effect of mismatch of impedance present in the telephone circuit. The echo signal is $d(n)$ and the residual echo plus the far-end signal is represented by $e(n)$. This system incorporates the signal of the feedforward and the feedback effect that means both systems contributes to generate the cancelling signal $\hat{d}(n)$ which approximates to the echo signal. Also this system includes a switch on the feedback system, when the echo signal and the far-end signal are highly correlated the feedback system cancel part of the far-end signal even if the hybrid system already converged [13].

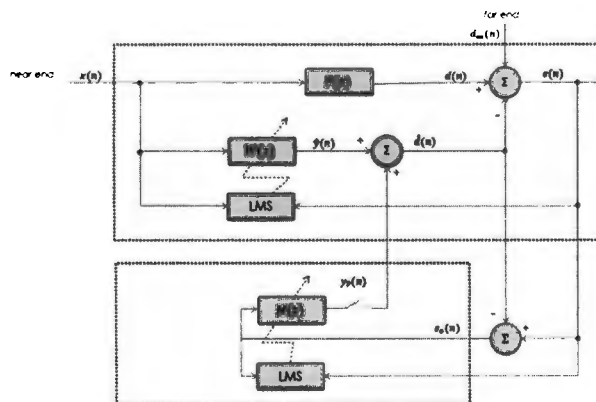


Fig. 2 Hybrid system for Active Echo Cancellation

To analyze the system is necessary to consider the correlation between signals, as shown in the next equation:

$$\bar{R} = E[\bar{x}(n) \bar{x}^T(n)] \quad (3)$$

The cross correlation vector between the entrance and the echo is given by:

$$\bar{p} = E[d(n)x(n)] \quad (4)$$

and the correlation matrix can be write as follows:

$$\overline{R}w_0 = \bar{p} \quad (5)$$

where \bar{w}_0 is the optimum vector of the transversal filter. In the selected algorithm, LMS, the reference signal $x(n)$ is processed by an adaptive filter $W(z)$. In this case the coefficients of the filter are updated by the gradient of the error signal power obtained plus the previous coefficients and μ step size:

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

III. PARAMETERS OF PERFORMANCE

The proposed system has different parameters to consider, this parameters influence if the system converge:

- Stepsize (μ):* which controls the system stability and speed of converge, one for each part of the system (feedback and feedforward)
- Plant:* that simulates the echo effect
- Adaptative filter $W(z)$:* length and values taken
- Number of blocks and iterations:* reflected in the number of samples observed
- Entrance signals:* including the near-end and the far-end.

Specifically for the stepsize where taken proposed values by [3] and [14]. The plant simulates the effect of echo that the near-end suffer because of the impedance mismatch, proposed by [15].

The entrance signals probed are from three types considering the classification proposed by [5]:

- Continuous:* the level of sound remains constant or nearly constant with small fluctuations. In this case the selected signal were vacuum[16], four tones[16] and silence
- Intermittent:* the level of sound presents some fluctuations that can be periodic or random. The selected signals are real voices recorded in a computer
- Impulsive:* the level of noise presents impulses in a brief period of time, In this case the signal used is a barf taken of an internet database [16]

IV TRAINING OF THE SYSTEM

Because the main objective of the system is to cancel echo voice signals the training of the system was with this. Also the plant previously mentioned, we adapt the plant for 20 representative coefficients

instead the 1000 given by [15], the adaptive filter was a vector of 20 coefficients initialized in zero. The near-end voice was a female voice and silence for the far-end. The step size value were change until get the higher level of ERLE, after run the simulation of the system using Matlab®, with an interface developed specifically for this purpose, the results of the adaptive filter were retaken to repeat the processing, when a 40dB of cancellation were achieve the training was stopped. That means that the scenario for training the system was single-talk with a single voice signal in the near-end.

V. SIMULATIONS

To consider an approximation of a real system the results of processing echo of voice with the hybrid proposed system. We presented the results using the feminine voice signal (Fig. 3) in the near-end and two different masculine voice signals in far-end (Fig. 4 and Fig. 5).



Fig. 3 Feminine voice signal



Fig. 4 First masculine voice signal



Fig. 5 Second masculine voice signal

The echo signal generated by the adaptation of the plant is represented in the Fig 6.



Fig. 6 Echo of the feminine voice signal with the adapted plant

Table 1. Parameters of analysis

Parameters	Value
Stepsize	0.1
Plant	Adaptation of [15]
Blocks	1000
Iteration	80

Applying the system with the parameters of Table 1, the results shown in Fig. 7 and Fig. 8 show the system increase the cancellation.

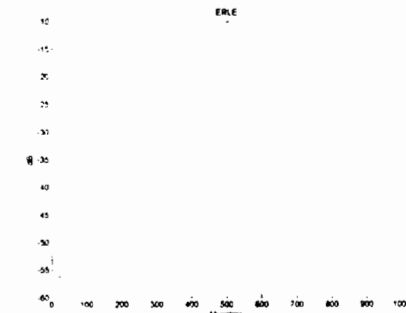


Fig. 7 ERLE using feminine voice in the near-end and masculine voice 1 in far-end

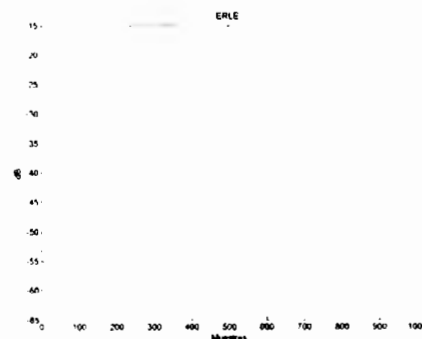


Fig. 8 ERLE using feminine voice in the near-end and masculine voice 2 in far-end

But a detail analysis in the cancelling signal, which imitates echo signal, shows for the first masculine signal that the system begin to diverge, seen in the peak of the Fig 9. This occurs because the high correlation between the two entrance voices where the correlation is in over 50, Fig. 10. This effect is given by the feedback because even when the system already converge starts to cancel the far-end signal [2]. To eliminate this effect the system includes a switch that turns off to eliminate the effect of the feedback when the signal generated by him it is greater than the maximum amplitude of the signal, both entrance signal are normalized.

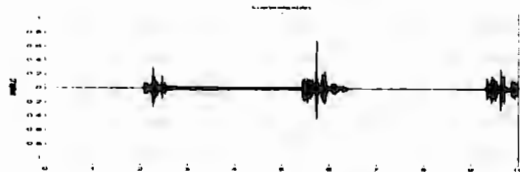


Fig. 9 Cancelling voice signal, system with masculine voice 1



Fig. 10 Correlation between feminine voice and masculine voice 1

Instead for the second masculine signal the system still converge this can be appreciated in Fig. 11, because the correlation between this signal and the feminine signal is less than 50, shown in Fig. 12.



Fig. 11 Cancelling voice signal, system with masculine voice 2

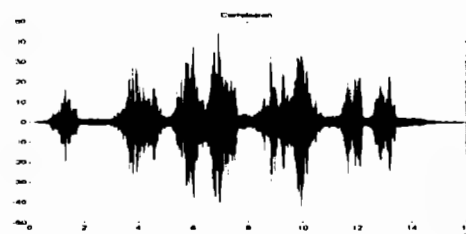


Fig. 12 Correlation between feminine voice and masculine voice 1

As mentioned before the stepsize factor has a great impact for the development of the system that is the reason to adjust this parameter to make the system converge, additional simulations were made using the parameters of the Table 2, this mean a smaller stepsize and the first masculine voice.

Table 2. Parameters for additional tests

Parameters	Value
Stepsize	0.01
Plant	Adaptation of [15]
Blocks	1000
Iteration	80

The system improves his performance using the parameters of Table 2. The generated cancelling signal, Fig13, doesn't have impulsive periods.



Fig. 13 Cancelling voice signal, system with masculine voice 1 and adjust stepsize factor

VI. CONCLUSIONS

The proposed system works in an acceptable way but it is necessary to consider and adjust the different kind of parameters. The system is efficient to cancel echo of voice signals and can be applied to simulated scenarios of double talk without use the Double Talk Detector. Also it is necessary to evaluate the correlation between entrance signals because this correlation has a great impact of the performance of the system. If both signals has a great correlation, greater than 50 it is necessary to use a small step size for both feedback and feedforward systems.

VII. REFERENCES

[1] Jiun-Hung Lin; Shih-Tsang Tang; Wei-Ru Han; Chih-Yuan Chuang; Ping-Ting Liu; Shuenn-Tsong Young; , "Evaluation of Speech Intelligibility for Feedback Adaptive Active Noise Cancellation Headset," *Biomedical and Pharmaceutical Engineering, 2006. ICBPE 2006. International Conference on*, vol., no., pp.24-29, 11-14 Dec. 2006.

[2] Mohammadzaheri, M.; Lei Chen; Behnia-Willison, F.; Aryan, P.; "A design approach for feedback-feedforward control systems," *Control and Automation, 2009. ICCA 2009. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.2266-2271, 9-11 Dec. 2009
doi: 10.1109/ICCA.2009.5410298

[3] Celis, A.; Colunga, P.; Lopez, M.J.; Lopez-Caudana, E.; Nakano-Miyatake, M.; Perez-Meana, H.; , "Evaluation of a Hybrid ANC System with Acoustic Feedback and Online Secondary Path Modelling," *Electrical, Communications, and Computers, 2009. CONIELECOMP 2009. International Conference on*, vol., no., pp.96-101, 26-28 Feb. 2009.

[4] Shoureshi, R.; "Active noise control: a marriage of acoustics and control," *American Control Conference, 1994* , vol.3, no., pp. 3444- 3448 vol.3, 29 June-1 July 1994.

- [5] Kuo, S.M.; Morgan, D.R.; "Active noise control: a tutorial review," *Proceedings of the IEEE*, vol.87, no.6, pp.943- 973, Jun 1999.
- [6] Murano, K.; Unagami, S.; Amano, F.; , "Echo cancellation and applications," *Communications Magazine, IEEE*, vol.28, no.1, pp.49-55, Jan 1990.
- [7] Lee E. and Messerschmitt D.; *Digital Communication*, Kluwer Academic Publisher, Norwell, MA. 1993.
- [8] Oka, R.; Fujii, K.; Muneyasu, M.;, "A step size control method steadily reducing acoustic echo even during double-talk," *Intelligent Signal Processing and Communications Systems, 2008. ISPACS 2008. International Symposium on*, vol., no., pp.1-4, 8-11 Feb. 2009.
- [9] Kun Shi; Xiaoli Ma; Zhou, G.T.; "A double-talk detector based on generalized mutual information for stereophonic acoustic echo cancellation systems with nonlinearity," *Signals, Systems and Computers, 2008 42nd Asilomar Conference on*, vol., no., pp.2161-2164, 26-29 Oct. 2008.
- [10] Buchner, H.; Benesty, J.; Gansler, T.; Kellermann, W.; "Robust extended multidelay filter and double-talk detector for acoustic echo cancellation," *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, vol.14, no.5, pp.1633-1644, Sept. 2006.
- [11] Jae Ha Yoo; Dong Yon Kim; , "Network echo canceller based on the practical adaptive filter," *Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2005. ISPACS 2005. Proceedings of 2005 International Symposium on*, vol., no., pp. 693- 696, 13-16 Dec. 2005.
- [12] Tandon, A.; Ahmad, M.O.; Swamy, M.N.S.; "An efficient, low-complexity, normalized LMS algorithm for echo cancellation," *Circuits and Systems, 2004. NEWCAS 2004. The 2nd Annual IEEE Northeast Workshop on*, vol., no., pp. 161- 164, 20-23 June 2004.
- [13] Mehmood, Z.; Tufail, M.; Ahmed, S.; "A new variable step size method for online feedback path modeling in active noise control systems," *Multitopic Conference, 2009. INMIC 2009. IEEE 13th International*, vol., no., pp.1-6, 14-15 Dec. 2009
- [14] Homana, I.; Topa, M.; Kirei, B.S.; Contan, C.; "Adaptive algorithms for double-talk echo cancelling," *Electronics and Telecommunications (ISETC), 2010 9th International Symposium on*, vol., no., pp.349-352, 11-12 Nov. 2010
- [15] Paleologu, C.; Ciocina, S.; Benesty, J.; "An Efficient Proportionate Affine Projection Algorithm for Echo Cancellation," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol.17, no.2, pp.165-168, Feb. 2010
- [16] Free Sound Effects, Samples & Music. *Free Sound Effects Categories*. Available on <<http://www.freesfx.co.uk/soundeffectcats.html>>

Anexo C

Nomenclatura de los archivos generados por el código en Matlab®

La asignación de nombres para los archivos generados cuentan con la forma general siguiente $xyyPxW\#B\#Q\#I\#term.ext$, la especificación de cada parte se muestra en la figura D.1

Nomenclatura	Descripción
xx	Primeras dos letras del nombre del archivo ".wav" de la señal de entrada en el <i>near-end</i> .
yy	Primeras dos letras del nombre del archivo ".wav" de la señal de entrada en el <i>far-end</i>
Px	planta seleccionada
W#	μ <i>feedforward</i> (parte decimal)
B#	μ <i>feedback</i> (parte decimal)
Q#	Número de bloques
I#	Número de iteraciones
term	Especifica la señal generada por el sistema
.ext	Extensión que va a tomar el archivo

Figura D.1 Nomenclatura para la asignación del nombre en los archivos generados por la interfaz gráfica de usuario

Específicamente, para las plantas se cuentan con dos opciones posibles, Figura D.2, la adaptación de la planta de Paleologu (2008) y la planta de Celis(2008) con 20 coeficientes.

Nomenclatura	Descripción
Pp	Adaptación de la planta de Paleologu
Pc	Planta Celis

Figura D.2 Nomenclatura para especificación de la planta

Con respecto a la especificaciones de las señales generales la terminación define la señal tanto en el espectro temporal, como en el espectro de frecuencia representadas mediante una gráfica. Así mismo se incluyen las señales con formato ".wav" para poder ser escuchadas auditivamente. La nomenclatura de la terminación de las señales se muestra en la Figura D.3.

Nomenclatura	Descripción
Sin terminación	Señal de entrada en el <i>near-end</i> $x(n)$
CA	Señal de cancelación generada por el sistema $\hat{d}(n)$
co	Muestra la correlación entre la señal del <i>near-end</i> con la señal del <i>far-end</i>
E2	Señal de entrada en el <i>far-end</i>
EC	Señal de eco $d(n)$
ERLE	Representación gráfica del ERLE
F1	Espectro en frecuencia de la señal de entrada en el <i>near-end</i> $x(n)$
F2	Espectro en frecuencia de la señal de entrada en el <i>far-end</i> $d_{in}(n)$
F12	Espectro en frecuencia de la suma de las señales de entrada sin implementar el sistema
FAU	Comparación de espectros en frecuencia de la señal de salida $e(n)$ al implementar el sistema y sin implementarlo
FCA	Espectro en frecuencia de la señal de cancelación $\hat{d}(n)$
FEC	Espectro en frecuencia de la señal de eco $d(n)$
FSA	Espectro en frecuencia de la señal de salida del sistema $e(n)$
MSE	Representación gráfica del MSE
SA	Señal de salida del sistema $e(n)$
Y1	Señal generada por la parte identificadora del sistema $\hat{y}(n)$
YP	Señal generada por la parte identificadora del sistema $y_p(n)$
1y2	Señal correspondiente a la suma de las señales de entrada sin implementar el sistema

Figura D.3 Nomenclatura para identificación de la señal, referente a la terminación del archivo

La extensión que puede tomar el archivo depende de la naturaleza del mismo, lo cual se muestra en la figura D.4.

Nomenclatura	Descripción
.wav	Archivos de audio
.jpg	Imágenes correspondientes a las gráficas generadas
.mat	Archivo de Matlab con variables guardadas

Figura D.4 Nomenclatura para la especificación de la extensión del archivo