

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA  
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“SISTEMA DE REDUCCIÓN DE RUIDO AMBIENTAL EN  
UNA DIADEMA DE COMUNICACIONES USANDO  
FILTRADO ADAPTABLE”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

ALFREDO CRUZ LÓPEZ

DIRECTORES:

M. C. JOSÉ JAIME ESQUEDA ELIZONDO

M. C. DANIEL GARCÍA RODRÍGUEZ

TIJUANA B. C., DICIEMBRE DE 2008

---

## RESUMEN

Esta Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias; tiene como objetivo el desarrollar una “aplicación acústica haciendo uso de Procesamiento Digital de Señales (PDS)”. El alcance de esta aplicación es desarrollar un sistema de reducción de ruido ambiental empleando la tarjeta de evaluación DSK-6713 [Apéndice G] donde se ejecuta un algoritmo de filtrado digital adaptable que señala una diadema prototipo con micrófonos supervisores para obtener referencias acústicas. Los resultados obtenidos se comparan con otros sistemas [Apéndice A).

La aplicación trata sobre la Reducción de Ruido Ambiental (RRA) que se implementa en una diadema de comunicaciones haciendo uso del principio físico de interferencia destructiva; es decir, sumar dos señales de igual magnitud y frecuencia pero con fases exactamente opuestas para lograr su cancelación. Llegar a una cancelación en la práctica es muy difícil, aún así se pretende lograr una reducción significativa que podrá ser medida.

La reducción de ruido ambiental es deseable en muchos lugares por diferentes razones, por ejemplo: salud física, evitar distraerse o simplemente conveniencia, entre otros. El trabajo presente tiene su aplicación en una Oficina o Centro de Llamadas en donde un agente que está atendiendo una llamada telefónica se encuentra en un lugar con ruido ambiental considerable, éste deberá estar aislado del sonido de su entorno para ser mas eficiente en su trabajo.

El prototipo con el que se trabaja es una diadema de comunicaciones a la cual se le incluyen micrófonos que captan el sonido del entorno de la persona que la usa. La señal del micrófono por si misma es insuficiente para inicializar la interferencia destructiva, de tal manera que se usan algoritmos de Filtrado Adaptable para la reducción del ruido, en específico se aplica el algoritmo LMS (mínimos cuadrados promedio) dada su simplicidad [1], [2], [3], [4].

## ABSTRACT

This work is to obtain the MS degree by developing an acoustic application using digital signal processing (DSP). The scope of this application is to develop a noise reduction system using the evaluation board DSK-6713 [Appendix G] on which runs adaptive filtering and signals a headset prototype with monitor microphones build in. The data obtained might be compared with similar systems [Appendix A].

This application simulates the environmental noise reduction feature built in a headset by using the signal interference principle; in other words, adding two signals with equal amplitude and frequency but with opposite phase to obtain their cancellation. To get signal cancellation is very difficult in the real world in any case significant noise reduction is pretended that can be measured.

Environmental noise reduction is desirable in many places for all sorts of reasons, such as: human health, to avoid distractions or just because it is convenient, among others. This work, applies at the office or call centers where a person who is on the phone attending a call is surrounded by considerable ambient noise needing to be isolated from noise in his/her surroundings so as to be more efficient in his/her job.

The prototype is a headset with microphones build in which serve as monitors of environmental sounds that the person who is wearing it is exposed to. The microphone signal is not enough to start the destructive signal interference, so adaptive filtering algorithms are used for this purpose, and the LMS (Least Mean Square) algorithm is used in particular due to its simplicity [1], [2], [3], [4].

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Título</b>	<b>Página No.</b>
<b><u>RESUMEN</u></b>	<b><u>2</u></b>
<b><u>ABSTRACT</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b><u>TABLA DE CONTENIDO</u></b>	<b><u>4</u></b>
Lista de Figuras.....	6
Lista de tablas .....	8
Lista de Símbolos y Acrónimos.....	9
<b><u>INTRODUCCION</u></b>	<b><u>10</u></b>
<b><u>1      <u>CAPITULO I. Entorno acústico</u></u></b>	<b><u>13</u></b>
1.1    Ruido ambiental en una oficina .....	14
1.2    Diadema de comunicaciones.....	19
1.2.1    El modulo transmisor .....	21
1.2.2    El modulo receptor.....	24
1.2.3    Aislamiento acústico en una diadema de comunicaciones	27
1.2.4    Modos de cancelación.....	29
<b><u>2      <u>CAPITULO II. Filtrado Adaptable</u></u></b>	<b><u>31</u></b>
2.1    Estructuras de filtros adaptables .....	33
2.2    El Filtro Wiener .....	35
2.3    Minimizando el error cuadrático promedio .....	38
2.4    El método de descenso más pronunciado .....	43
2.5    El algoritmo LMS .....	44
<b><u>3      <u>CAPITULO III. Des</u> <u>CAPITULO III. Desarrollo del</u></u></b>	
<b><u>Sistema de reducción de Ruido Ambiental (SRRA)</u></b>	<b><u>47</u></b>
3.1    Diadema de comunicaciones prototipo.....	49

3.2	Topología del SRRA y su integración con la tarjeta de evaluación .....	57
3.2.1	Funciones de transferencia del prototipo .....	60
3.2.2	Integración del prototipo a la tarjeta DSK .....	62
3.3	Desarrollo del algoritmo LMS para la tarjeta DSK .....	64
3.4	RESULTADOS DE PRUEBAS .....	69
<b><u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u></b>		<b>76</b>
<b><u>APENDICE A: Estudio Competitivo de Diademas con “ANR”</u></b>		<b>77</b>
<b><u>APENDICE B: Comportamiento y Límite Auditivo Humano</u></b>		<b>78</b>
<b><u>APENDICE C: Valoración de RA en una Oficina y un CC</u></b>		<b>80</b>
<b><u>APENDICE D: Valoración Subjetiva de RA Aceptable en ERP</u></b>		<b>87</b>
<b><u>APENDICE E: Ubicación del Micrófono Supervisor de RA en Prototipo</u></b>		<b>89</b>
<b><u>APENDICE F: Interfaz del prototipo y la tarjeta DSK</u></b>		<b>90</b>
<b><u>APENDICE G: Tarjeta de evaluación: DSK6713, TI</u></b>		<b>92</b>
<b><u>APENDICE H: Hardware del sistema SRRA</u></b>		<b>94</b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍAS</u></b>		<b>96</b>

**Lista de Figuras**

<b>Títulos</b>	<b>Pág. No.</b>
Figura 1-1. Espectro de frecuencia de RA en un CC; (a), (b) gráficos en 3D diferentes ángulos, (c) vista superior .....	17
Figura 1-2. Variedad de Diademas de comunicaciones (fotos, cortesía de Plantronics, Inc.) .....	20
Figura 1-3. Diagrama a bloques de una diadema de comunicaciones básica. ....	21
Figura 1-4. Canal de transmisión .....	22
Figura 1-5. Respuesta en frecuencia para la transmisión telefónica [11] .....	24
Figura 1-6. Canal de recepción .....	25
Figura 1-7. Respuesta en frecuencia para la recepción telefónica [11] .....	26
Figura 1-8. Vías de flujo entre transmisor y receptor .....	28
Figura 1-9. Modo pasivo y activo de cancelación en el espectro de frecuencia.....	29
Figura 2-1. Cuatro estructuras básicas de filtrado adaptable: (a) Predictor, (b) Identificador de sistemas, (c) Modelado inverso y (d) Cancelador de interferencia.....	33
Figura 2-2. Filtro FIR, estructura básica.....	35
Figura 2-3. Filtro Wiener .....	36
Figura 2-4. Identificación de los pesos de adaptación .....	37
Figura 2-5. Filtro adaptable .....	37
Figura 2-6. Función de desempeño con un solo peso .....	42
Figura 2-7. Función de desempeño con dos pesos.....	42
Figura 2-8. Representación grafica del factor de convergencia, $\mu$ [4].....	44
Figura 3-1. Arreglo de micrófonos supervisores en la diadema de comunicaciones prototipo .....	49
Figura 3-2. Diadema de comunicaciones prototipo con los micrófonos instalados .....	50
Figura 3-3. Diagrama para interpretar la interferencia destructiva en el dominio SPL..	53
Figura 3-4. Respuesta en Frecuencia de micrófonos supervisores del prototipo; (a) lado primario y (b) lado secundario .....	54
Figura 3-5. Funciones de transferencia por acoplamiento (a) primario, (b) secundario.	57
Figura 3-6. Topología del cancelador de ruido [1]-[4] .....	58

Figura 3-7. Sistema SRRA representado con sus funciones de transferencia [13].....	61
Figura 3-8. Arquitectura del sistema, SRRA .....	63
Figura 3-9. Diagrama de flujo del algoritmo SRRA operando en la tarjeta de evaluación DSK6713 .....	64
Figura 3-10. Convergencia del algoritmo LMS para casos: (a) $L=32$ , $N=200$ , $\mu=0.01$ , (b) $L=32$ , $N=200$ , $\mu=0.001$ , (c) $L=32$ , $N=100$ , $\mu=0.068$ .....	71
Figura 3-11. Proceso de reducción de RA mediante algoritmo LMS y muestras de archivos de audio.....	72
Figura 3-12. Datos de las variables de salida usando diferentes parámetros.....	75
Figura A-1. Gráficos comparativos sobre el desempeño de RRA de productos disponibles en el Mercado.....	77
Figura B-1 Curvas de Fletcher and Munson [8]; (a) entrada-salida en incrementos de 10 dB, (b) limite mínimo y máximo de intensidad sonora.....	78
Figura C-1. Espectro de frecuencia de RA medido: DIA 1 a DIA 5, en Oficina, DIA 6 a DIA 10, en un CC.....	83
Figura D-1. Mediciones ERP de RA en camara anecoica .....	88
Figura E-1. Respuesta en frecuencia para cada posición de 4 micrófonos distribuidos en el receptor .....	89
Figura G-1. Diagrama a bloques de DSK6713, TI [17].....	92
Figura H-1. Diagrama esquemático del sistema SRRA.....	95

**Lista de tablas**

<b>Títulos</b>	<b>Pág. No.</b>
Tabla 1-1. Nivel de “RRA” sugerido, medido en 1 KHz.....	19
Tabla 1-2. Especificación de reducción de ruido ambiental.....	19
Tabla 3-1. Tiempo de convergencia .....	69
Tabla C-1: Registro del calendario de grabaciones del espectro de frecuencia del ruido ambiental en una oficina y centro de llamadas .....	80
Tabla F-1. Lectura de puertos E/S de la tarjeta DSK.....	90

**Lista de Símbolos y Acrónimos**

ANR	Reducción activa de ruido, <i>Active Noise Reduction</i>
CC	Centro de llamadas, <i>Call Center</i>
dBSPL	Nivel de presión de sonido en decibel, <i>Decibel Sound Pressure Level</i>
DSK	Tarjeta de desarrollo PDS, <i>Digital Signal Processing, starter kit</i>
DSP	Procesamiento digital de señales, <i>Digital Signal Processing</i>
ERP	Punto de referencia en oído, <i>Ear Referente Point</i>
FIR	Respuesta finita al impulso, <i>Finite Impulse Response</i>
FXLMS	Siglas en ingles de : <i>Filtered –X Least Mean Square</i>
HATS	Simulador de torso y cabeza, <i>Head and Torso Simulator</i>
IIR	Respuesta infinita al impulso, <i>Infinite Impulse Response</i>
LMS	Mínimos cuadrados promedio, <i>Least Mean Square</i>
NLMS	Siglas en ingles de : <i>Normalized Least Mean Square</i>
OSHA	Siglas en ingles de : <i>Occupational Safety and Health Administration</i>
Pa	Pascal
PDS	Procesamiento Digital de Señales
RA	Ruido Ambiental
RRA	Reducción de Ruido Ambiental
RLR	Siglas en ingles de : <i>Receive Loudness Rating</i>
RLS	Siglas en ingles de : <i>Recursive Least Square</i>
RRmA	Reducción de Ruido modo Activo
SNR	Relación señal a ruido, <i>Signal to Noise Ratio</i>
SRRA	Sistema de Reducción de Ruido Ambiental
TI	<i>Texas Instruments</i>
VoIP	Siglas en ingles : <i>Voice Over Internet Protocol</i>
K	Función de transferencia de acoplamiento pasivo

## INTRODUCCION

Para el mercado de las comunicaciones telefónicas convencionales y actualmente comunicaciones de voz a través de Internet, las firmas líderes en diseño y manufactura de Diademas de Comunicaciones persiguen como objetivo fundamental para el uso de sus productos, ofrecer una comunicación clara e inteligible tanto en su transmisión como en su recepción y así brindar servicios de calidad durante la comunicación. Este objetivo los lleva a incorporar en sus productos diseños mecánicos, electrónicos y acústicos en ocasiones complejos para el tratamiento de tales señales. Por ejemplo; el diseño mecánico es llevado a la práctica de tal manera que sea eficiente para la operación de los transductores seleccionados, estos a su vez, son buscados para garantizar la correcta detección y reproducción del espectro de frecuencia auditivo. El diseño electrónico para el manejo de las señales auditivas es llevado a la práctica incluso con tecnologías de punta como lo es el Procesamiento Digital de Señales (PDS).

Sin embargo, es de reconocer que una Diadema de Comunicaciones es un accesorio de un Equipo Terminal tal como un aparato telefónico o un computador y que por lo tanto, existen “n “ variables que se suscitan a través de todo el canal de comunicaciones y que no podrían necesariamente ser controladas en la diadema de comunicaciones; por ejemplo, el ruido agregado al canal de comunicación, la posibilidad de una mala operación del equipo telefónico o de la tarjeta de audio del computador, hasta las fallas que se generan en la fuente de alimentación, entre otras.

Pero también existen variables en el lado de la diadema de comunicaciones que son bien consideradas y tratadas; ellas pueden ser: un óptimo acoplamiento eléctrico con el Equipo Terminal, un óptimo manejo de la corriente de consumo para la operación de la diadema y por supuesto procurar la óptima señal transmitida libre de ruido, entre otras. La óptima transmisión de la señal sin ruido es muy conocida en el ámbito acústico y denominada “técnica de cancelación de ruido”; cuyo propósito es filtrar el ruido ambiental de la señal que se transmite, y para ello es usual el uso de micrófonos específicos denominados canceladores de ruido. Así, en el lado receptor, quien recibe la comunicación, escucha

una señal clara (a expensas del funcionamiento del canal de comunicaciones y del equipo Terminal).

Existe otra variable que afecta la inteligibilidad de una comunicación que no es tratada muy comúnmente y que es el tema de Tesis: La Reducción del Ruido Ambiental, RRA, en el lado Receptor. Este es el caso en que la recepción es llevada a cabo en un ambiente ruidoso o muy concurrido y hay una diversidad de sonidos en el entorno y como ejemplos se podrían enumerar, un estadio de fútbol, la sala de una bolsa de valores, un taller de maquinado, una oficina, un centro de llamadas (Call Center, CC), etc., y que es necesario establecer una comunicación. Evidentemente esta se llevará a cabo pero en ocasiones será poco eficiente dada su poca inteligibilidad.

La reducción del ruido ambiental en el lado de recepción es deseable para la inteligibilidad de la comunicación y de mayor consideración, cuestiones de salud humana, en el caso de ambientes de trabajo muy ruidosos y que son nocivos para el oído humano. A la fecha solo unas pocas diademas de comunicaciones incorporan esta característica.

Dado que este trabajo tiene aplicación en una Oficina o un Centro de Llamadas; se llevan a cabo mediciones acústicas para determinar las características del ruido ambiental en lugares de este tipo. Estos datos de ruido ambiental dan un reconocimiento de su espectro y magnitud que ayudan a definir los requisitos del sistema para su reducción. La aplicación se llevo a cabo con los dispositivos siguientes:

- Diadema de Comunicaciones Prototipo
- Algoritmo de Filtrado Adaptable
- Tarjeta de evaluación DSK-6713

La diadema de comunicaciones incorpora micrófonos supervisores para la detección del ruido ambiental y la señal capturada es después procesada por el algoritmo LMS (Least Mean Square) para obtener la señal estimada de ruido e invertida en fase. La señal estimada es luego reproducida por la bocina de la misma diadema de comunicaciones prototipo.

El uso de filtrado adaptable es usado por ser una técnica de procesamiento adecuada para trabajar con señales en tiempo real y con cambios aleatorios, es decir estará actualizando sus parámetros conforme la entrada vaya modificándose.

La tesis se distribuye en tres capítulos; en el capítulo I, se persigue solamente dar una idea sobre el tema de la diadema de comunicaciones y el tema acústico que esta asociado a la aplicación tratada, se espera también crear el interés por ahondar mas en el área para quienes recurran a este trabajo e invitarlos a hacer más investigación. En el capítulo II, en términos sencillos y sin un desarrollo matemático a fondo, se explican los conceptos de filtrado adaptable para llegar a las principales ecuaciones del algoritmo LMS, base para el desarrollo del código de programación que será usado. Finalmente en el capítulo III, con las bases tratadas en los capítulos previos, se describe el desarrollo del sistema de reducción de ruido ambiental (SRRA), así como los resultados que se obtienen.

Por otra parte, si bien el contenido que se presenta en esta tesis tiene un alto contenido de otra área de estudio dado que esta es una aplicación, el algoritmo seleccionado en sí, propone la aplicación de distintos tópicos del área de señales y sistemas y procesamiento digital de señales vistos en de clases como lo son el desarrollo de filtros FIR, procesos de convolución, correlación y análisis espectral principalmente [6], [7].

# CAPITULO I

## Entorno Acústico

En este capítulo se describen las características del ruido ambiental en un sitio de trabajo y su influencia para quienes están expuestos a este sonido. Se describe también, como una diadema de comunicaciones típica funciona y como ésta es modificada para integrar la característica de RRA, los elementos que la componen, y su relación con la forma en que desempeña tal función.

## 1.1 Ruido ambiental en una oficina

El párrafo siguiente es una nota genérica encontrada en internet y que describe un lugar de trabajo específico, como el de una oficina, y como el ruido en su ambiente no es conveniente para el desempeño de sus funciones. Con esto en mente, el desarrollo de un producto que ayude en la reducción de este ruido es deseable, y es como el tema de tesis fue seleccionado.

```
+++++
+
Re:      Active      Noise      Reduction      headphones
Apr      20,      2004      10:57      pm,      by      Jodie
My work environment is pretty noisy at times - copier, printer and the usual
office noise, but most importantly people chatter noise. I do not have a
private office. My desk is in the front administration office and my job
requires that I do programming in new software. HELP! What are the best
headphones for me? I don't care what they look like, but they need to be
comfortable.
Thanks.
+++++
+
```

Haciendo un análisis de este texto, se pueden asociar los siguientes puntos importantes:

- (1) Para ciertas áreas de trabajo, reducir el ruido ambiental es deseable para permitir un mejor desempeño laboral.
- (2) ¿Cual es la naturaleza del ruido ambiental en una oficina?
- (3) ¿Cual es la relación de este ruido ambiental en relación con una señal deseada?

“*Ruido ambiental (RA)*, llamaremos a todo aquel sonido que se encuentra en el entorno de una persona y que no es deseado “.

En referencia al punto (1), es comprensible que disminuir el nivel de ruido ambiental (RA) permite a quien se beneficia de este, lograr una mayor concentración para el

desempeño de alguna función. Una disminución de este RA no solo es deseable por lo descrito anteriormente, sino en algunos casos es necesario para mantener una salud auditiva. La organización OSHA [10] destaca que una persona no debe estar expuesta a sonidos mayores a 118dB SPL. Recordemos las graficas de Fletcher-Munsen [Apéndice B] que indican 120 dB como el nivel de sonido al cual existe dolor en el oído y como consecuencia disminución en la capacidad auditiva o pérdida de la misma.

Algunos sitios de trabajo o lugares públicos en donde los niveles de sonido que se alcanzan son altos pueden ser: una discoteca, un taller de maquinado, un aeropuerto, la cabina de una avioneta, helicóptero, una mina, etc. y para estos casos debe ser necesario el uso de protectores auditivos.

Por otra parte, una oficina común de trabajo es un sitio en donde los niveles de ruido ambiental ahí generados no son tan altos que afecten la salud auditiva, pero “si” en cambio, contienen un nivel notable para distraer a personas. En el estudio: “Valoración de RA en una Oficina y un CC” [Apéndice C], llevado a cabo como parte de esta tesis arroja datos sobre los niveles de RA que predominan en una Oficina y un CC en función de su intensidad y espectro de frecuencia.

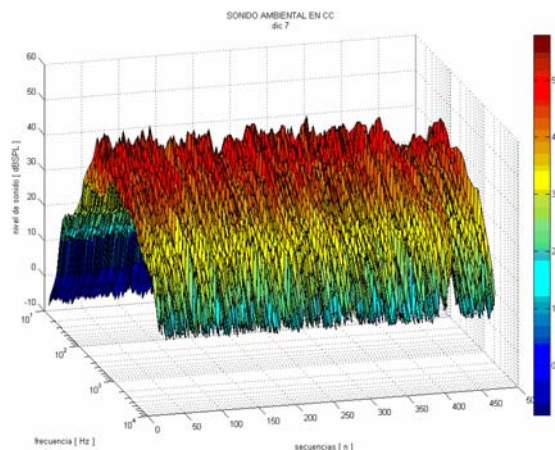
**Una Oficina o CC, es el lugar idóneo de aplicación para este trabajo.** Típicamente es una sala en la que se ubican a un número “x” de recepcionistas que atienden vía telefónica a usuarios/clientes. En este escenario un número indeterminado de voces y sonidos diversos se mezclan y perturban el entorno de cada recepcionista, quien al estar conversando con el usuario/cliente es susceptible de distracciones a raíz de este enrarecido entorno acústico y en consecuencia no prestar un buen servicio. Es este entorno acústico o de RA el que es deseable de ser cancelado o al menos ser disminuido.

En referencia al punto (2), ¿Cuál es la naturaleza del ruido ambiental en una oficina?

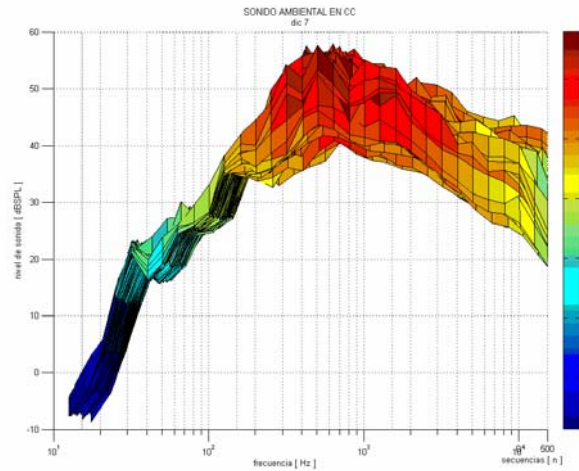
Se destaca lo siguiente:

- el ruido ambiental esta compuesto por voces y por una diversidad de sonidos , que además proveniente de distintas fuentes
- el ruido ambiental es variable y aleatorio tanto en su espectro de frecuencia como en su densidad espectral de potencia
- el ruido ambiental se espera sea distinto de un lugar a otro, dependiendo del rubro del lugar, características físicas del lugar, cantidad de personas en el lugar, entre otras variables mas.

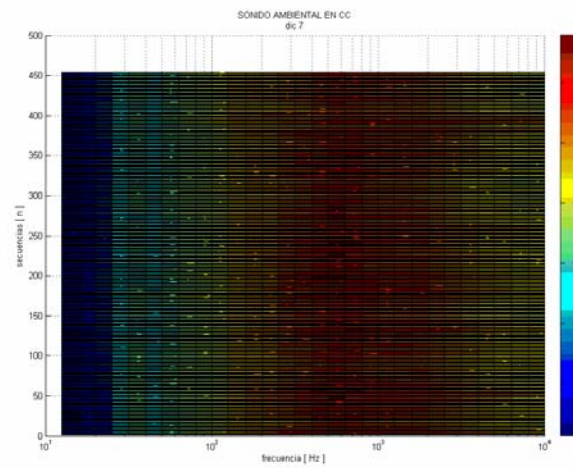
El estudio de “Valoración de RA en una Oficina y un CC” [Apéndice C] arroja datos como los mostrados en Figura 1-1. Los gráficos representan el espectro de frecuencia del RA medido en un CC, particular a un día específico de trabajo; (a) se observa como la intensidad de RA cambia aleatoriamente de una muestra a otra, en el “eje x” se representa la secuencia de muestras, en el “eje y” la intensidad, y en el “eje z” la frecuencia; (b) al rotar el gráfico se intercambian los ejes es decir, en el “eje x” se representa la frecuencia y en el “eje y” la intensidad, (c) con el objetivo de identificar las áreas de frecuencia que tienen mayor energía (color rojo) a lo largo de todas las muestras, se emplea una vista superior de este mismo gráfico simulando un plano coloreado 2D [ frecuencia (x), muestra(y) ], el color indica la intensidad.



(a)



(b)



(c)

**Figura 1-1. Espectro de frecuencia de RA en un CC; (a), (b) gráficos en 3D diferentes ángulos, (c) vista superior**

Por otra parte, la banda de frecuencia para comunicaciones telefónicas convencionales manejada en la red de telefonía pública es de banda angosta: 300Hz a 3400Hz, de acuerdo con el estándar de comunicaciones ANSI/TIA 810B [11]. El RA se encuentra distribuido principalmente en frecuencias bajas – medias de acuerdo con la Figura 1-1 y mas detalladamente con el estudio descrito en el Apéndice C.

En referencia al punto (3), ¿Cuál es la relación entre la señal deseada y el ruido ambiental?

Dato : Para el caso específico en el que se recibe una llamada con un equipo telefónico convencional, se puede esperar, en el auricular telefónico o en la diadema de comunicaciones, una señal de recepción nominal RLR de  $0\text{dB} \pm 4\text{dB}$  [11]. Para los aparatos que cuentan con control de volumen, este valor es ajustable en un rango dinámico típico de 10~15 dB.

De las mediciones hechas [Apéndice C], el valor promedio del ruido ambiental en una oficina y es:

$$\text{RA} \sim 45 \text{ dBSPL @ } 1 \text{ Khz.}$$

Este dato solo da la información del RA como referencia, más no de la intensidad de sonido que existe en el oído de la persona que esta expuesta a éste. Para conocerlo, debe involucrarse la función de aislamiento de la diadema de comunicaciones que se emplee.

Por otro lado, para conocer prácticamente cual es un valor deseado de reducción de ruido ambiental (RRA) cuando una llamada telefónica esta en proceso, se hace la siguiente evaluación subjetiva, “Valoración subjetiva de RA aceptable, ERP” [Apéndice D]; esto es, escuchar una conversación con un nivel de recepción promedio de 65dBSPL en una diadema de comunicaciones del tipo SUPRA AURAL (a describirse en sección 1.2.4) y generando un RA inicial de 65 dBSPL. Entonces, incrementar el RA gradualmente hasta encontrar el nivel en que el usuario comienza a perder información de la comunicación por falta de inteligibilidad o en otras palabras le es difícil mantener la comunicación adecuadamente. La diferencia de la variación de RA entre lo tolerable y no deseable es la “REDUCCION DE RUIDO AMBIENTAL, RRA”, que se sugiere. La Tabla 1-1 muestra los datos de 3 usuarios evaluando este procedimiento.

**Tabla 1-1. Nivel de “RRA” sugerido, medido en 1 KHz**

USUARIO	NIVEL DE CONVERSACION [ dBSPL ]	RUIDO AMBIENTAL AJUSTADO [ dBSPL ]	“RRA” SUGERIDO [ dB ]
usuario (A)	65	65, 70, 75, 80	> 10 dB
usuario (B)	65	65, 70, 75, 80	> 10 dB
usuario (C)	65	65, 70, 75, 80	> 10 dB

Estos valores son tomados a la frecuencia de 1KHz, tomar en cuenta que la distribución del espectro de frecuencia no es plana sobre el rango auditivo [Apéndices B – C].

De estos datos y el estudio llevado a cabo [Apéndice C], sugerimos la especificación deseable para reducción de ruido ambiental en una diadema de comunicaciones y que se enlistan en la siguiente Tabla 1-2.

**Tabla 1-2. Especificación de reducción de ruido ambiental**

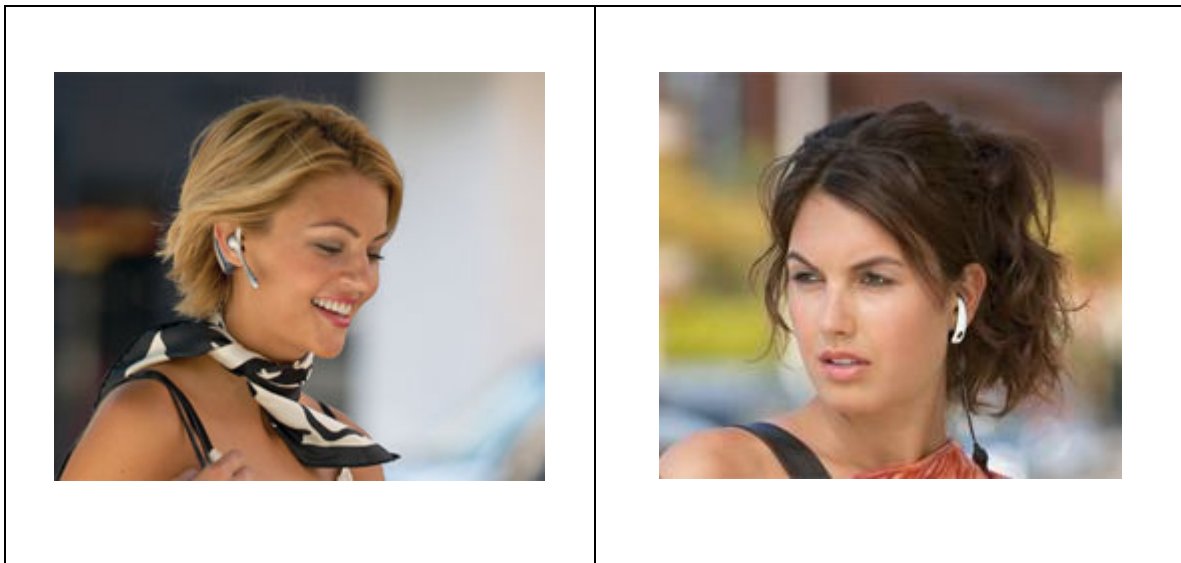
	Parámetro	Especificación	Unidad
1.	Reducción de ruido ambiental, RRA. ( @ 1KHz )	>10	dB
2.	Banda de frecuencia de operación de RRA	400 ~ 4000	Hz

El parámetro (1) nos indica el nivel mínimo de reducción que el prototipo deberá cumplir medido a la frecuencia de 1 KHz, en tanto que el parámetro (2) nos indica el rango de frecuencia en que este deberá operar óptimamente.

## 1.2 Diadema de comunicaciones

En la telefonía moderna, los servicios que se prestan con equipos telefónicos son tan variados y juegan un papel importante en la sociedad que por ello han estado en constante evolución. Para aquellos servicios en que una persona esta en constante uso del

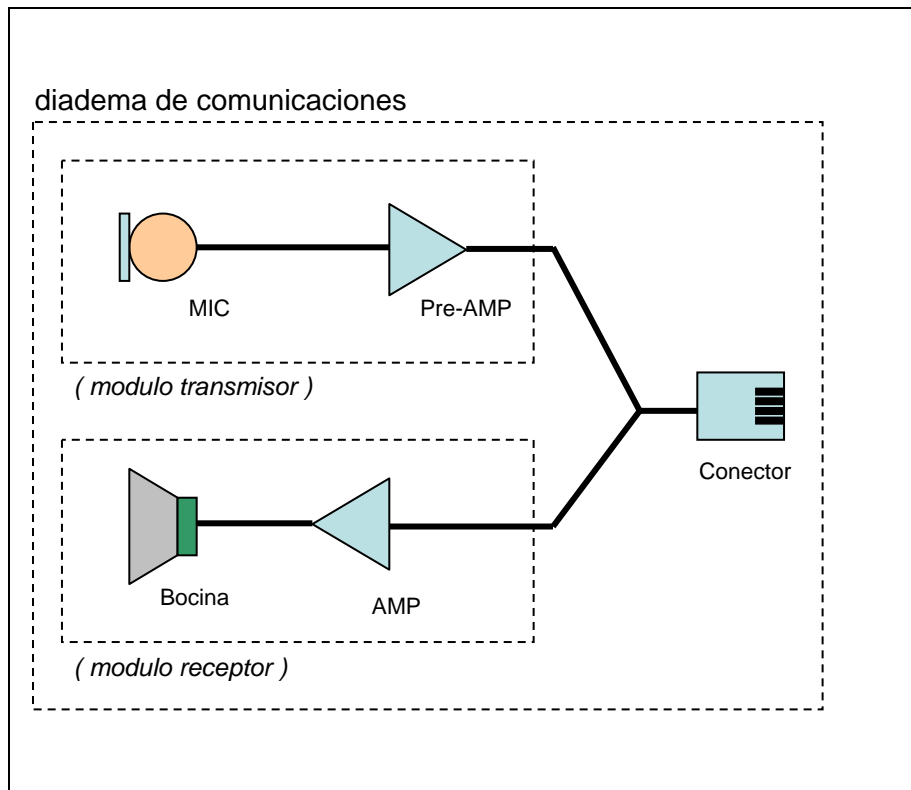
auricular y efectuando diferentes tareas manuales como tomar notas, teclear en la computadora, arreglar artículos personales, etc., resulta difícil la sincronización de todas estas actividades, y entonces surge el concepto de “manos libres”. Una “diadema de comunicaciones” se conecta a un aparato telefónico en substitución del tradicional auricular ofreciendo las misma función de comunicación, para conseguir tener las manos disponibles para llevar a cabo otras actividades, “manos libre” (Figura 1-2).



**Figura 1-2. Variedad de Diademas de comunicaciones (fotos, cortesía de Plantronics, Inc.)**

La diadema de comunicaciones, en esencia esta compuesta por: un modulo transmisor, un Pre-amplificador y un modulo receptor (ver Figura 1-3 ). Las diademas de comunicaciones recientes incorporan sistemas de control y señalizaciones. Igualmente, estas evolucionan y han venido adoptando las tecnologías emergentes, de tal manera que las diademas de comunicación pueden ser: alámbricas, que se conectan a través de un cable al aparato telefónico; inalámbricas, aquellas que se enlazan por radio frecuencia (RF); analógicas, en el que se hace uso de electrónica analógica para el manejo de las señales eléctricas; o bien digitales, que incorporan sofisticados sistemas de control y procesamiento digital de señales (PDS) como los disponibles hoy en día, para el manejo de las mismas señales eléctricas.

En el diagrama a bloques mostrado en la Figura 1-3, es representada una diadema de comunicaciones básica, se observa un transmisor, representado por el micrófono, un receptor, representado por una bocina y un pre-amplificador; en ocasiones es necesario incorporar un amplificador en el canal receptor. En las secciones subsecuentes se detalla cada parte.



**Figura 1-3. Diagrama a bloques de una diadema de comunicaciones básica.**

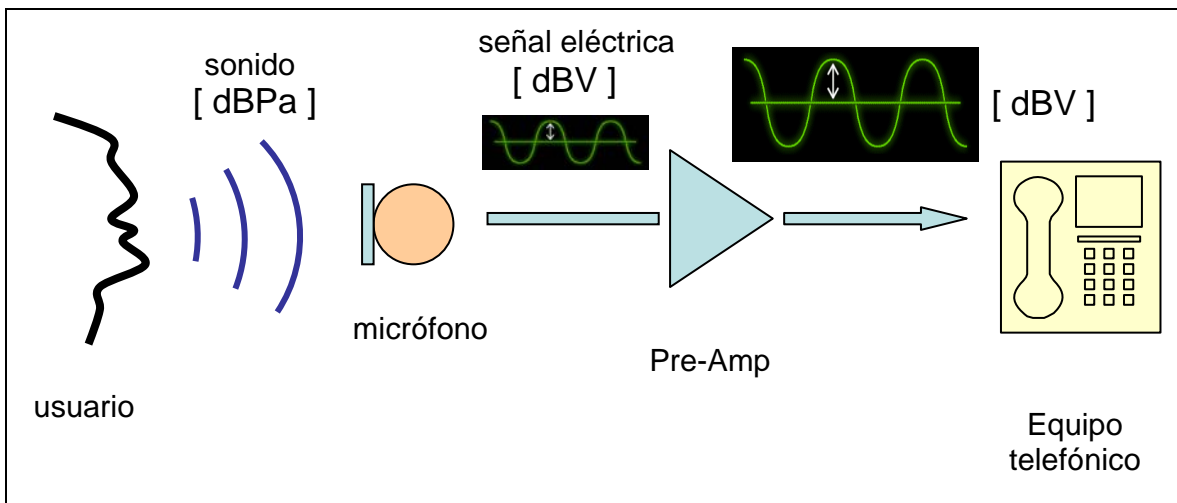
### 1.2.1 El modulo transmisor

El modulo transmisor básico en una diadema de comunicaciones esta integrado por un micrófono, un circuito pre-amplificador y un medio en el cual se transporta una señal eléctrica.

Este modulo esta dedicado para detectar la voz y adecuarla en una señal eléctrica que cumpla con especificaciones y se acople a un modulo transmisor de un equipo Terminal. El proceso comienza en el momento en que hablamos, es decir, al momento de hablar se producen cambios en la presión atmosférica del aire; dichos cambios definen una frecuencia y una amplitud de señal que entendemos como sonido. Tal sonido es necesario convertirlo en señales eléctricas y ello es efectuado mediante el micrófono de la diadema de comunicaciones, un elemento transductor.

Cuando hablamos, entendemos que podemos hacerlo desde un susurro hasta un grito. En términos acústicos cuantitativos, se cubre un rango dinámico muy amplio: 20  $\mu$ Pa que se considera el umbral de detección del oído humano y hasta 20 Pa que son niveles en el que el oído humano puede ser dañado, esto es una relación de 1 a 1 millón. Es debido a esta amplia variación del rango dinámico del sonido en el oído humano que este se expresa en decibeles.

El micrófono [8], siendo el elemento transductor (acústico – eléctrico), debe ser capaz de detectar estos pequeños niveles de sonido (dBPa) y convertirlos en señales eléctricas (dBV), ver Figura 1-4 y Apéndice F. El grado en que un micrófono es capaz de detectar el sonido y convertirlo en una señal eléctrica es medido mediante su “sensitividad [ dBV/Pa ]”.



**Figura 1-4. Canal de transmisión**

En una diadema de comunicaciones el nivel típico de sensibilidad del micrófono es de alrededor de -50 dBV/Pa, misma señal eléctrica que debe ser amplificados en una siguiente etapa electrónica. A este etapa se le denomina etapa de Pre-Amplificación cuyo objetivo es dar una ganancia a esta señal eléctrica, típicamente de 20 dB, aunque este nivel varia si la diadema de comunicaciones tiene una aplicación diferente. De acuerdo con estándares de telefonía [11], el nivel de amplitud que un auricular de teléfono debe entregar a su base es alrededor de -20 dBV, típicamente.

El micrófono siendo parte determinante del modulo transmisor, se ha desarrollado exponencialmente en los últimos años para cubrir una amplia gama de características [8]:

- Omnidireccionales    Captan sonidos provenientes de todas direcciones
- Unidireccionales    Captan sonidos provenientes de una sola dirección principalmente.

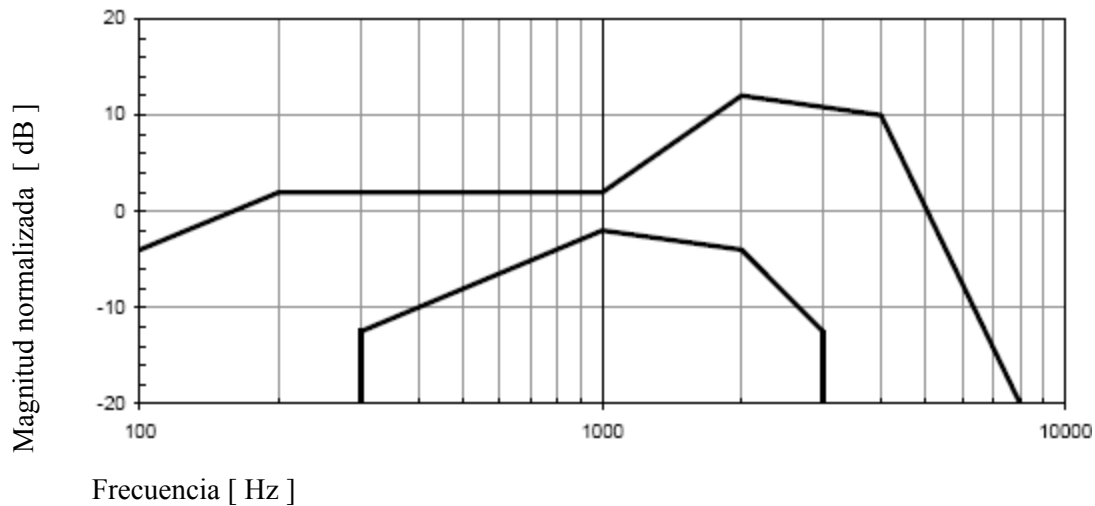
En este trabajo se emplean micrófonos omnidireccionales y también de alta sensibilidad.

Como se mencionó, otra propiedad del sonido es la frecuencia. Es común encontrar en literaturas acústicas que el rango auditivo humano de frecuencia es de 20 Hz a 20000Hz [8], [9]. Cabe mencionar que este rango varía de persona a persona así como de la edad. Es conocido que un joven tienen un mayor rango de audición que un adulto o que un anciano, o que el género masculino genera un contenido de energía mas abundante en bajas frecuencias que en altas frecuencias, lo que es contrario con el género femenino [Apéndice B].

Dicho esto, el micrófono y pre-amplificador deben operar eficientemente en una banda de operación que es la auditiva. Para la telefonía convencional, la banda de frecuencia que se especifica : 300 Hz a 3400 Hz [11].

En el mercado de los electrónicos, cubrir esta banda de operación no es un problema; comercialmente se ofertan micrófonos generalmente de mayor ancho de banda para cubrir bandas de frecuencias mas amplias.

Cabe mencionar que un buen módulo transmisor es aquel que combina un buen micrófono, que integra a un buen diseño mecánico-acústico y que combina este funcionamiento con electrónicos que procesan la señal en la medida deseada para cumplir con estándares de comunicación como el mostrado en la Figura 1-5.



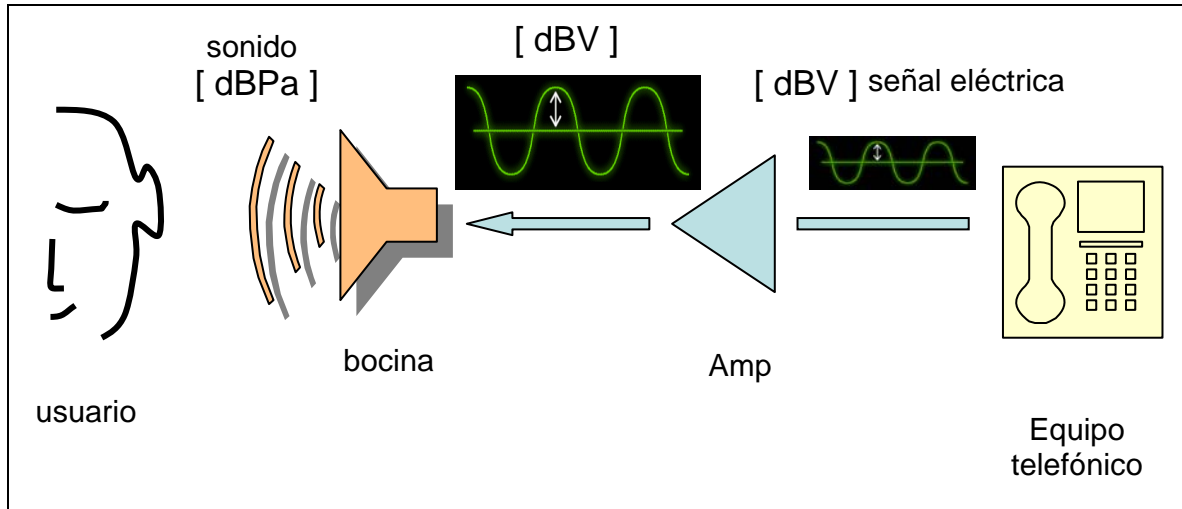
**Figura 1-5. Respuesta en frecuencia para la transmisión telefónica [11]**

### 1.2.2 El modulo receptor

El modulo receptor de la diadema de comunicaciones lo integra la bocina [9] y generalmente un amplificador.

Al inverso que el modulo transmisor, en el modulo receptor el proceso comienza en el equipo telefónico cuando éste envía una señal eléctrica cuya información debe llegar a quien escucha, ver Figura 1-6. El nivel de esta señal no es tan débil como la convertida

por un micrófono pero requiere ser amplificada para que pueda ser manejada por la bocina (el transductor de recepción).

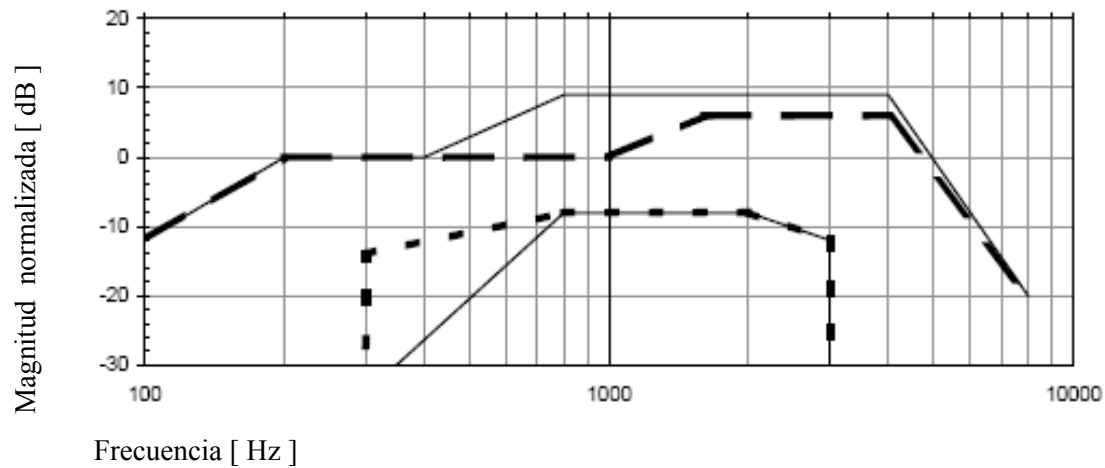


**Figura 1-6. Canal de recepción**

Cabe señalar que el factor en que esta señal debe ser amplificada depende del tipo de aplicación: diadema de comunicaciones o audífonos. Pues ellos emplean diferentes bocinas; baja o mediana potencia así como la impedancia de la bocina. Muy frecuentemente, los equipos terminales, entregan una señal amplificada (aproximadamente  $-10 \text{ dBV}$ ), que es suficiente para la operación adecuada de la bocina, con lo que no es requerida etapa de amplificación alguna.

Como se expuso en la sección 1.2.1, las frecuencias que escuchamos se encuentran en el rango de audición (  $20 \text{ Hz} \sim 20 \text{ KHz}$  ) y la bocina generalmente opera en estas frecuencias.

Tanto para la recepción como para la transmisión, el transductor es el elemento fundamental que determina el rango de frecuencia de operación y son el diseño mecánico y eléctrico que se combinan para obtener la respuesta deseada. En el caso de la diadema de comunicaciones para aplicación de telefonía, esta respuesta se prepara para que cumpla con los límites enmarcados en la Figura 1-7.



**Figura 1-7. Respuesta en frecuencia para la recepción telefónica [11]**

Nota: La raya sólida es el limite obligatorio, la raya punteada es un limite deseado

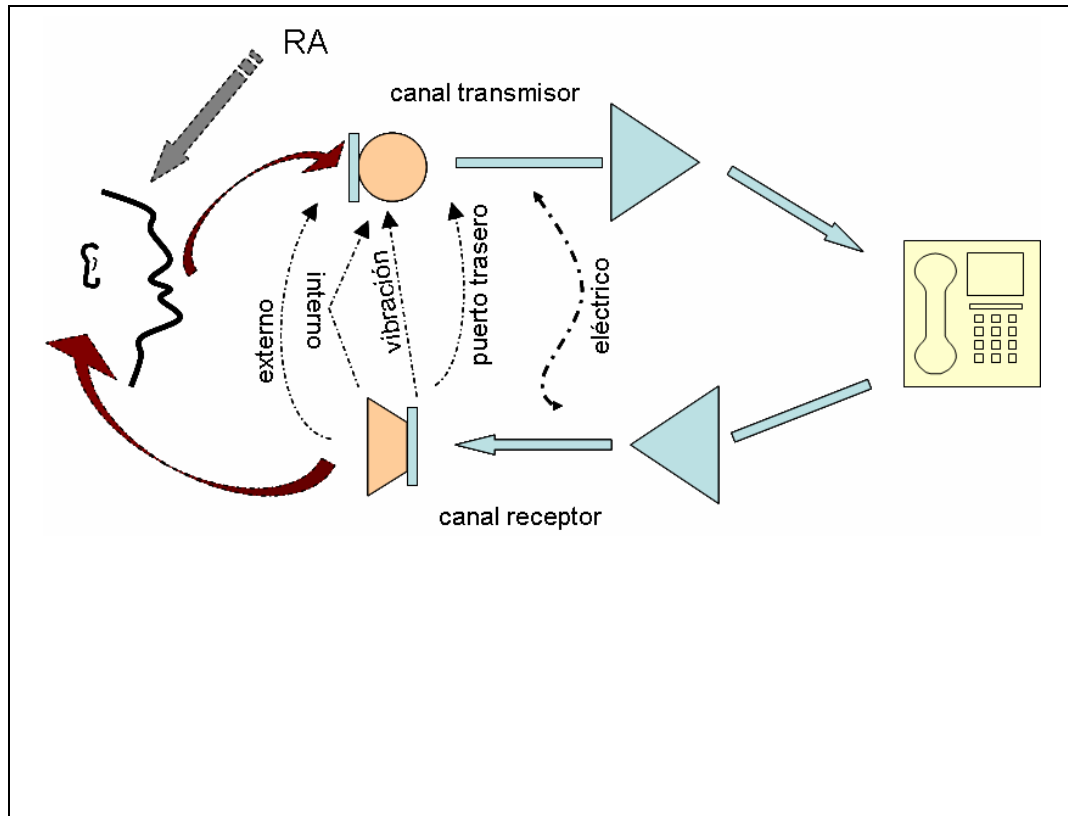
Cabe mencionar que hoy día conviven en telefonía dos bandas de operación de frecuencia, denominadas; “ banda angosta: limitada entre 300Hz y 3400Hz” que es la que se emplea en la telefonía convencional pública y “ banda amplia: limitada entre 150Hz y 6800Hz” que emplea la telefonía por Internet, VoIP (Voice Over Internet Protocol).

*En este trabajo, dado que no se envía ni se recibe señal alguna a través de la red de telefonía pública o dedicada, no se intenta cumplir con las bandas de frecuencia mencionadas. Sin embargo, si fijan un criterio por enfocar la cancelación o reducción de ruido en el rango de banda angosta.*

### 1.2.3 Aislamiento acústico en una diadema de comunicaciones

Se ha mencionado en las secciones anteriores 1.2.1 y 1.2.2 que dos canales se complementan para una comunicación en una diadema de comunicaciones mediante la transmisión y la recepción, ver Figura 1-8. Desde el punto de vista de la inteligibilidad de una comunicación; una comunicación en modo “half duplex” da como resultado un nivel alto de inteligibilidad mientras que una comunicación en modo “full duplex” da como resultado un menor grado de inteligibilidad. Cuando en la comunicación se agregan otros factores como lo son el medio ambiente, el sistema, etcétera; la inteligibilidad de la comunicación misma puede llegar a deteriorarse significativamente. Debido a ello el concepto de aislamiento es importante de considerarse en un sistema; para aislar el canal de recepción del canal de transmisión o el sistema de recepción del medio ambiente. Se mencionan los siguientes casos de aislamiento:

- Cuando no existe dependencia eléctrica entre ellos, es decir hay un canal para transmitir y otro para recibir, se dice que se encuentran aislados eléctricamente, ello es posible, aunque ocasionalmente existe una inducción entre ambos canales ocasionando una retroalimentación no deseada.
- El sonido también es retroalimentado tanto por los ductos internos del producto como externamente. Imaginemos que se recibe una llamada, la bocina reproduce una señal audible, misma que llega a ser percibida por el micrófono de la diadema de comunicaciones, con un resultado de retroalimentación no deseada.
- Llega a haber un deterioro en la transmisión, cuando el micrófono no está suficientemente aislado del receptor. Este caso es cuando la bocina vibra al reproducir niveles de sonido alto y/o de baja frecuencia, generando vibración en el mecanismo que la sujeta y este a su vez se transmite hasta llegar al micrófono, el cual al ser de tan alta sensibilidad, interpreta estas vibraciones y las traduce en ruido eléctrico.



**Figura 1-8. Vías de flujo entre transmisor y receptor**

El tipo de aislamiento mencionado en los puntos anteriores cae dentro de aquellos que se encuentran dentro del sistema de comunicación; transmisor y receptor y de alguna manera son esperados y pueden tener un control.

Una variable que no está en el control del sistema de comunicaciones pero que sin embargo afecta indirectamente la inteligibilidad de una comunicación es el ruido ambiental (RA) que percibe un usuario quien tiene una diadema de comunicaciones y está atendiendo una llamada, ilustrado en la Figura 1-8.

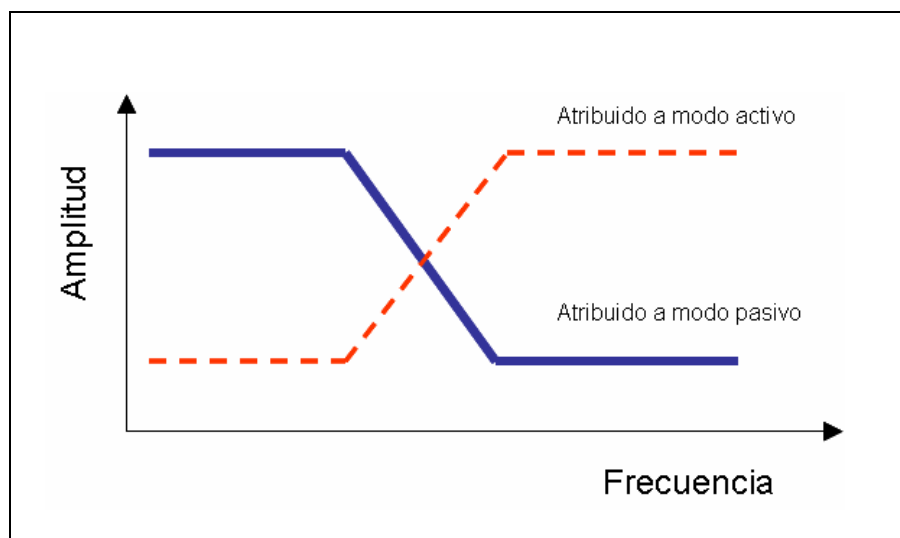
#### 1.2.4 Modos de cancelación

El RA es representado en la Figura 1-8 y ha sido tratado en la sección 1.1. La diadema de comunicaciones por si misma genera un aislamiento que esta en función del diseño de la misma, es decir, de la capacidad de acoplamiento entre el receptor y el oído.

En la actualidad, existen diferentes tipos de acoplamiento de un receptor, y ellos se clasifican como:

1. Supra-aural. Si el receptor es posicionado solo sobre la superficie de la oreja
2. Circum-aural. Si el receptor rodea y cubre plenamente la oreja
3. Intra-Aural. Si la bocina del receptor es introducida en el canal auditivo.

Cada una de estos tipos, como es de esperarse, representa un mayor o menor aislamiento al RA. Este tipo de aislamiento por acoplamiento mecánico del producto al oído representa un modo de cancelación denominada: **CANCELACION PASIVA**. Como en la Figura 1-9 se observa que la cancelación pasiva es efectiva en el rango de frecuencias altas pero NO en el rango de frecuencias BAJAS.



**Figura 1-9. Modo pasivo y activo de cancelación en el espectro de frecuencia**

De manera que si se desea efectuar procedimientos de cancelación para el rango de frecuencias bajas, no es probable que tan solo deba aprovecharse el diseño mecánico del

producto, sino que también deben intervenir filtros electrónicos adicionales que operen en esta banda de frecuencias bajas para cubrir este rango auditivo. A este último proceso para reducción de RA, se le denomina: **CANCELACION ACTIVA**, y opera eficientemente en el rango de frecuencias BAJAS, [13]-[16].

El SRRA que en esta tesis se desarrolla hace uso de ambos modos de cancelación. En el Capítulo II se presenta bases sobre filtrado adaptable.

# CAPITULO II

## Filtrado Adaptable

Las primeras sugerencias sobre filtrado adaptable son atribuidas a Widrow and Hoff's en los años 60's publicadas en sus trabajos sobre circuito de conmutación adaptable (*adaptive switching circuit*) y el algoritmo de mínimos cuadrados promedio (*least mean square, LMS*) como una alternativa al procesamiento en tiempo real [1]-[5]. Desde entonces, una larga lista de investigaciones se han hecho en este campo y se han desarrollado algoritmos tanto para sistemas lineales como para los no lineales. De entre los algoritmos lineales mas comunes destacan LMS, NLMS, RLS, KALMAN, LATTICE entre otros; igualmente en el campo de los filtros no lineales destacan los algoritmos Volterra y Redes neuronales.

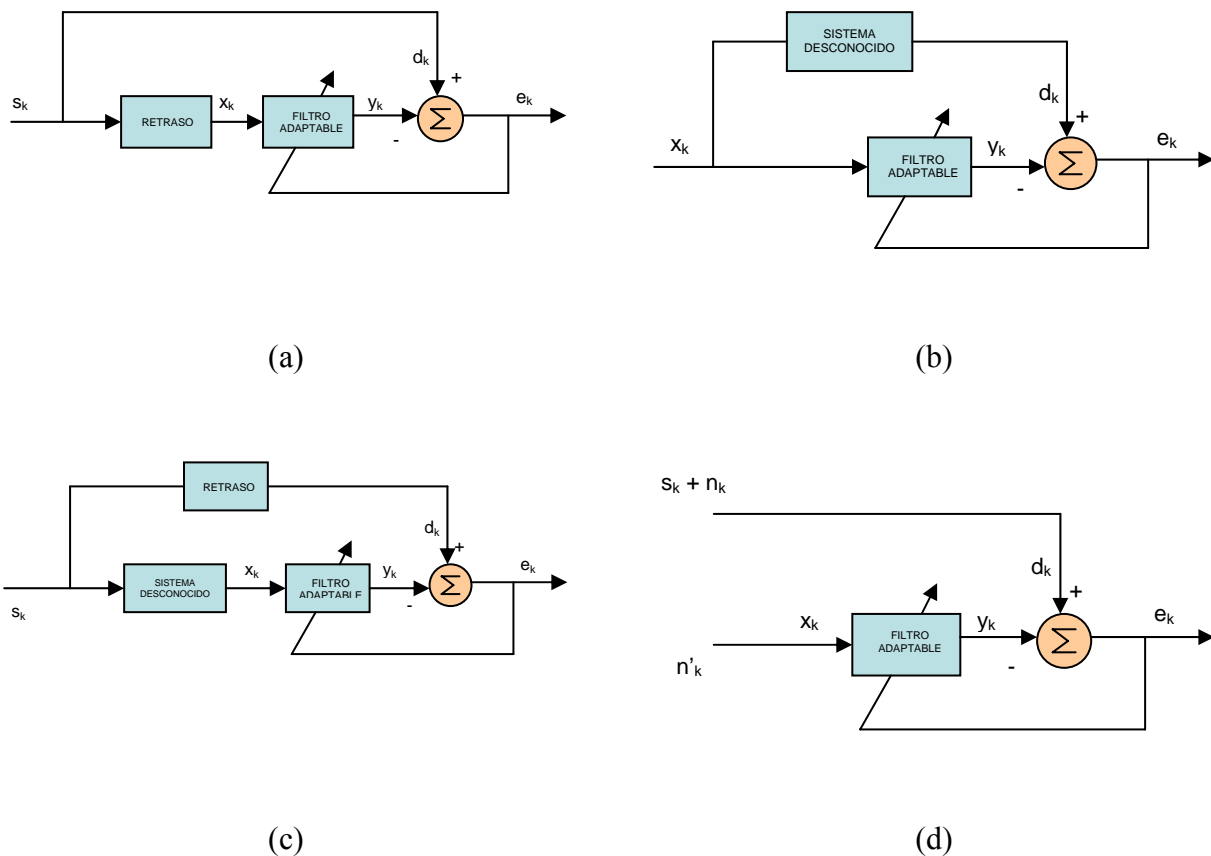
Un Filtro Adaptable es esencialmente un filtro digital que se caracteriza por auto-ajustarse dependiendo de los cambios que se presentan a la entrada del filtro. Está constituido por un filtro digital FIR (Finite Impulse Response) o IIR (Infinite Impulse Response) o bien un filtro no lineal y también por una algoritmo para adaptar los

coeficientes del filtro digital seleccionado. La mayoría de los filtros adaptables son FIR por razones de estabilidad del algoritmo, sin embargo últimamente viene realizándose filtros adaptables IIR haciéndolos igualmente estables, también con filtros adaptables no lineales [2], [5].

En este capítulo se describen los principios básicos del filtrado adaptable empleando un filtro FIR por sus beneficios en función de su estabilidad y su relativamente fácil implementación; finalizando con la descripción del algoritmo LMS. Este capítulo presenta las bases teóricas para el desarrollo del algoritmo LMS para la reducción de ruido ambiental que se desarrollará en el capítulo siguiente.

## 2.1 Estructuras de filtros adaptables

La habilidad del filtro adaptable para operar satisfactoriamente en ambientes desconocidos y responder a variaciones de los valores estadísticos de su entrada lo convierten en un dispositivo sumamente útil para aplicaciones de procesamiento de señales y de control. Se encuentran aplicaciones en el campo de ingeniería en comunicaciones, radar, sonar, sismología y biomédica entre otras. Siendo estos campos tan distintos, tienen elementos comunes como un vector de entrada y una señal deseada para calcular un error estimado. Luego entonces, la característica distintiva entre cada aplicación y el uso común del filtrado adaptable radica en la manera en que la señal deseada es obtenida. Así, son cuatro las principales estructuras básicas de filtrado adaptable que se han identificado [1], [2], [3], [4], se muestran en la Figura 2-1.



**Figura 2-1. Cuatro estructuras básicas de filtrado adaptable: (a) Predictor, (b) Identificador de sistemas, (c) Modelado inverso y (d) Cancelador de interferencia**

A continuación se describe el propósito básico de estas cuatro estructuras [1]:

- (a) *Predictor*. Su objetivo principal es el de proporcionar la mejor predicción del valor presente de una señal aleatoria. La señal deseada  $d_k$ , es la señal presente a la entrada  $s_k$ , y su retraso es  $x_k$ , esta señal es filtrada y representada por  $y_k$ . Esta estructura encuentra aplicación en canceladores de ruido periódico, extracción de señales periódicas, codificadores de voz, canceladores de interferencia, entre otros.
  
- (b) *Identificador de sistemas*. Su objetivo principal es el de proporcionar un modelo lineal que represente la mejor aproximación de un sistema desconocido. La misma señal de entrada  $x_k$  sirve al sistema desconocido y al filtro, la respuesta del sistema desconocido  $d_k$  es la señal deseada  $y_k$  que es la señal filtrada. Esta configuración encuentra su aplicación en sistemas tales como identificadores de canal y canceladores de eco, entre otros.
  
- (c) *Modelado inverso*. Su objetivo principal es el de proporcionar un modelo inverso que represente la mejor aproximación de un sistema desconocido en condiciones de ruido. La señal retrasada representa la señal deseada  $d_k$ . Idealmente el modelo inverso  $x_k$  tiene una función de transferencia igual a la función inversa de la función de transferencia del sistema desconocido. Esta configuración tiene aplicación en ecualizadores, filtros digitales y sistemas de control entre otros.
  
- (d) *Cancelador de interferencia*. Su objetivo es cancelar la interferencia contenida en la señal deseada ( $d_k = s_k + n_k$ ), esto es, la señal deseada esta contaminada por otra señal/ruido  $n_k$  pero que no esta correlacionada con la señal deseada. La señal que entra al filtro es una señal de referencia  $n'_k$  que esta correlacionada con el ruido  $n_k$ , en tanto que la salida  $y_k$  es la estimación de tal ruido. Esta configuración tiene aplicaciones en sistemas activos de cancelación de ruido (ANC, active noise cancellation), principalmente.

La estructura del cancelador de interferencia es la que mejor se adaptara a este trabajo pues se cuenta con una señal de referencia y una señal deseada. Los detalles serán explicados en el Capitulo III.

## 2.2 El Filtro Wiener

Considere un filtro FIR (Finite Impulse Response) como el mostrado en la Figura 2-2. En donde  $x(k)$  es el vector de entrada,  $y(k)$  el vector de salida del filtro,  $w_0 \sim w_2$  los pesos del filtro FIR y  $Z^{-M}$  representa un retraso.

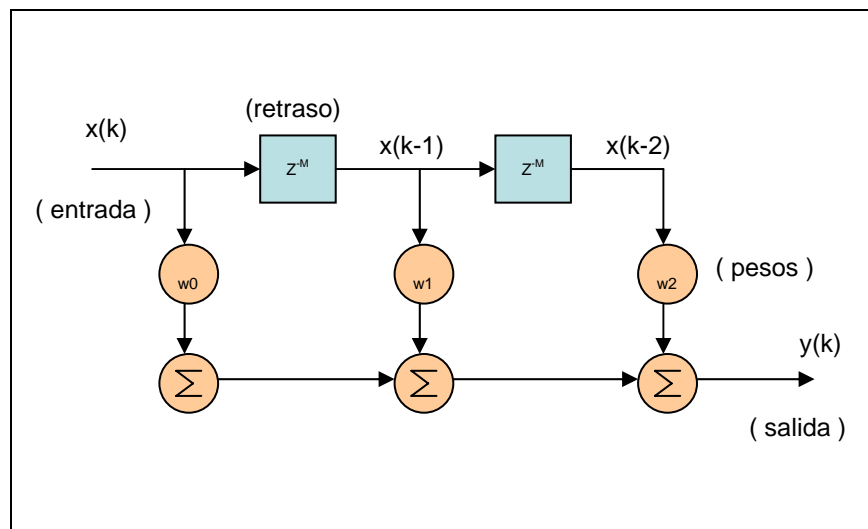


Figura 2-2. Filtro FIR, estructura básica

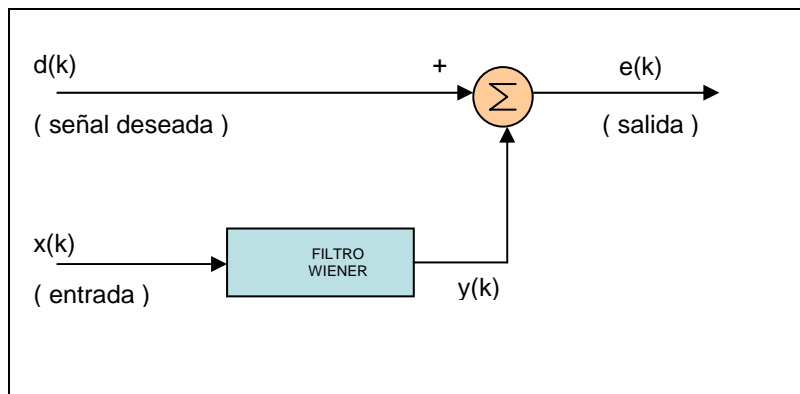
Matemáticamente, el diagrama representado en la Figura 2-2 puede verse también como una serie de convoluciones entre el vector de entrada y el vector de pesos en forma general:

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} w_n x(k-n) \quad (2-1)$$

O como su ecuación de diferencia

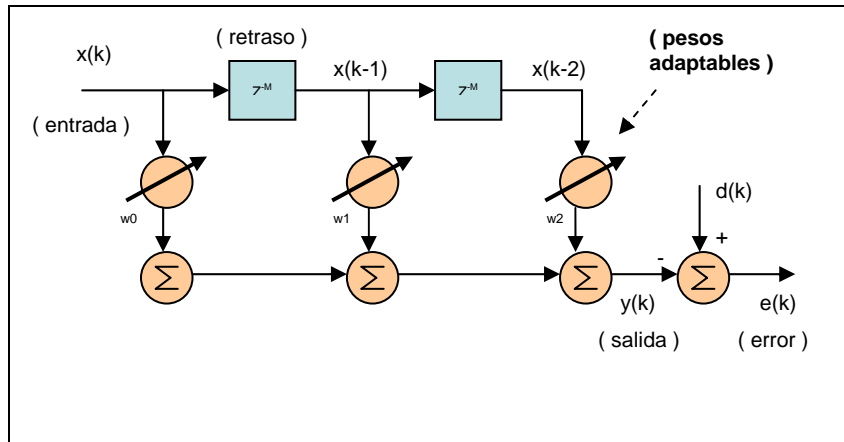
$$y_k = x(k)w_0 + x(k-1)w_1 + x(k-2)w_2 \quad (2-2)$$

Si se combina matemáticamente la salida del filtro (Figura 2-2) con una señal deseada, puede entonces obtenerse una señal de error; y en la medida en que esta señal de error sea minimizada, mayor es la estimación de la señal deseada, que es el modelo básico del Filtro Wiener representado en la Figura 2-3.



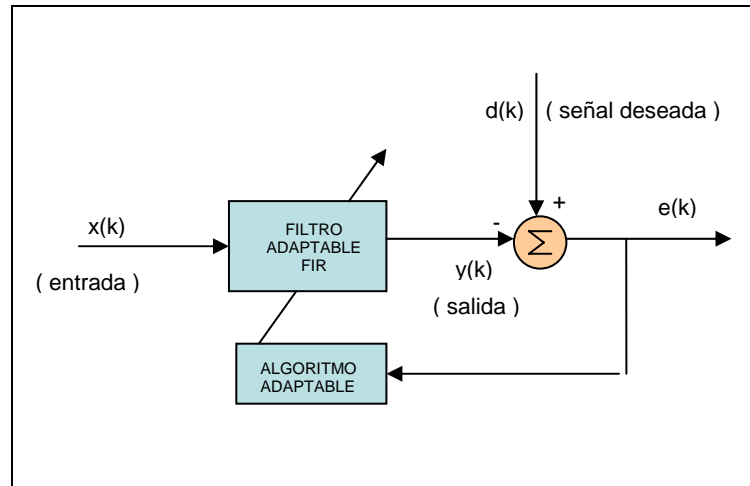
**Figura 2-3. Filtro Wiener**

Luego, si un filtro adaptable es aquel que ajusta sus propiedades con respecto a su entrada, el filtro FIR descrito con anterioridad puede ahora representarse como el diagrama de la Figura 2-4



**Figura 2-4. Identificación de los pesos de adaptación**

Donde  $w_0 \sim w_2$  representa los pesos que estarán ajustándose de acuerdo con una señal de entrada en  $x(k)$ . Otra forma de representación del filtro adaptable más genérica es la mostrada en la figura 2-5.



**Figura 2-5. Filtro adaptable**

Definimos entonces las correspondientes ecuaciones

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n x(k-n) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(k) \quad (2-3)$$

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (2-4)$$

Donde

$$\mathbf{w} = [w_0 \quad w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_{N-2} \quad w_{N-1}]^T \quad (2-5)$$

$$\mathbf{x}(k) = [x(k) \quad x(k-1) \quad x(k-2) \quad \dots \quad x(k-N+2) \quad x(k-N+1)]^T \quad (2-6)$$

Si los valores estadísticos de  $x(k)$  y  $d(k)$  son estacionarios y ergódicos en el sentido amplio, entonces se puede elegir minimizar la señal del error cuadrático medio (MSE), así  $\mathbf{w}_{\text{opt}}$  es una función de  $x(k)$ ,  $d(k)$  y  $\mathbf{w}_{\text{opt}}$  representa al vector de pesos que minimiza la señal de error. Igualmente a esta variable se le denomina como mínimo MSE (MMSE) [3].

### 2.3 Minimizando el error cuadrático promedio

Dado que el objetivo de un filtro digital adaptable es que la señal  $x(k)$  sea filtrada para producir una señal  $y(k)$  la cual al ser restada de la señal deseada  $d(k)$  sea minimizado la potencia de la señal de error  $e(k)$ , se puede considerar 2 métodos:

- a) Minimizar el error cuadrático promedio de la señal. [ esta opción nos conduce al algoritmo de mínimos cuadrados promedio (*LMS*) que se vera secciones adelante].

$$E[e^2(k)] = \frac{1}{M_2 - M_1} \sum_{n=M_1}^{M_2-1} e^2(k) \quad (2-7)$$

- b) Minimizar la suma total del error cuadrático. [ esta opción conduce al algoritmo recursivo de mínimos cuadrados (*recursive least squares, RLS*) ].

$$V_k = \sum_{s=0}^k e^2(s) \quad (2-8)$$

Al elevar al cuadrado la ecuación (2-4).

$$e^2(k) = (d(k) - \mathbf{w}^T \mathbf{x}(k))^2 = d^2(k) + \mathbf{w}^T [\mathbf{x}(k) \mathbf{x}^T(k)] \mathbf{w} - 2d(k) \mathbf{w}^T \mathbf{x}(k) \quad (2-9)$$

Si se considera el valor esperado en ambos lados de la ecuación y por el momento se quita “(k)”, se tiene el error cuadrático medio (MSE)

$$\text{MSE} = \xi = E[e^2] = E[d^2] + \mathbf{w}^T E[\mathbf{x} \mathbf{x}^T] \mathbf{w} - 2\mathbf{w}^T E[d \mathbf{x}] \quad (2-10)$$

Al escribirse esta ecuación en términos de correlación para  $\mathbf{R}$  y para  $\mathbf{p}$

$$\text{MSE} = \xi = E[e^2(k)] = E[d^2] + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} - 2\mathbf{w}^T \mathbf{p} \quad (2-11)$$

Esta ecuación es cuadrática en el vector  $\mathbf{w}$ . Entonces solo hay un valor mínimo al que como se dijo previamente se le denomina error cuadrático promedio mínimo (MMSE) simbolizado como  $\mathbf{w}_{\text{opt}}$ . Este es encontrado derivando parcialmente la ecuación (2-11) con respecto a  $\mathbf{w}$ , e igualando a 0 [1]. En otras literaturas en el idioma español, suele mencionarse función de desempeño [3].

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{w}} = 2\mathbf{R} \mathbf{w} - 2\mathbf{p} \quad (2-12)$$

Reemplazando  $\mathbf{w}$  por  $\mathbf{w}_{\text{opt}}$  y despejando se obtiene el vector de pesos optimo.

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p} \quad (2-13)$$

A la ecuación (2-13), se le conoce también como ecuación de Wiener-Hopf o solución Wiener-Hopf, de manera que se deben buscar estos pesos óptimos,  $w(0)$ ,  $w(1)$ , etc., para lograr la mejor estimación  $y_k$ .

Para casos NO ESTACIONARIOS, existen varias limitantes para la implementación de esta solución, por ejemplo, al tener señales en tiempo real como las tratadas en esta tesis, los pesos  $\mathbf{w}_{\text{opt}}$  deberán estar ajustando muestra por muestra.

En términos matriciales, asumiendo que  $x(k)$  y  $d(k)$  son procesos estacionarios y ergódicos en el sentido amplio (su valor promedio y varianza son constantes), al trabajar con una matriz de correlación con un filtro adaptable de 3 pesos, se tiene

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{xx}^T] = E \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ x_{k-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k & x_{k-1} & x_{k-2} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} (x^2) & (x_k x_{k-1}) & (x_k x_{k-2}) \\ (x_{k-1} x_k) & (x_{k-1}^2) & (x_{k-1} x_{k-2}) \\ (x_{k-2} x_k) & (x_{k-2} x_{k-1}) & (x_{k-2}^2) \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

Nótese que la matriz de correlación  $\mathbf{R}$  es del tipo: Toeplitz. Así que una matriz de este tipo puede ser escribirse en términos mas genéricos como

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{N-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{N-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{N-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{N-1} & r_{N-2} & r_{N-3} & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

El vector de correlación cruzada  $\mathbf{p}$  para un filtro adoptivo de 3 pesos es

$$\mathbf{p} = E[ d_k \mathbf{x}_k ] = E \begin{bmatrix} d_k x_k \\ d_k x_{k-1} \\ d_k x_{k-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

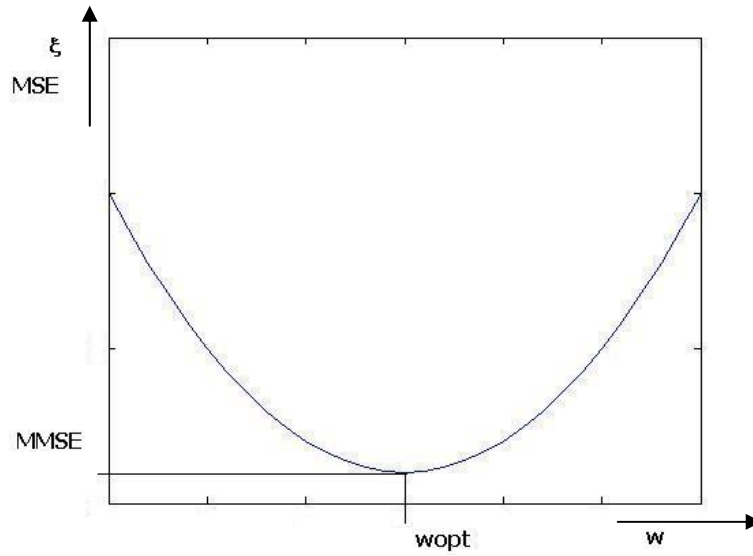
Así que en forma general

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \vdots \\ p_{N-1} \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

Ejemplificando gráficamente un caso de MSE para un filtro adaptable de un solo peso.

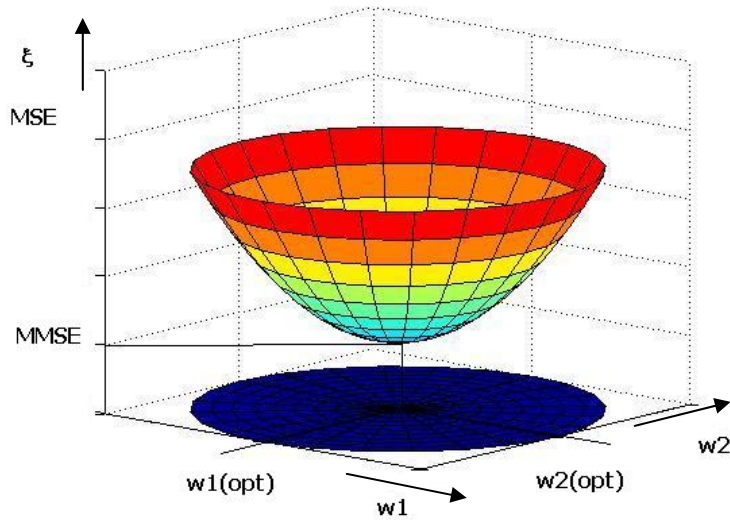
$$\xi = E[ d(k)]^2 + \mathbf{w}^2 \mathbf{r} - 2\mathbf{w}\mathbf{p} \quad (2-18)$$

Sea  $E[ d(k)]^2$  una constante y  $\mathbf{w}$  y  $\mathbf{r}$  valores escalares entonces la función de desempeño,  $\xi$  (MSE), será una parábola



**Figura 2-6. Función de desempeño con un solo peso**

Si el filtro tiene dos pesos, la función de desempeño será una parábola en 3D [4]



**Figura 2-7. Función de desempeño con dos pesos**

Si el filtro tiene mas de tres pesos, entonces la función de desempeño NO se podrá dibujar en tres dimensiones, sin embargo, matemáticamente solo hay un punto mínimo y

este ocurre cuando el vector gradiente con respecto a  $\mathbf{w}$  es cero. Una función de desempeño con mas de tres pesos es frecuentemente llamada como “hiperparábola” [4].

## 2.4 El método de descenso más pronunciado

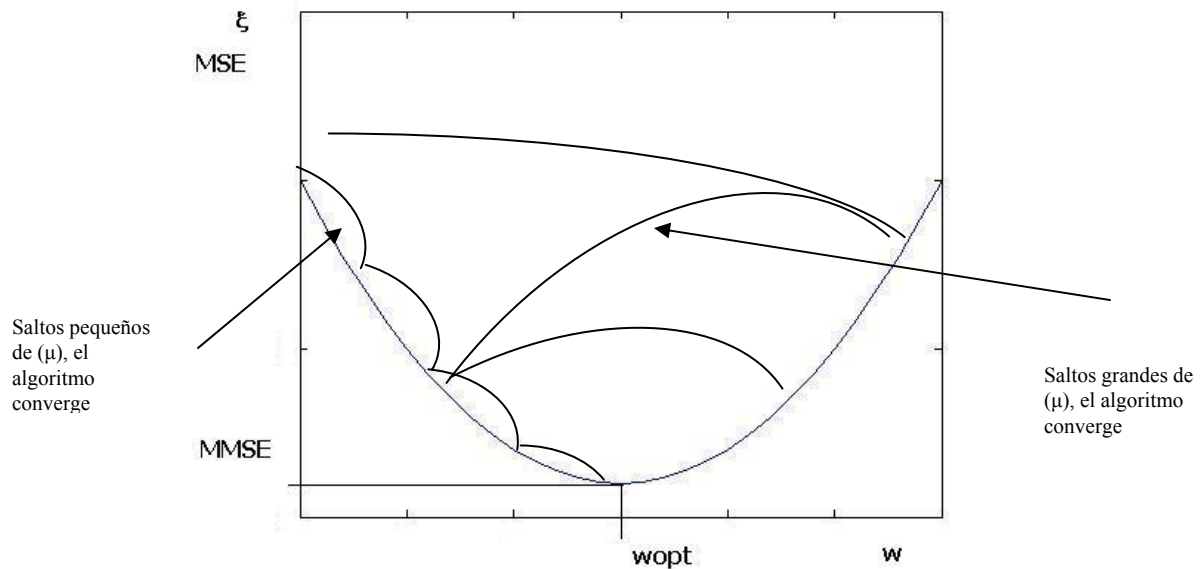
EL diseño de un filtro Wiener requiere información ‘a priori’ acerca de los datos estadísticos a ser procesados y el filtro resulta ser óptimo cuando sus características de sus datos de entrada sean idénticos a la información ‘a priori’ para el cual el diseño del filtro se esta basado. Para operaciones en tiempo real, se tiene la desventaja de requerirse un excesivamente elaborado hardware dado la cantidad de operaciones para el cálculo matricial, por lo que no es adecuado.

Por lo anterior, una solución para hallar el MMSE se encuentra al ejecutar saltos negativos hacia el fondo de la función de desempeño  $-\nabla(k)$ , lo que se conoce como Método del descenso más pronunciado.

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu(-\nabla(k)) \quad (2-19)$$

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_0 \\ \mathbf{w}_1 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

A  $\mu$  se le conoce como factor de convergencia y controla la velocidad de adaptación del filtro y también la estabilidad del algoritmo. Si  $\mu$  es muy grande, el algoritmo puede no encontrar el fondo de la función de desempeño y hacer que el algoritmo diverja, por el contrario, si se elige un valor muy pequeño, el algoritmo convergerá con el costo de ser un proceso lento, como se observa en la Figura 2-8.



**Figura 2-8. Representación grafica del factor de convergencia,  $\mu$  [4]**

Otra manera de convergencia es elegir un valor inicial para  $w$  ( $\mathbf{0}$ ), de esta manera, con cada iteración, el algoritmo convergerá.

## 2.5 El algoritmo LMS

El algoritmo más simple de un filtro adaptable es el Filtro FIR LMS. Su principio es el auto ajuste de sus coeficientes al hallar la diferencia en un tiempo 'k' y 'k+1'. Esta diferencia es dada por el gradiente negativo que fue minimizado.

Widrow sugiere que en vez de calcular la derivada del error cuadrático medio, sea usada el valor instantáneo del error [1].

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu \left[ -\frac{\partial}{\partial \mathbf{w}(k)} (e^2(k)) \right] \quad (2-21)$$

Calculando el gradiente  $\nabla(k)$ , tenemos

$$\nabla(k) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{w}(k)} (e^2(k) = 2e(k) \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{w}(k)} e(k) \right]) = -2e(k)\mathbf{x}(k) \quad (2-22)$$

Así, se llega al gradiente de estimación del algoritmo LMS

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu e(k)\mathbf{x}(k) \quad (2-23)$$

El algoritmo LMS es un método práctico para la realización del filtro Wiener sin la necesidad de resolver la ecuación de Wiener- Hopf. Se dice que este algoritmo es una implementación estocástica del algoritmo del descenso mas pronunciado.

La estabilidad del algoritmo LMS depende, como en párrafos anteriores se comento, del valor que tome  $\mu$  y se recomienda mantener la siguiente relación en donde  $\lambda_{\max}$  corresponde al mayor de los eigenvalores de la matriz de autocorrelación [1], [3].

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}} \quad (2-24)$$

El factor de convergencia  $\mu$  también depende de la potencia de la señal de entrada así como del orden del filtro seleccionado [1], [3], de manera que puede ser también expresada como

$$0 < \mu < \frac{1}{(L+1)\sigma_x^2} \quad (2-25)$$

Siendo L la longitud del filtro y  $\sigma_x^2$  la potencia promedio de la señal de referencia.

RESUMIENDO:

El procedimiento del algoritmo puede ser resumido de la siguiente manera [2]:

1. Asignar a cada peso  $w_k(i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ , un valor arbitrario, por ejemplo 0.

Para cada muestra subsecuente,  $k = 1, 2, \dots$ , hacer los pasos (2) ~ (4) siguientes.

2. Calcular el filtro (ecuación 2-1)

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n x(k-n)$$

3. Calcular el error estimado (ecuación 2-4)

$$e(k) = d(k) - y(k)$$

4. Actualizar los pesos siguientes del filtro (ecuación 2-23)

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu e(k)\mathbf{x}(k)$$

En el Capitulo III, se presenta el desarrollo del prototipo SRRA y su integración con el algoritmo LMS. Las variables de las ecuaciones que en este capítulo se emplearon serán intercambiadas por señales del SRRA.

# CAPITULO III

## Desarrollo del Sistema de Reducción de Ruido Ambiental ( SRRA )

El desarrollo del sistema de reducción de ruido ambiental (SRRA) consta de tres elementos principales:

1. Una diadema de comunicaciones prototipo con micrófonos supervisores instalados para la detección del sonido ambiental.
2. Una tarjeta de evaluación DSP : DSK6713, en donde se instala y opera el algoritmo adaptable.
3. Un algoritmo de filtrado adaptable “LMS” que fue desarrollado para correr esta aplicación.

En este capítulo se describe el desarrollo de cada uno de estos elementos y su integración para después operar el sistema SRRA.

Dado que se ha podido trabajar modularmente, al llegar a este capítulo, cada uno de estos elementos ha sido pre-determinado y su explicación tiene bases en capítulos previos.

Existen diferentes escenarios en los cuales se espera opere el sistema SRRA, sin embargo, el enfoque de esta tesis esta avocado a un solo escenario de ellos: cuando el usuario de la diadema no esta comunicado con otra persona y sin embargo desea reducir el RA de su entorno.

### 3.1 Diadema de comunicaciones prototipo

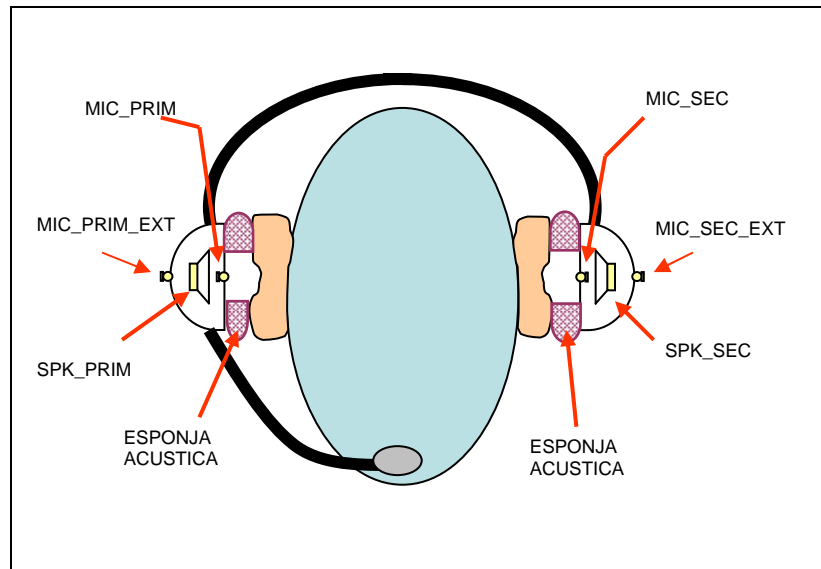
El prototipo (Figura 3-1) propone utilizar un arreglo de 4 micrófonos unidireccionales que están instalados adelante y atrás de la bocina (SPK\_PRIM y SPK\_SEC) de la diadema de comunicaciones; en la cavidad del receptor. Ellos se ubican estratégicamente; uno en el exterior de la cavidad del receptor denominado MIC\_EXT\_PRIM y el otro en el interior de la cavidad del receptor denominado MIC\_PRIM. El mismo arreglo se tienen para ambos lados de la diadema de comunicaciones; izquierdo y derecho, como se aprecia en la Figura 3-1 y Figura 3-2.



**Figura 3-1. Arreglo de micrófonos supervisores en la diadema de comunicaciones prototipo**

Al hacer uso de un micrófono exterior, se persigue el objetivo de supervisar directamente el RA, es decir la señal que deseamos atenuar es monitoreada para conocer la densidad espectral de este RA. Por otra parte un segundo micrófono ubicado en el interior de la cavidad del receptor tiene la ventaja de capturar el ruido en el punto ERP, en otras palabras, se puede hacer la consideración de que este micrófono percibe una señal muy cercana a la que nuestro oído estaría percibiendo; esto incluye el hecho de que esta señal ha sido modificada por la función de transferencia que aplica el receptor de la diadema al

RA, dada su cercanía al punto de salida del sistema ( bocina ); este micrófono es ideal para usarse en la función de detección de error que retroalimentaría al filtro adaptable.



**Figura 3-2. Diadema de comunicaciones prototipo con los micrófonos instalados**

En párrafos siguientes, se vera que la densidad espectral del RA es distinta entre micrófono externo y micrófono interno, dada la acústica que conforma el receptor de la diadema, esponja acústica y función de transferencia de la bocina con el oído del usuario mismo.

De acuerdo con la Figura 3-1 y Figura 3-2, se pueden determinar las siguientes ecuaciones asociadas a las señales que cada micrófono estará percibiendo:

$$M_p = \begin{cases} S_p + Sra', & S_p > 0 \\ Sr', & S_p = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

$$M_s = \begin{cases} S_s + Sra', & S_s > 0 \\ Sr', & S_s = 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

$$M_{eP} = \begin{cases} S_p' + Sra, & S_p > 0 \\ Sr, & S_p = 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

$$M_{eS} = \begin{cases} S_s' + Sra, & S_s > 0 \\ Sr, & S_s = 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

$$* \operatorname{Re} S_p = \begin{cases} S_p + \hat{S}ra'^{-1}, & \hat{S}ra'^{-1} > 0 \\ S_p, & \hat{S}ra'^{-1} = 0 \end{cases} \quad (3-5)$$

$$* \operatorname{Re} S_s = \begin{cases} S_s + \hat{S}ra'^{-1}, & \hat{S}ra'^{-1} > 0 \\ S_s, & \hat{S}ra'^{-1} = 0 \end{cases} \quad (3-6)$$

$$S_p' = S_p + \kappa S_p \quad (3-7)$$

$$S_s' = S_s + \kappa S_s \quad (3-8)$$

\* El sistema SRRA esta habilitado si  $\hat{S}ra'^{-1} > 0$ , y deshabilitado si  $\hat{S}ra'^{-1} = 0$

En donde, de acuerdo a la señal que se observa en cada variable / transductor, se define:

$M_p$  Señal SPL recuperada en micrófono primario, MIC\_PRIM

$M_s$  Señal SPL recuperada en micrófono secundario, MIC\_SEC

$M_{eP}$  Señal SPL recuperada en micrófono externo primario, MIC\_PRIM\_EXT

$M_{eS}$  Señal SPL recuperada en micrófono externo secundario, MIC\_SEC\_EXT

$S_p$  Señal SPL de recepción primaria reproducida por bocina primaria, SPK\_PRIM

$S_s$  Señal SPL de recepción secundaria reproducida por bocina secundaria, SPK\_SEC

$S_p'$	Señal Sp filtrada por diadema y recuperada en micrófono externo, MIC_PRIM_EXT
$S_s'$	Señal Ss filtrada por diadema y recuperada en micrófono externo, MIC_SEC_EXT
$Sra$	Señal de ruido ambiental recuperada por micrófonos, MIC_PRIM_EXT y MIC_SEC_EXT
$Sra'$	Señal Sra filtrada por diadema y recuperada por micrófonos, MIC_PRIM y MIC_SEC
$Re S_p$	Señal SPL reproducida por la bocina primaria, SPK_PRIM
$Re S_s$	Señal SPL reproducida por la bocina secundaria, SPK_SEC
$\hat{Sra}^{-1}$	Señal Sra estimada e invertido 180°, denominada ANTI-RUIDO
$\kappa$	<i>Función de transferencia de acoplamiento pasivo</i>

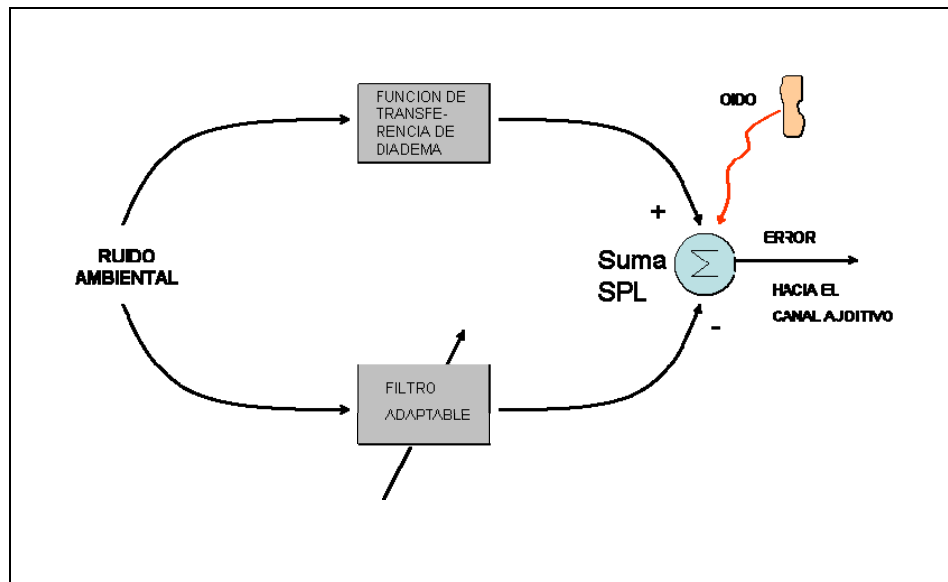
Por otra parte, para lograr la interferencia destructiva mencionada en secciones anteriores que se requiere en el proceso de RRA, las bocinas SPK\_PRIM y SPK\_SEC deberán reproducir (ecuaciones 3-5 y 3-6) el sonido percibido en el exterior de la cavidad del receptor pero con la señal desfasada 180°. Esto es representado también en el siguiente par de ecuaciones, denominadas en lo sucesivo *ecuaciones de cancelación RA*, cuando la señal Mp y Ms son cero:

$$M_p = 0 = \begin{cases} S_p + Sra' + \hat{Sra}^{-1}, & S_p > 0 \\ Sra' + \hat{Sra}^{-1}, & S_p = 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

$$M_s = 0 = \begin{cases} S_s + Sra' + \hat{Sra}^{-1}, & S_s > 0 \\ Sra' + \hat{Sra}^{-1}, & S_s = 0 \end{cases} \quad (3-10)$$

Siendo  $Sra$  y  $\hat{Sra}^{-1}$  iguales, la suma de estas dos variables tenderán a cancelarse mutuamente. Estas ecuaciones aplican en el lado primario y secundario del prototipo, es decir SPK\_PRIM y SPK\_SEC. Así, el ruido ambiental que existe en el entorno de quien usa la diadema prototipo será reproducido por el SPK del mismo, logrando así una reducción significativa o cancelación del sonido ambiental.

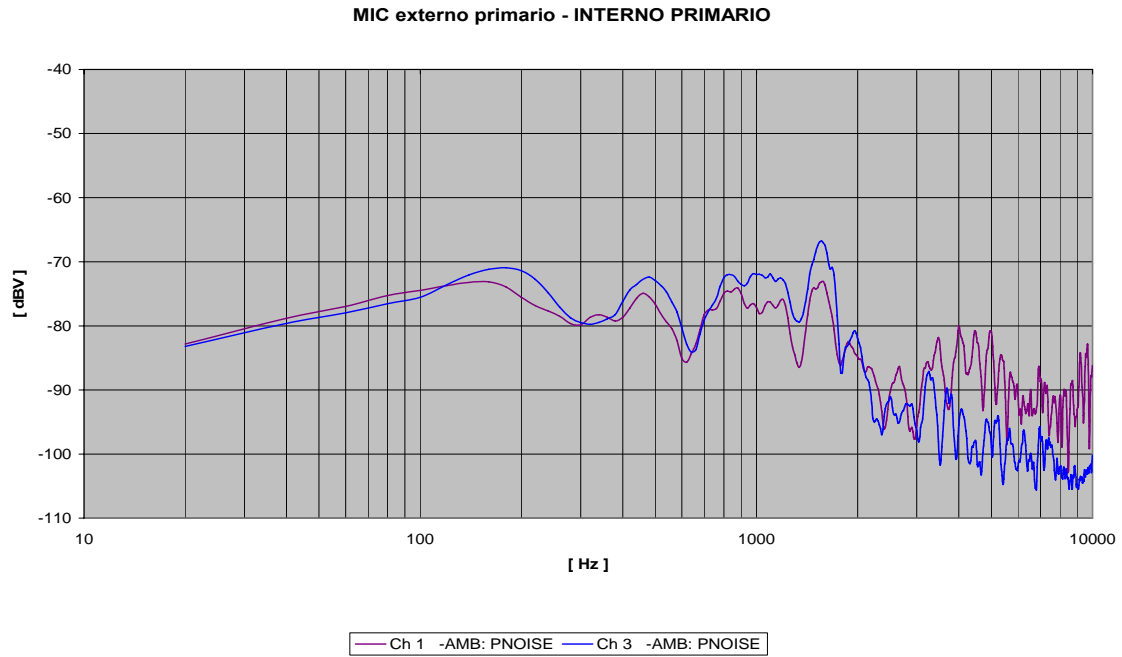
La Figura 3-3, muestra gráficamente como es llevada a cabo la reducción de RA en el punto ERP; en donde por un camino se introduce RA al punto ERP, pero este es a través de la función de transferencia de acoplamiento pasivo del receptor de la diadema de comunicaciones. Por la otra, en el mismo punto ERP, debe reproducirse un “anti-ruido” estimado que se genero mediante el filtro adaptable; dando como resultado la reducción de RA.



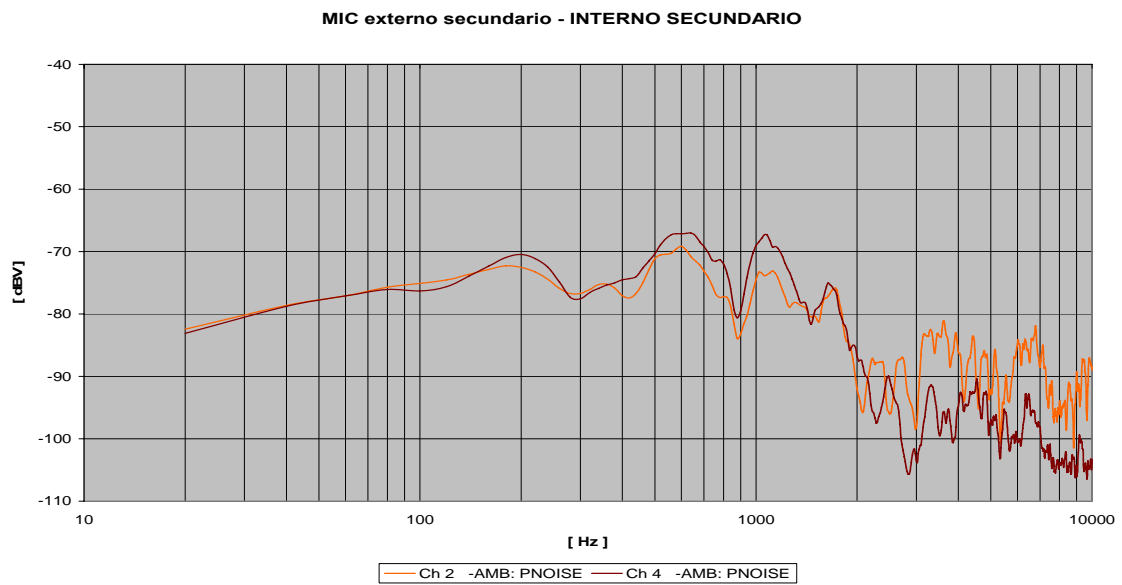
**Figura 3-3. Diagrama para interpretar la interferencia destructiva en el dominio SPL**

Cabe mencionar que dado el acoplamiento pasivo (descrito en el capítulo 1) intrínseco a cada tipo de diadema de comunicaciones y al hecho de que no se repiten las características acústicas para 2 componentes, hace que la relación entre la señal exterior y la señal interna medidas en los micrófonos respectivos, sean diferentes entre un producto y otro.

Para el prototipo desarrollado, fueron medidas las respuestas en frecuencia de cada micrófono instalado, y ellas son representadas en la Figura 3-4.



(a)



(b)

**Figura 3-4. Respuesta en Frecuencia de micrófonos supervisores del prototipo; (a) lado primario y (b) lado secundario**

En donde los trazos del gráfico fueron definidos como:

*Ch1 Respuesta en frecuencia del micrófono interno primario, MIC\_PRIM*

*Ch3 Respuesta en frecuencia del micrófono externo primario, MIC\_PRIM\_EXT*

*Ch2 Respuesta en frecuencia del micrófono interno secundario, MIC\_SEC*

*Ch4 Respuesta en frecuencia del micrófono externo secundario, MIC\_SEC\_EXT*

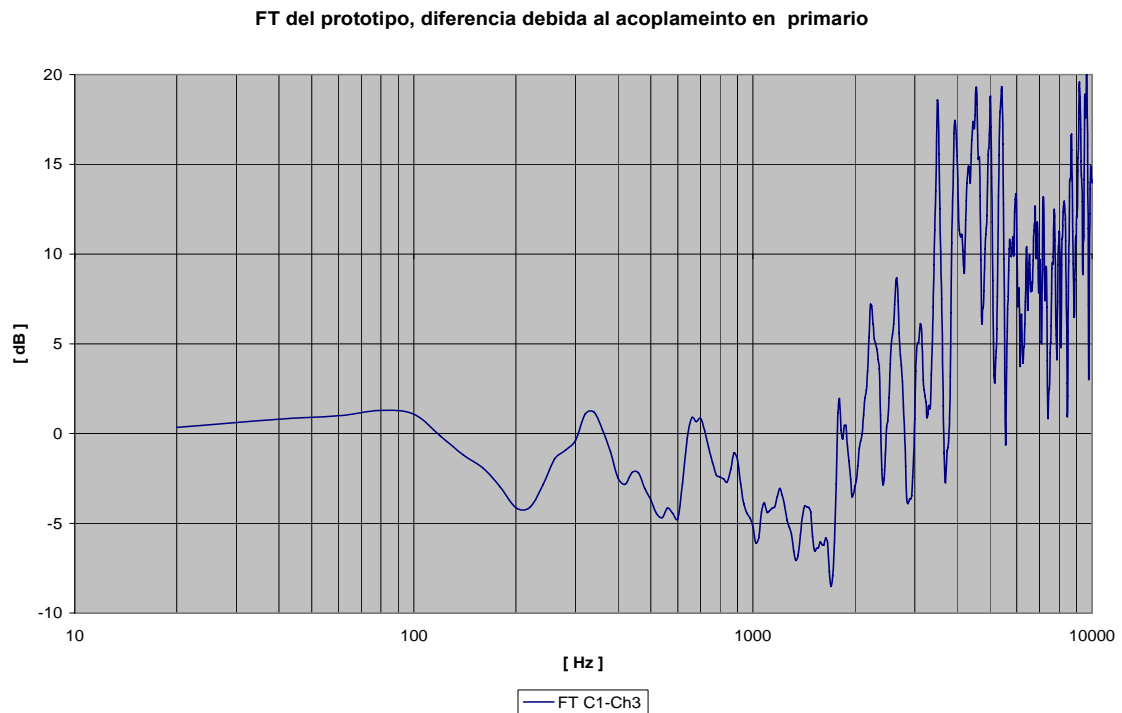
Estas mediciones se obtuvieron en una cámara acústica, en donde se simuló un sonido externo o ambiental. Para efectos de conocer en sentido amplio el espectro auditivo, se genera un ruido coloreado (pink noise) el cual es reproducido dentro de la cámara acústica. Un equipo HATS (head and torso simulator) es utilizado dentro de la cámara acústica simulando un usuario que usa el prototipo y que esta expuesto a un determinado nivel de ruido ambiental. La fuente de sonido que es generada esta calibrada y tiene un nivel de 94dB SPL (94dB SPL=0 dBPa) en el punto en que el MIC\_PRIM\_EXT o MIC\_SEC\_EXT estarían ubicados.

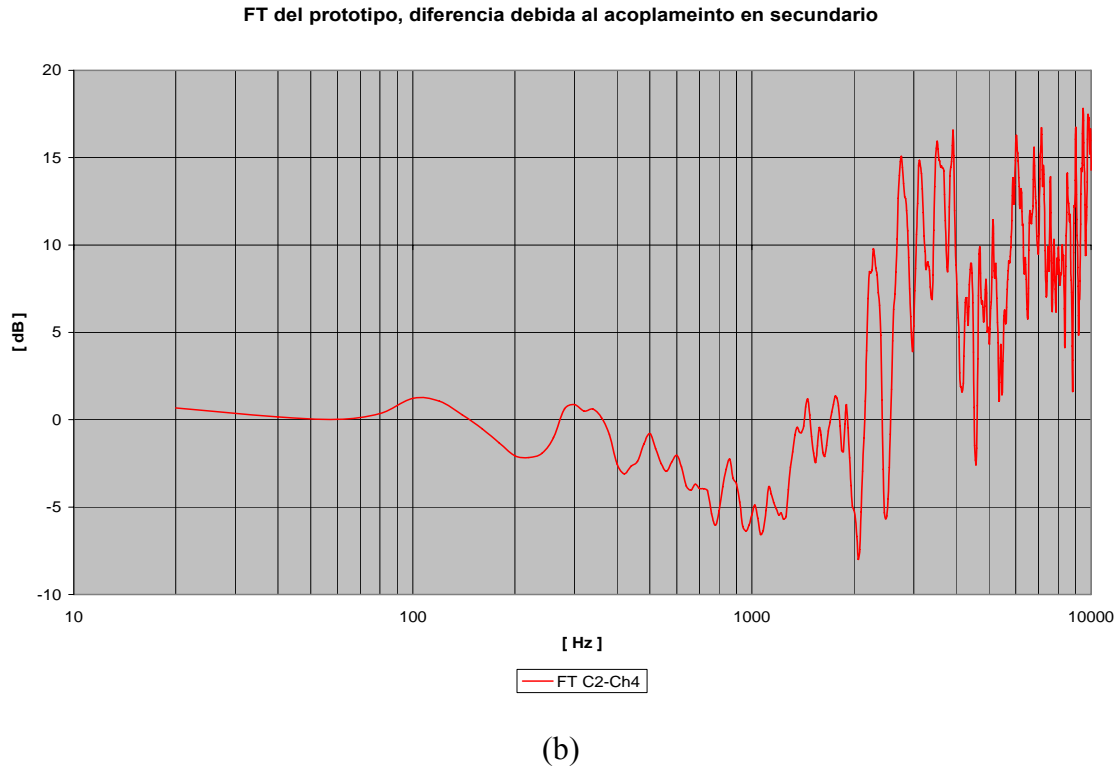
Una revisión rápida a esta Figura 3-4, nos lleva a una importante conclusión:

- *El nivel de sonido percibido en frecuencias altas (arriba de aproximadamente 1.5KHz) es mayor en los micrófonos internos que en los micrófonos externos, y debajo de esta frecuencia es mayor el nivel percibido por los micrófonos externos que en los internos para este prototipo en particular.*
- *El comportamiento de atenuación en altas frecuencias confirma el desempeño del prototipo como cancelador PASIVO (secc. 1.2.4).*

Esta conclusión, contrapone la intuición común de que los micrófonos externos medirían un nivel mayor sobre todo el espectro auditivo dada su exposición directa a el ruido ambiental.

Para obtener la función de transferencia de acoplamiento pasivo del receptor del prototipo, dado que se cuenta con datos paramétricos de los micrófonos externos e internos instalados en el prototipo, se obtiene su diferencia 'MIC\_EXT' – 'MIC' y estos son graficados en la Figura 3-5:



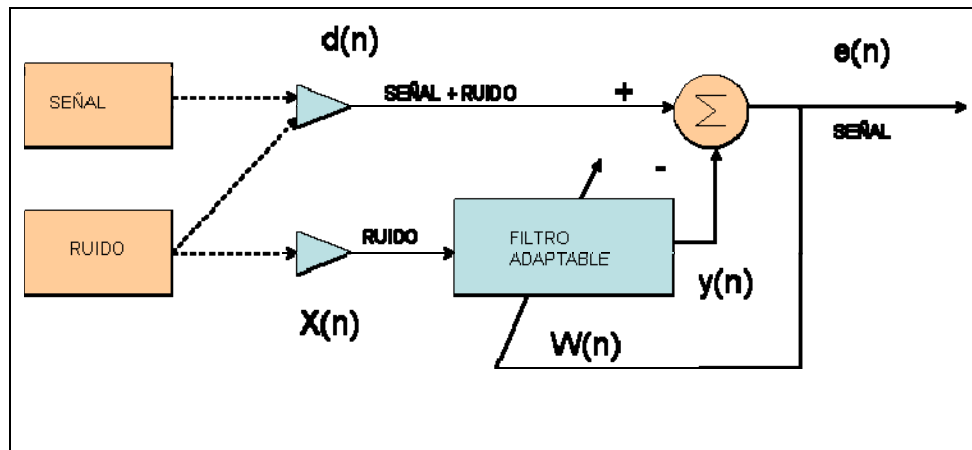


**Figura 3-5. Funciones de transferencia por acoplamiento (a) primario, (b) secundario**

Esta función de transferencia tiene uso para entender cual es el grado de transformación del espectro auditivo hasta el punto ERP que varia en aproximadamente  $+2/-7$  dB (cuando  $100 \text{ Hz} < f < 2000\text{Hz}$ ) y  $> 5\text{dB}$  (cuando  $f > 2\text{KHz}$ ). De no haberse contado con datos paramétricos, esta función deberá ser calculada considerando factores del receptor del prototipo y del usuario, fuera del alcance de esta tesis.

### 3.2 Topología del SRRA y su integración con la tarjeta de evaluación

Como en el Capítulo II se ha estudiado, de las diferentes topologías de filtrado adaptable existentes, la que es conveniente a este sistema SRRA es el cancelador de ruido. En la Figura 2-1(d), se graficó esta arquitectura y ahora es modificada agregando las respectivas fuentes sonoras como lo son una señal de ruido y una señal deseada que se observa en la Figura 3-6.



**Figura 3-6. Topología del cancelador de ruido [1]-[4]**

La operación de esta topología es la siguiente : a través del canal “ $x(n)$ ”, se introduce un “ruido” que es luego estimado mediante el uso de un del filtro adaptable obteniendo una salida “ $y(n)$ ” y luego enviado ésta a un punto de suma aritmética, este es un proceso iterativo dada la retroalimentación que se obtiene de la salida o error “ $e(n)$ ” y que alimenta los pesos del filtro adaptable “ $w(n)$ ”. En tanto que por el otro canal “ $d(n)$ ” se introduce una trama que incluye una “señal deseada” y parte del “ruido” que esta correlacionado con el que se introdujo por el primer “ $x(n)$ ”, igualmente, esta señal es llevada al mismo punto de suma aritmética y en cuyo punto ambas señales se sobreponen. En una primera iteración se espera un valor “ $e(n)$ ” que ira disminuyendo con respecto al tiempo; y como se ha explicado en el capítulo II, el ruido correlacionado se elimina quedando como residuo la señal deseada. Este proceso es representado en las ecuaciones (2-1), (2-4) y (2-23).

Bajo esta topología el ruido que deseamos eliminar o reducir es el ruido ambiental que se introduce al bloque de filtrado adaptable que será actualizado en función del error generado

Un producto con sistema de reducción de ruido operaria idealmente bajo los siguientes escenarios:

1. *SIN recepción y SIN transmisión*
2. *Recepción en proceso y SIN transmisión*
3. *SIN recepción y transmisión en proceso*
4. *Recepción en proceso y transmisión en proceso*

El primer escenario significa que el producto puede ser usado en aplicaciones de descanso; un caso muy típico es cuando el producto se usa en aerolíneas para reducir el ruido ambiental producido por las turbinas del aeroplano pero sin que el producto este reproduciendo otro sonido. En este escenario, aplican las ecuaciones (3-1) - (3-4) cuando  $S_p$  y  $S_s$  son iguales a cero.

El segundo escenario significa que hay una actividad de recepción como por ejemplo cuando se esta entablando una comunicación o cuando se esta escuchando música, a la vez que se desea reducir el ruido ambiental del entorno. En este escenario, aplican las ecuaciones (3-1) - (3-4) cuando  $S_p$  y  $S_s$  son diferentes de cero.

En el tercer escenario no se espera actividad de recepción, se esta transmitiendo a través de la diadema de comunicaciones y a la vez se desea reducir el ruido ambiental. Este escenario presenta una complejidad grande al momento de que la variable de “transmisión” es involucrada, esto es, la señal que es generada por el usuario mismo, sería capturada por los micrófonos supervisores del sistema SRRA y tratada como una señal RA para idealmente cancelarla, lo cual NO es deseado en una diadema de comunicaciones. Típicamente en una diadema de comunicaciones, cuando se transmite se espera una copia atenuada de dicha señal en el receptor a la que se le denomina “side tone” y esta regulada por estándares de comunicaciones como el TIA810B [11]. Las ecuaciones de este escenario no son descritas en este trabajo.

En el cuarto escenario hay actividad de recepción y se esta transmitiendo a la vez, y adicionalmente se desea cancelar el ruido ambiental del entorno. Este es un caso impráctico y que se menciona sólo como parte de los escenarios que podrían suscitarse y considerar que este es un escenario que podría hacer un sistema inestable si no es tratado apropiadamente.

**EN este punto cabe mencionar que el sistema SRRA de este trabajo, esta únicamente limitado a los primeros dos escenarios mencionados arriba y es funcional con el primero dados los canales ADC disponibles en la tarjeta DSK de evaluación.**

### **3.2.1 Funciones de transferencia del prototipo**

El siguiente diagrama (Figura 3-7) a bloques representa la combinación de los modelos representados en la Figuras 3-3 y Figura 3-6. El nivel de éxito de la interferencia destructiva, teóricamente, radica en la generación de un ‘anti-ruido’ como se ha mencionado en secciones anteriores, y cuyas características deben ser misma amplitud y defasamiento de  $180^\circ$  con respecto a la señal será cancelada.

El proceso para obtener estas dos variables representadas en el ‘anti-ruido’ es un reto práctico basado en el hecho de que en la ruta para generarlo implica el uso de varios subsistemas con funciones de transferencia propias que afectan la señal y que deben ser consideradas para obtener el resultado deseado, de otra forma, la reducción de RA no será efectivo.

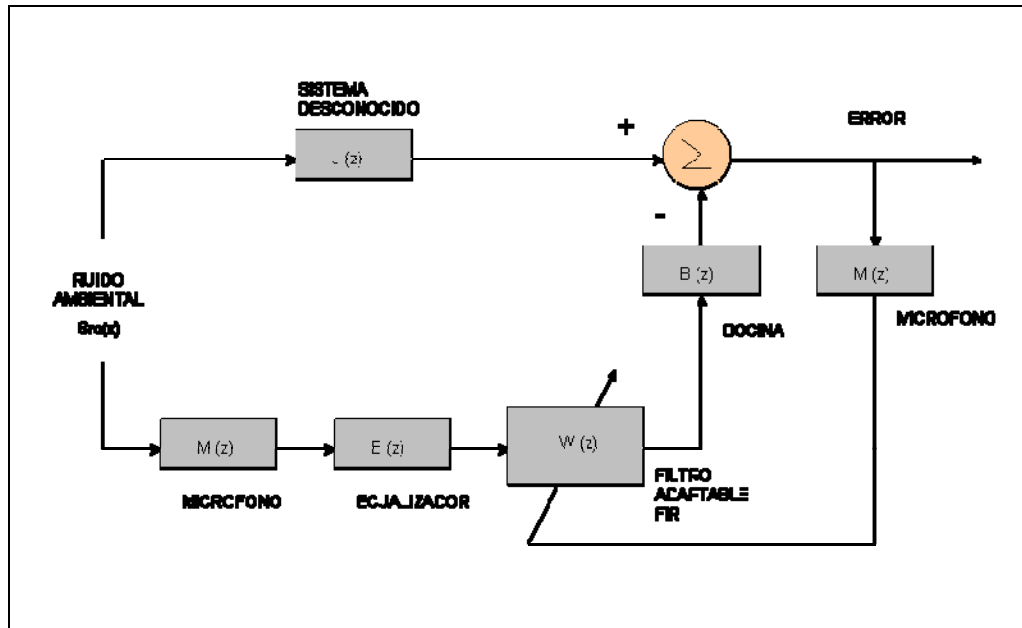


Figura 3-7. Sistema SRRA representado con sus funciones de transferencia [13]

El diagrama a bloques de este sistema ha sido basado en el modelo de Rubak [13], y el cuál sugiere incorporar un ecualizador  $E(z)$  en el canal para contra restar el efecto de la función de transferencia del micrófono mismo. Ello aplica a todos los transductores empleados en el prototipo.

Dada la no linealidad de cualquier bocina [9], [13]-[15], la función de transferencia  $B(z)$  debe construirse en base al método de fase mínima [16]. Para construir la función de transferencia de los micrófonos, se sigue el método directo.  $J(z)$  representa la función de transferencia del acoplamiento pasivo de la diadema prototipo y hemos hecho  $S_{ra}(z)$  como la transformada Z del ruido ambiental, RA.

El comportamiento ideal de este sistema sucede cuando el error tiende a cero; siendo así se obtiene la aproximación ideal del Filtro Wiener  $W^*(z)$ . Si se fuerza hace que el error sea cero, entonces se obtiene

$$Sra(z) \cdot M(z) \cdot E(z) \cdot W(z) \cdot B(z) = Sra(z) \cdot J(z) \quad (3-11)$$

Y despejando para obtener W, se obtiene el valor de los pesos ideales en función del sistema propuesto.

$$W(z) = \frac{J(z)}{M(z) \cdot E(z) \cdot B(z)} \quad (3-12)$$

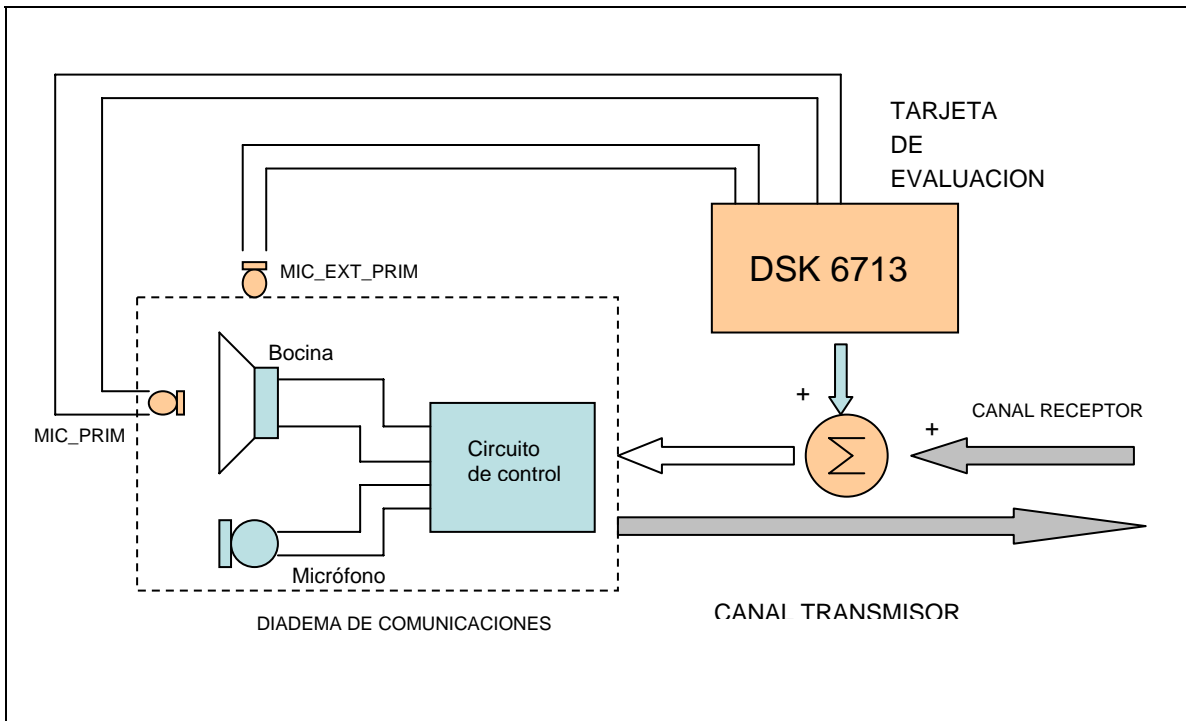
Este método analítico ayuda a simular una condición de operación del sistema SRRA.

### 3.2.2 Integración del prototipo a la tarjeta DSK

La tarjeta de desarrollo que se emplea en este trabajo es una DSK6713 de TI [18]. Esta cuenta con dos entradas '*LINE IN LEFT*' y '*LINE IN RIGHT*' las cuales se estarán dedicando para los micrófonos interno y externo respectivamente (Apéndices G y H). Dada la limitación de puertos en el 'hardware' y dado que este trabajo es demostrativo, en lo subsiguiente, se trabajará tan solo con el LADO PRIMARIO de la diadema prototipo. El sistema es simétrico, así que con mínimos ajustes, se podría implementar la operación del LADO SECUNDARIO de la diadema prototipo.

Dicho esto, en la Figura 3-8, se representa la arquitectura a bloques del SRRA para el LADO PRIMARIO.

Las señales que los micrófonos interno y externo registran son llevadas a las entradas analógicas de la tarjeta DSK. El nivel que en este punto es manejado es de -37dBV (94dB SPL & 1KHz). La tarjeta lleva a cabo la digitalización de la señal con una tasa de muestreo de 48KHz y se encarga de entregar tramas de datos al DSP.

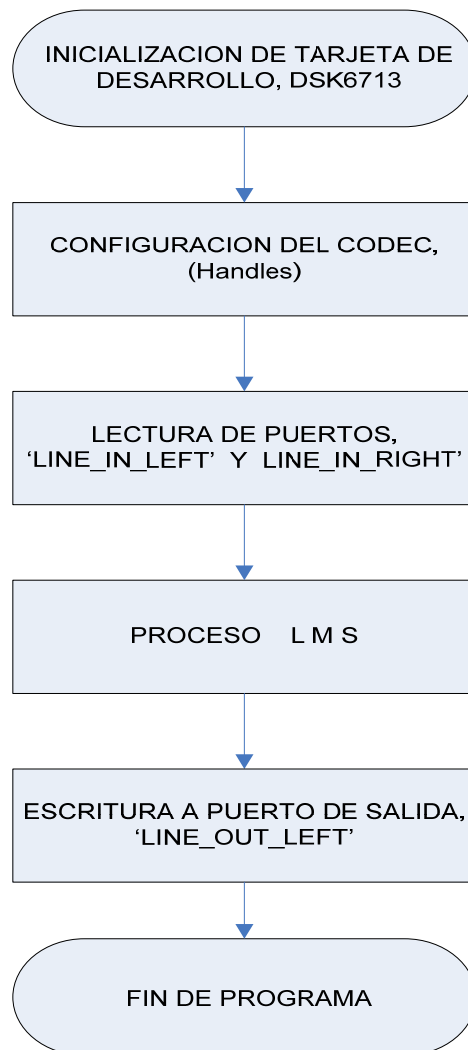


**Figura 3-8. Arquitectura del sistema, SRRA**

Después del procesamiento de las señales que entraron a los puertos '*LINE IN LEFT*' y '*LINE IN RIGHT*', la señal de anti-ruido  $\hat{S}_{ra}^{-1}$  descrita en la sección 3.1, es enviada al puerto de salida '*LINE OUT LEFT*' de la tarjeta DSK, que a su vez es sumada con la señal de recepción,  $S_p$ , y luego reproducida por la bocina de la diadema SPK-PRIM.

### 3.3 Desarrollo del algoritmo LMS para la tarjeta DSK

En base al desarrollo del algoritmo LMS explicado en el capítulo II, y en base a la diadema de comunicaciones prototipo, se desarrolla el programa “SRRA\_v1.0” que tiene el diagrama de flujo siguiente:



**Figura 3-9. Diagrama de flujo del algoritmo SRRA operando en la tarjeta de evaluación DSK6713**

Los siguientes párrafos serán enfocados al proceso LMS.

Para efectos de aproximar una solución óptima de parámetros ( número de muestras, orden del filtro y factor de convergencia ) al proceso LMS con el menor número de iteraciones, se desarrollan los siguientes ejercicios:

- (i) Generar programa para asegurar el funcionamiento del algoritmo LMS con señales estacionarias
- (ii) Generar programa para asegurar el funcionamiento del algoritmo LMS con señales dinámicas (ejemplo: archivos de audio y/o ruido)
- (iii) Desarrollar el algoritmo LMS para implementarlo y correrlo en la tarjeta de desarrollo DSK y con la diadema de comunicaciones prototipo: Sistema SRRA

A continuación se describe el desarrollo de cada punto y los resultados derivados son presentados en la siguiente sección 3.4.

#### Ejercicio (i).

El siguiente código basado en el código muestra de Rulph [18].

```
SENAL_DESEADA=2*cos(2*pi*T*1000/Fs)
```

```
SENAL_DE_RUIDO=sin(2*pi*T*1000/Fs)
```

```
X[0] = SENAL_DE_RUIDO
```

```
D = SENAL_DESEADA
```

```
Y = 0
```

$$Y += (W[I] * X[I])$$

$$E = D - Y$$

$$W[I] = W[I] + (\text{beta} * E * X[I])$$

El programa alimenta al sistema LMS con dos tipos de señales: una señal deseada compuesta por un tono cosenoidal  $2\cos(2n\pi f/Fs)$  en tanto que el ruido de referencia es seleccionado como un tono senoidal  $\sin(2n\pi f/Fs)$ ; en donde la  $f = 1\text{KHz}$  y  $Fs = 8\text{KHz}$ . El sistema desecha el tono senoidal y convergerá a la señal deseada.

### Ejercicio (ii).

El siguiente código basado en el trabajo del Ingeniero G. Rodriguez, tiene como finalidad ejecutar el algoritmo usando como fuentes sonoras archivos de audio.

```

signal=wavread(file1)
noises=wavread(file2)

Rxx_0=xcorr(signal,1)
Var=Rxx_0(2)/(10^(SNR/10))
noise=sqrt(Var)*noises
noise_aten=noise

signal_noise=signal+noise_aten;

delta=1/(20*L*Px(2))

nk=nk+(w(i,j)*noise_buffer(j))

ek(i)=signal_noise(i)-nk
uek=2*delta*ek(i)

w(i+1,j)=w(i,j)+(uek*noise_buffer(j))
    
```

En este programa se hacen dos consideraciones especiales : el comportamiento del sistema respecto a la relación señal a ruido y el cálculo del factor de convergencia con respecto a la potencia de la señal instantánea y de la longitud del filtro.

### Ejercicio (iii).

Con las experiencias pasadas, se puede aproximar el código para el DSK con las siguientes consideraciones:

- HANDLES: En la configuración de los handles se procura que los puertos I/O tengan un grado de precondicionamiento, esto es; como las señales de entrada 'LINE\_IN\_LEFT' y 'LINE\_IN\_RIGHT' son limitadas en potencia, debe ser habilitada una preamplificación para entregar señal suficiente al ADC, y en el caso de 'LINE\_OUT\_LEFT' y 'LINE\_OUT\_RIGHT' considerar activar la etapa de amplificación de ser necesario. Las entradas analógicas de la tarjeta correspondan a un nivel no mayor a 0dBV para evitar saturar el ADC [17], pero no tan pequeño como -60dBV que es la que proporcionarían los micrófonos. Un valor tan pequeño ocasionará que la señal de entrada sea interpretada como ruido eléctrico.
- INICIALIZACION: la inicialización que se hace a la tarjeta es la típica. Habilita el DSK6713 BSL y el codec AIC23.
- PROCESO LMS:

Para este caso se corre la configuración de reducción de RA bajo el escenario 1, descrito en la sección 3.2.

Se hacen las siguientes asignaciones

MIC\_PRIM → LINE\_IN\_LEFT: el microfono de error alimenta la entrada izquierda del DSK

MIC\_PRIM\_EXT → LINE\_IN\_RIGHT: el microfono de referencia alimenta la entrada derecha del DSK

LINE\_OUT\_LEFT → SPK\_PRIM: la salida “antinoise” procesada es enviada desde el DSK al receptor derecho del prototipo.

W[I] = 0.0

X[I] = 0.0

while (!DSK6713\_AIC23\_read(hCodec, &inputdata1))

while (!DSK5510\_AIC23\_read16(hCodec, &inputdata2))

E = (float)inputdata1

X[0] = (float)inputdata2

Y = 0

Y += (W[I] \* X[I])

while (!DSK6713\_AIC23\_write(hCodec, (short)Y\*-1.00))

$$E = (\text{float})\text{inputdata1}$$

$$W[I] = W[I] + (2 * \mu * E * X[I])$$

Los resultados de este experimento como el de los anteriores son mostrados en la sección siguiente.

### 3.4 RESULTADOS DE PRUEBAS

#### Ejercicio (i)

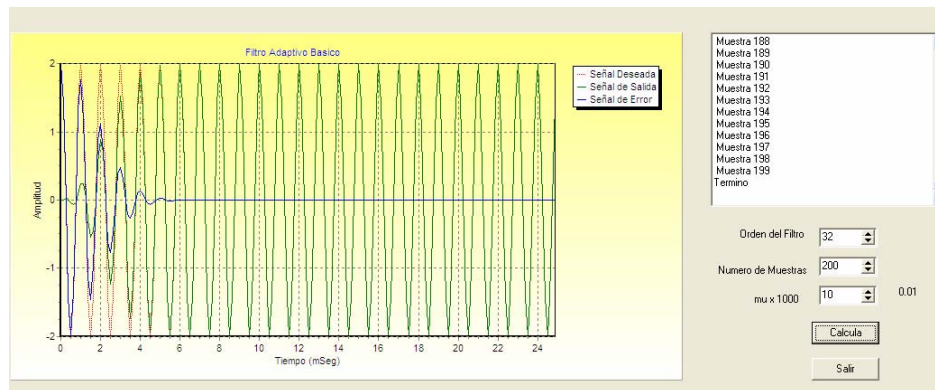
En la Tabla 3-1, se describen las condiciones de prueba que se desarrollan con este programa y también sus resultados; se realizan ocho pruebas. Las variables a evaluar son la combinación de: orden del filtro (L), número de muestras (N) y factor de convergencia ( $\mu$ ), y como resultado se analiza el tiempo de convergencia para un  $MSE \leq 0.01$

**Tabla 3-1. Tiempo de convergencia**

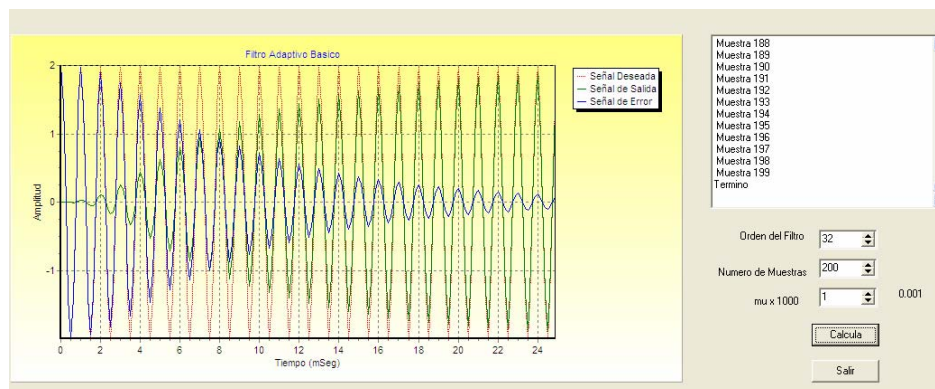
Número de Prueba	ORDEN DEL FILTRO (L)	NUMERO DE MUESTRAS (N)	FACTOR DE CONVERGENCIA ( $\mu$ )	TIEMPO DE CONVERGENCIA, mseg (@ MSE $\leq$ 0.01)
1	16	100	0.01	7.5
2	32	100	0.01	5.25
3	16	200	0.01	8
4	32	200	0.01	5.1
5	16	100	0.001	12mseg @ MSE=1
6	32	100	0.001	12mseg @ MSE=0.5
7	16	200	0.001	24mseg @ MSE=0.35
8	32	200	0.001	24mseg @ MSE=0.2

De estos datos se observa que la mejor combinación para obtener la mayor rapidez de convergencia corresponde a las condiciones de la prueba #4.

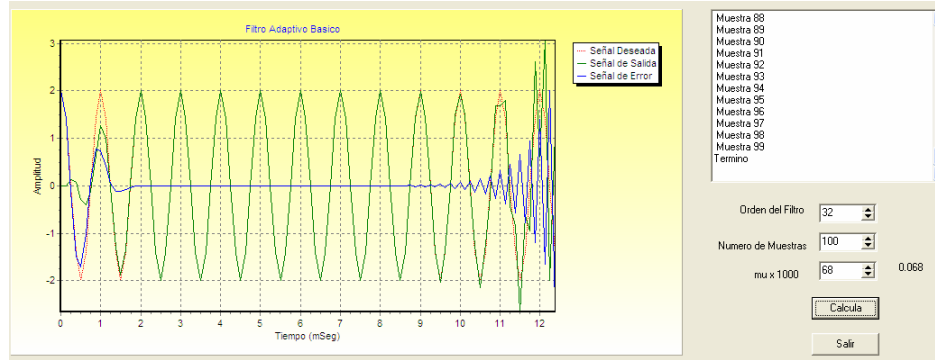
En la Figura 3-10 se muestran tres gráficas que corresponden como sigue: (a) a la pruebas # 4, (b) a la prueba # 8 y (c) a otra prueba no incluida en la Tabla 3-1 y que ejemplifica un caso de “no convergencia”. El trazo en color rojo es la señal deseada, el trazo en color azul es la señal de error y el trazo en color verde es la señal estimada. En el caso (a) y (b) se observa que la señal estimada después de un intervalo de tiempo simula a la señal deseada, es decir, la señal estimada converge con la señal deseada. En el caso (c) la señal estimada no se estabiliza y tampoco alcanza a simular a la señal deseada, es decir, la señal estimada no converge.



(a)



(b)



( C )

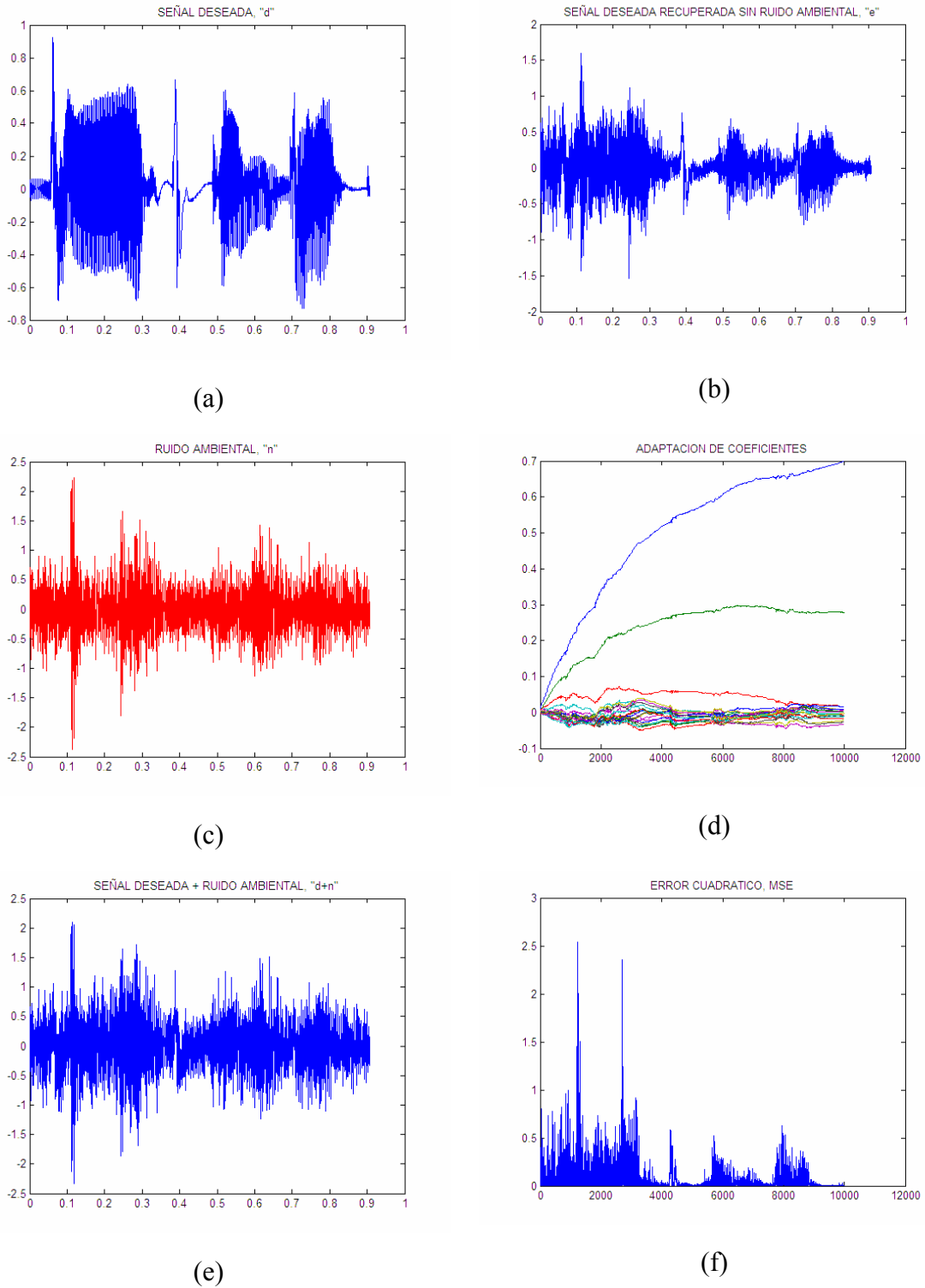
**Figura 3-10. Convergencia del algoritmo LMS para casos: (a)  $L=32$ ,  $N=200$ ,  $\mu=0.01$ , (b)  $L=32$ ,  $N=200$ ,  $\mu=0.001$ , (c)  $L=32$ ,  $N=100$ ,  $\mu=0.068$**

Para la prueba #4 se usó un filtro de 32 coeficientes, se usaron 200 muestras y se usó un factor de convergencia de 0.01.

### Ejercicio (ii)

En la Figura 3-11, se observa de manera gráfica el proceso del algoritmo LMS. Cada cuadro representa un proceso y este comienza con la lectura de dos archivos de sonido: (a) una señal de voz o señal deseada y (c) una grabación de RA correspondiente a un centro CC. Ambas señales se suman para obtener una señal contaminada (e) y el índice de RA en esta señal contaminada está determinada por la relación de señal a ruido (SNR). En la gráfica se representa el caso de  $SNR = 30\text{dB}$ .

La señal contaminada (e) y la señal de ruido (c) son procesadas por el algoritmo LMS y al final del proceso se obtiene la señal recuperada (b) con RA reducido. En el proceso se calculan los pesos (d) del filtro adaptable que dan cuenta de la velocidad de convergencia, a la vez que se calcula el error (f) resultante entre la señal contaminada (e) y la señal de ruido (c).

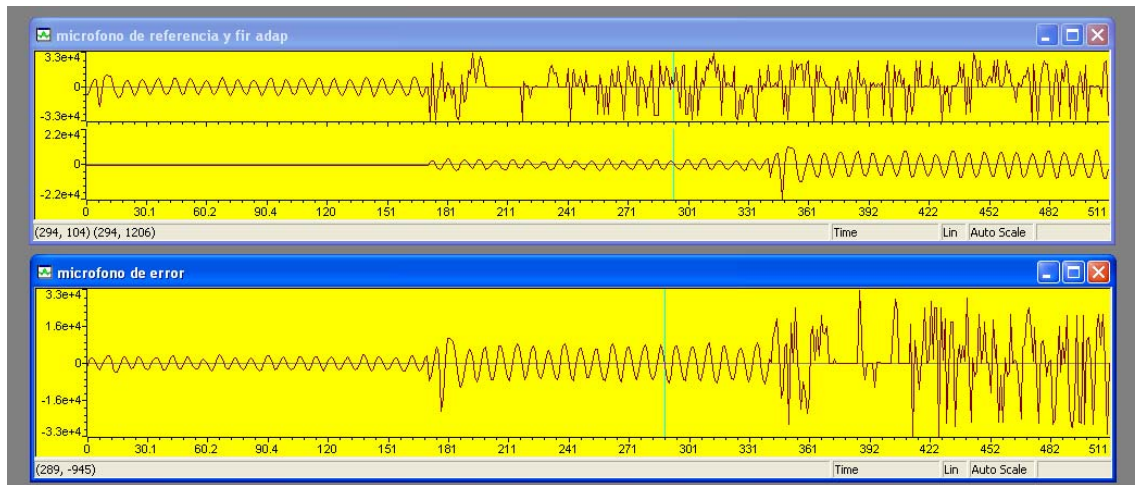


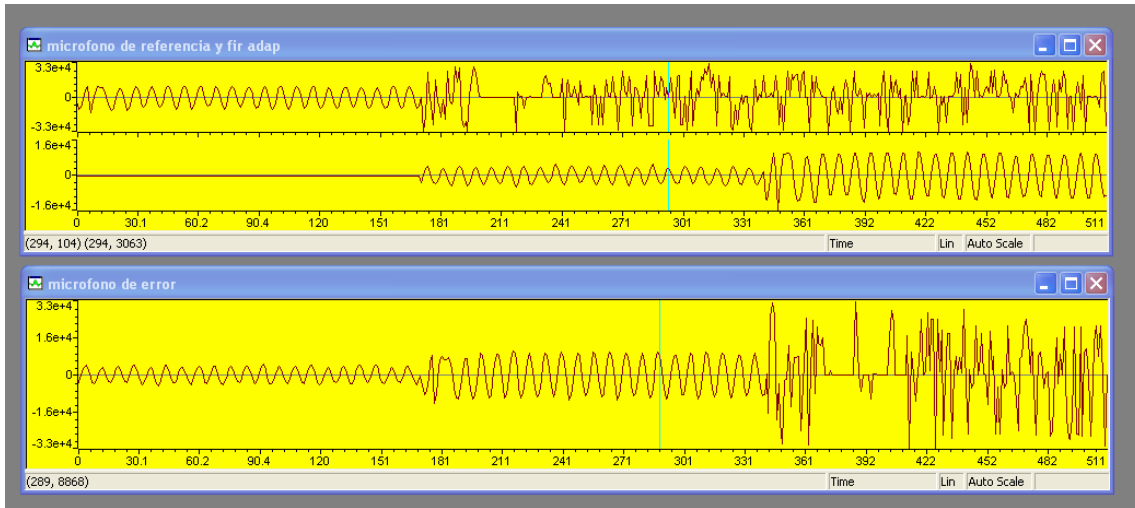
**Figura 3-11. Proceso de reducción de RA mediante algoritmo LMS y muestras de archivos de audio**

Ejercicio (iii)

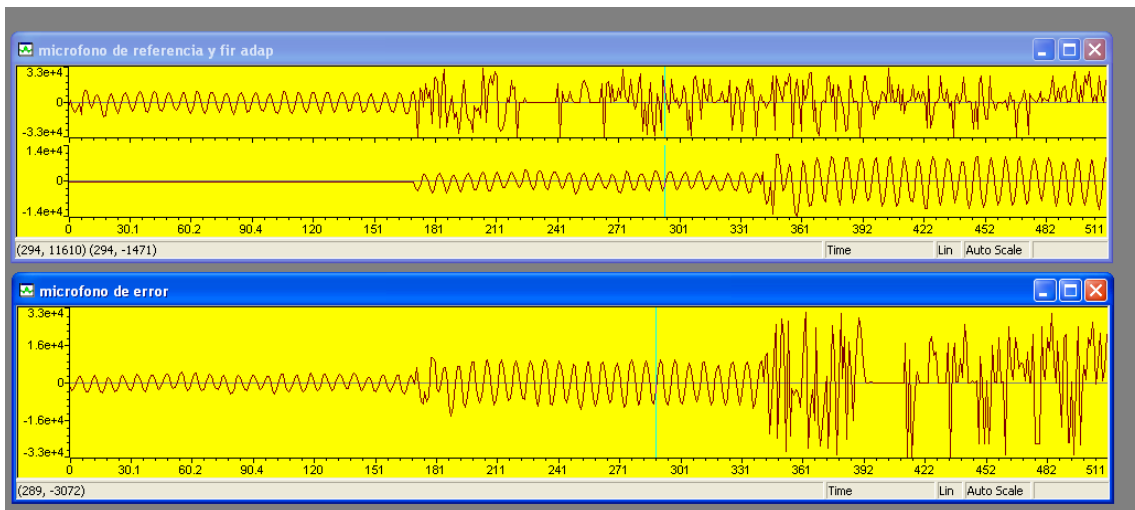
En la Figura 3-12 se representan las señales eléctricas del micrófono de referencia junto con la salida del filtro FIR y también la señal del micrófono de error. Estas señales se repiten para diferentes condiciones (a)-(d) en que se variaron parámetros de factor de convergencia ( $u$ ), de la longitud del filtro ( $fir$ ) y del número de muestras ( $n$ ), en el algoritmo LMS.

Estos datos sin embargo no representan una condición de prueba esperada a través del micrófono de error y que en consecuencia hacen que la cancelación de ruido percibida en la diadema prototipo sea mínima.

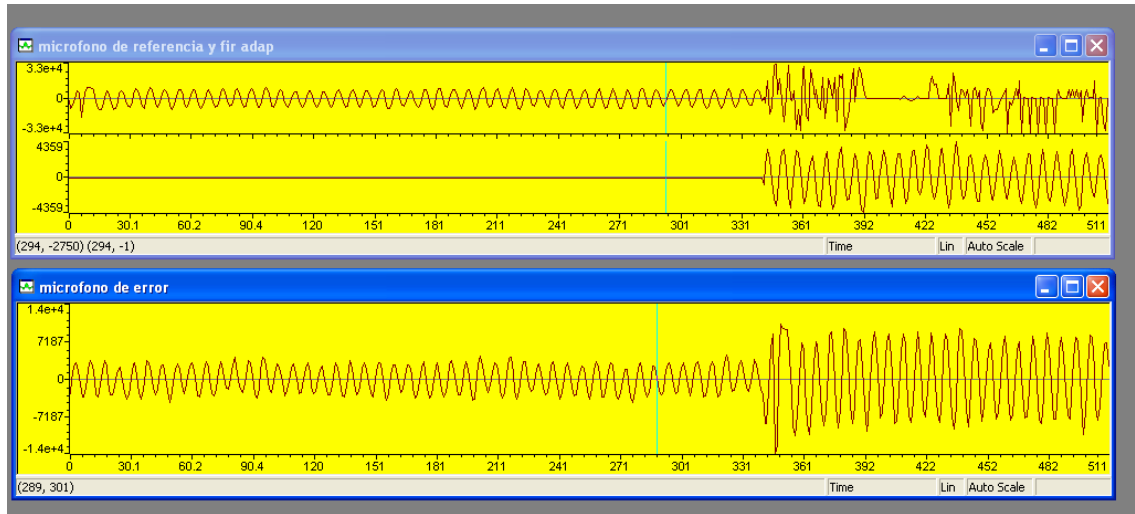
(a):  $u=1e-3$   $fir$  32  $n$  512



(b):  $u=1e-6$  fir 32 n 512



(C):  $u=1e-6$  fir 64 n 512



(d):  $u=1e-6$  fir 64 n 1024

**Figura 3-12. Datos de las variables de salida usando diferentes parámetros**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general, el sistema SRRA construido y probado tiene un desempeño que no es el adecuado para lograr competir con un producto comercial y hace falta más investigación en el campo acústico. Esta consideración se basa en el hecho de que el algoritmo probado con señales estacionarias y archivos de audio encuentra un alto grado de convergencia y estabilidad (caso i, tratado en la sección anterior).

Considero que el camino de investigación tomado ha sido el correcto y que se encuentra cerca una solución, esta investigación continuará como actividad extra-escolar, y por motivos de tiempo; esta fase de desarrollo de tesis debe concluir.

El algoritmo LMS demostró ser una herramienta suficiente para tratar con señales estacionarias, aunque por referencias en varios artículos que se consultaron [13] – [15], [19] – [21], se observaron diversas variables del mismo como NLMS, FXLMS, entre otros. Igualmente, se observaron modelos más complejos para identificar la función de transferencia del acoplador pasivo del prototipo.

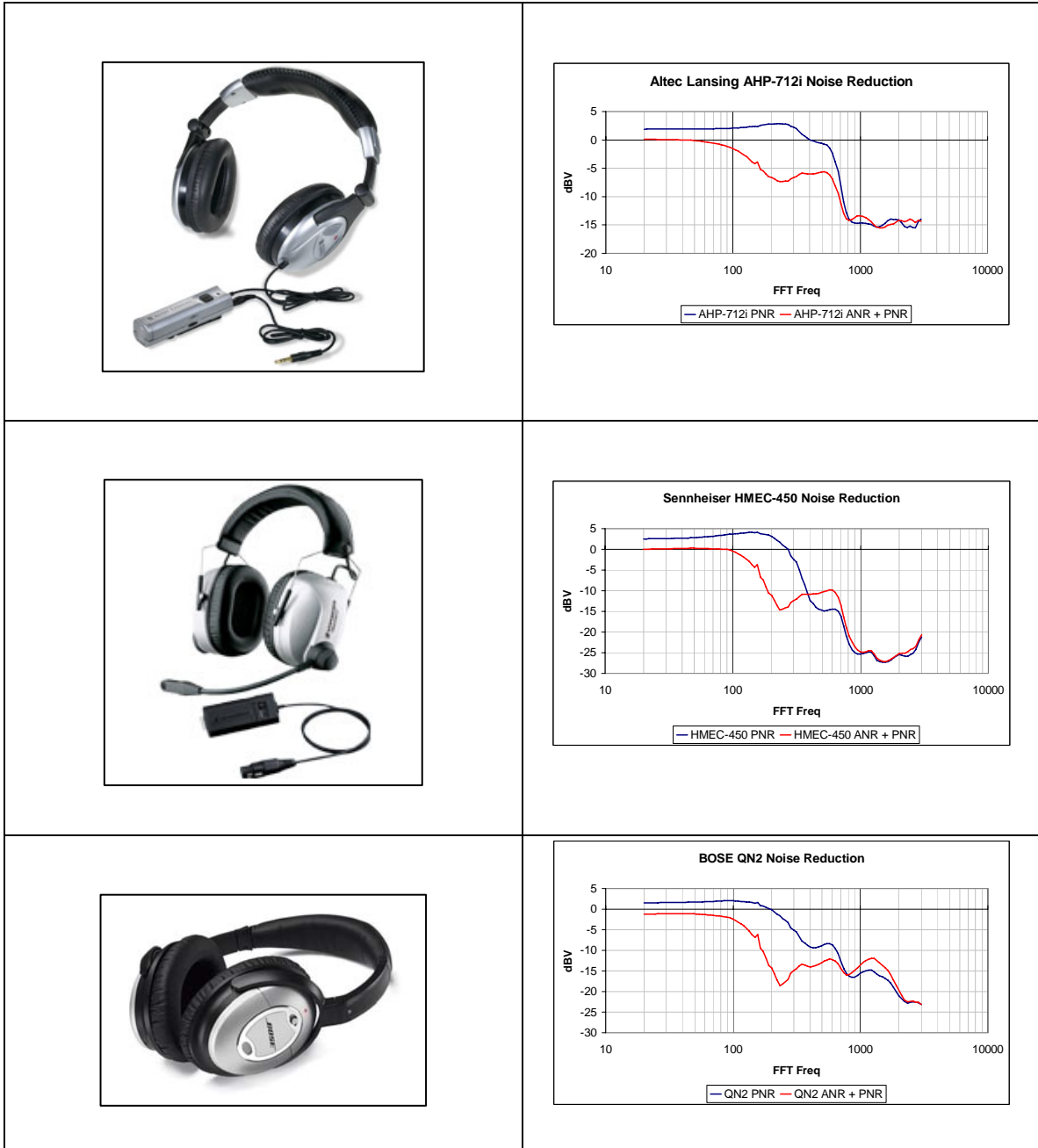
Con respecto a la tarjeta de desarrollo empleada, se considera suficiente, sin embargo el proceso de revisión de código es laborioso. El codec que emplea es adecuado y fue relativamente fácil la manipulación de sus parámetros.

Concluyo también en que el desarrollo de esta tesis fomentó el desarrollo de diversos estudios de acústica y en la investigación de trabajos desarrollados en este campo para dar soporte al desarrollo de la misma.

Recomiendo ampliamente explorar un circuito eléctrico más robusto de acondicionamiento de señal una etapa antes del DSK con la finalidad que las señales a manejar sean óptimas para el ADC. Recomendo también trabajar con otras variantes de LMS y modelos más robustos.

**APENDICE A: Estudio Competitivo de Diademas con “ANR”**

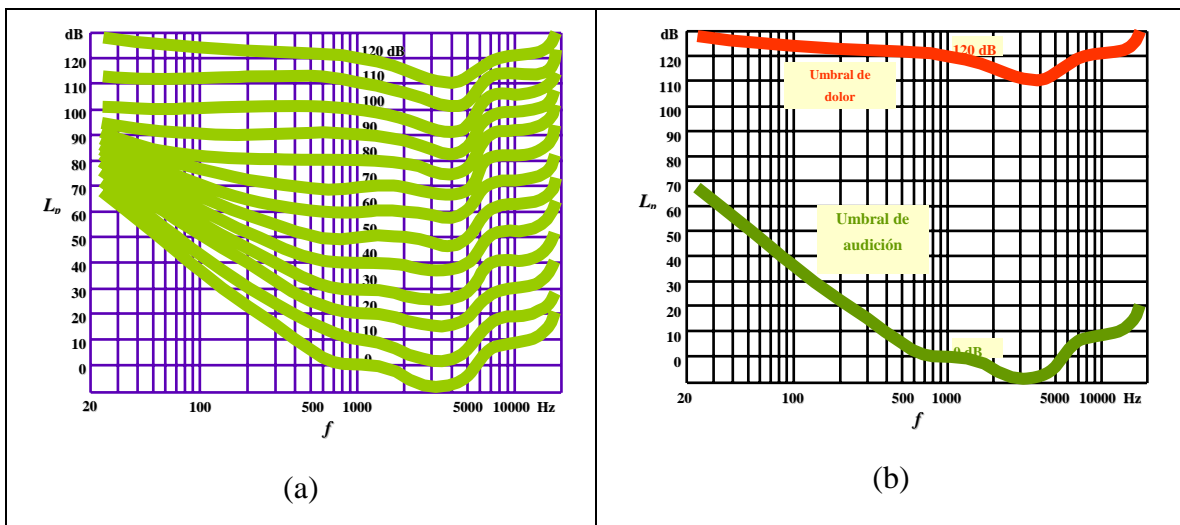
En la Figura A-1, se observan los resultados de la función ANR de en tres productos que integran esta característica y que se encuentran disponibles comercialmente. El trazo azul, representa la característica normal del receptor, en tanto que el trazo rojo representa la característica de recepción cuando el sistema ANR ha sido activado.



**Figura A-1. Gráficos comparativos sobre el desempeño de RRA de productos disponibles en el Mercado.**

## APENDICE B: Comportamiento y Límite Auditivo Humano

Con el objetivo de tener un mayor conocimiento sobre el sonido y como el sistema auditivo humano los percibe, se han realizado numerosos estudios para medir la frecuencia y el nivel de presión sonora. En la Figura B-1, se observan las celebres gráficas de Fletcher and Munson [8]. Ellas nos dicen como el sistema auditivo percibe el sonido en función de la frecuencia, y también el umbral mínimo y máximo de audición humano promedio.



**Figura B-1** Curvas de Fletcher and Munson [8]; (a) entrada-salida en incrementos de 10 dB, (b) límite mínimo y máximo de intensidad sonora

En (a) es mostrado la respuesta auditiva en función del sonido SPL y el grado de audición promedio en función de su respuesta en frecuencia y percepción de intensidad sonora. En (b), son mostrados el umbral de audición promedio (0dB) y el limite seguro de audición (120dB) [8], [10].

La información que proporciona las gráficas (a); son el grado de percepción auditiva en el rango de frecuencias entre 20 Hz y 20000 Hz, e indican que nuestro sentido de audición es más agudo en frecuencias bajas que en medias – altas. Por ejemplo, un tono de 200 Hz, debe ser 20 dB mas alto a 1 KHz cuando este es de 20 dB para tener la misma

percepción auditiva, pero también en la medida en que el nivel sonoro es más alto, este delta cambia.

Dado que el conjunto de estas gráficas modelan el comportamiento auditivo humano promedio, ellas tienen varias aplicaciones; por ejemplo han ayudado a definir filtros electrónicos (A-weighting) que son utilizados en equipos de medición para aproximar el sonido SPL a nuestra percepción. También son referencias para el diseño de equipos de audio, pues predicen el comportamiento auditivo, así como de normas de medición.

### APENDICE C: Valoración de RA en una Oficina y un CC

Para poder hacer una estimación estadística del ruido ambiental para un sitio en particular, se llevó a cabo el siguiente experimento durante varios días en horario de trabajo normal:

- a) Medición de RA en una Oficina (Plamex SA de CV)
- b) Medición de RA en un CC (Plamex SA de CV)

Las mediciones fueron hechas con un medidor de sonido B&K Hand Held type 2250 [12].

- Frecuencia de Análisis: 20Hz a 20KHz, bandas de frecuencia de 1/3 octavas
- Resolución de muestreo: 1 seg
- Calibración: 94 dBSPL @ 1KHz
- Tipo de medición: Campo abierto, 90°

En la Tabla C-1, se describe el calendario de prueba para los lugares de Oficina y CC. Se procura en lo posible medir en un horario (Hrs) corrido para tener referencias de horarios con alto y bajo nivel de RA.

**Tabla C-1: Registro del calendario de grabaciones del espectro de frecuencia del ruido ambiental en una oficina y centro de llamadas**

LUGAR	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES
OFICINA	NOV 26, 2007 10:26~11:37 12:49~16:45	NOV 27, 2007 07:10~12:52 14:03~17:08	NOV 28, 2007 07:37~09:21 09:24~12:10 14:23~17:00	NOV 29, 2007 07:27~13:08	NOV 30, 2007 07:43~13:25 13:58~17:01
CENTRO DE LLAMADAS	DIC 3, 2007 10:26~15:29 15:52~16:37	DIC 4, 2007 07:10~12:52	DIC 5, 2007 07:23~07:24 15:54~15:55	DIC 6, 2007 07:52~13:34	DIC 7, 2007 07:39~15:12

Los datos obtenidos son graficados usando MATLAB y el propósito fundamental es:

*Identificar los máximos niveles de sonido que son reproducidos en horarios específicos y en que frecuencias estos suceden.*

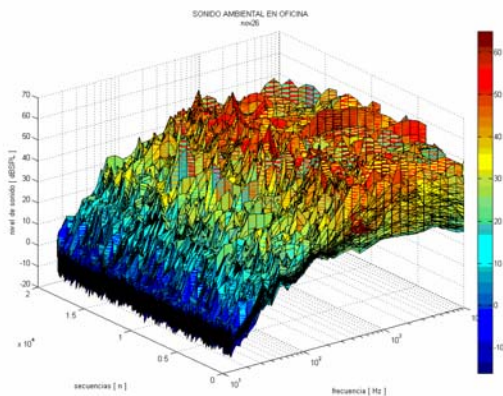
Sabemos que estas variables NO son determinísticas, por el contrario son aleatorias y dependen de muchos eventos que no son controlados. Sin embargo, tomando una muestra considerable y sistemática (como la efectuada, de 10 días), se piensa que sus datos nos proporcionan información representativa para responder la pregunta (2) derivada en la sección 1.1: *¿Cuál es la naturaleza del ruido ambiental en una oficina?*

Los datos obtenidos son graficados en 3D en la Figura C-1 para su apreciación visual: frecuencia, muestras/tiempo, intensidad de sonido; y sus datos están disponibles ( Apéndice I) para análisis estadísticos más precisos pero que salen del alcance de este trabajo.

**OFICINA**

DIA 1

M [ 33 x 18801 ]

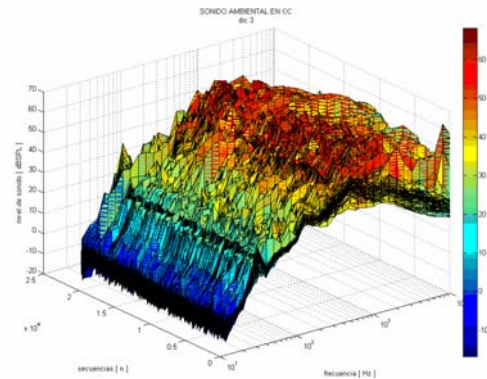


DIA 2

**CENTRO DE LLAMADAS**

DIA 6

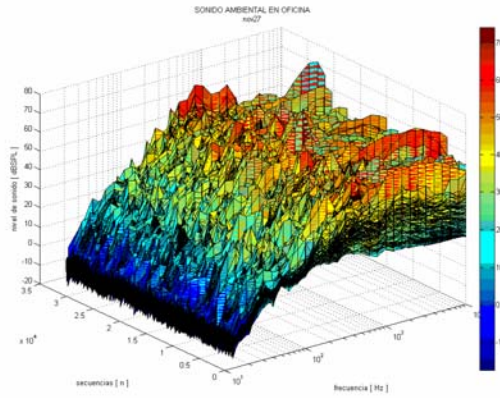
M [ 33 x 20751 ]



DIA 7

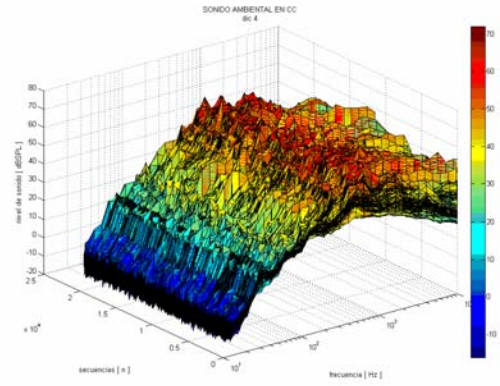
### OFICINA

M [ 33 x 31614 ]



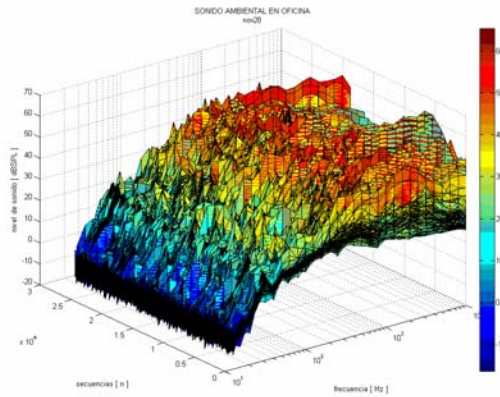
### CENTRO DE LLAMADAS

M [ 33 x 20522 ]



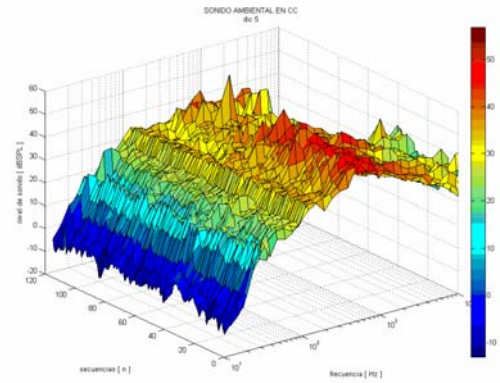
DIA 3

M [ 33 x 25652 ]



DIA 8

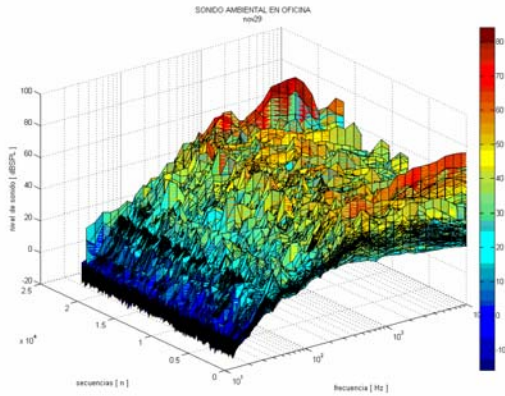
M [ 33 x 120 ]



**OFICINA**

**DIA 4**

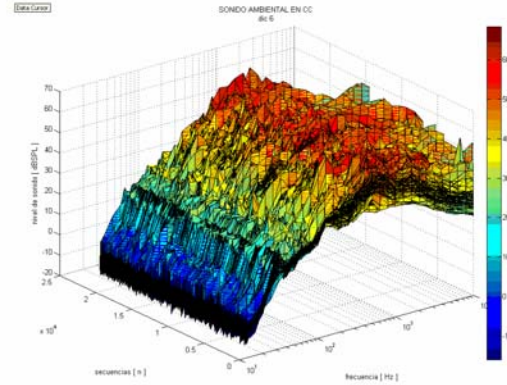
M [ 33 x 20462 ]



**CENTRO DE LLAMADAS**

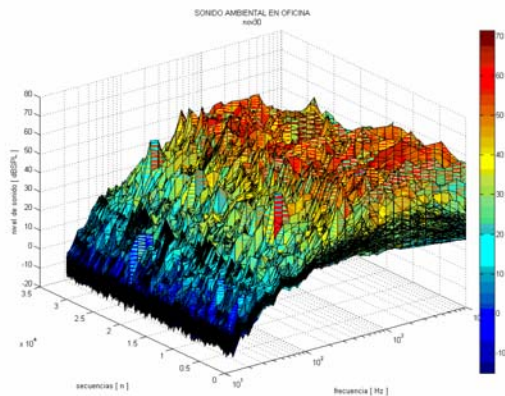
**DIA 9**

M [ 33 x 20522 ]



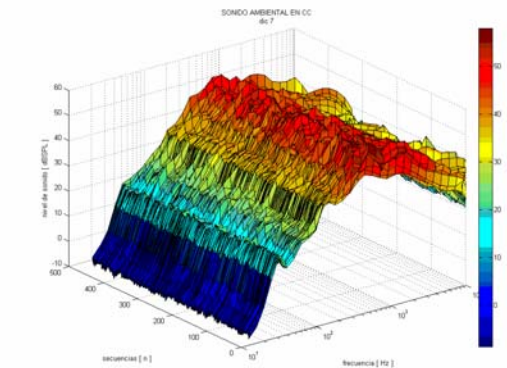
**DIA 5**

M [ 33 x 31543 ]



**DIA 10 ( tiempo de muestreo de 1 min)**

M [ 33 x 454 ]



**Figura C-1. Espectro de frecuencia de RA medido: DIA 1 a DIA 5, en Oficina, DIA 6 a DIA 10, en un CC**

En donde “M” representa el tamaño de la matriz de datos [frecuencia, secuencia temporal]. Cada muestra de la secuencia temporal incluye un barrido de las frecuencias 20 Hz ~ 20KHz en 1/8 de frecuencia (de acuerdo con capacidades del equipo).

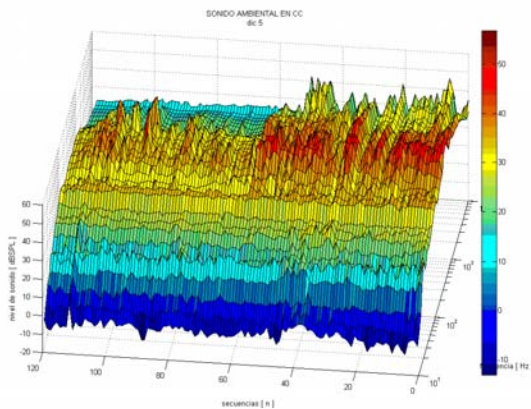
Al color rojo se asocian los niveles sonoros con mayor intensidad, en el caso opuesto, los colores azules indican los de menor intensidad. El color rojo predomina en la banda de frecuencia media, es decir, se escucha un mayor nivel de sonido en estas frecuencias.

La Figura C-2, muestra en otra perspectiva los datos de los DIA 8 y 10 pues fueron graficados un menor numero de muestras y por ello su mejor apreciación visual. La grafica DIA 8 (a), muestra dos patrones y ellos debido a que fueron 2 tomas de 60 muestras, una durante la mañana (7:23am~ 7:24am) y la otra durante la tarde (3:54pm ~3:55pm), en tanto que para el DIA 10 (a) aunque se registraron datos sobre un periodo amplio ( 7:39am ~ 3:12pm ), la resolución fue de 1 min y por ello un menor numero de muestras.

Vista Lateral

DIA 8

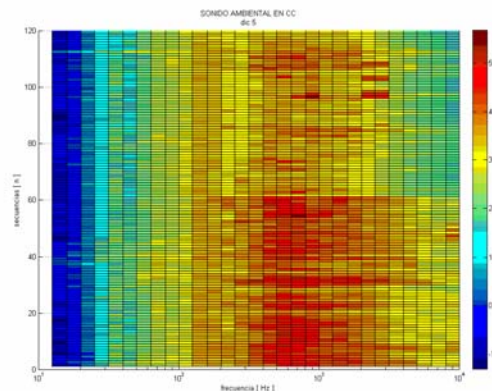
(a)



Vista Superior

DIA 8

(b)

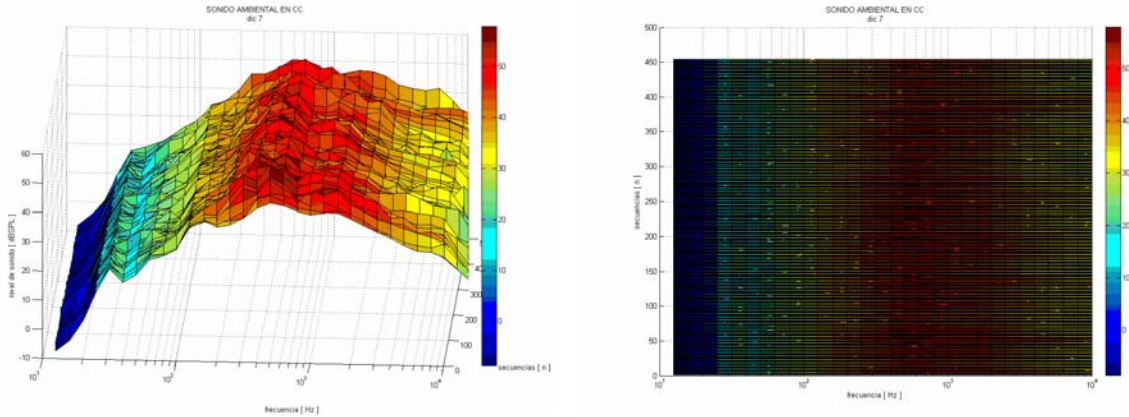


DIA 10

(a)

DIA 10

(b)



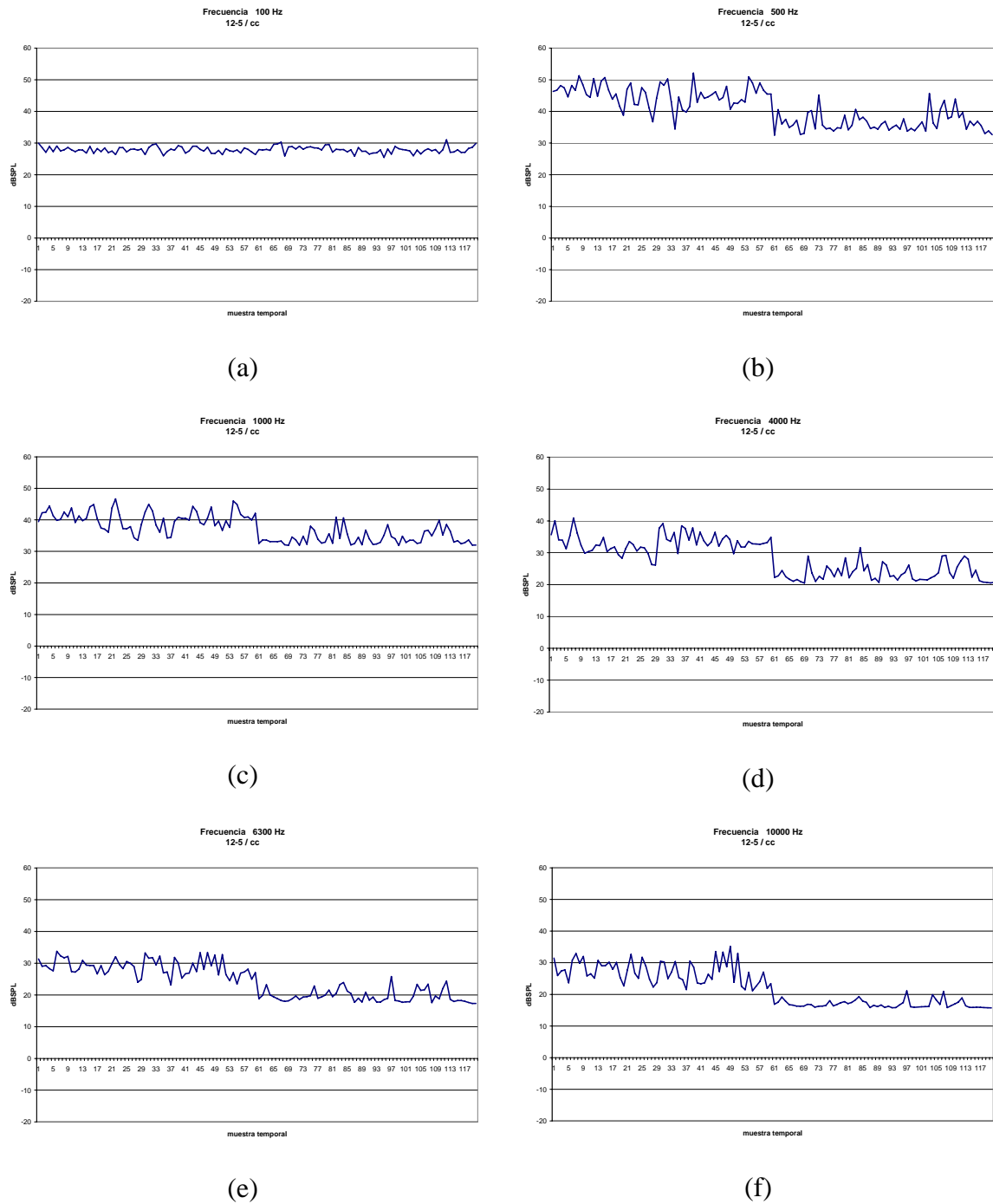
**Figura C-2. Detalle de colores para delimitar la banda de mayor intensidad sonora**

Para ambos casos DIA 8 y 10, se obtuvo el gráfico con perspectiva superior (b), que nos ayuda a identificar visualmente el área de frecuencia en que la mayor intensidad sonora se presenta: DIA 8 (b) de 400 Hz a 2600Hz y DIA 10 (b) de 300 Hz a 3000 Hz.

En la Figura C-3 se muestran datos del DIA 8 únicamente, y se grafica la intensidad de sonido para 8 secuencias de datos cuya frecuencia de análisis se especifica en cada gráfica. Con esta gráfica se observan las variaciones instantáneas de nivel de RA para una frecuencia específica ya que en la gráfico tridimensional éste detalle no es claramente apreciado; también se observan las variaciones de la intensidad del nivel de RA entre frecuencias adyacentes.

En la secuencia de 100 Hz (a), el nivel de RA es estable a lo largo del periodo de observación y con mínimas variaciones en las secuencias restantes. Se observa también que el nivel de RA es menor en los extremos del rango auditivo, es decir para una frecuencia de 100Hz (a) el nivel de RA es de 30 dBSPL y similar amplitud en 10000 Hz (f) cuyo nivel es de 20 dBSPL, pero este nivel de RA es alto, 40 a 50 dBSPL, para frecuencias de 500 Hz (b) y 1000Hz (c). En el caso de 4000Hz (d) y 6300Hz (e) se observa que el nivel de RA va decreciendo como se ha visto en las graficas tridimensionales anteriores ( Figura C-2).

### DIA 8, Nivel de sonido en frecuencias específicas con respecto al tiempo



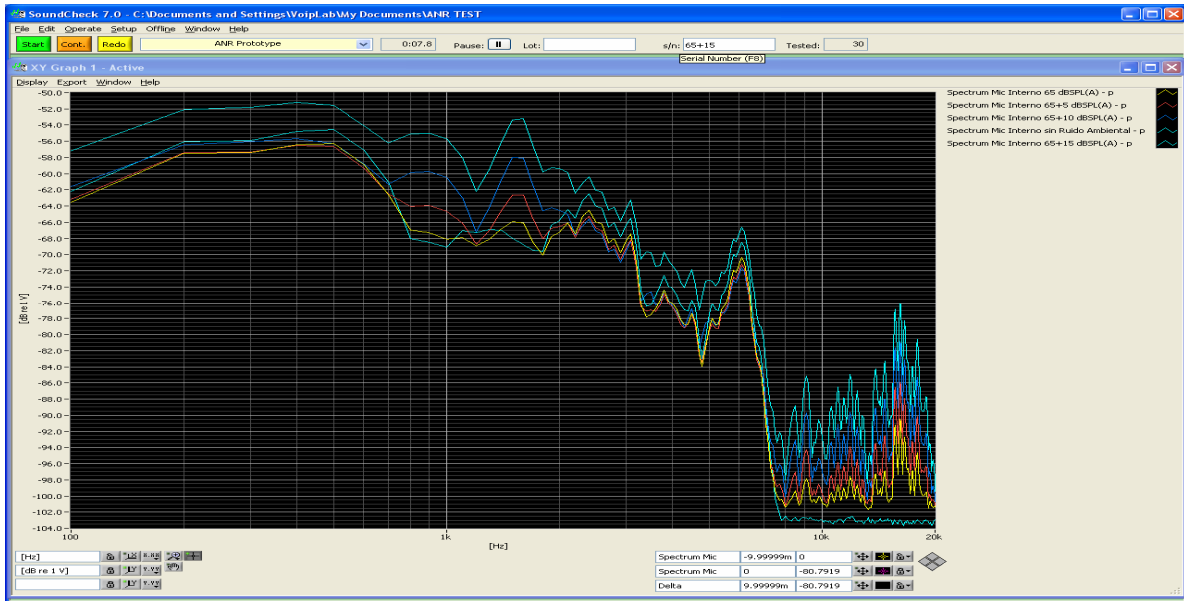
**Figura C-3. Gráfico de intensidad sonora vs muestra temporal del DIA 8: (a) f=100Hz, (b) f=500 Hz, (c) f= 1000 Hz, (d) f=4000 Hz, (e)f=6300Hz y (f) f=10000 Hz**

**APENDICE D: Valoración Subjetiva de RA Aceptable en ERP**

Con el objetivo de conocer subjetivamente un RA controlado y como éste influye en la inteligibilidad de una comunicación; se hizo la siguiente evaluación:

En un cuarto anecoico y con ayuda de un HATS (Head and Torso Simulator), se le instaló el prototipo SRRA que se desarrolló y utilizó su micrófono supervisor interno para llevar a cabo las pruebas de medición. En el cuarto anecoico se generó un ruido rosa calibrado a 65dB en el punto ERP (como referencia) con ayuda de un micrófono B&K.

La prueba consistió en reproducir una grabación de un texto sin ruido (\* archivo : RCVR speech stimulus.wav) que el HATS estaba escuchando a través del prototipo SRRA, simultáneamente se estaba registrando una grabación y medición espectral (Figura D-1) de este archivo por como el HATS lo percibía a través del micrófono interno del SRRA ( archivo : sin ruido ambiental.wav), evidentemente, hay una pequeña variación respecto al archivo original debido a todo el sistema involucrado. En una segunda prueba, se generó el ruido a 65 dBSPL con referencia a ERP mientras se reproducía el texto original, igualmente se hizo una grabación y se midió la respuesta en frecuencia del sistema. Tres pruebas más se repitieron de acuerdo con este procedimiento : ruido generado a 65 + 5 dBSPL, 65 + 10 dBSPL y 65 + 15 dBSPL.



**Figura D-1. Mediciones ERP de RA en camara anecoica**

\* Los archivos de esta prueba son listados en el Apéndice I.

El micrófono interno del SRRRA fue preferido con respecto al micrófono externo debido a su ubicación cercana al punto de calibración ERP.

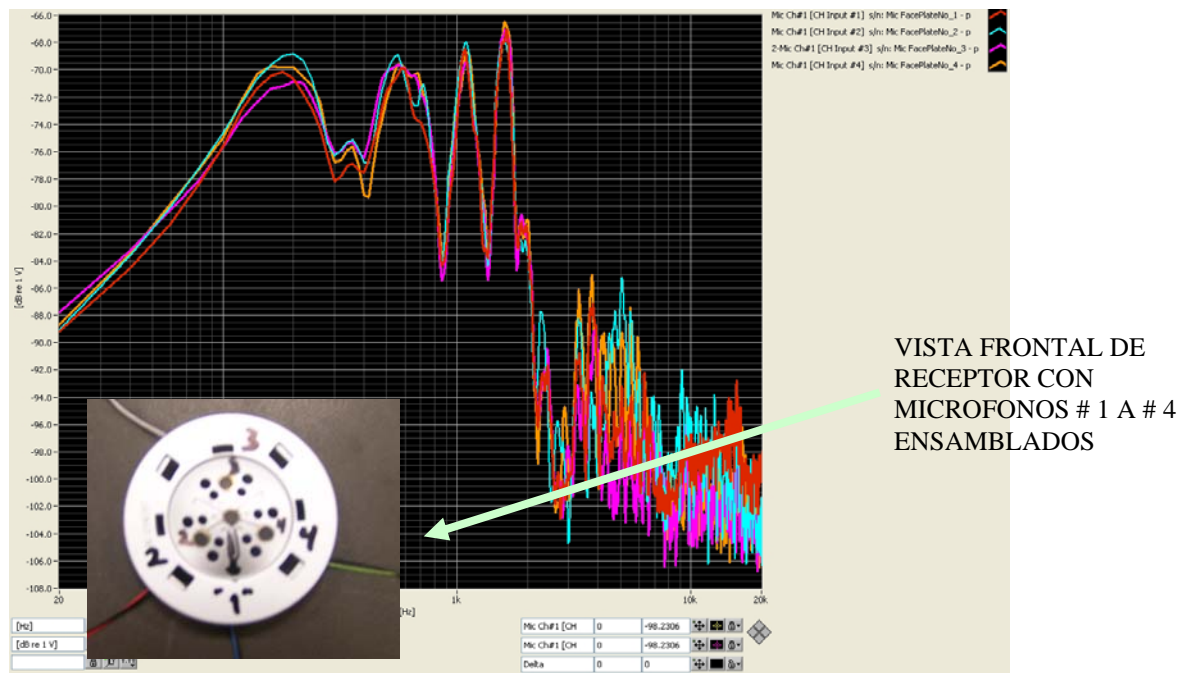
Al reproducir la grabación (en cualquier sistema de reproducción) hecha para los 3 niveles de ruido, se escucha que entre 65+10dB y 65+15dB, el texto fue enmascarado por el RA generado, haciendo la interpretación del texto menos inteligible.

## APENDICE E: Ubicación del Micrófono Supervisor de RA en Prototipo

Cuando se desea registrar el sonido externo en un producto disponible mediante el uso de uno o un arreglo de micrófonos y dado que existen muchas variables en la percepción auditiva [8], [15]; es necesario entonces conocer cual es la variación de percepción entre una ubicación y otra, entre un producto y otro, y también entre un sistema auditivo a otro.

Este estudio sólo se enfoca en conocer las variaciones por colocar el micrófono supervisor en la parte interna del receptor, frente al oído humano cuando el SRRA es usado, dado que se ha elegido un producto específico como base del prototipo previamente. Las respuestas en frecuencia que se obtienen, son en base al recinto acústico que se forma entre el receptor del SRRA y la oreja de HATS.

En la Figura E-1, se representan la respuestas en frecuencia asociada para cada micrófono de acuerdo con su ubicación. De estos datos, observamos solo 2 dB @ 200Hz entre los micrófonos (2) a (1), y de 3 dB @ 700 Hz entre los micrófonos (4) a (1).



**Figura E-1. Respuesta en frecuencia para cada posición de 4 micrófonos distribuidos en el receptor**

## APENDICE F: Interfaz del prototipo y la tarjeta DSK

¿ Que nivel de potencia debe proporcionar el prototipo a la tarjeta DSK ?

El micrófono empleado en este prototipo tiene un nivel de sensibilidad de  $-37\text{dBV/Pa}$ . Por otra parte, el ADC acepta como rango dinámico óptimo  $0\text{dBV}$  de acuerdo con su especificación. En pruebas experimentales realizadas a la tarjeta DSK mediante un generador de funciones externo conectado a LINE IN y un analizador de audio externo conectado a LINE OUT, la tarjeta configurada como “BYPASS” y  $0\text{dB}$  de ganancia en etapas de entrada y salida; se obtuvieron los datos de la siguiente tabla F-1

**Tabla F-1. Lectura de puertos E/S de la tarjeta DSK**

LINE INPUT LEFT	LINE OUT LEFT	
Entrada @ 1KHz [ dBV ]	Salida [ dBV ]	Distorsión [ % ]
0	-6.8	0.85
-10	16.8	2.08
-20	26.8	6.27
-30	-36.7	19.4
-40	-46.09	60.5

Haciendo uso de los filtros del analizador  $100\text{Hz} < f < 22\text{KHz}$ , la distorsión para el caso de  $-40\text{dBV}$  de entrada se reduce a  $3.43\%$ , en tanto que para  $-20\text{dBV}$  la distorsión es de  $0.46\%$ . Se sugiere así tener una entrada de alrededor de  $-20\text{dBV}$  en LINE IN y filtrada en este ancho de banda. Para ello se debe calcular el nivel de voltaje en las terminales del micrófono. El calculo a realizar es convertir la señal del micrófono del dominio SPL a presión absoluta  $\text{dBPa}$  para luego convertir al dominio  $\text{dBV}$ . Ver siguiente ejemplo:

*Si en una oficina hay un RA de 60 dBSPL y contamos con un micrófono cuya sensibilidad especificada por el proveedor es de - 44 dBV/Pa. ¿ cuál será la magnitud de la señal eléctrica en las terminales del micrófono ?*

*Solución :*

$$y [dBV] = x [dBSPL] - 94 \text{ dBSPL} + \text{Sensibilidad del micrófono [dBV/Pa]}$$

$$y [dBV] = 60 \text{ dBSPL} - 94 \text{ dBSPL} - 44 \text{ dBV/Pa} = \underline{-78 \text{ dBV}} \sim \underline{126 \text{ uVrms}}$$

En las terminales del micrófono se leerá -78dBV ( 126 uVrms )

## APENDICE G: Tarjeta de evaluación: DSK6713, TI

La tarjeta de desarrollo DSK6713 [18] utilizada en este trabajo, esta construida en base a un procesador de señales de punto flotante TMS320C6713 [17] y cuyas características principales son :

- 32/64 bits de datos
- Ocho instrucciones de 32 bits / ciclo
- velocidad de reloj de 225 MHZ
- capacidad de procesamiento de 1800 MIPs ( millones de instrucciones por segundo)

y el fabricante la recomienda para aplicaciones de procesamiento de audio, medicas y de diagnóstico entre otras.

La tarjeta de desarrollo tiene la arquitectura que se describe en la Figura G-1, y de ésta se emplearon sus capacidades de conectividad USB para la programación del sistema, sus puertos de audio de 3.5mm para entradas y salida para conectar la diadema de comunicaciones prototipo SRRA, su codec AIC23 de 24-bits estéreo como interfaz al procesador digital de señales y la fuente de alimentación para polarizar eléctricamente los micrófonos del prototipo SRRA.

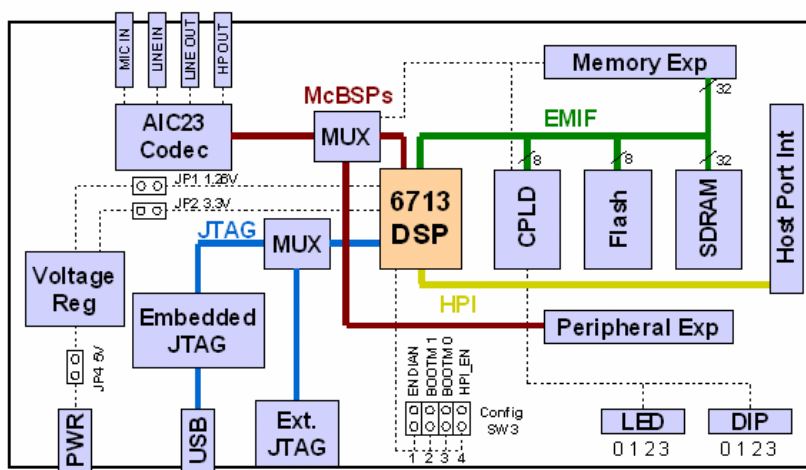


Figura G-1. Diagrama a bloques de DSK6713, TI [17]

Más información técnica sobre esta tarjeta puede ser consultada en el sitio de Internet del fabricante:

<http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/tmdsdsk6713.html>

## APENDICE H: Hardware del sistema SRRA

La Figura H-1 corresponde al diagrama eléctrico que se desarrolló para conectar la diadema de comunicaciones prototipo a la tarjeta de desarrollo DSK6713 y en general la conectividad del sistema SRRA.

### Entradas de audio:

El circuito constituye en esencia una interfaz de audio y de polarización eléctrica de los micrófonos supervisores de RA ( MIC interno y MIC externo ) hacia los los puestos de entrada LINE IN left y LINE IN right de la tarjeta de desarrollo. Las resistencias R1 y R3 adecuan la polarización eléctrica de los micrófonos empleados, en tanto que R2, C1 y R4, C4 constituyen un filtro pasa bajas de un polo para cada canal respectivamente. La salida de los filtros son conectadas a una etapa de preamplificación que adecuan a un nivel óptimo las señales enviadas desde los micrófonos y que se introducen luego a la tarjeta de desarrollo a través de los convertidores analógico a digital (ADC) del codec de dicha tarjeta.

Cabe señalar que por limitantes de puertos en la tarjeta de desarrollo, solo opera un lado de la diadema prototipo.

### Salidas de audio :

El puerto de salida LINE OUT left de la tarjeta de desarrollo es conectado a un circuito sumador Amp-3, pues en este circuito en que convergen por un lado la señal  $\hat{S}ra^{-1}$  que es la señal procesada por el algoritmo LMS y denominada ‘anti-ruido’ y por otro lado se suma la señal de recepción de una comunicación ordinaria (diadema –recepción). La salida del circuito sumador Amp-3 envía una o ambas señales hacia la bocina de la diadema prototipo para su reproducción sonora.

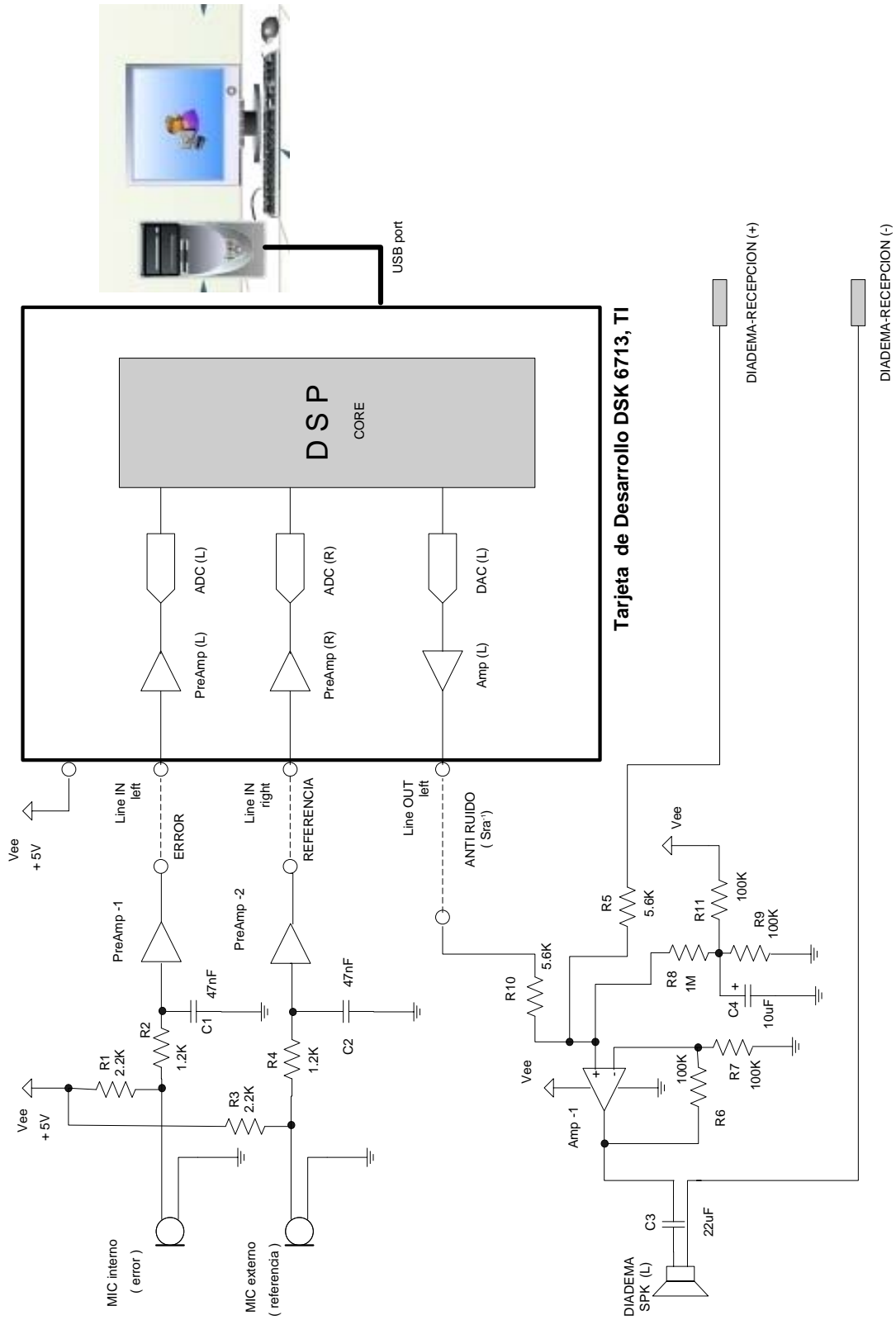


Figura H-1. Diagrama esquemático del sistema SRRA

**BIBLIOGRAFIAS**

- [1] Haykin, S., **Adaptive Filter Theory**, 3<sup>rd</sup> ed., Prentice Hall
- [2] Ifeachor, Emmanuel C., Jervis, Barrie W., **Digital Signal Processing –a practical approach**, Addison-Wesley
- [3] Ortega Corral, César, **“Tesis: Aplicaciones del Filtrado Digital Adaptable”**, Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, IPN, Baja California, México, Febrero (2001)
- [4] R.W. Stewart, **DSPedia**, University of Strathclyde, 1997.
- [5] Smith, Steven W., **The Scientist and Engineering’s Guide to Digital Signal Processing**, 2<sup>nd</sup> ed., California Technical Publishing
- [6] López, J. **“Procesamiento Digital de Señales”**, CITEDI-IPN, Mexico, 171, (2000)
- [7] Esqueda, J **“Implementación de Algoritmos de Procesamiento Digital de Señales”**, Libro Sometido a la “Selección Anual del Libro Universitario de la UABC 2006”, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, 40-70 (2006)
- [8] Beranek, Leo L., **Acosutics**, 1954, McGraw Hill
- [9] Borwick, John, **Loudspeaker and headphone handbook**, 3<sup>rd</sup> Ed., Focal Press
- [10] Occupational Safety and Health Administration, **OSHA Regulation 29CFR 1910.95**, Occupational Noise Exposure
- [11] ANSI/TIA/EIA-810A. **Transmission Requirements for Narrow Band Voice over IP and Voice over PCM Digital Wireline Telephones**. Telecommunications Industry Association, 2000.
- [12] B&K, **Hand Held Analyzer Type 2250 Manual**, Dec. 2005.
- [13] Per Rubak, Lars G. Johansen, **ADAPTIVE NOISE CANCELING IN HEADSETS**, Nordical Acoustic Meeting, 12-14 June 1996 Helsinki.
- [14] Vikash Sethia, **NOISE CANCELLATION IN HEADPHONES**, M. tech. credit seminar, Electronic System Group, EE Dept, IIT Bombay, Nov '02.
- [15] Woon S. Gan, Sohini Mitra and Sen M. Kuo, **Adaptive Feedback Active Noise Control Headset: Implementation, Evaluation and its Extensions**, IEEE Transactions on Consumer Electronics, VOL 51, No. 3, AUG 2005.
- [16] Malcolm Omar Hawksfor, **Minimum Phase signal processing for loudspeaker system**, AES 100<sup>th</sup> convention, May 11-14, Copenhagen.
- [17] Data sheet, **TMS320C6713 Floating Point Digital Signal Processor**, Texas Instruments, NOV 2002.
- [18] Technical Reference, **TMS320C6713 DSK**, Texas Instruments

- [19] Rulph Chassaing, **DSP application using C and the TMS320C6x DSK**, John Wiley and Sons Inc.
- [20] Sen M. Kuo, Issa Panahi, Kai M. Chung, **Design of Active Noise Control with the TMS320 Family**, Texas Instruments, Jun 1996.
- [21] Angela Kuo Wang and Benedict Tse, **Adaptive Active Noise Control for Headphones Using the TMS320C30 DSP**, Application Report, University of California at Berkeley, Jan 1997.