MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE SEÑAL EN AMBIENTES RUIDOSOS PARA PERSONAS CON DISCAPACIDADES AUDITIVAS

Andrade Sampedro Alejandro Danilo
alejandro—andrade@hotmail.com
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO
Av. El Progreso S/N, Sangolquí, Ecuador

Resumen— En el presente proyecto se realizó el estudio, diseño y factibilidad del mejoramiento de la calidad de señal a través del mejoramiento de la señal afectada, la cual fue filtrada en presencia de ruido que sobrepasa los niveles normales de ruido ambiente. Para el desarrollo del proyecto se utilizó herramientas para el diseño de los distintos filtrajes, como Matlab® y Simulink®.

Se analizó las ventajas y desventajas del uso de filtros FIR e IIR y se determinó el tipo de filtro y las características que se debían cumplir para lograr el mejoramiento de señal deseado. En la herramienta Matlab® se probó cuatro aproximaciones de filtros: Chevyshev de tipo 1 y 2, Elíptico y Butterworth y se analizó los resultados propuestos por cada uno para la selección del más adecuado.

Índice de Términos— Matlab, Simulink, Filtraje, Supresor, Butterwotrh

I. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se encuentra enfocado hacia dos conceptos de similares características pero de aplicaciones distintas; ambos enfocados al mejoramiento de la calidad de señal en sistemas ruidosos.

El primero enfocado a la conceptualización de un sistema previo a la etapa de amplificación de un audífono para personas con discapacidades auditivas, el cual posee la característica de eliminar los ruidos excesivos en ambientes laborales ruidosos y que ocasionan un tipo de sordera conocida como Pérdida Auditiva Inducida por el Ruido. El segundo se basa en el diseño para la fabricación de un dispositivo supresor de ruidos excesivos como medida de mejoramiento de las condiciones laborales en las cuales se exceden los niveles permitidos de exposición al ruido. Adicionalmente se realiza un análisis profundo de los principales filtros para mejoramiento de señales de audio y la aplicación que tiene cada uno, así como sus alcances y deficiencias al realizar una comparación entre uno y otro.

De igual manera se presenta algunas alternativas para el diseño de filtros de audio, se indaga en el uso de Matlab® y Simulink® para la fabricación de filtros de tipo IIR y filtros FIR, así como las características que se deben incluir dentro del diseño del filtro seleccionado para cumplir con los requerimientos que se le solicita a la señal de audio.

Con respecto a la fabricación de los dispositivos mencionados, se realiza un análisis de la posibilidad y los requerimientos para la futura fabricación de un dispositivo completo para personas con discapacidad auditiva.

II. DISCAPACIDAD AUDITIVA EN AMBIENTES RUIDOSOS

A. *Problemática Actual*

El presente proyecto se encuentra enfocado a brindar a la comunidad una mejora en la calidad de vida, brindado la visión de disminuir los problemas suscitados en ambientes laborales con presencia de ruido y a la vez evitando daños futuros en la salud de los trabajadores expuestos a estas condiciones.

"La exposición excesiva a los ruidos fuertes puede dar lugar a una afección denominada PAIR Pérdida auditiva inducida por el ruido, la cual en su mayor porcentaje es causada por el ruido de los reproductores de música, los videojuegos, los televisores, el tráfico y algunos tipos de maquinarias que crean un entorno excesivamente ruidoso para cualquier persona. Tal es la exposición al ruido que muchos expertos creen que la audición se está perdiendo a edades más tempranas que en épocas pasadas." [1]

B. *Incidencia de las Discapacidades Auditivas*

"Según el último estudio auspiciado por la CONADIS en 1996. Del total de la población del Ecuador, el 13,2 % son personas con algún tipo de discapacidad (1`600.000 personas), y podemos señalar que en el país existen aproximadamente:

592.000 personas con discapacidad por deficiencias físicas.

432.000 personas con discapacidad por deficiencias mentales y psicológicas.

363.000 personas con discapacidad por deficiencias visuales; y,

213.000 personas con discapacidad por deficiencias auditivas y del lenguaje." [2]

C. *Porcentaje de discapacidad, deficiencia y minusvalía en el Ecuador*

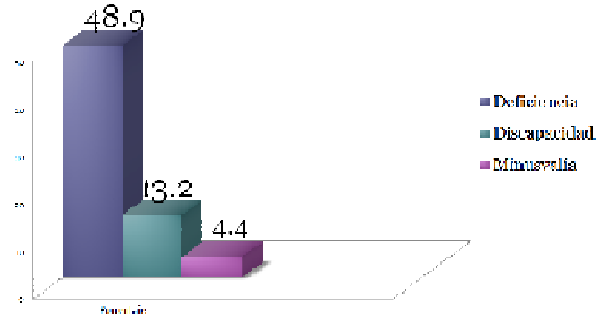

Figura. 2.1. Porcentaje de discapacidad, deficiencia en el Ecuador

D. *Porcentaje de personas con discapacidad por sexo, región y sector.*

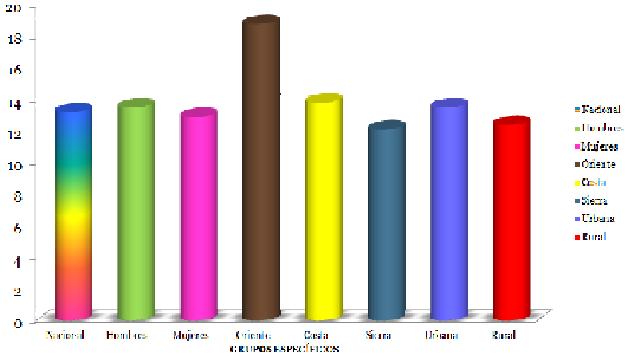

Figura. 2.2. Porcentaje de personas con discapacidad por sexo, región y sector

E. *Distribución de las personas con discapacidad que trabajan y que generan ingresos.*

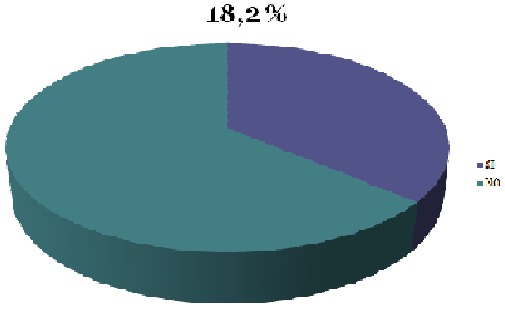

Figura. 2.3. Distribución de las personas con discapacidad que trabajan (18.2%) y que generan ingresos.

F. Porcentaje de personas con discapacidad que utilizan ayudas técnicas.

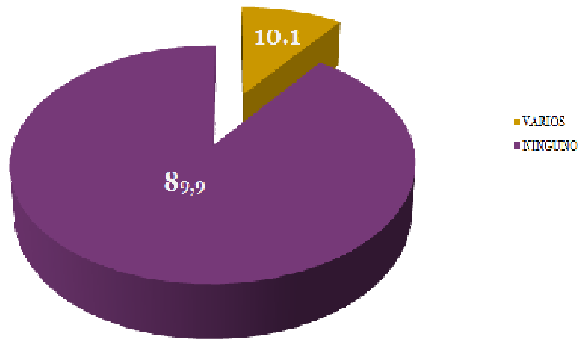

Figura. 2.4. Porcentaje de personas con discapacidad que usan ayudas técnicas.

III. PAIR

La exposición excesiva a los ruidos fuertes puede dar lugar a una afección denominada PAIR.

"El ruido no afecta todas las frecuencias por igual, lesionando especialmente las frecuencias de 3000, 4000 y 6000 Hz; siendo posible medir la pérdida del umbral de la audición en personas expuestas a ruidos continuos por encima de 80 dB." [3]

Típicamente las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz no son afectadas.

A. Trauma acústico

Causado por un ruido único, de corta duración pero de muy alta intensidad.

B. Hipoacusia neurosensorial

Inducida por ruido, por exposición crónica a ruidos de no tan alta intensidad.

IV. AMBIENTES RUIDOSOS Y AUDICION EN RUIDO

A. El Ruido y la Comunicación Verbal

El ruido puede interferir la comunicación verbal, bien directa o telefónica, hasta hacerla imposible.

- Una señal inferior a 3 dB, mantiene la *inteligibilidad* al 100%.
- Una señal de 10 dB, reduce la *inteligibilidad* al 70%.

B. El Ruido y la Comunicación Verbal

Cada frecuencia tiene un nivel de presión necesario para que el oído detecte la misma sonoridad en todas.

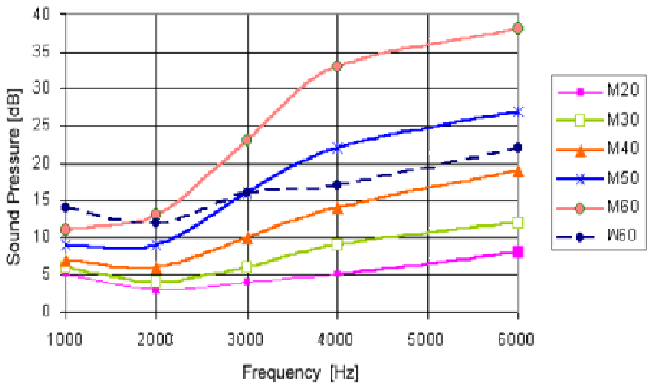

Figura. 4.1. Umbrales de Audición para masculinos (M) y femeninos (W) entre las edades de 20 a 60.

C. Detección del Ruido por el Oído Humano

"La variación de Presión que puede ser detectada por el oído humano es el umbral de percepción para un individuo, el cual se produce a partir de una presión sonora de: 2x10-5 Nw/m2."

Nivel de Presión (dB) = 10log (Presión acústica existente/Presión acústica de referencia)

D. Intensidad del Ruido

RANGO (dB)	EFECTO
• 0 - 20	Umbral de audición.
• 20 – 50	Comunicación fácil.
• 50 – 80	Comunicación posible.
• 80 – 110	Límite riesgo (jornada 8 horas).
• 110 – 140	Comunicación imposible.
• más de 140	Dolor

Tabla. 4.1. Intensidad de Ruido en Comunicación

E. Nivel de ruido y calidad de comunicación telefónica

	RANGO (dB)	EFECTO
mayor de	95 dB	Insatisfactoria.
de	70 - 85	Difícil.
de	55 – 70	Ligeramente difícil.
menor de	55	Satisfactoria.

Tabla. 4.2. Exposición ocupacional permisible para ruidos intermitentes

F. Exposición ocupacional permisible para ruidos continuos

Nivel de Ruido (dB)	Exposición Permitida (hrs)
85	8
88	4
91	2
94	1
97	0.5
100	0.25
103	0.125

Tabla. 4.3. Exposición ocupacional permisible para ruidos continuos

G. Exposición ocupacional permisible para ruidos intermitentes

Nivel de Ruido "Pico" (dB)	Números de Impactos por 8 Horas
140	100
138	158
136	251
134	398
132	631
130	1000
128	1585
126	2512
124	3981
122	6310
120	10000
118	15840
116	25119
114	39811

Tabla. 4.4. Exposición ocupacional permisible para ruidos intermitente

H. Síntomas sicosomáticos atribuidos al ruido

- *Astenia (cansancio o fatiga).*
- *Irritabilidad o tensión.*
- *Cefaleas (dolores de cabeza).*
- *Dificultades para dormir y trastornos del*

sueño.

- *Subirrigación sanguínea (palidez).*
- *Lumbalgias (dolor de espalda).*
- *Trastornos digestivos*
- *Zumbidos.*
- *Impotencia.*
- *Malestar general.*

I. Niveles Ambientales

"Una exposición larga a sonidos con una intensidad superior a 90 decibelios puede producir pérdida de audición permanente.

Igualmente una exposición continua a sonidos de más de 80 decibelios puede producir los mismos resultados." [5]

J. Indicadores de Ruido Ambiental [6]

- **LEQ o Nivel continúo equivalente**

El nivel de ruido constante. Mide en decibeles el nivel de ruido de un determinado lugar, durante un período de tiempo.

- **LDN o Nivel equivalente Día-Noche:**

Mide el nivel de ruido LEQ que se produce en 24 horas. Al calcular el ruido nocturno, como no debe haber, se penaliza sobre 10 dB los ruidos que se producen entre las 10 de la noche y las 7 de la mañana.

- **SEL o Sound Explousure level**

Se utiliza para medir el número de ocasiones en que se superan los niveles de ruido tolerado en sitios específicos como barrios residenciales, hospitales, escuelas, etc.

V. MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE SEÑAL UTILIZANDO MATLAB®

A. Pruebas de Filtraje

- Chebyshev 1

Son filtros que únicamente tienen polos, presentan un rizado constante en la banda pasante y presentan una caída monótona en la banda de rechazo. Matlab® dispone de funciones semejantes a las anteriores para el desarrollo de aproximaciones Chebyshev.

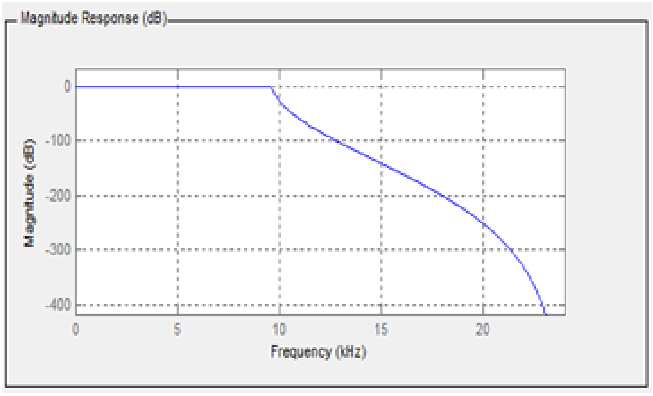

Figura. 5.1. Respuesta en Frecuencia ante un filtro Chebyshev Tipo 1

- Chebyshev 2

Estos filtros a diferencia de los Chebyshev I presentan ceros y polos, su rizado es constante en la banda de rechazo y además presentan una caída monotónica en la banda pasante.

Mediante las funciones de Matlab® cheb2ord y cheby2 obtenemos de forma relativamente sencilla la aproximación buscada. El orden es 7, igual que la anterior aproximación.

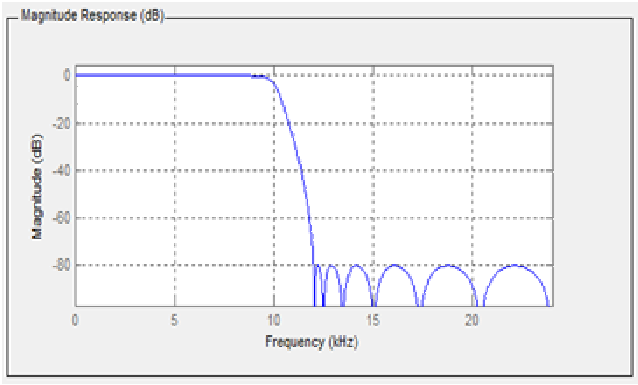

Figura. 5.2. Respuesta en Frecuencia ante un filtro Chebyshev Tipo 2

- Cauer o Elíptico

Están diseñados de manera que consiguen estrechar la zona de transición entre bandas y, además, acotando el rizado en esas bandas. La diferencia con el filtro de *Chevyshev* es que este sólo lo hace en una de las bandas. Estos filtros suelen ser más eficientes debido a que al minimizar la zona de transición, ante unas mismas restricciones consiguen un menor orden.

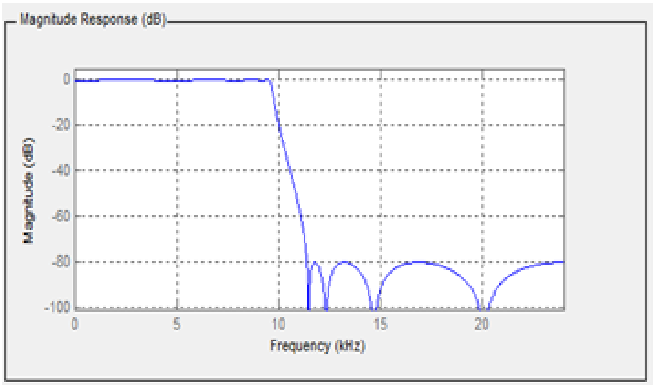

Figura. 5.3. Respuesta en Frecuencia ante un filtro Elíptico

- Butterworth

Diseñado para producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte. En otras palabras, la salida se mantiene constante casi hasta la frecuencia de corte, luego disminuye a razón de 20n dB por década (ó ~6n dB por octava), donde n es el número de polos del filtro.

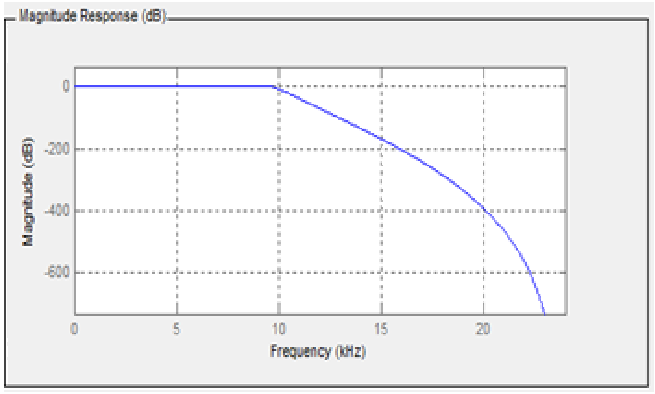

Figura. 5.4. Respuesta en Frecuencia utilizando un filtro Butterword

B. Análisis de Señales

En primera instancia se ingresa la señal de audio de manera continua hacia el dispositivo de captura de sonido, el cual recoge, no sólo la señal de audio que se ha generado, sino también, todos los ruidos provenientes de agentes externos.

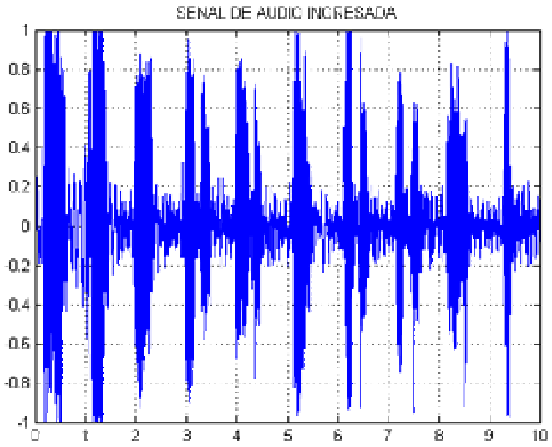

Figura. 5.5. Señal de Audio Ingresado

Se procede a ingresar la señal previamente acondicionada hacia el filtro diseñado, el cual en este punto tendrá la función de discriminar las frecuencias distintas a las ya mencionadas como audibles de las frecuencias que no se encuentren dentro de los rangos definidos con anterioridad. Utilizamos la función buttord, la cual devuelve la frecuencia natural y hace el cálculo para un filtro analógico, en el que Wp y W vienen dados en radianes por segundo.

Seleccionamos Rp como 3 dB, y hacemos el cálculo hace el cálculo para el filtro previamente acondicionado De esta manera obtenemos la señal una vez que ha sido filtrada y en la cual se ha eliminado el ruido, como se muestra a continuación.

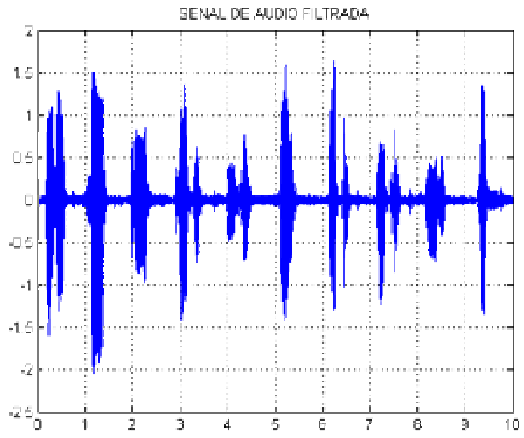

Figura. 5.6. Señal de Audio Filtrada

C. Análisis de Espectros

A continuación se muestra el espectro de la señal de audio previamente acondicionada, la cual ingresa al filtro en una ventana de 8000 Hz, tomando en consideración el teorema de Nyquist como se muestra en la figura.

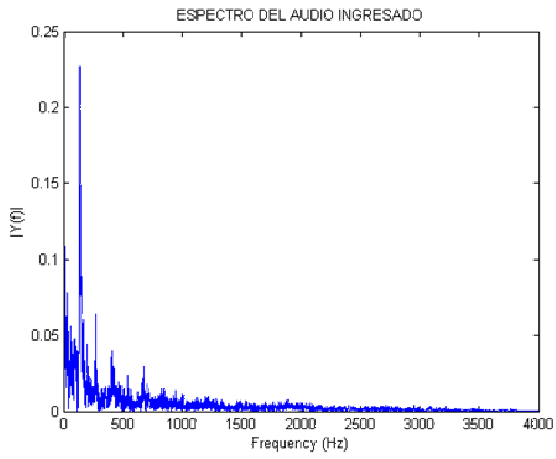

Figura. 5.7. Espectro de Audio Ingresado

En esta etapa, la señal debe ser tratada para incrementar su nivel espectral y por tanto lograr un acondicionamiento que permita posteriormente discriminar con mayor claridad la señal correcta que se desea obtener y el ruido que se desea eliminar.

Adicionalmente en esta etapa se realiza la adición de la señal de audio ingresada con la señal de ruido, como se puede observar en la figura:

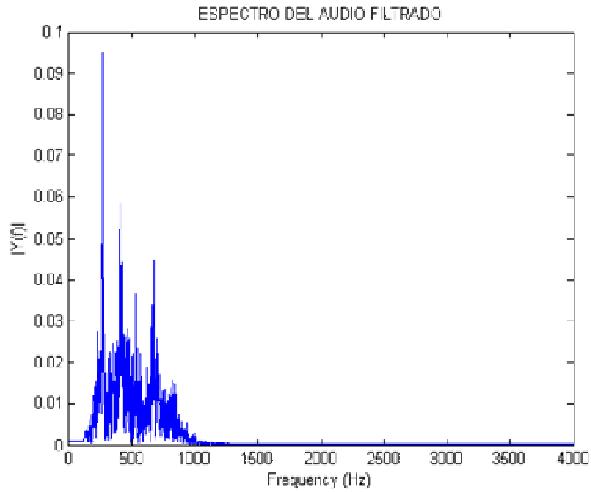

Figura. 5.8. Espectro de Audio Filtrado

D. Respuesta en Fase y Respuesta en Magnitud

El segundo aspecto a ser tomado en cuenta, es la mínima ganancia de paso o Amplitud mínima que se debe utilizar para el diseño del filtro, la cual es de suma importancia a la hora de determinar la amplitud que le queremos dar a nuestro filtro y por tanto el grado de afinamiento que queremos obtener en nuestro diseño.

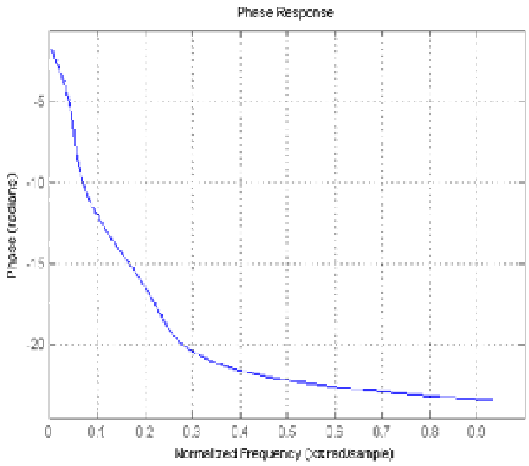

Figura. 5.9. Banda de Paso en el filtro diseñado

En la figura se muestra la respuesta en magnitud al filtro diseñado, tomando en consideración que la opción fvtool genera distintos parámetros del filtro.

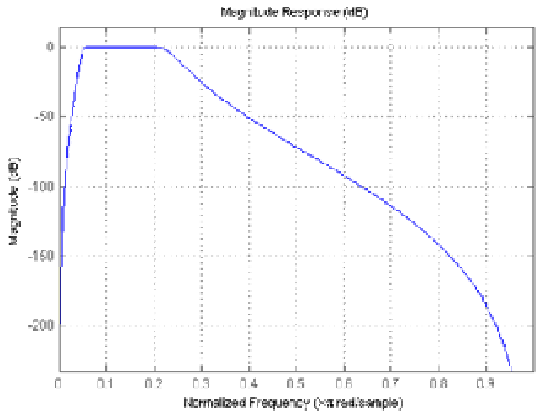

Figura. 5.10. Frecuencia de la Banda de Paso del filtro diseñado

E. Polos y Ceros

De igual manera, se ha obtenido los polos y ceros propios del filtro, los cuales han generado la función de transferencia antes mencionada. Con esto analizamos la estructura que afecta a las características finales del filtro. Se analiza la estabilidad y la causalidad del sistema.

Cuando todos los ceros y polos están en el interior de la circunferencia se dice que es de fase mínima y el sistema es estable y causal. Si todos los ceros están en el exterior es fase máxima. Si algún polo está fuera de la circunferencia unidad el sistema es inestable.

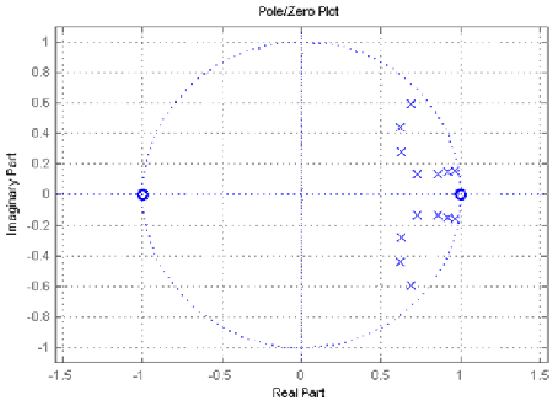

Figura. 5.10. Polos y Ceros del Filtro diseñado

VI. MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE SEÑAL UTILIZANDO SIMULINK®

A. Pruebas de Filtraje

- Conceptualización de Diseño Auditiva. Etapa de Ingreso.

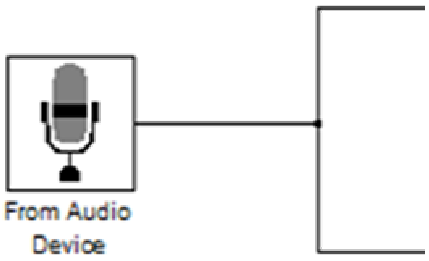

Figura. 6.1. Pruebas Auditivas con el Filtro Diseñado

- Conceptualización de Diseño Auditiva. Mejoramiento de Señal.

Figura. 6.2. Exportación de Filtro Diseñado a Simulink®

B. Resultados Auditivos

- Señal de Audio Original

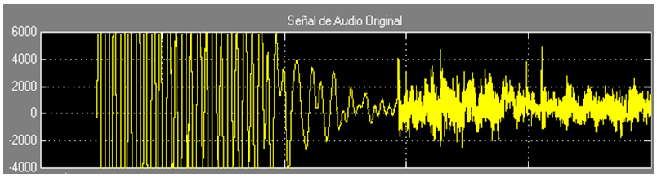

Figura. 6.3. Señal de Prueba Original

- Señal de Audio Filtrada

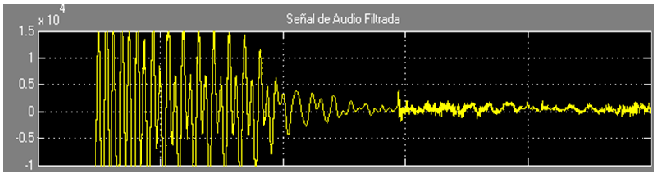

Figura. 6.4. Señal de Prueba Filtrada

C. Pruebas de Filtraje

- Conceptualización de Diseño Gráfico. Simulación Gráfica.

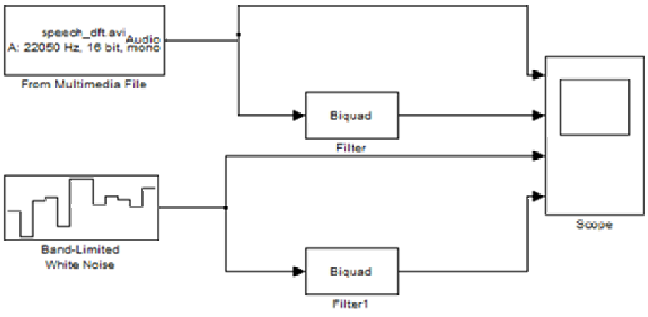

Figura. 6.5. Pruebas Graficas con el Filtro Diseñado

D. Resultados Gráficos

- Señal de Ruido Original

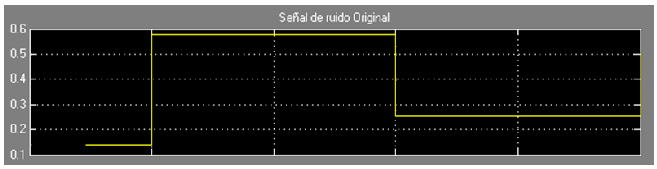

Figura. 6.6. Señal de Ruido Original

- Señal de Ruido Filtrada

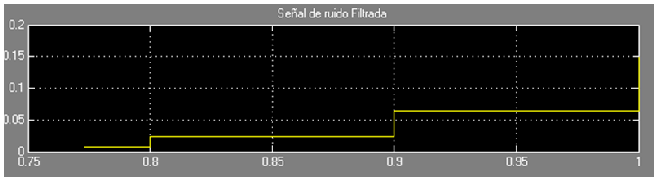

Figura. 6.7. Señal de Ruido Filtrada

VII. PERSPECTIVA DE FABRICACIÓN

A. Componentes de Fabricación

El avance de la tecnología ha permitido fabricar audífonos cada vez más pequeños, de un tamaño que resulta imperceptible para las personas que rodean al paciente que lo usa. Como se observa en la figura, la fabricación se ha servido de la tecnología digital para proporcionar una calidad e inteligibilidad mayores. No todos los pacientes consiguen entender al completo el mensaje que reciben ya que eso depende de la patología de cada uno, pero la mejoría es realmente notoria.

Componentes	Valores
R1	**12 W**
R2	**12 KW**
R3	**22 KW**
C1	**4,7 nF poliéster**

C2	**10 nF poliéster**
C3	**220 uF electrolítico**
C4	**1 uF electrolítico**
C5	**100 uF electrolítico**
C6	**100 nF poliéster**
P1	**Potenciómetro 47 kW**
Micrófono	
LM 386	

Tabla 7.1. Componentes para la fabricación de un Amplificador de audio con LM386

B. *Perspectiva de Fabricación en Miniatura*

A continuación se muestra la etapa de amplificación que en general posee todo audífono para discapacidad auditiva. A esta etapa le hace falta la parte de filtraje de ruido que es lo que daría como resultado un aparato completo y avanzado para tratamiento de discapacidad auditiva. "En la figura se muestra un circuito amplificador de reducidas dimensiones basado en un circuito integrado LM386." [7]

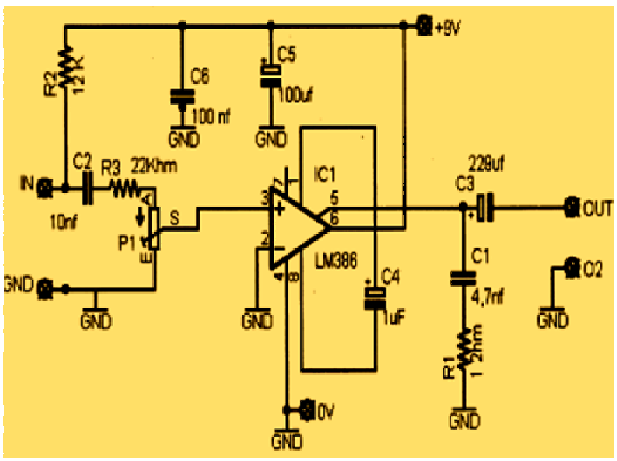

Figura. 7.1. Amplificador de audio basado en un circuito integrado *LM386*

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. *Conclusiones*

Cuando la fase juega un papel fundamental en el tratamiento de la señal (por ejemplo, en el caso de comunicaciones de datos) es mejor el uso de filtros FIR de mayor costo pero de fase lineal.

Cuando la fase no toma gran importancia (por ejemplo, en aplicaciones de audio, donde el oído humano no es capaz de discernir pequeñas variaciones de la fase) el empleo de filtros IIR, de menor costo, es el adecuado.

Se comprobó que la aproximación de Butterworth es la que presenta una fase más próxima a la ideal para un orden dado, pero el orden que necesita para cumplir las especificaciones suele ser notablemente mayor al que requieren las demás.

Se probó que la utilización de Matlab® para el mejoramiento de la calidad de señal en aplicaciones de audio, genera mejores resultados que la aplicación de Simulink®, esto debido a que en Matlab® se puede definir exactamente los valores para el diseño del filtro, mientras que en Simulink® se genera el filtro haciendo un estimado de los parámetros.

Se validó la posibilidad de que este mismo diseño, se puede utilizar como etapa previa de dispositivos completos como audífonos, los cuales pueden tener costos de fabricación menores a los del mercado, que son importados y exceden el presupuesto de las personas de clase media baja.

De esta manera se plantea la posibilidad de fabricar en nuestro país dispositivos para personas con discapacidad auditiva y al alcance de personas con menor poder adquisitivo.

B. Recomendaciones

Se recomienda el uso de Matlab® para aplicaciones de audio cuando se desea mejorar la calidad de la señal sacrificando la eficiencia computacional y por tanto la factibilidad de diseño del sistema.

La respuesta en magnitud del filtro Butterword cumple los requisitos buscados. Si vemos la respuesta en magnitud en dB podemos ver que la atenuación en la banda de rechazo es muy superior a la que se le pedía al filtro por lo cual se recomienda este tipo de filtro para aplicaciones de audio.

El orden obtenido a partir de la función Chevyshev requiere las mismas entradas de datos que la correspondiente aproximación de Butterword.

Este orden es muy inferior al de las otras aproximaciones.

Si pensamos en términos de coste, el área de silicio requerido (en la FPGA, en el ASIC o en el circuito que vaya a implementar el filtrado digital) es mucho menor y, por ende, el coste, razón por la cual se sugiere utilizar la aproximación Butterword.

Se recomienda la utilización del filtro de Butterworth ya que el menor orden de la aproximación Elíptica muestra las bandas de paso y de rechazo de este filtro. Por un lado, mientras que la banda de paso del Butterworth es máximamente plana, la del elíptico manifiesta un rizado, por otro, mientras que el Butterworth ocasionaba un exceso de atenuación en la banda de rechazo no necesario, el elíptico manifiesta también un rizado en la misma.

Se recomienda el uso de la aproximación de Butterworth ya que el orden del filtro es menor que la aproximación Chebyshev, tanto directa como inversa.

REFERENCIAS

1. Fundación Científica y Tecnológica , www.cienciaytrabajo.cl, 24 Octubre 2011
2. Distribución de las personas con discapacidad por tipo de deficiencia, http://www.conadis.gob.ec/estadisticas.htm, 26 de Octubre del 2011
3. Corozo Alvarez Gilber., Efectos de la Salud por exposición a ruido industrial, http://www.espaciologopedico.com/articulos/articulos2.php?Id_articulo=320 , 20 de Diciembre 2011
4. Dr. Gilbert Corzo A., Ruido Industrial y Efectos a la Salud, http://www.medspain.com/ colaboraciones / ruidoindustrial.htm, 25 de Noviembre del 2011
5. Efectos del ruido en la salud, http://www.botanical-nline.com/ruidosalud.htm, 15 de Noviembre 2011.
6. Efectos del ruido en la salud, http://www.botanical-nline.com/ruidosalud.htm, 15 de Noviembre 2011.
7. Audífonos de Ultima Generación, http://www.vivirmejor.com/audifonos-y-dispositivos-tecnologicos-para-garantizar-la-inteligibilidad, 10 de Febrero de 2012

IX. SOBRE EL AUTOR

Alejandro Danilo Andrade Sampedro, nace en la ciudad de Quito en el año de 1987, obtiene el título de Físico Matemático en el Colegio Sebastián de Benalcázar de Quito. Egresado de la Escuela Politécnica del Ejercito en el año 2011 de Ingeniería Electrónica especialidad en Telecomunicaciones.