

Procedimiento de diseño de algoritmos en Matlab para el análisis de filtros digitales no adaptativos aplicados en el procesamiento de señales con perturbaciones

Cesar Gil Arrieta

Corporación Universitaria de la Costa, Barranquilla, Atlántico, Colombia, cgil@cuc.edu.co

RESUMEN

Se plantea un procedimiento de diseño de algoritmos de procesamiento de señales con perturbaciones utilizando el software Matlab como herramienta esencial para el análisis y comparación del desempeño de filtros digitales no adaptativos aplicando las técnicas convencionales de diseño en procesos de filtrado, recurriendo para ello al estudio de una señal de audio mezclada con ruido superior a 4000 Hz para establecer un mecanismo de inmersión en el estudio de transformaciones que se realizan a señales más complejas, como por ejemplo los armónicos, con base en el conocimiento de características puntuales o aproximadas de las mismas. Para ello se diseñan filtros IIR como el Butterworth, chebychev tipo I y II, elíptico y tipo FIR como los filtros PARKS-MCCLELLAN y de Kaiser, todos pasobajo disminuyendo considerablemente el ruido de la señal original acorde con los parámetros de cada uno de ellos, como la frecuencia de paso (menor a 4 KHz), de corte y rechazabanda (superior a 4 KHz). El procesamiento de señales con perturbaciones en sistemas eléctricos de baja tensión exige soluciones teóricas y prácticas que minimicen los efectos de dicho fenómeno, resultado que se refleja en el mejoramiento de las prestaciones y aumento de la eficiencia de la señal filtrada.

Keywords: Perturbaciones, Filtros digitales, frecuencia de corte, frecuencia de muestreo, atenuación de ruido

ABSTRACT

There is a design signal processing algorithms with disturbances using the Matlab software as an essential tool for analysis and comparison of the performance of adaptive digital filters do not apply the conventional filter design process, using it to study an audio signal mixed with noise above 4000 Hz to establish a mechanism for immersion in the study of changes that are made more complex signals such as harmonics, based on knowledge of characteristics point or approximately the same. This design IIR filters such as Butterworth, chebychev type I and II, and elliptic type filters as FIR Parks-McClellan and Kaiser, all pasobajo significantly decreasing the noise of the original signal according to the parameters of each the frequency shift (less than 4 KHz), and cutting and stop band (greater than 4 KHz). Signal processing with disturbances in low voltage electrical systems requires theoretical and practical solutions to minimize the effects of this phenomenon, a result that is reflected in improved performance and increased efficiency of the filtered signal.

1. INTRODUCCION

El filtrado digital de señales con perturbaciones consiste en el procesamiento de dicha señal mediante la combinación de dispositivos electrónicos, simulación, o adquisición de datos para el respectivo análisis de los componentes de frecuencia que la conforman, eliminando aquellos que producen alteraciones en la misma. Los valores de las muestra de entrada se obtiene mediante el muestreo a la frecuencia de nyquist y algunas muestras anteriores son multiplicadas por unos coeficientes definidos a partir de cada diseño del filtro a utilizar. A su vez, los valores de salida pueden ser realimentados con valores pasados y multiplicarlos por otros coeficientes para determinar los pesos o valores óptimos que minimicen la salida deseada con base en un error preestablecido en el diseño. Los resultados de las multiplicaciones son sumados o matemáticamente operados, dando como resultado

una salida para el instante actual. Esto implica que internamente se realiza un proceso en el que tanto la salida como la entrada del filtro serán digitales, por lo que puede ser necesario una conversión analógico-digital en el módulo de entrada para transformar la señal a filtrar y otro proceso de conversión digital-analógico para uso de filtros digitales en señales analógicas.

La integrabilidad en el análisis de señales adquiridas de esta forma, implica un alto nivel de abstracción, análisis, aplicación y confluencia de conceptos de ingeniería que conducen en última instancia a la toma de decisiones para el diseño, selección y/o construcción de los circuitos filtros que permitan la disminución de ruidos, cancelación de frecuencias de armónicos o cualquier otro tipo de perturbación en la señal, surgiendo con esto la pregunta problema: ¿Cuál es el procedimiento de diseño de algoritmos de filtros digitales en Matlab para la reducción de ruidos de señales perturbadas?

La clasificación de filtros es amplia, desatancado entre muchos aquellos que dejan pasar y atenúan la señal acorde con características de frecuencia como por ejemplo los filtros pasa alto, filtros pasa bajo, filtros pasa banda, banda eliminada, Multibanda, pasa todo, resonador, oscilador, filtro peine (Comb filter), y filtro ranura o filtro rechaza banda (Notch filter), entre otros.

2. CASO DE ESTUDIO

El objetivo del caso de estudio (González M. D, 2006) es el diseño de filtros digitales del tipo respuesta al impulso infinita (IIR) y de tipo respuesta al impulso finita (FIR) para filtrar una señal de audio contaminada con ruido de alta frecuencia por encima de 4 KHz, utilizando para ello filtros tipo IIR como el Butterworth, chebychev tipo I, chebychev tipo II y elíptico y tipo FIR como los filtros PARKS-MCCLELLAN y de Kaiser, utilizados ampliamente en el procesamiento de señales lo cual implica la necesidad de cumplir y aplicar un conjunto de herramientas de cálculo y diseño enmarcado en el contexto convencional de desarrollo de algoritmos aplicados a la ingeniería.

Con el fin de establecer las características fundamentales de simulación mediante MATLAB es necesario tener en cuenta que el hardware donde se implementaría lo expuesto anteriormente solo presentaría un máximo de 17 multiplicaciones por muestra que pueden ser llevadas a cabo como parámetro de entrada del filtro. Con base en estas limitaciones los requerimientos de diseño son los siguientes: máximo número de multiplicaciones por muestra de entrada: 17; 2. Límite de la banda de paso: lo más cercana a 4 KHz; 3. Frecuencia de la banda de rechazo: 4 KHz; 4. Ganancia máxima en la banda de paso (Gbpmax): 40dB; 5. Ganancia mínima en la banda de paso (Gbpmin): 37 dB; 6. Ganancia máxima en la banda de rechazo (Gbrmax): -55 dB.

3. PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO DE ALGORITMOS EN MATLAB

Se plantea a continuación algunas estrategias que permiten llevar a cabo el tratamiento o procesamiento de señales con perturbaciones haciendo énfasis en el caso de estudio anteriormente descrito.

1. Identificación del tipo de señal a procesar: es indispensable conocer la mayor cantidad de características de la señal a procesar con el fin de seleccionar o definir el tipo de filtro a usar debido especialmente a las condiciones de corte de frecuencias y atenuación de amplitudes, entre otras no menos importante. Algunas señales pueden no responder adecuadamente a ciertas características de corte de frecuencia lo que puede producir alteraciones en la señal de salida.

2. Selección de la técnica de procesamiento de la señal: es posible disponer de técnicas de procesamiento que implican cálculos intermedios como por ejemplo la transformación bilineal, que en ultima generan algunas distorsiones en la señal de salida filtrada debido a las transformaciones matemáticas que incluyen en el proceso de transformación. Por estas razones es recomendable definir el algoritmo mediante programación directa haciendo uso de las funciones del toolbox de Matlab con el fin de utilizar las técnicas propias de “optimización” incluidas en el toolbox de PDS (procesamiento digital de señales).

3. Inclusión de los archivos de las señales a procesar: es indispensable disponer de la señal a procesar una vez se haya realizado el proceso de adquisición por algún medio como una tarjeta, un instrumento de medición con interfaz a computador o cualquier otra forma que permita esta labor.
4. Definición de la jerarquía a utilizar en el algoritmo: es la forma como se estructura la organización de cada función que hace parte del algoritmo haciendo énfasis en aquellas que permiten hacer ciclos que contribuyen con la obtención de la respuesta final, mediante el ordenamiento lógico y secuencial de las instrucciones, subrutinas y demás aspectos propios de la algoritmia.
5. Definición de los archivos de salida: es esencial definir claramente los archivos de salida con el objeto de graficar la respuesta filtrada y comparar con la señal de entrada teniendo en cuenta las pérdidas o ganancia del proceso de filtrado.
6. Graficación de la entrada, salida y demás parámetros de importancia y comprobación gráfica y audible de los resultados del filtrado: es evaluar en cierta forma los resultados obtenidos mediante la comparación de la señal de entrada en relación con la atenuación del ruido y en qué proporción se efectúa este tipo de transformación.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL CON LOS FILTROS DISEÑADOS (Paarmann, Larry D, 2003).

Aplicando los ítems del procedimiento anteriormente explicado es posible realizar algoritmos para el procesamiento de señales con perturbaciones que permitan establecer mecanismos para la reducción del ruido implícito con la señal que contiene la información. El esquema general de la figura 2 ilustra la acción de un filtro digital sobre la señal original de información con ruido con el fin de obtener una señal con ruido minimizado.

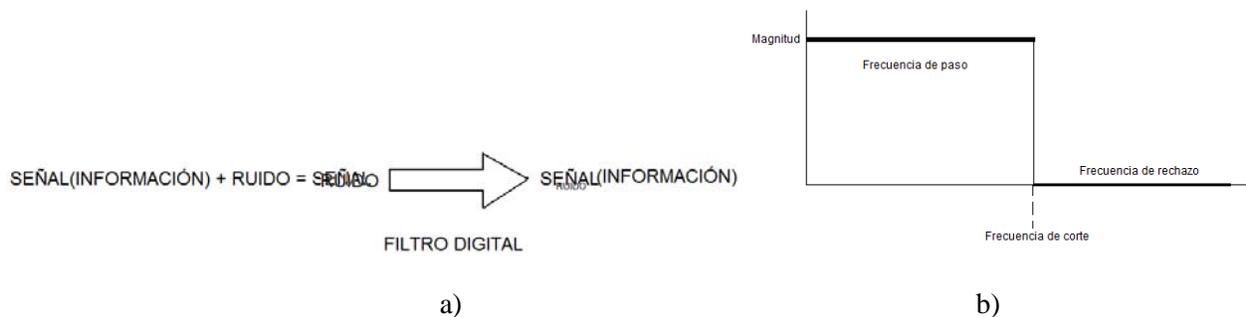


Figura 1: Acción del filtro digital sobre la señal con ruido a) Respuesta en frecuencia general de un filtro pasabajo b)

La respuesta del filtro (Oppenheim, 1999) diseñado, se analiza con base en la estructura general del mismo en relación con el comportamiento de los filtros pasabajo mediante la cual por debajo de cierta frecuencia denominada de corte (f_c), la magnitud de la señal con ruido a filtrar es reproducida con cierto rizado (ripple) y por encima de f_c para frecuencias mayores la magnitud de la señal original tiende a ser nula aún con cierto rizado también, obteniendo como resultado final la minimización del ruido en la señal de entrada al filtro digital, con la restricción que la frecuencia del ruido deber ser superior a la frecuencia de corte establecida por la frecuencia máxima de la señal original con información..

De acuerdo con la figura 2 b), para los filtros diseñados tanto en la frecuencia de paso como en la de rechazo se presentan rizados de la señal original cuyas características de amplitud, frecuencia, oscilaciones y atenuación depende de cada filtro en particular.

4.1. Diseño del filtro elíptico: el algoritmo del filtro elíptico es el siguiente:

```
%Algoritmo que determina la respuesta de un filtro pasobajo con
%rechazabanda de 4000Hz, frecuencia de muestreo de 44100 Hz, ganancia de
%pasabanda de 3Db,y atenuación de rechazabanda de 55Db.
%Autor: Cesar Gil Arrieta.
%email:cgil@cuc.edu.co
%cesargil2005@gmail.com
load proyectol; %Se carga la señal con ruido para el filtrado
%DISEÑO DE FILTRO ELIPTICO DIGITAL
%Parámetros de diseño del filtro:
%fpa:frecuencia pasabanda analógica en Hz
%fsa:frecuencia rechazabanda analógica en Hz
%As:Ganancia de pasabanda en Db
%Ap:Atenuación de rechazabanda en Db
%fm:Frecuencia de muestreo en Hz
d=4;%Factor de decimación
%fpa = 3820/2*d;
fpa = 3820/2*d;
fsa = 4000/2*d;
Ap = 3;
As = 55;
fs=44100;
fm = 44100/2*d;
Wp = fpa/(fm/2); Ws = fsa/(fm/2);%Se normalizan las frecuencias de diseño del filtro.
[N,Wn]=ellipord(Wp, Ws, Ap,As);%Se determina el orden y la frecuencia de corte del filtro
[b,a]=ellip(N,Ap,As,Wn);%Se determinan los coeficientes del filtro
[h,w]=freqz(b,a,1024);%Se determina la magnitud y respuesta en frecuencia del filtro
[b,a] = eqtflength(b,a);
[z,p,k] = tf2zp(b,a)%Se obtienen los polos,ceros y ganancia de la función de transferencia
freqz(b,a,1024),title('Respuesta en frecuencia y de fase del filtro elíptico')% Se grafica la respuesta
en magnitud y de fase.
figure
yelip=filter(b,a,noisy)
fs2=fs/d;
yelip2=decimate(yelip,d)
subplot(211),stem(yelip),title('Señal filtrada con reducción de ruido')
subplot(231),stem(yelip2),title('Señal filtrada con reducción de ruido con decimación')
Hd_FDIq = dfilt.df1(b,a);%Se analiza las prestaciones computacionales del filtro en forma directa
Hd_FDIq.arithmetic = 'single';
fvtool(Hd_FDIq),title('Forma directa 1 Cuantizada')
Hdc = dfilt.df1t(b,a);%Se analiza las prestaciones computacionales del filtro en forma directa
Hdc.arithmetic='single';
fvtool(Hdc),title('Forma directa 1 transpuesta Cuantizada')
Hda = dfilt.df2t(b,a);%Se analiza las prestaciones computacionales del filtro en forma directa
Hda.arithmetic='single';
fvtool(Hda),title('Forma directa 2 transpuesta Cuantizada')
Hdb = dfilt.df2(b,a);%Se analiza las prestaciones computacionales del filtro en forma directa
Hdb.arithmetic='single';
fvtool(Hdb),title('Forma directa 2 Cuantizada')
fvtool(b,a),title('Diseño del filtro Elíptico en forma directa 1')
```

La respuesta en frecuencia de salida del filtro diseñado es:

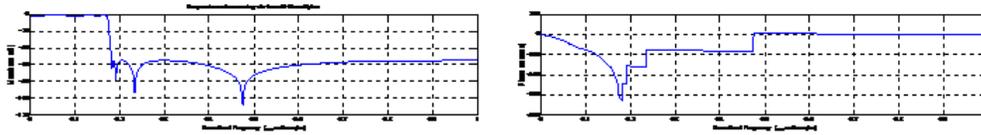


Figura 2: Respuesta en magnitud y frecuencia del filtro elíptico digital

Al comparar la señal de entrada con ruido y la señal de salida del filtro con ruido minimizado se obtienen las gráficas de la figura 3.

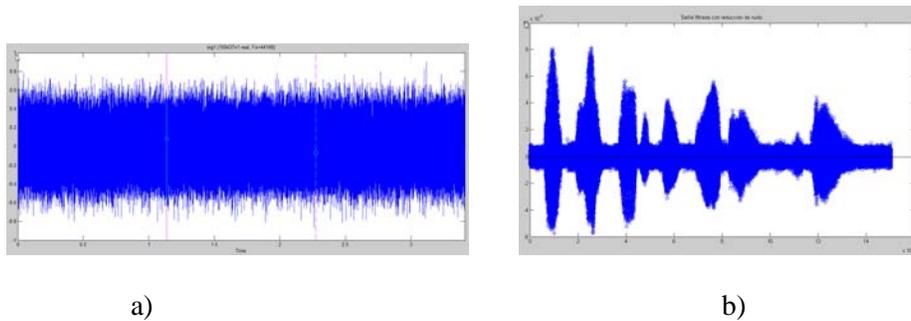


Figura 3: Señal de entrada con ruido a) y señal filtrada con ruido minimizado b).

Con base en las figuras ilustradas es posible concluir que:

- El orden del filtro elíptico diseñado con orden $n=8$ reúne características importantes ya que permite establecer una cantidad de muestras de entradas acorde con las exigencias del diseño (17) lo cual reduce las prestaciones computacionales logrando con esto diseñar un filtro con una frecuencia pasabanda bastante alta y muy cercana a la frecuencia de rechazabanda, lo cual aproxima la respuesta del filtro en frecuencia a la del filtro ideal ya que posee un cambio abrupto desde la frecuencia pasabanda (f_p) escogida de 3820 Hz a la frecuencia rechazabanda f_s igual a 4000Hz.

4.2. Diseño del filtro butterworth. La respuesta en frecuencia de salida del filtro diseñado es:

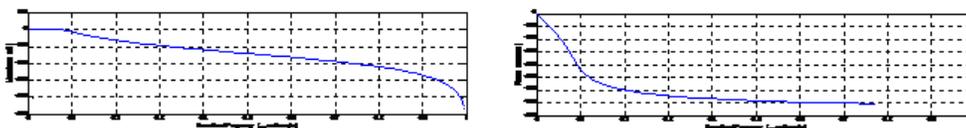


Figura 4: Respuesta en magnitud y frecuencia del filtro butterworth digital

Al comparar la señal de entrada con ruido y la señal de salida del filtro con ruido minimizado se obtienen las gráficas de la figura 5.

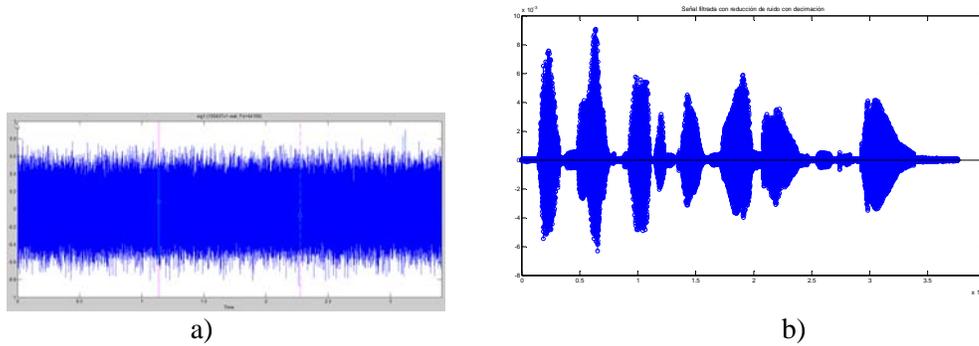


Figura 5: Señal de entrada con ruido a) y señal filtrada con ruido minimizado b) del filtro butterworth.

Con base en las figuras ilustradas es posible concluir que:

- El orden del filtro butterworth diseñado con orden $n=8$ permite establecer la cantidad de muestras de entradas acorde con las exigencias del diseño (17) lo cual cumple con las prestaciones computacionales del DSP. Sin embargo, no es posible lograr con esto un filtro con una frecuencia pasabanda bastante alta y muy cercana a la frecuencia de rechazabanda, ya que posee un cambio con pendiente muy suave desde la frecuencia pasabanda (f_p) escogida de 1851 Hz a la frecuencia rechazabanda $f(s)$ igual a 4000Hz, lo cual difiere ostensiblemente de la respuesta del filtro ideal.

4.3. Diseño del filtro chebychev tipo I: La respuesta en frecuencia de salida del filtro diseñado es:

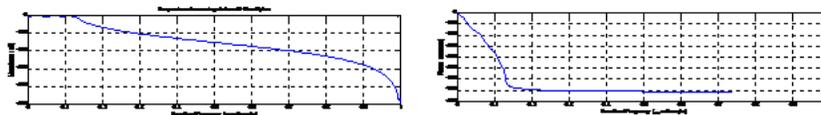


Figura 6: Respuesta en magnitud y frecuencia del filtro chebychev tipo I digital

Al comparar la señal de entrada con ruido y la señal de salida del filtro con ruido minimizado se obtienen las gráficas de la figura 7.

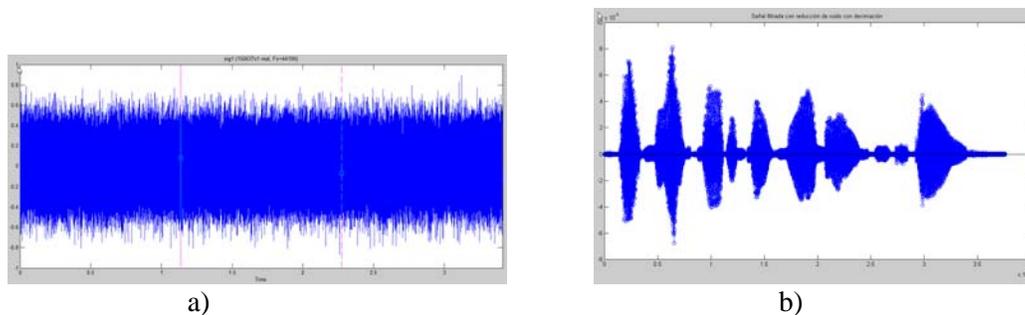


Figura 7: Señal de entrada con ruido a) y señal filtrada con ruido minimizado b) del filtro chebychev tipo I digital.

Con base en las figuras ilustradas es posible concluir que:

- El filtro chebychev tipo I diseñado presenta ventaja en comparación con el filtro butterworth ya que su banda de transición entre f_p y f_s produce menor pérdida de información y disminución en la potencia de la señal de salida, lo cual repercute en una reproducción de mayor fidelidad del mensaje original con predominancia de un nivel de ruido mucho menor que el de la señal original.
- El rizado de este filtro solo se presenta en la banda de paso, razón por la cual no presenta iguales características de optimización que los filtros con rizados tanto en la banda de paso como la de rechazo (equiripple).

4.4. Diseño del filtro chebychev tipo II: La respuesta en frecuencia de salida del filtro diseñado es:

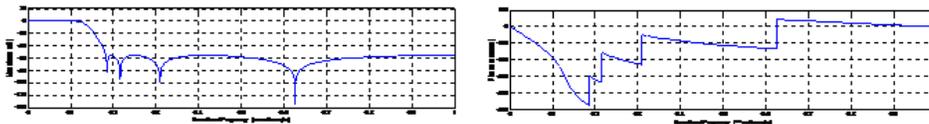


Figura 8: Respuesta en magnitud y frecuencia del filtro chebychev tipo II digital

Al comparar la señal de entrada con ruido y la señal de salida del filtro con ruido minimizado se obtienen las gráficas de la figura 9.

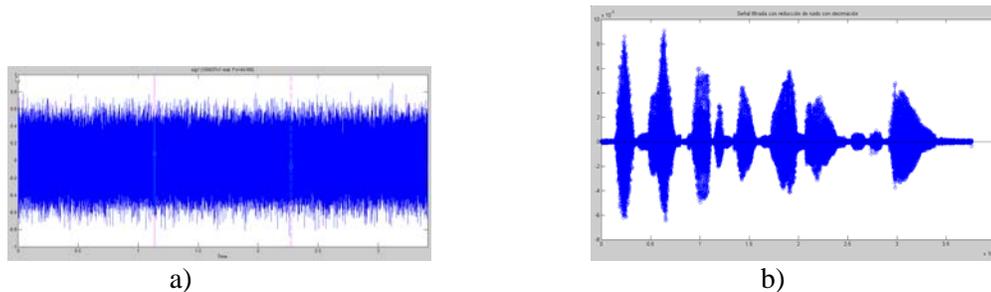


Figura 9: Señal de entrada con ruido a) y señal filtrada con ruido minimizado b) del filtro chebychev tipo II digital.

Con base en las figuras ilustradas es posible concluir que:

- El orden del filtro CHEBYCHEV TIPO II diseñado con orden $n=8$ permite establecer la cantidad de muestras de entradas de acuerdo con los parámetros del diseño (17) cumpliendo con las prestaciones computacionales del DSP a implementar. Presenta características iguales que el filtro CHEBYCHEV tipo I en relación con la frecuencia escogida f_p de 2872 Hz lo cual aproxima la banda de transición a la frecuencia rechazabanda f_s igual a 4000Hz, lo cual mejora el desempeño en comparación con el filtro butterworth respecto a la respuesta del filtro ideal.
- El rizado de la banda de rechazo presenta predominio de lóbulos con tendencia al aumento del ancho de los mismos a partir del inicio de la banda de transición. El rizado de la banda de paso presenta tendencia a ser más lineal que la banda de rechazo, lo cual está acorde con las características del filtro chebychev tipo II.

4.5. Diseño del filtro FILTRO PARK-MCCLALLEN:

La respuesta en frecuencia de salida del filtro diseñado es:

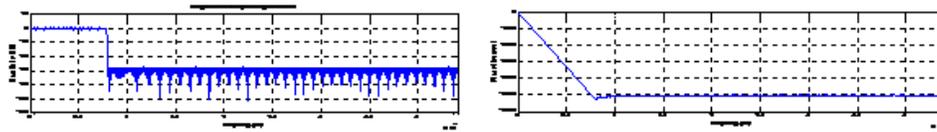


Figura 10: Respuesta en magnitud y frecuencia del filtro PARK-MCCLALLEN digital

Al comparar la señal de entrada con ruido y la señal de salida del filtro con ruido minimizado se obtienen las gráficas de la figura 11.

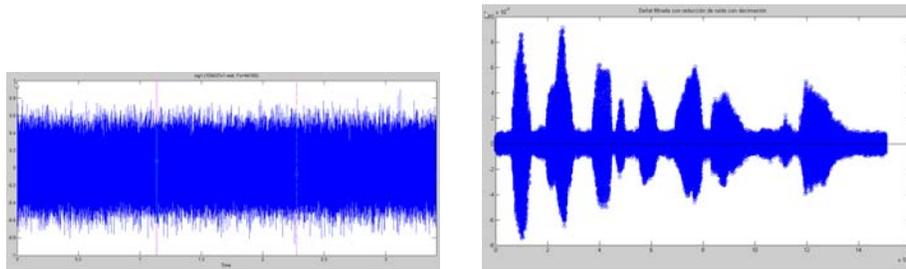


Figura 11: Señal de entrada con ruido y señal filtrada con ruido minimizado del filtro PARK-MCCLALLEN digital

Con base en las figuras ilustradas es posible concluir que:

- El orden del filtro PARK-MCCLALLEN diseñado con orden $n=652$ no permite establecer la cantidad de muestras de entradas de acuerdo con los parámetros del diseño (17) ya que en la estructura de diseño tipo directa para filtros FIR no cumple con las prestaciones computacionales del DSP a implementar (cantidad de multiplicaciones por muestras de entrada tipo directo $FIR=653$) (González M. D, 2006).
- Requiere un DSP de alta capacidad de cómputo matemático por el alto orden y cantidad de multiplicaciones por muestras de entradas, razón por la que no puede implementarse en un dispositivo de baja gama

4.6. Diseño del filtro kaiser digital el algoritmo del filtro elíptico es el siguiente:

La respuesta en frecuencia de salida del filtro diseñado es:

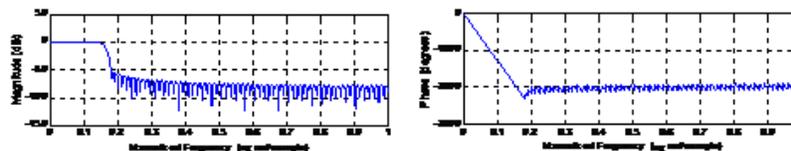


Figura 12. Respuesta en magnitud y frecuencia del filtro KAISER digital

Al comparar la señal de entrada con ruido y la señal de salida del filtro con ruido minimizado se obtienen las gráficas de la figura 13.

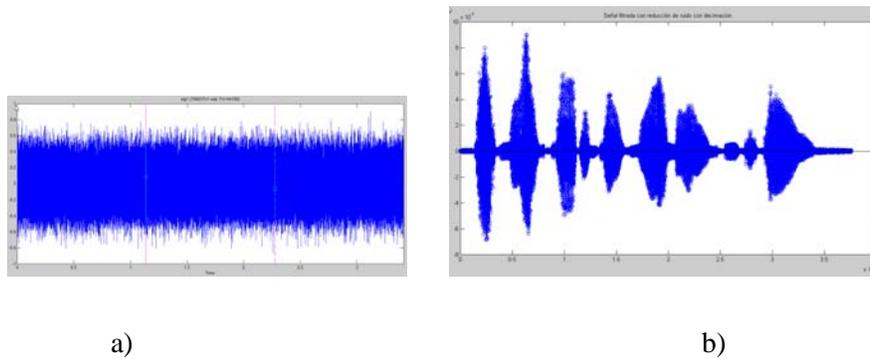


Figura 13: Señal de entrada con ruido a) y señal filtrada con ruido minimizado b) del filtro KAISER digital

Con base en las figuras ilustradas es posible concluir que:

- El orden del filtro KAISER DIGITAL diseñado con orden $n=141$ no permite establecer la cantidad de muestras de entradas de acuerdo con los parámetros del diseño (17) ya que en la estructura de diseño tipo directa para filtros FIR no cumple con las prestaciones computacionales del DSP a implementar (cantidad de multiplicaciones por muestras de entrada tipo directo $FIR=142$).
- Se comporta estructuralmente como un filtro que optimiza los parámetros de diseño mediante el cálculo de valores como BETA dentro de un rango estipulado por el factor A que depende de la desviación de la ganancia de pasabanda y atenuación de rechazabanda, razón por la cual ajusta sus valores acorde con un error establecido por los parámetros de diseño para determinar elementos óptimos de operación. La figura 18 ilustra la señal procesada con disminución del ruido de alta frecuencia.

5. CONCLUSIONES

- Los algoritmos de diseño de filtros digitales implican una estructura que debe ser bien definida acorde con la estructura propia de las funciones del toolbox de Matlab debido a que para cada filtro existen versiones análogas y digitales que podrían conducir a resultados diferentes si se aplican indistintamente por la misma organización matemática al igual que la estrategia o técnica de optimización de dichos algoritmos, razón por la cual el procedimiento propuesto es válido en la minimización de ruido de la señal bajo estudio y puede ser generalizada para el diseño de filtros de mayor nivel de alcance de filtrado como por ejemplo el de la disminución de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.
- A partir del análisis de resultados se seleccionaría el diseño del filtro elíptico por cumplir con los requisitos de diseño especialmente indicado por la cantidad de muestras de entradas igual a 17 presentando a su vez la banda de transición más estrecha lo cual certifica que la frecuencia de pasabanda se encuentre lo más cerca posible a la frecuencia de rechazabanda permitiendo con esto una reproducción mucho más precisa que los otros filtros tipo IIR generando un filtro que puede ser implementado o realizado en el DSP de baja capacidad, con disminución del ruido que permite la identificación del mensaje de la señal original.
- Los otros filtros IIR pueden ser realizados en el DSP de baja capacidad con la diferencia fundamental en relación con el elíptico que ofrecen mayor amplitud en la banda de transición lo que produce pérdida de información y de potencia a pesar de reducir el ruido.
- Los filtros tipos FIR no cumplen con la requisición de diseño de la cantidad de multiplicaciones por muestras de entrada, por lo que a pesar de disminuir la banda de transición y aumentar la potencia de la señal de salida en relación con los otros filtros, las prestaciones computacionales superan las condiciones del DSP a implementar.

REFERENCIAS

González M. D (2006). Comparación de filtros FIR de fase lineal por Método Óptimo y de Ventanas. Disponible en <http://ewh.ieee.org/sb/argentina/comahue/ed2/trabajos.html>

Oppenheim (1999), "Signal processing digital" . 2nd ed.

Paarmann, Larry D (2003). Design and analysis of analog filters. A Signal Processing Perspective. Kluwer academic publishers

Proakis (2007). "Signal processing digital ". 4th ed.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos de la conferencia. LACCEI o los editors no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.

Cesar Javier Gil Arrieta es ingeniero electricista y especialista de la Universidad del Norte de Barranquilla, Colombia. Desde el año 1997 realiza labores de mantenimiento de maquinas eléctricas, diseño de instalaciones eléctricas y capacitación industrial en baja tensión. Actualmente se desempeña como docente investigador del programa de ingeniería eléctrica y realiza investigación bajo la dirección de la vicerrectoría de investigación de la Corporación Universitaria de la Costa, CUC, de Barranquilla Colombia, como parte del grupo de investigación GIOPEN. El tema expuesto en el presente documento es resultado de los estudios que actualmente adelanta en la maestría en ingeniería electrónica en la Universidad del Norte de Barranquilla, Colombia.