

## IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE FILTERS IN RECONFIGURABLE LOGIC TECHNOLOGIES

### IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS ADAPTATIVOS EN TECNOLOGIAS DE LÓGICA RECONFIGURABLE

**MSc. Jaime Orlando Ruiz**

**Universidad de Nariño.**

Departamento de Ingeniería Electrónica.

Ciudad Universitaria Torobajo - Calle 18, Cr 50, San Juan de Pasto. Tel. (572) 731 1449.

E-mail: jaimeruiz@udenar.edu.co

**Abstract:** The advance in the microelectronics technology and the reached miniaturization level has allowed the construction of sophisticated systems digital and powerful development tools that you/they allow the design of much more complex systems. In this work use of technologies of logical reconfigurable is made, as the FPGAs, which can modify its characteristics according to the necessities of the system like it is the case of the adaptive filters which modify its characteristics according to certain approaches.

**Keywords:** Adaptive filters, FPGAs, implementation of adaptive filters

**Resumen:** El avance en la tecnología microelectrónica y el nivel de miniaturización alcanzado ha permitido la construcción de sofisticados sistemas digitales y poderosas herramientas de desarrollo que permiten el diseño de sistemas mucho más complejos. En este trabajo se hace uso de tecnologías de lógica reconfigurable, como las FPGAs, las cuales pueden modificar sus características de acuerdo a las necesidades del sistema como es el caso de los filtros adaptativos los cuales cambian sus características de acuerdo a determinados criterios.

**Palabras clave:** Filtros adaptativos, FPGAs, implementación de filtros adaptativos

### 1. INTRODUCCIÓN

Los filtros FIR o IIR corresponden a una familia de sistemas lineales e invariantes en el tiempo, descritos por una relación de entrada-salida denominada ecuación en diferencias con coeficientes constantes, su operación de filtrado es estacionaria, esto significa que su comportamiento es indiferente al instante en que se aplique. Esta propiedad no es adecuada para filtrar señales que cambian sus características con el tiempo.

Uno de los problemas típicos a resolver, que por algún tiempo fue el centro de atención de

investigadores, es la conveniente eliminación del ruido de la línea de potencia contenido en las señales analizadas por equipos biomédicos. Cuando la frecuencia de la línea es estable un filtro *notch*, supresor de frecuencia, es suficiente. Pero la frecuencia de la línea de fuerza no siempre posee el valor exacto de 60 Hz, presenta una variación de frecuencia que es asumida comúnmente como Gausiana. Esto sugiere que la distribución puede o no ser centrada en los 60 Hz además, la desviación de la frecuencia no siempre se encuentra en una sola dirección.

El ruido se puede eliminar con un filtro notch fijo si la distribución es centrada exactamente a la frecuencia para la cual el filtro fue diseñado, pero si la frecuencia no está centrada a la misma del filtro notch, entonces, este filtro no cumpliría su función por lo tanto es necesario adaptar el filtro para que se ajuste a las nuevas características de la señal a eliminar.

Los filtros adaptativos son sistemas que cambian su comportamiento en dependencia del instante en que se aplique el estímulo, o sea son sistemas variantes en el tiempo. El filtro cambia sus características obedeciendo determinadas leyes o criterios predeterminados, son sistemas que modifican dinámicamente su función de transferencia. Esta propiedad permite utilizar este filtro en casos donde la función de transferencia no se conoce a priori o donde las características de la señal a eliminar cambian como cuando se quiere eliminar el ruido producido por la señal de alimentación eléctrica.

La naturaleza cambiante del filtro adaptativo exige que su realización se lleve a cabo sobre escenarios flexibles que permitan la implementación de los criterios o leyes que determinan las nuevas características de forma dinámica. Desde esta perspectiva, un sistema adaptativo se podría implementar de dos formas: por software o por hardware, en las plataformas de lógica reconfigurable.

La implementación software implica que los criterios que determinan la reconfiguración del sistema se puedan expresar en un algoritmo. Existen programas especializados que permiten el diseño y la implementación de filtros adaptativos, entre los más utilizados actualmente se puede mencionar Matlab, de igual forma se dispone de lenguajes de programación de alto nivel y los lenguajes ensambladores para implementación sobre un microprocesador de propósito general o especializado como los PDS (*Procesador Digital de Señales*).

La implementación hardware en plataformas de lógica reconfigurable como los FPGAs (*Matriz de compuertas programables por campo*) es el motivo de este trabajo. El uso de estos sistemas reconfigurables, las técnicas y herramientas de diseño digital avanzado, sus ventajas en cuanto a facilidad y flexibilidad de desarrollo, reducción de costos, etc., permitirá tener una gran herramienta para el estudio y procesamiento de señales.

Los FPGAs permiten obtener velocidades hardware adecuadas para determinadas aplicaciones con flexibilidad software. La posibilidad de reutilización del hardware reconfigurable disminuye su costo ya que puede utilizarse exactamente el mismo hardware para varias aplicaciones cambiando únicamente su programación interna. Actualmente un FPGA contiene millones de transistores a un costo relativamente bajo, en este escenario es posible el diseño de sistemas digitales de mayor complejidad sobre una estructura que puede ser programada.

## 2. FILTROS ADAPTATIVOS

Un filtro adaptativo es un sistema digital compuesto por un filtro lineal programable de entrada  $x(n)$  y salida  $y(n)$  cuyos coeficientes se pueden reprogramar de una muestra a la siguiente a partir de un algoritmo de adaptación.

$x(n)$	señal de entrada.
$y(n)$	respuesta del filtro.
$\hat{y}(n)$	respuesta deseada.
$e(n)$	error entre la respuesta del filtro y la respuesta deseada.
$\underline{h}(n)$	coeficientes del filtro que cambian de valor de acuerdo al algoritmo adaptativo.

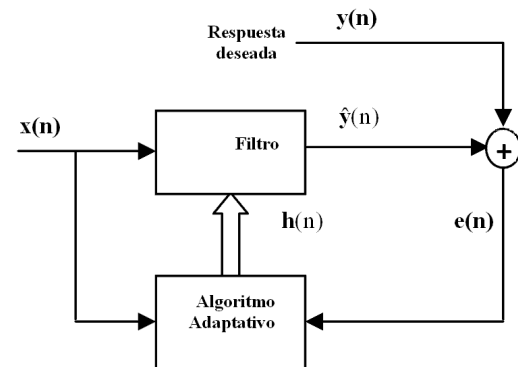


Fig. 1: Filtro adaptativo

El filtro lineal puede ser un filtro FIR o un filtro IIR. Es importante tener en cuenta que si los coeficientes cambian su valor dinámicamente en el tiempo, existe el peligro de que el sistema se haga inestable por lo que se prefiere el uso de los sistemas FIR que son incondicionalmente estables. Los algoritmos adaptativos normalmente son de manera recursiva, se utiliza con frecuencia la forma iterativa dada por:

$$h_i(n+k) = h_i(n) + q\{\underline{x}(n), y(n), \underline{e}(n)\} \quad (1)$$

En la expresión 1:

$h_i(n)$  es el  $i$ ésimo coeficiente del filtro en el instante  $n$ .

$h_i(n+k)$  es el  $i$ ésimo coeficiente del filtro en el instante  $n+k$ .

$\underline{x}(n)$  es un vector que incluye la muestra de entrada en el instante  $n$  y muestras anteriores.

$y(n)$  es un vector que incluye la muestra de salida en el instante  $n$  y muestras anteriores.

$\underline{e}(n)$  es un vector error que incluye las muestras de la señal error en el instante  $n$  y muestras anteriores.

La señal error se define como la diferencia requerida o deseada en el instante  $n$ ,  $y(n)$  y la salida real en dicho instante  $y(n)$ :

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n) \quad (2)$$

La ecuación iterativa especifica los coeficientes del filtro  $h_i(n)$ , en el instante  $n + k$ , en términos de los coeficientes de dicho filtro en el instante  $n$ , más un término de actualización de adaptación  $q$ , el cual es una función principalmente de la señal de error (la función  $q$  puede incluir o no  $y(n)$  o  $\underline{x}(n)$ , pero necesariamente debe incluir como argumento el error  $\underline{e}(n)$ ). Este término de actualización puede tener formas diferentes con resultados que varían en cuanto a complejidad, viabilidad, etc.

De la forma  $q\{\underline{x}(n), y(n), \underline{e}(n)\}$  se pueden identificar algunos de los elementos básicos de los algoritmos de adaptación.

1. Si  $y(n)$  no existe como argumento en la función, entonces el filtro que se usa será del tipo no recursivo FIR, es lo más común.
2. Si el vector  $\underline{e}(n)$  tiene orden 1 (incluye solo la muestra actual de la señal error) el proceso de adaptación será uno de muestra a muestra.
3. Si el vector  $\underline{e}(n)$  es mayor que 1 entonces el proceso de adaptación es de tipo en bloque.

Al diseñar un algoritmo adaptativo hay un número de características importantes que se deben tener en cuenta:

1. Complejidad computacional
2. Estabilidad
3. Velocidad inicial de convergencia.
4. Consistencia de la velocidad de convergencia con variaciones en el condicionamiento de la señal (coloración espectral).
5. Habilidad para seguir características variables en el tiempo.
6. Robustez (inmunidad) al ruido aditivo.

El funcionamiento de cualquier algoritmo con respecto a cualquiera de estos criterios es dependiente enteramente de la selección de la función de actualización de adaptación.

### 3. IMPLEMENTACIÓN EN FPGA

La implementación del filtro adaptativo presenta algunas características especiales que están relacionadas con su propiedad reconfigurable. En primera instancia en este caso no se habla de diseño de un filtro con determinadas características de respuesta en frecuencia, más bien es la implementación de una estructura, incluso similar a la de un filtro lineal, más un algoritmo de adaptación para actualizar los coeficientes que permiten estimar una señal a partir de unos datos de entrada.

Dada la naturaleza del uso del filtro adaptativo el comportamiento del mismo se evalúa sobre la base de la implementación directa de aplicaciones.

### 4. ESTRUCTURA PARA FILTROS ADAPTATIVOS

Se ha planteado, en este trabajo, la implementación de un filtro adaptativo no recursivo (FIR), los cuales son incondicionalmente estables. La estructura de un filtro adaptativo no recursivo es similar a la estructura de un filtro FIR lineal, con la diferencia de que en este caso los coeficientes no son constantes, pues ellos varían de acuerdo a un algoritmo de adaptación. En la figura 2 se observa la estructura de un filtro adaptativo de cuatro coeficientes.

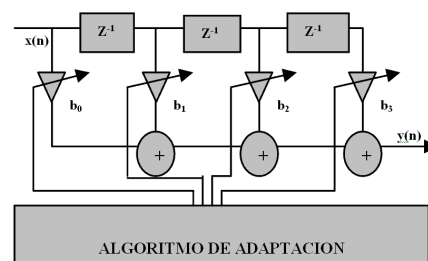


Fig. 2: Estructura de un filtro adaptativo no recursivo

### 5. IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ADAPTATIVO

Para la implementación del filtro adaptativo se parte de la estructura de un filtro FIR de orden tres,

al cual se le añade la estructura de un algoritmo de adaptación que permita actualizar los coeficientes del filtro, tal como se puede apreciar en la figura 2.

De acuerdo a la definición de un filtro adaptativo discutida anteriormente un diagrama en bloques para un filtro adaptativo podría ser como el que se muestra en la figura 3

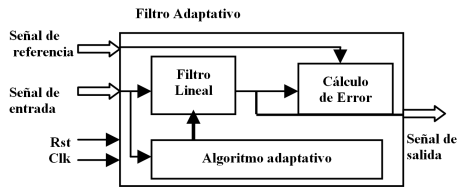


Fig. 3: Diagrama en bloques de un filtro adaptativo

Las señales de entrada y de referencia son señales de 16 bits y su procedencia depende de la aplicación que se vaya a implementar.

El filtro lineal corresponde a la estructura de un filtro FIR de orden 3, del cual se muestra su diagrama en bloques en la figura 4. La función de este módulo es calcular una salida que es una estimación de la entrada, con los coeficientes que tiene en ese momento.

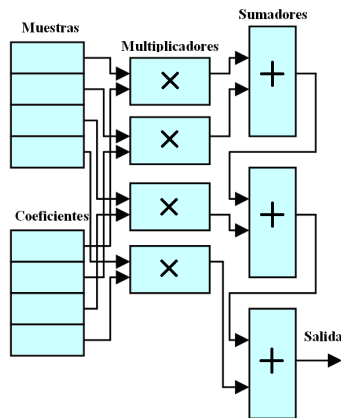


Fig. 4: Diagrama en bloques para el filtro lineal

El módulo encargado de calcular el error es simplemente un circuito restador que determina la diferencia algebraica entre la señal deseada y la señal de salida del filtro lineal, por lo tanto un diagrama en bloques de este módulo se observa en la figura 5.



Fig. 5: Módulo para calcular el error

El algoritmo de adaptación que se utiliza, para calcular los coeficientes, es el de mínimos cuadrados. Inicialmente el valor de los coeficientes es cero, este valor se actualizará, de acuerdo a esta expresión, por lo tanto el cálculo de los cuatro coeficientes del filtro adaptativo que se desea implementar, se realizará de la siguiente forma:

$$h_0(k+1) = h_0(k) + \mu x(k)e(k) \quad (3)$$

$$h_1(k+1) = h_1(k) + \mu x(k-1)e(k) \quad (4)$$

$$h_2(k+1) = h_2(k) + \mu x(k-2)e(k) \quad (5)$$

$$h_3(k+1) = h_3(k) + \mu x(k-3)e(k) \quad (6)$$

En este conjunto de expresiones:

$h_i(k+1)$  Valor del coeficiente  $h_i$  en el instante  $k+1$ .

$h_i(k)$  Valor del coeficiente  $h_i$  en el instante  $k$ .

$\mu$  Constante que controla la velocidad de convergencia

$x(k-i)$  Valor de la señal de entrada en el instante  $k-i$

$e(k)$  Valor del error en el instante  $k$ .

Para cada nuevo coeficiente la implementación digital es como se ilustra en la figura 6.

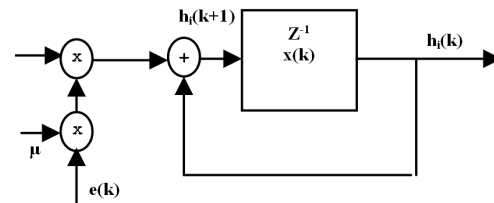


Fig. 6: Implementación digital para el cálculo de un coeficiente nuevo

La entrada *rst*, corresponde a una señal normal de reseteo, en este caso es activa con uno lógico y se utiliza para inicializar variables o señales como por ejemplo el valor inicial de los coeficientes. La entrada *clk*, corresponde a la señal de reloj que determina el período de tiempo entre muestra y muestra de la señal de entrada para el cálculo de la señal de salida.

El filtro adaptativo debe calcular la señal de salida y actualizar los coeficientes durante el mismo ciclo de reloj. La señal de salida se calcula con el borde de subida del reloj y los coeficientes se actualizan con el borde de bajada, de tal suerte que para el próximo cálculo de la salida ya se tienen los coeficientes actualizados.

En la figura 7 se observa el comportamiento del filtro adaptativo durante un ciclo de reloj, suponiendo que tiene una frecuencia de 25 KHz.

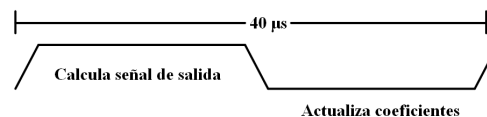


Fig. 7: Ciclo de reloj para el filtro adaptativo

El proceso de calcular la señal de salida y el proceso de actualizar los coeficientes no son simultáneos aunque se realizan en el mismo ciclo. Después de calcular la salida con el borde de subida de la señal de reloj, él debe aprovechar el borde de bajada para reconfigurarse, actualizar los coeficientes de acuerdo al error estimado y alistarse para el próximo cálculo de la señal de salida. La figura 8 muestra un diagrama simplificado de la estructura hardware del filtro adaptativo:

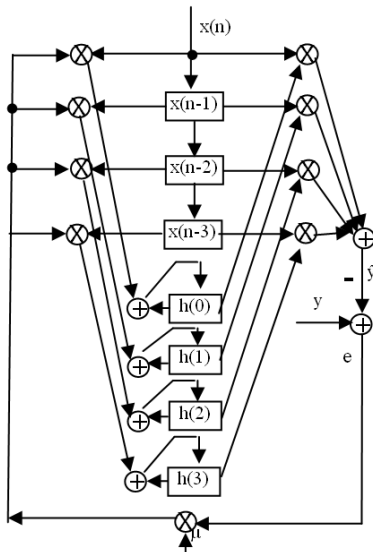


Fig. 8: Estructura hardware del filtro adaptativo

La señal de salida es una señal que en el caso de un filtro de cuatro coeficientes es de 32 bits. Es muy importante decir que si el número de coeficientes aumenta es posible que esta señal tenga mayor número de bits, debido a que los registros para almacenar resultados intermedios podrían aumentar de tamaño en función de evitar su desborde.

Esta señal de salida puede representar la señal estimada o la señal de error, todo depende de la aplicación que se esté desarrollando. Eventualmente a la hora de implementar en VHDL se podrían tener las dos señales. Para observar el comportamiento del filtro adaptativo es necesario hacerlo directamente sobre aplicaciones específicas. En este caso la aplicación a utilizar es un sistema dinámico de disminución de ruido.

## 6. SISTEMA DE DISMINUCIÓN DINÁMICA DE RUIDO

Una de las aplicaciones de mayor interés del filtrado adaptativo es la disminución dinámica de ruido. Se podría imaginar por un momento que se realiza una charla en un aula, y al mismo tiempo en

el exterior se encuentra un obrero con un martillo neumático, el cual imposibilita la realización de la charla. Para solucionar este problema se colocaría un micrófono cerca del martillo y mediante un filtro adaptativo se buscaría "estimar" el ruido que se suma a la señal de interés para luego restarlo y obtener únicamente la voz del conferencista.

En términos técnicos, se trata de que una señal deseada  $S$  (voz, audio, ECG, vibración o cualquier otra) que está afectada por un ruido aditivo  $N_0$ . Si el ruido,  $N_1$ , puede captarse (muy importante) libre de señal deseada entonces, puede usarse de referencia para cancelar este a la salida (véase la figura 6.1). Lo que se espera del filtro adaptativo es que sea capaz de lograr una estimación del ruido  $N_1$  lo más parecida a  $N_0$ , de tal suerte que la señal error sea prácticamente la señal  $S$  libre de ruido.

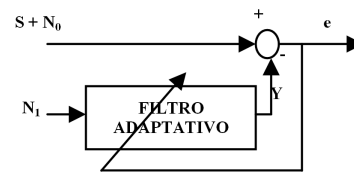


Fig. 9: Eliminación de ruido

Si se conocieran las características de los canales sobre los cuales se transmite el ruido a los sensores primarios y de referencia, sería teóricamente posible diseñar un filtro fijo capaz de convertir  $N_1$  en  $N_0$ . La salida del filtro pudiera ser entonces sustraída de la entrada primaria y la salida del sistema sería la señal. Como, en general, las características de la transmisión son desconocidas o conocidas en forma aproximada y son raramente de naturaleza fija, el uso de un filtro fijo no es factible. Aun, si fuese factible un filtro fijo, las características tendrían que ser ajustadas con una precisión difícil de lograr y el error más ligero podría resultar en un incremento significativo en la potencia del ruido a la salida.

En el sistema mostrado, la entrada de referencia se procesa por un filtro adaptativo. La señal de error usada en un proceso adaptativo depende de la naturaleza de la aplicación, en un sistema dinámico de disminución de ruido el objetivo práctico es producir una salida  $Z = S + N_0 - Y$ , que es la mejor aproximada en el sentido de mínimos cuadrados. Este objetivo se logra realimentando la salida del sistema al filtro adaptativo y ajustando el filtro a través de un algoritmo adaptativo de diferentes tipos, aquí utilizamos el LMS para minimizar la potencia de salida del sistema. En un sistema de cancelación dinámica de ruido la salida del sistema

sirve como señal de error para el proceso adaptativo.

Asumiendo que  $S$ ,  $N_0$ ,  $N_1$ , e  $Y$  son estacionarias estadísticamente y de media cero, que el ruido y la señal no están correlacionadas y además  $N_0$  si está correlacionada con  $N_1$ . La salida  $Z$  es:

$$Z = S + N_0 - Y \quad (7)$$

Calculando el error cuadrático medio y considerando que  $S$  no está correlacionada con  $N_0$  e  $Y$ , se tiene que:

$$E(Z^2) = E(S^2) + E[(N_0 - Y)^2] \quad (8)$$

La potencia de la señal  $E(S^2)$  no será afectada cuando el filtro se ajusta para minimizar  $E(Z^2)$ . De acuerdo a ello la potencia mínima de la salida es:

$$E(Z^2) = E(S^2) + \min E[(N_0 - Y)^2] \quad (9)$$

Cuando el filtro se ajusta de modo de minimizar  $E(Z^2)$ ,  $E[(N_0 - Y)^2]$  es, por lo tanto también minimizada. La salida del filtro  $Y$  es un mejor estimado en sentido de mínimos cuadrados del ruido primario  $N_0$ . Además cuando  $E[(N_0 - Y)^2]$  se minimiza,  $E[(Z - S)^2]$  se minimiza también, dado que

$$(Z - S) = (N_0 - Y) \quad (10)$$

Ajustar o adaptar el filtro para minimizar la potencia total de salida provoca que la salida  $Z$  sea el mejor estimado en sentido de mínimos cuadrados de la señal  $S$ .

La salida  $Z$  contendrá la señal  $S$  más ruido. El ruido de salida está dado por  $(N_0 - Y)$ , dado que minimizar  $E(Z^2)$  minimiza  $E[(N_0 - Y)^2]$ , minimizar la potencia total de salida minimiza la potencia de ruido de salida. Como la señal en la salida permanece constante, al minimizar la potencia total de salida se maximiza la relación señal a ruido de salida.

La implementación del experimento se realiza de acuerdo al diagrama en bloques mostrado en la figura 10.

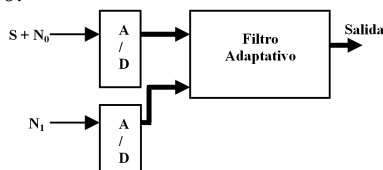


Fig. 10: Diagrama en bloques de un sistema para disminución dinámica de ruido

## 7. RESULTADOS Y OBSERVACIONES

Para observar los resultados del experimento se utiliza una señal de audio que bien puede ser la señal generada por un radio receptor o la señal de audio que se tiene a la salida del computador.

Como señal de ruido se utiliza un tono audible de 300 Hz, proveniente de un generador de señales. Mediante un circuito sumador se mezcla con la señal de audio para de esta manera obtener la entrada  $S + N_0$ , al escuchar esta señal claramente se escucha la interferencia molesta que genera el tono. Con otro generador de señales se obtiene otro tono simulando el ruido  $N_1$ , el cual entra al sistema. Por medio de los controles del generador se van suministrando las características de amplitud y frecuencia del tono  $N_0$ , a la salida del sistema se puede escuchar disminución paulatina del ruido hasta lograr la completa eliminación cuando los dos tonos son iguales.

El sistema también se prueba utilizando como señal un tono de 500 Hz, de tal suerte que la entrada  $S + N_0$  corresponde a una señal compuesta por dos ondas seno de 300 Hz y 500 Hz. Se utiliza otro generador para obtener  $N_1$  y como en el caso anterior cuando ésta más se aproxima a  $N_0$  a la salida se tendrá el tono de 500 Hz. En la figura 11 se puede observar este resultado.

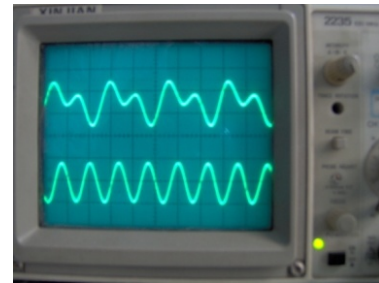


Fig.11: Eliminación de un tono

Se intentó crear una situación más real en términos de utilizar micrófonos para captar una señal contaminada y captar el ruido causante de dicha contaminación, sin embargo, una situación bastante delicada se hizo evidente, los dispositivos para captar las señales sobre todo el micrófono encargado de captar el de ruido  $N_1$ , debe tener un patrón de radiación muy directivo para que se enfoque en captar el ruido y evitar que esta señal tenga componentes de la señal deseada  $S$ .

El uso de un micrófono sin estas características implica que por esta vía al sistema le llega otra versión de la señal de entrada  $S + N_0$ , lo que

implica que a la salida se tendría la señal deseada ruidosa y además de menor potencia como efectivamente se puede escuchar.

Como conclusión de este resultado no satisfactorio, es evidente la necesidad de realizar el experimento con los dispositivos adecuados que cumplan con las características expuestas.

### 7.1 Consumo de recursos del FPGA

En la tabla 1 se muestra el consumo de recursos FPGA para la implementación de un filtro adaptativo. Se puede observar que el consumo más notorio es el de multiplicadores, los otros recursos son de menor uso.

Tabla 1. Recursos utilizados del FPGA

DESCRIPCION	RECURSO	FILTRO ADAPTATIVO		
		DISPONIB.	USADOS	% DE USO
SLICE		3840	550	14
ENTRADAS LUT		3840	306	7
BLOQUES IO		173	13	7
MULTIPLICADORES		12	9	75

## 8. CONCLUSIONES

El uso de multiplicadores es posible preverlo de acuerdo al número de coeficientes que tenga el filtro, de esta manera se puede decir que:

- Para el cálculo de la señal de salida, por cada coeficiente se utiliza un multiplicador, por lo tanto en este caso son necesarios cuatro multiplicadores.
- Para la actualización de coeficientes y según el algoritmo de adaptación es necesario realizar una multiplicación por cada coeficiente, además otra multiplicación por la constante  $\mu$ . Por lo tanto para actualizar un coeficiente se necesitan cinco multiplicadores, lo que implica que los cuatro coeficientes requieren de nueve multiplicadores.

## REFERENCIAS

- Hamming, Richard Wesley. Digital Filters. Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall. 1983
- Haykin, Simon. Adaptative Filter Theory. United States of America, Prentice-Hall, Inc. 2002
- Alba Emiliano. Filtros Adaptativos, conferencia. Instituto Politécnico José Antonio Echeverría. 2006
- Douglas, L Jones. IIR Filter Structures, <http://cnx.org/content/m11919/latest>, 2004.
- García Díaz, José Alberto, Salazar Brenes, Eugenio. Quirós Rojas, Luis. Diseño de un filtro digital (IIR) con microprocesador de arquitectura multiciclo en FPGA. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electrónica, Cartago, Costa Rica
- Morrego, Bernardo. Comparación de implementaciones en C y Matlab de filtros adaptativos para DSP
- Bautista Cuellar, Ricardo Valerio. Matlab y el diseño de filtros digitales
- Fir and Iir Digital Filter Design Guide. Frequency Devices, Inc
- González, Javier. Implementación de filtros adaptativos en DSP aplicados al tratamiento de interferencia de 60 Hz y desplazamiento de la línea de base del ECG.
- Lagunas, Miguel Ángel. El filtro de Weiner. 2003

## DIRECCIONES WEB

- <http://www.iberchip.org/iberchip2006/ponencias/8.pdf>
- [http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXII/documentos/A\\_06\\_IC.pdf](http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXII/documentos/A_06_IC.pdf)
- [http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod\\_sevilla/archivos/revistaense/n19/matlab.pdf](http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_sevilla/archivos/revistaense/n19/matlab.pdf)
- <http://www.freqdev.com>
- <http://energiaycomputacion.univalle.edu.co/edicion24/24art3.pdf>