

Implementación en Tiempo Real de un Sistema Digital de Audio Basado en un Filtro Analógico Tipo Butterworth

Gonzalez Salazar Dalia [dayko_831@hotmail.com]
Ayin Castro Mario [ario77_ayin@hotmail.com]
Hidalgo Arellano Salvador Indra [sharellax@hotmail.com]
Asesor: Luis Rizo [lrizo@ucaribe.edu.mx]

Universidad del Caribe
Cancun, Quintana Roo, México.

30 de noviembre de 2010

Resumen

La investigación se realizó a partir de los ecualizadores de audio que tienen variaciones de audio que ocasionan problemas de recepción, por lo que la frecuencia debe ajustarse en tiempo real, para lograr la calidad requerida del sonido. En este documento se explica la implementación en tiempo real de un ecualizador de audio usando un Procesador Digital de Señales (DSP) que permita entender de una manera práctica el estudio de procesamiento de señales y aplicarlas al tratamiento digital de las mismas. Para ello, se modelarán e implementarán filtros de audio digitales que cubran las características de los filtros analógicos, logrando así una mejor respuesta en frecuencia y un filtrado de audio en tiempo real.

1. Introducción

En la actualidad podemos observar constantes reuniones y eventos sociales que implican la presencia de muchas personas, eventos como obras teatrales, conciertos, conferencias, etc., mismas que se llevan a cabo en diferentes ambientes, pudiendo ser en espacios cerrados (salones, auditorios) o en espacios al aire libre como campos y canchas.

En estos eventos se utilizan diversos aparatos de audio para lograr captar la atención de los presentes, aparatos como: micrófonos, bocinas, instrumentos musicales, y ecualizadores de audio que son encargados de cortar componentes de frecuencia para lograr una mejor calidad del sonido. Sin embargo existen variaciones de audio debido a que el sonido cambia dependiendo de las personas

que se encuentren presentes en el lugar, o igualmente cuando la frecuencia de voz de la persona al frente del micrófono varía. Esto ocasiona problemas de recepción y claridad del sonido reproducido. Es por tal motivo que el ecualizador debe ser capaz de solucionar dichos problemas en tiempo real. En un ecualizador digital este proceso de ajuste en tiempo real puede realizarse sin problemas.

Sin embargo para los ecualizadores analógicos no se puede realizar ese ajuste en tiempo real debido a que implicaría el reemplazo total del ecualizador analógico ya que éste, está formado por componentes con valores constantes, diseñados para trabajar a una frecuencia determinada, esto es porque la frecuencia de corte de un filtro analógico no es ajustable en tiempo real.

Se podría entonces optar por utilizar ecualizadores digitales que permitan resolver los problemas de audio en tiempo real, pero se requiere tomar en cuenta que la respuesta en frecuencia de un filtro analógico es mejor que el de un filtrado digital. Por tanto se plantea mapear las características de los filtros analógicos y aplicarlos a filtros digitales.

El modelado de filtros analógicos para su implementación a filtros digitales resulta ser más económico que usar una consola analógica. El filtrado digital que se propone persigue las ventajas analógicas de respuesta en frecuencia. Por último, el costo de computación de un sistema discreto se reduce respecto a una simulación analógica.

La ecualización de audio es una técnica que consiste en aumentar o cortar ciertos componentes de frecuencia de una señal determinada para la mejora de la calidad del sonido[1]. Los ecualizadores de audio pueden ser clasificados en dos grupos principales: ecualizadores gráficos y ecualizadores paramétricos. Mientras que los ecualizadores paramétricos reciben su nombre del hecho de que los parámetros de los filtros son totalmente ajustables, los ecualizadores gráficos deben su nombre al hecho de que las posiciones relativas de los deslizadores construyen una imagen gráfica de la magnitud de respuesta deseada. Los ecualizadores paramétricos se pueden controlar cambiando varios parámetros específicos, tales como la frecuencia de corte, frecuencia central o media, factor de ganancia, ancho de banda, etc.

En el caso de los ecualizadores gráficos solamente se controla con los sliders, la ganancia (amplificación y atenuación) manteniendo la frecuencia central o media sin cambios. Un ecualizador gráfico es un conjunto de filtros pasa bandas cada uno con una frecuencia central fija y cierto ancho de banda. Donde la primera y última banda son respectivamente filtro pasa bajo/alto[2]. Teniendo en cuenta que la norma ISO da frecuencias centrales prescritas con sus anchos de banda respectivos, la complejidad previamente observada en ecualizadores paramétricos es totalmente reducida.

Actualmente en el mercado existen los ecualizadores analógicos, digitales, paramétricos y los más difundidos los gráficos. Los ecualizadores comerciales existentes varían en precio entre los 500 hasta 4000 dls. ADC (Audio Dynamics Corporation), es una empresa pionera en la fabricación de los mejores ecualizadores del mundo. Es reconocida por la gran calidad de sus diseños, componentes y sonido, ya que su frecuencia de respuesta en diversas escalas de frecuencia los distingue de otros ecualizadores. Entre los modelos que están en el mercado son: SOUND SHARPER TWO, SOUND SHARPER THREE (PARAGRAFICO), SS100SL, 200, ONE TEN, ELEVEN, MKIII, etc. En la actualidad no existe la empresa que manufacture estos ecualizadores debido que en su tiempo diversos factores obligaron a esta empresa a cerrar, por lo cual, en nuestro país no se encuentra una sucursal y mucho menos un mercado directo en el cual se puedan adquirir dichos artículos, lo que obliga a los consumidores a buscarlos en mercados de reventa tales como son Mercado libre, BazarVirtual, entre otros. Donde el precio varía entre los 1600 hasta los 5000 pesos, siendo así ecualizadores de bajo costo pero con poca probabilidad de localización.

El 15 de septiembre de 2005, se reveló la patente de Aram Lindahl y Joseph Mark Williams. La aplicación de la patente número 20050201572 se titula: Métodos y sistema para aproximar ecualizadores gráficos utilizando un filtro dinámico de reducción[9]. Esta aplicación se refiere a mejoras en los ecualizadores gráficos de algunos modelos de iPods. Por ejemplo, iTunes puede desplegar un ecualizador gráfico en ciertos tipos de ordenadores, la configuración de ciertos elementos pueden ser transferidos de iTunes al iPod. Esta técnica está siendo utilizada en la actualidad por la empresa APPLE.

Marcas como Sony, Kenwood, Panasonic, Yamaha, Behringer, Onkyo, Radox, entre lo más conocidos, se dedican a la distribución de productos electrónicos, entre ellos, los ecualizadores profesionales (aparatos físicos). Winamp, PcAudi, Voice Changer, AIMO Nokia, Orion Pro, SkiniTunes Basic, por mencionar algunos, son ecualizadores digitales para PC, la mayoría de ellos gratis o de prueba por un mes, con la intención de al ser usados por el usuario sea de su agrado y decidan adquirir la licencia del programa. Pocos son los autores que dejan el código abierto, para otros usuarios.

Los filtros analógicos son más baratos, rápidos y tienen un gran rango dinámico tanto en amplitud como en frecuencia y los filtros digitales son enormemente superiores en el nivel de cumplimiento que los analógicos. Nuestra solución es tomar lo mejor de estos ecualizadores e implementar en un Procesador Digital de Señales (DSP) un ecualizador digital con las propiedades de un analógico a una fracción del costo de los ecualizadores del mercado. Para el diseño del ecualizador se propone utilizar un filtro analógico de tipo Butterworth, que es una estrategia matemática para lograr un corte agudo y un respuesta plana en la banda de paso debido a que una de sus características principales es la ausencia de rizos en las bandas de paso, que es lo que se espera al filtrar una señal

de audio. Por lo tanto con la implementación de un filtro tipo Butterworth se lograrán la precisión y exactitud típicas de la electrónica analógica en el paso de la señal y las ventajas tecnológicas de los filtros digitales.

2. Propuesta

Se podría entonces optar por utilizar ecualizadores digitales que permitan resolver los problemas de audio en tiempo real, pero se requiere tomar en cuenta que la respuesta en frecuencia de un filtro analógico es mejor que la del filtrado digital. Por tanto se plantea mapear las características de los filtros analógicos y aplicarlos a filtros digitales.

2.1. Filtros

Un filtro eléctrico o electrónico es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase. Actualmente hay dos tipos de filtros, analógico y digital.

2.1.1. Filtro Analógico

Un filtro analógico utiliza circuitos electrónicos que hacen uso de resistencias, condensadores y amplificadores para producir el efecto requerido en el filtrado. En todas las etapas, la señal que se filtra es un voltaje eléctrico o corriente como puede ser la analógica directa de una cantidad física (un sonido, una señal de video) compleja [Fig.1].

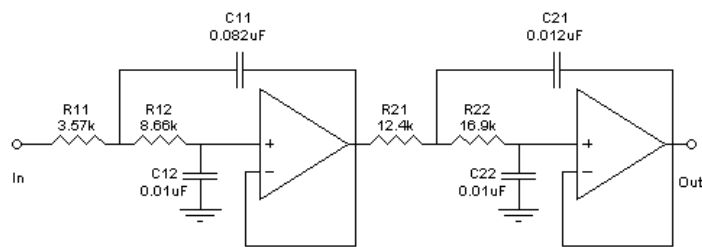


Figura 1: Diagrama de un filtro analógico

2.1.2. Filtro Digital

Un filtro digital es un algoritmo matemático, expresable como una ecuación en diferencias en implementación de hardware y/o software, estos filtros debe ofrecer un proceso selectivo en frecuencias de la señal de entrada[Fig.2].

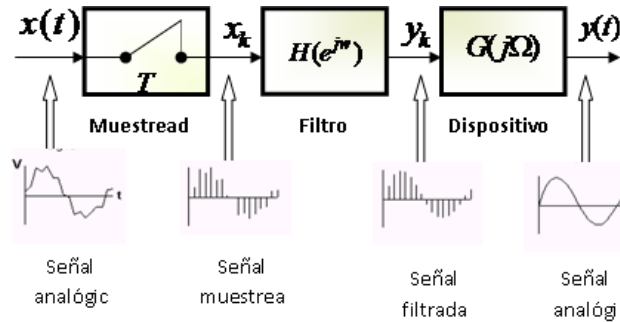


Figura 2: Configuración básica de un filtrado digital

Para hacer la implementación en tiempo real de un sistema de audio, se utiliza un filtro digital, ya que su función está determinada por un programa almacenado en el procesador. Así que, cuando se requiere cambiar el filtro, puede ser cambiado fácilmente sin modificar su circuitería (hardware).

2.1.3. Parámetro de un filtro digital

Dominio del tiempo: La descripción del momento de ocurrencia de eventos y la magnitud del evento. Está codificada en el dominio del tiempo, es decir, en la forma de onda. Las modificaciones en la información en el dominio del tiempo están mejor especificadas en la respuesta al escalón del filtro.

Dominio de la frecuencia: La descripción de las características de eventos de naturaleza oscilatoria está representada en el dominio de la frecuencia. El objetivo de estos filtros es la de permitir que algunas señales pasen inalterables, mientras se realiza un bloqueo a las otras frecuencias. En la banda de paso se refiere las frecuencias de paso, mientras que en la banda de interrupción se sitúan aquellas frecuencias que no pasan. Un apagado rápido indica que la banda de transición es muy estrecha. La división entre la banda de paso y la banda de transición es llamada como la frecuencia de corte [10].

Por lo anterior, especificamos que en el sistema de audio realizado trabajamos con filtros en el dominio de la frecuencia, ya que se trabaja en base a la amplitud, la frecuencia y la fase de la componente sinusoidal y no en la información codificada en la forma de onda de la señal.

2.1.4. Tipos de los filtros digitales. Criterios de selección

Los filtros digitales pueden realizarse como filtros de respuesta impulsional infinita (IIR) o de respuesta impulsiones (FIR). Filtro FIR, es un tipo de filtro digital que si su entrada es un impulso (una delta de Kronecker) la salida será un número limitado de términos no nulos. Para obtener la salida solo se emplean

valores de la entrada actual y anterior. También se llaman filtros digitales no recursivos.

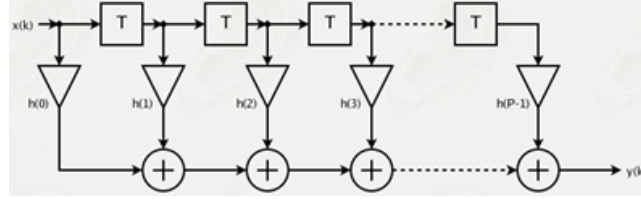


Figura 3: Estructura de un filtro FIR

La cual se puede ver reflejada en la aplicación de la transformada Z:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k z^{-k} = h_0 + h_1 z^{-1} + \dots + h_{N-1} z^{-(N-1)} \quad (1)$$

Se puede ver que es la misma entrada retardada cada vez más en el tiempo, multiplicada por diversos coeficientes y finalmente sumada al final. Si tenemos una respuesta de frecuencia como objetivo, conseguiremos que la respuesta del filtro se asemeje mas a ella cuanto más largo sea o número de coeficientes tenga.

El filtro IIR es un tipo de filtro digital que si su entrada es un impulso (una delta de Kronecker) la salida será un número ilimitado de términos no nulos, es decir, que nunca volverá a estado de reposo. Para obtener la salida se emplean valores de la entrada actual y anterior y, además valores de salida anteriores que son almacenados en memoria y realimentados a la entrada. También se llama filtros recursivos [Fig.4].

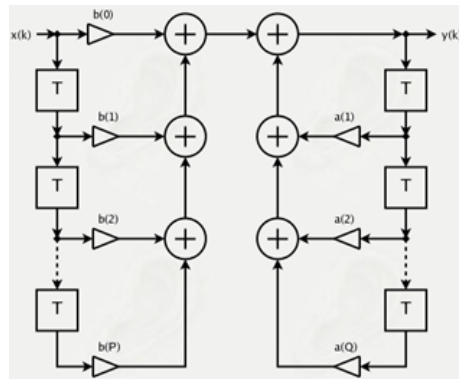


Figura 4: Estructuras para un filtro IIR

Se puede ver como la salida $y(K)$ es introducida de nuevo en el sistema. La transformada del mismo es:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^P b_i z^{-i}}{\sum_{j=0}^Q a_j z^{-j}} \quad (2)$$

A continuación se hace una comparación de las características de los dos tipos de filtros digitales: Los filtros FIR tienen una mejor ejecución que los filtros IIR, pero su ejecución es mucho más lenta. Los filtros FIR son estables puesto que solo tienen polos, esto se refiere a los elementos en el numerador en su función de transferencia. Los filtros FIR pueden diseñarse para ser de fase lineal, es decir, no introducen desfases en la señal, a diferencia de los IIR o los filtros análogos.

La ventaja de los filtros IIR respecto a los FIR es que pueden conseguir una misma respuesta empleando un número de coeficientes en el filtro mucho menor, requiriendo un menor tiempo de cálculo.

El sistema de audio digital, debe estar hecho con un filtro que se adecue a las características para mejorar el sonido, a simple vista, elegir un filtro FIR, sería nuestra mejor opción ya que se tienen interés en audio, pero como emplea un número de coeficientes en el filtro mucho mayor, requiere un mayor tiempo de cálculo que puede dar problemas en aplicaciones en tiempo real, como estudio de grabación o conciertos en directo. Por lo que, hacemos uso de filtro IIR.

2.1.5. Tipos de filtros IIR

Los filtros IIR se clasifican dependiendo del diseño, estos son:

Filtros Butterworth: Maximiza una amplitud plana en la banda de paso ($\epsilon=0.7041$). Es el filtro más simple, esto dado a su configuración polo/cero directa de la función de transferencia en el plano s , pero es el que requiere de mayor orden. Todos los polos están sobre un círculo centrado en el origen del plano s y todos los ceros están en el infinito, por eso los filtros Butterworth son filtros todos polo.

Filtros Chebyshev: El filtro Chebyshev tiene la banda de transición más pequeña, el Chebyshev I maximiza la pendiente fuera de la banda de paso, tiene rizo en la banda de paso y es monolítico fuera de ella. El Chebyshev II tiene una respuesta monolítica en la banda de paso y rizo en la de rechazo.

Filtro Elíptico: Es una combinación del Chebyshev I y II, maximiza el ancho de la banda de transición. Permite rizo en la banda de paso y una atenuación mínima en la rechazo. Analíticamente es más complicado, pero es el que requiere el menor orden. Filtro Bessel: Maximiza una respuesta en fase lineal (implica un retraso en grupo constante). Tiene una menor atenuación en la banda de rechazo que un filtro Butterworth de igual orden y ancho de banda. Estos filtros conservan la forma de onda. Para el diseño de la solución nos basamos en los filtros analógicos tipo Butterworth.

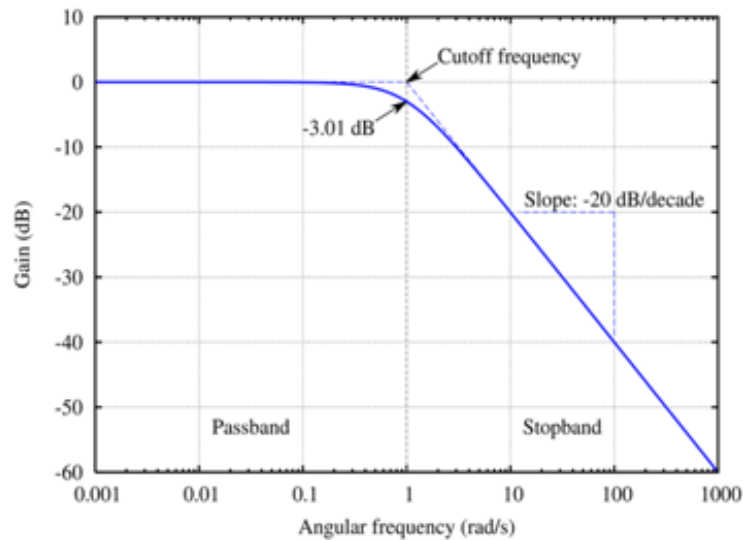


Figura 5: filtro de Butterworth

La respuesta en frecuencia de un filtro de Butterworth es una estrategia matemática para lograr un corte agudo y una respuesta plana en la banda de paso. Por lo tanto con la implementación de un filtro tipo Butterworth en un DSP se lograrán la precisión y exactitud típicas de la electrónica analógica y las ventajas tecnológicas de los filtros digitales.

La siguiente imagen, hace una comparación de Butterworth con otros filtros, esto demuestra gráficamente por que este filtro es la mejor opción en la aplicación. A pesar de que Chebyshev I y II dan una mejor respuesta en la frecuencia de corte (lo que necesitamos para la aplicación), existen rizados tanto en la banda de paso como en la respuesta de frecuencia normalizada[Fig.6].

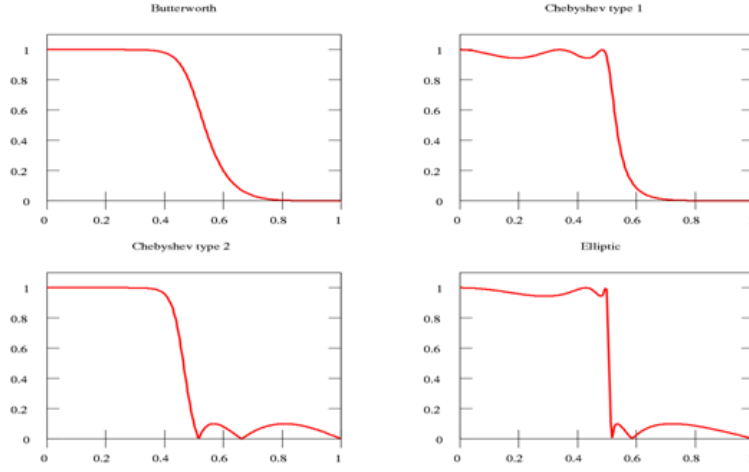


Figura 6: Comparación de Butterworth con otros filtros

2.1.6. La función de la transferencia

En un filtro tipo Butterworth, la forma de la curva de la respuesta a la frecuencia del filtro obtenida usando la función de transferencia se puede diseñar con estructuras preestablecidas y de acuerdo a la posición de las raíces del polinomio característico en el plano complejo S . La estructura tipo Butterworth corresponde a una respuesta sin rizado en el dominio de la frecuencia. Además el comportamiento dinámico de la respuesta en el tiempo para un sistema Butterworth se aproxima a la respuesta de un sistema crítico amortiguado (factor de amortiguamiento = 0.707).

La manera de obtener la respuesta en algún simulador es introducir la función de transferencia del filtro, a continuación se presentan las funciones de transferencia de los filtros implementados.

Función de transferencia de un filtro pasa bajas de primer orden:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{K}{Sw_0 + 1} \quad (3)$$

De forma que solo se requiere de una resistencia y un capacitor para obtener la respuesta del filtro:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{K}{RCS + 1} \quad (4)$$

Función de transferencia de un filtro pasa bajas de segundo orden:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{K}{S^2 + S\frac{w_0}{Q} + w_0^2} \quad (5)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{k \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{S^2 + S \left[\frac{(R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1 (1-k))}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right] + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (6)$$

Para determinar los polos de un filtro Butterworth de orden n, se deben de encontrar las raíces del denominador. La respuesta a la frecuencia de un filtro pasa bajas normalizado óptimo de orden n. Esta dado por:

$$Av(jw) = \frac{AF}{\sqrt{1 + w^2}} \quad (7)$$

Dado que el filtro es estable, los polos en el semiplano izquierdo pertenecen a $Av(s)$ (que se toman en cuenta para el diseño del filtro) y los polos del semiplano derecho a $Av(-S)$

2.1.7. Polinomios normalizados de Butterworth

n	Polinomio $B_n(s)$
1	$(s + 1)$
2	$(s^2 + 1,414s + 1)$
3	$(s + 1)(s^2 + s + 1)$
4	$(s^2 + 0,765s + 1)(s^2 + 1,848s + 1)$
5	$(s + 1)(s^2 + 0,618s + 1)(s^2 + 1,618s + 1)$
6	$(s^2 + 0,518s + 1)(s^2 + 1,414s + 1)(s^2 + 1,932s + 1)$
7	$(s + 1)(s^2 + 0,445s + 1)(s^2 + 1,247s + 1)(s^2 + 1,802s + 1)$
8	$(s^2 + 0,390s + 1)(s^2 + 1,111s + 1)(s^2 + 1,663s + 1)(s^2 + 1,962s + 1)$

Figura 7: Polinomios normalizados de Butterworth

Los polinomios de Butterworth se pueden escribir en forma compleja como arriba, pero son escritos generalmente con coeficientes verdaderos multiplicando los pares del poste que son conjugaciones complejas, por ejemplo s_1 y s_n . Los polinomios son normalizados fijando $w_c = 1$. Los polinomios normalizados de Butterworth entonces tienen la forma general: Para n incluso
Para n impar

A cuatro lugares decimales, están [Fig.7]:

En este caso, se trabajo en orden 4. Debido a que trabajar con un orden menor no arroja el resultado que se requiere, y en la aplicación de una orden de mayor grado implica mayor complejidad.

El filtro digital traba en conjunto con un DSP (digital signal processor) que es un procesador digital de señales, es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Como es un sistema digital, por lo tanto necesitará un conversor analógico/digital a su entrada y digital/analógico en la salida. Con el DSP se hacen las pruebas finales, para lograr que el filtro digital haga su trabajo.

3. Resultados

Al tener estudiadas las técnicas de diseño de filtros analógicos, se realizó el proceso de diseño de un filtro digital que requiere de tres pasos:

1. Establecer las especificaciones del filtro para unas determinadas prestaciones. Estas especificaciones son las mismas que las requeridas por un filtro analógico: frecuencias de parabanda y pasabanda, atenuaciones, ganancia dc, etc.
2. Determinar la función de transferencia que cumpla las especificaciones.
3. Realizar la función de transferencia en software.

La técnica que se utilizo fue mediante métodos de diseño analógico, seguido de una transformación del plano s al plano z.

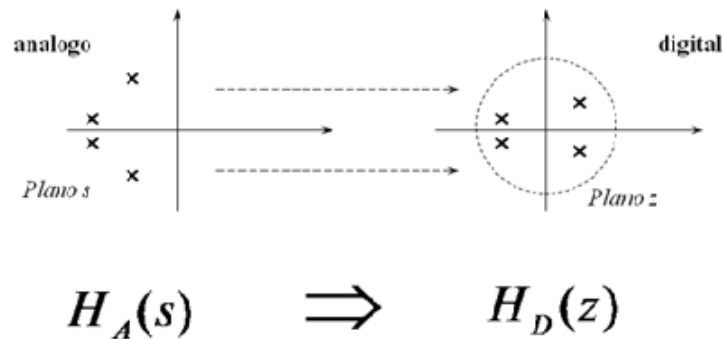


Figura 8: Transformacion Plano S a Plano Z

Existen varios métodos para transformar una función de s en otra función de z. El método utilizado en esta ocasión es el de transformación bilineal. Este método consiste en obtener el filtro digital integrando la ecuación diferencial

correspondiente al filtro analógico y realizando una aproximación numérica de la misma.

Si $H_c(s)$ es la función del sistema en tiempo continuo y $H(Z)$ la función del sistema en tiempo discreto, la transformación bilineal corresponde a sustituir s por:

$$s = \frac{2}{T} * \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (8)$$

A partir de la ecuación es posible demostrar que las frecuencias continuas y discreta están relacionadas de la siguiente forma:

$$\Omega = \frac{2}{T} \tan(w/2) \quad (9)$$

$$\omega = 2 \arctan(\Omega T_d / 2) \quad (10)$$

Al utilizar la transformación bilineal para el diseño de filtros digitales, las frecuencias críticas del filtro de tiempo discreto deben ser descomprimidas a las frecuencias de tiempo continuo correspondientes usando la ecuación 10 de modo que la distorsión inherente en la transformación bilineal mapee las frecuencias de tiempo continuo a las frecuencias de tiempo discreto correctas.

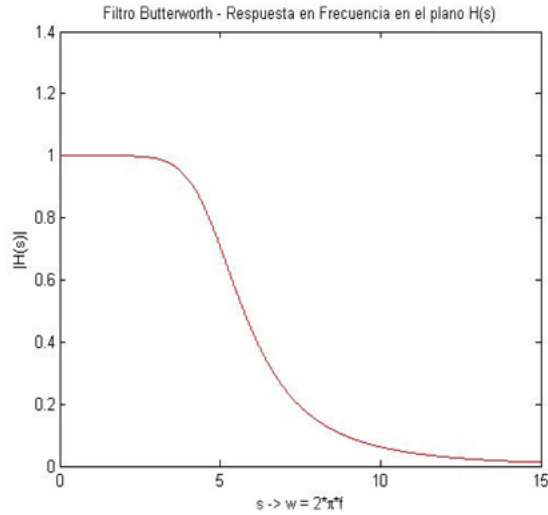


Figura 9: Respuesta de Frecuencia en el Plano s

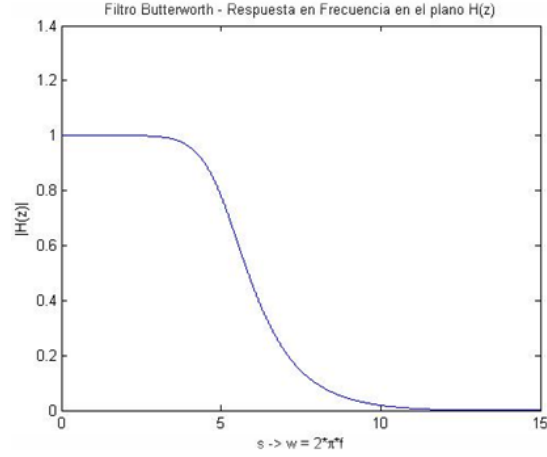


Figura 10: Respues de Frecuencia en el Plano z

En las imágenes Fig.9 y la Fig.10, se hace la comparación de la respuesta de frecuencia en el plano $H(s)$ de un filtro analógico y la respuesta de frecuencia en el plano $H(z)$ de un filtro digital. Esto nos muestra que al hacer la conversión de una señal analógica a digital, el resultado es similar a la señal de entrada.

También se especifica que se trabajó con una frecuencia de corte $f_c = 2\,000$ HZ y una frecuencia de muestreo $f_s = 48\,000$ Hz.

La frecuencia de corte del filtro digital normalizada viene dada por la siguiente ecuación:

$$\Omega_c = \frac{2\pi f_c}{f_s} \quad (11)$$

Sustituyendo:

$$\Omega_c = \frac{2\pi f_c}{48000} = 0,261 \quad (12)$$

El filtro análogo equivalente de la frecuencia de corte ω_{ac} :

$$\omega_{ac} = K * \tan\left(\frac{\Omega_c}{2}\right) \quad (13)$$

Sustituyendo:

$$\omega_{ac} = 1 * \tan\left(\frac{0,261}{2}\right) = \tan(0,1305) = 0,131 \text{ rad/seg} \quad (14)$$

Para obtener la función de transferencia de un filtro pasa bajas de primer orden se utilizó la siguiente fórmula:

$$H(s) = \frac{1}{1 + S} \quad (15)$$

donde:

$$S = \frac{S}{\omega_{ac}} \quad (16)$$

Sustituyendo:

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{S}{0,131}} \quad (17)$$

$$S = \left[\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right] \quad (18)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{0,131} \left[\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right]} = \frac{1}{1 + \frac{1 - z^{-1}}{0,131 + 0,131 z^{-1}}} \quad (19)$$

$$H(s) = \frac{0,131 + 0,131 z^{-1} + 1 - z^{-1}}{0,131 + 0,131 z^{-1}} = \frac{0,131 - 0,869 z^{-1}}{0,131 + 0,131 z^{-1}} \quad (20)$$

Función de transferencia de un filtro pasa bajas de segundo orden, donde la frecuencia de muestreo es $f_s = 24\ 000$ Hz:

$$H(s) = \frac{K}{S^2 + S \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (21)$$

Sustituyendo:

$$H(s) = \frac{1}{1 + 1,4142(s) + s^2} \quad (22)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + 1,4142 \left(\frac{s}{0,1316} \right) + \left(\frac{s}{0,1316} \right)^2} \quad (23)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + 1,4142 \frac{\frac{z-1}{z+1}}{0,1316} + \left(\frac{\frac{z-1}{z+1}}{0,1316} \right)^2} \quad (24)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 - 14826359(z^2) - \frac{6250000(z^2) * (216482(z) + 108241)}{108241(z^2)} + 3923641 - \frac{6250000(z^2)}{108241(z^2)} - \frac{7729}{658}} \quad (25)$$

$$H(s) = \frac{216482(z+1)^2}{15042841(z^2) - 24567036(z) + 10390123} \quad (26)$$

$$\frac{0,0144z^2 + 0,0288z + 0,0144}{z^2 - 1,633z + 0,690} \quad (27)$$

Para obtener la función de transferencia de un filtro pasa altas de primer orden se utilizó la siguiente fórmula:

$$H(s) = \frac{k}{1 + \frac{1}{S}} \quad (28)$$

Sustituyendo:

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{0,1316}{S}} \quad (29)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + (0,1316) \frac{[1]}{\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}}} \quad (30)$$

$$H(z) = \frac{1}{1 + [(0,1316)(1 + z^{-1})(\frac{1}{1-z^{-1}})]} = \frac{1}{1 + [0,1316 + 0,1316z^{-1}(\frac{1}{1-z^{-1}})]} \quad (31)$$

$$H(z) = \frac{1}{1 + \frac{0,1316}{1+z^{-1}} + \frac{0,1316z^{-1}}{1-z^{-1}}} = \frac{1}{\frac{1-z^{-1}+0,1316+0,1316z^{-1}}{1-z^{-1}}} \quad (32)$$

$$H(z) = \frac{1 + z^{-1}}{1,1316 - 0,8684z^{-1}} \quad (33)$$

Función de transferencia de un filtro pasa altas de segundo orden, donde la frecuencia de muestreo es fs= 24 000 Hz. de la ecuacion 22

$$H(s) = \frac{1}{1 + 1,4142(\frac{1}{\frac{s}{0,1316}}) + (\frac{1}{\frac{s}{0,1316}})^2} \quad (34)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + 1,4142 \frac{1}{\frac{z-1}{z+1}} + \left(\frac{1}{\frac{z-1}{z+1}}\right)^2} \quad (35)$$

$$H(s) = \frac{1}{\frac{2542841z + \frac{108241z^2(12500000z - 6250000)}{6250000(z-1)^2}}{6250000(z-1)^2} + \frac{108241z^2}{6250000^2} + \frac{14826359}{12500000}} \quad (36)$$

$$H(s) = \frac{12500000(z-1)^2}{15042841(z^2) - 24567036(z) + 10390123} \quad (37)$$

$$\frac{0,8309z^2 - 1,66z + 0,8309}{z^2 - 1,63z + 0,690} \quad (38)$$

Para realizar filtros de orden superior, se construyen usando filtros de primer y de segundo orden conectados en cascada. Los valores de los componentes deben de seleccionarse para obtener una respuesta máximamente plana en la banda de paso al interconectar todas las etapas.

Para el filtro realizado se hicieron 4 cálculos, 2 filtros de 1er y 2do orden pasa bajas y 2 filtros de 1er y 2do orden pasa altas [Fig11 y Fig12].

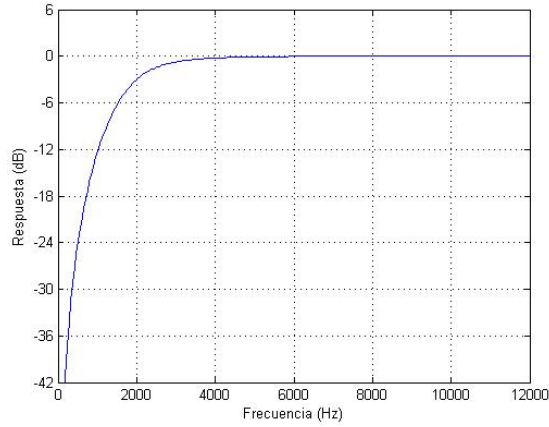


Figura 11: Filtro de 2000 Hz Pasa Altos IIR de 2do Orden. Fs= 48000 Hz

Para el filtro realizado de 4to orden se hizo en cascada dos filtros de 2do orden [Fig.13].

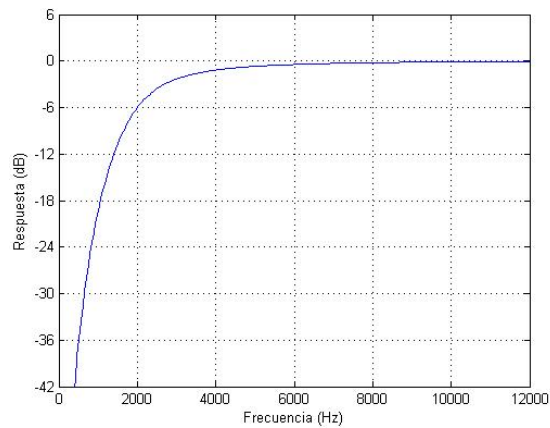


Figura 12: Filtro de 2000 Hz Pasa Altos IIR de 3er Orden. $F_s=48000$ Hz

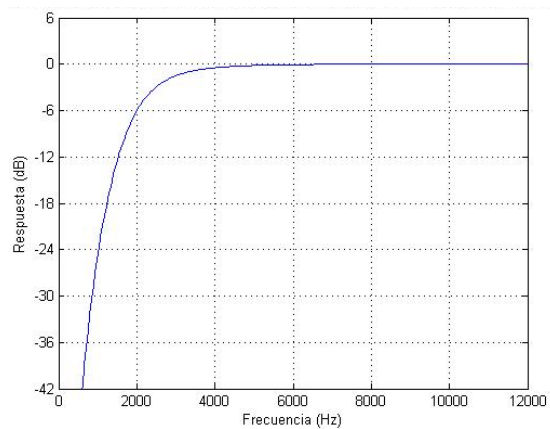


Figura 13: Filtro de 2000 Hz Pasa Altos IIR de 4to Orden. $F_s= 48000$ Hz

Este método, nos ayuda a realizar menos cálculos y calcular filtros de mayor orden de manera más rápida. Por ejemplo, si queremos realizar ahora un filtro de 6to orden, se ponen en cascada un filtro de 4to orden como se hizo en el paso anterior con uno de 2do orden [Fig.14].

Al tener listo el filtro digital tipo Butterworth de 4to orden, se realizaron las últimas pruebas con la Tarjeta DSP [Fig.15].

El filtro se programa en Matlab donde es pre compilado. DSP recibe valores digitales o samples procedentes de la señal de entrada, calcula qué salida se obtendrá para esos valores con el filtro que se le ha programado y saca esa salida en tiempo real.

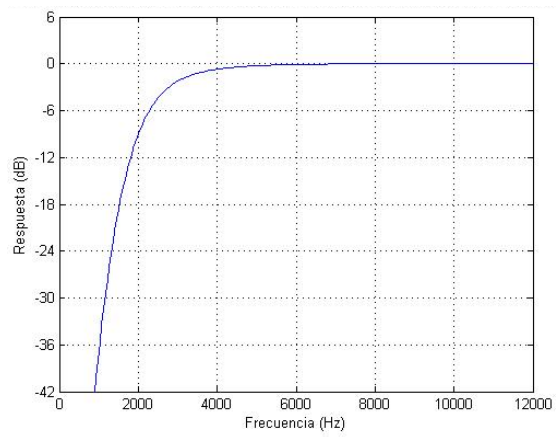


Figura 14: Filtro de 2000 Hz Pasa Altos IIR de 6to Orden. $F_s=48000$ Hz

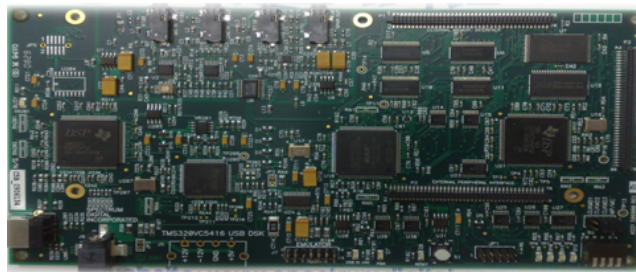


Figura 15: DSP de Texas Instrument, modelo TMS320VC5416

Para esta demostración se dispuso de una placa de desarrollo de Spectrum Digital con un DSP de Texas Instrument, modelo TMS320VC5416 [Fig.15], esta placa tiene conectividad USB y el compilador Code Composer (software de instalación) con capacidad de interactuar con Matlab y Simulink.

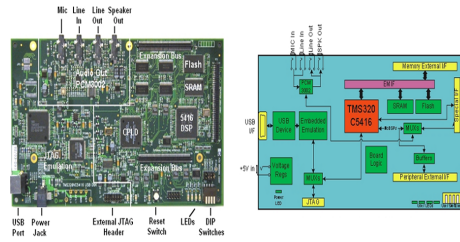


Figura 16: Componentes de un DSP



Figura 17: Tarjeta DSP funcionando

4. Conclusion

Aprovechar las ventajas y la simplicidad del diseño analógico y simular con filtros digitales las características de los filtros analógicos, nos demostró que realizar los diseños en programas de simulación como lo es MatLab, tiene la ventaja de facilitar el profundo análisis matemático, logrando así la reducción del análisis del comportamiento de los filtros digitales y darnos una idea de lo que realmente está haciendo el sistema de filtrado en tiempo real, como es el caso de los Filtros PasaBajas y PasaAltas Butterworth, ya que estos sistemas la única forma de analizar su comportamiento es tomando muestras a la frecuencia de muestreo.

En este trabajo, se propuso una técnica para el diseño, simulación, y la realización del programa basado en DSP de filtros recursivos digitales. Usando los polinomios de Butterworth y la transformación bilineal para el mapeo del plano s al plano z se obtuvo los coeficientes, la frecuencia y las respuestas del dominio de tiempo con una longitud de palabra finita. La realización de la función de transferencia se simuló con Matlab y Simulink el cual generó el código fuente



Figura 18: Tarjeta DSP

DSP para la tarjeta Texas Instrument DSP TMS320C5416.

Usando Code Composer Studio de Texas Instrument se creó un proyecto, se compiló con Visual Linker, y se cargó en la tarjeta TMS320C5416 DSK. La efectividad de la aproximación propuesta en este trabajo quedó demostrada con el diseño de filtros pasa bajas y pasa altas del tipo IIR Butterworth, ideales para la ecualización de audio.

Referencias

- [1] Proakis, J.G., Manolaski, D.G., Digital Signal Processing: A Practical Approach. Addison-Wesley, 1996.
- [2] Dennis A. Bohn Constant-q graphic equalizers. Audio Eng Soc., Vol.34, no.9, 1986.
- [3] Yoder, Mark. IIR Digital Filter Design Using MATLAB fdatool Filter Design Program IIR Filter Implementation via C-language Program.
- [4] TMS320VC5416 DSK Technical Reference, Spectrum Digital Incorporated, April 2004. Code Composer Studio User's Guide, Texas Instruments, February 2000.
- [5] www.mathworks.com/products/
- [6] D.A.S Audio, 2010. En internet: <http://www.dasaudio.com/>
- [7] Ecualizador Audio, 2007. En internet: <http://proyectoselectronics.blogspot.com/2007/11/ecualizador-audio.html>
- [8] Filtros de Frecuencia,. En internet: <http://www.galeon.com/senales/aficiones1349723.html>
- [9] Noticias y Tecnologia para el mundo MAC, 2010. En Internet: <http://www.faq-mac.com>
- [10] Diseño de Filtros Digitales, 2006. En internet: <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/TL03904M.pdf>