



Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica

Procesamiento Digital de Señales

Informe de Proyecto:

Ecualizador digital

Profesor:

Ing. José Miguel Barboza Retana

Camila Gómez Molina - 2014089559
Steven León Domínguez - 2014138025

4 de diciembre de 2017

1. Consideraciones previas

El ecualizador es un sistema que modifica la ganancia de frecuencias específicas de una señal de audio, con lo que se logra cambiar la intensidad de distintos tonos presentes en la señal.

Existen analógicos y digitales. Consiste en un banco de filtros pasa bandas (BPF) y suelen tener, al menos, 10 bandas, comúnmente posicionadas en 31, 64, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 y 16000 Hz.

Las frecuencias centrales en la banda de paso de los filtros normalmente se encuentran distribuidas de forma logarítmica con el fin de asemejarse a la escala de frecuencias del oído humano.

2. Diseño del ecualizador

El ecualizador implementado es de 10 bandas de paso, o bien, 10 filtros de control; además, cuenta con 9 modos de ecualización predeterminados para su uso: Classical, Club, Dance, Full Bass & Treble, Full Treble, Pop, Reggae, Rock y Techno.

2.1. Diagrama de bloques del ecualizador

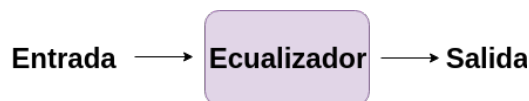


Figura 1: Diagrama de bloques de primer nivel del ecualizador.

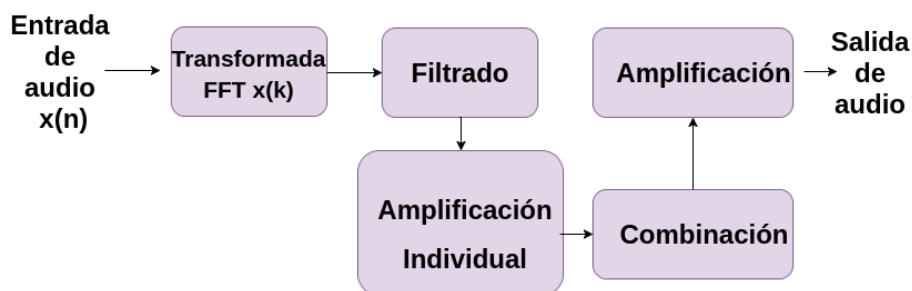


Figura 2: Diagrama de bloques de segundo nivel del ecualizador.

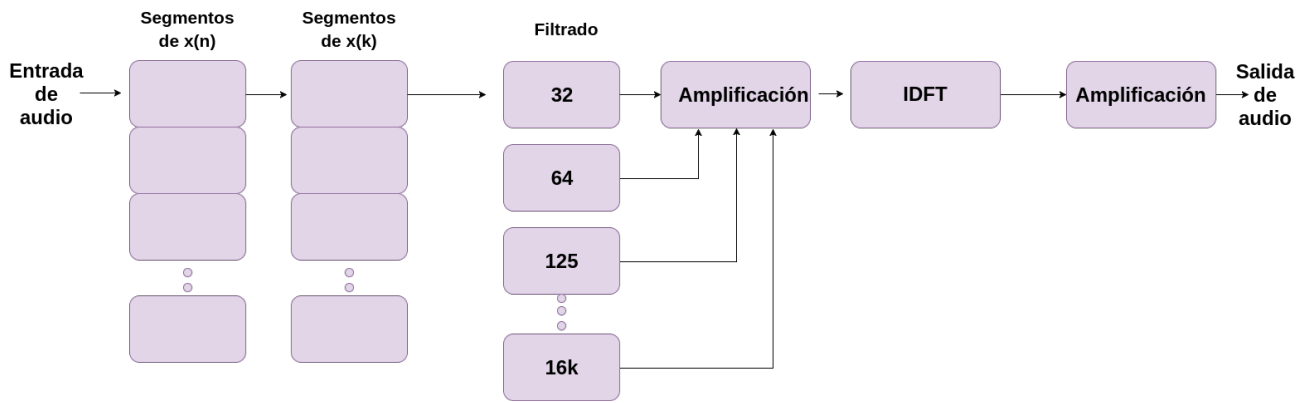


Figura 3: Diagrama de bloques de tercer nivel del ecualizador.

Las figuras 1, 2 y 3 muestran diagramas de bloques que describen el diseño del ecualizador.

La entrada es una señal de audio digital (muestreada), obtenida de un archivo de audio en formato *.wav*, a esta señal se le calcula Transformada Discreta de Fourier (DFT) para luego ser filtrada en el dominio de la frecuencia.

Una vez filtrada la señal, utilizando la Transformada Inversa Discreta de Fourier (IDFT), la señal filtrada se transforma en una señal temporal, la cual se reproduce usando los recursos de audio del computador.

El filtrado consiste en 3 partes básicas:

1. Se toman como parámetros las constantes que definen la respuesta (o ecuación de diferencias) de los filtros previamente diseñados, con estas se calcula la respuesta al impulso de los mismos.
2. Una vez obtenida la respuesta al impulso de los filtros, a esta señal se le calcula la DFT.
3. Por último, se realiza el filtrado en el dominio de la frecuencia mediante el método de solapamiento y almacenamiento de las señales: entrada y respuesta al impulso del filtro.

Es importante señalar que todo el procesamiento se realiza en bloques de tamaño definido; es decir, la entrada temporal se divide en bloques de muestras para ser procesada, con bloques del mismo tamaño de la respuesta al impulso. Normalmente estos bloques se utilizan de tamaño 2^n , $n = 1, 2, 3, \dots$. En este caso se utilizaron bloques de procesamiento de tamaño 1024 (2^{10}).

La frecuencia de muestreo F_s utilizada en el sistema es de 44100 Hz debido a que es el valor típico para el muestreo de señales de audio.

3. Diseño de los filtros

3.1. Especificación

Al diseñar los filtros, el énfasis era satisfacer ciertos requisitos impuestos para su respuesta en magnitud únicamente, pues la respuesta en fase de los mismos no era de importancia para la aplicación.

La respuestas en magnitud de los filtros debían cumplir con las siguientes características:

1. Ganancia unitaria o de 0 dB en su banda pasante.
2. Atenuación de banda de rechazo de alrededor de 80 dB.
3. Rizado en banda pasante menor o igual a 0.5 dB.
4. Frecuencias de corte y central de acuerdo con tabla 1.

Tabla 1: Frecuencia de operación de los filtros del ecualizador.

Número de Filtro	Frecuencia Inicial (Hz)	Frecuencia Central (Hz)	Frecuencia Final (Hz)	Ancho de Banda (Hz)
1	20	32	45	25
2	45	64	91	46
3	91	125	177	86
4	177	250	353	176
5	353	500	707	354
6	707	1000	1414	707
7	1414	2000	2828	1414
8	2828	4000	5657	2829
9	5657	8000	11314	5657
10	11314	16000	20000	8686

Para el cálculo de las frecuencias de corte se utilizó la fórmula de la ecuación (1), en donde f_0 es la frecuencia central, la exponencial positiva se utiliza para el corte superior y la negativa para el inferior.

$$f_C = 2^{\pm \frac{1}{2}} f_0 \quad (1)$$

Para el rizado en la banda pasante, a mayor frecuencia central, se utilizó un mayor rizado, era necesario para disminuir la cantidad de muestras de la respuesta al impulso cuyos valores no eran cercanos a cero.

Se deseaban pocas distintas de cero ya que así el cálculo de fft sería menos complicado a nivel de procesamiento.

Por ejemplo, en la figura 4 se muestra la respuesta al impulso del filtro cuya frecuencia central es 32 Hz, en esta se nota cómo después de 1,2 ms las muestras son básicamente nulas, por lo que no aportan información. Esto no sucede en filtros de frecuencia mayor con rizados muy bajos.

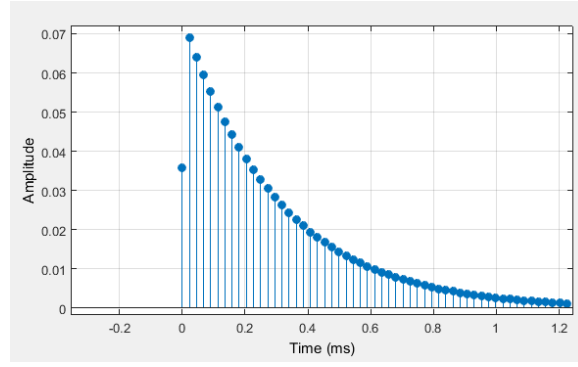


Figura 4: Respuesta impulsional del filtro con frecuencia central en 32 Hz.

3.2. Dimensionamiento

Se seleccionó diseñar todos los filtros de tipo IIR (Respuesta Impulsional Infinita), debido a que con estos implica un menor orden que los FIR (Respuesta Impulsional Finita) para tener la misma respuesta en magnitud (ganancias en las bandas de paso y rechazo).

El diseño de los filtros digitales se realizó a partir de filtros analógicos; es decir, transformando, por medio de un mapeo, un filtro analógico en digital. El filtro utilizado fue el elíptico, ya que este se caracteriza por tener un rizado constante tanto en la banda de paso, como en la de rechazo.

El orden de los filtros varía, pues a mayor frecuencia central, también es mayor el ancho de banda y necesario un orden mayor para obtener las características mínimas deseadas en la respuesta en frecuencia del filtro.

3.3. Realización

La estructura de implementación utilizada en el sistema filtrado es en paralelo, pues, tal como se muestra en el diagrama de la figura 3, esta sección es un conjunto de filtros funcionando simultáneamente, cuyos efectos se suman posteriormente para formar la señal filtrada.

Cada uno de esos filtros está representado mediante la función de transferencia de la ecuación (2) y su respectiva ecuación de diferencias corresponde a la ecuación (3).

$$H(z) = \frac{K \cdot (b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M})}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}} \quad (2)$$

$$a_0 y(n) = - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (3)$$

En donde N es el orden del filtro y las constantes o coeficientes K , a_k y b_k se obtienen mediante el diseño de los mismos con el uso de la herramienta Filter Design & Analysis Tool (FDATool) de MATLAB.

Las tablas 3 y 4 muestran la información utilizada en FDATool para la generación de los filtros diseñados.

3.4. Implementación

El sistema de filtrado se implementó usando el lenguaje de programación C++.

Con este se realizaron los cálculos implicados en el uso de DFT, con ayuda de la herramienta matemática FFT (Transformada Rápida de Fourier), de la cual existen bibliotecas para C++; además, se hicieron los cálculos correspondientes al filtrado (respuesta al impulso y algoritmo de solapamiento y almacenamiento).

4. Implementación del sistema

El ecualizador digital se implementó también haciendo uso del lenguaje de programación C++, mediante el cual se creó un archivo ejecutable o aplicación para sistemas operativos Linux, en el computador y utiliza sus recursos de audio.

La aplicación cuenta con interfaz gráfica de sencillo uso, que permite cargar un archivo de audio en formato *.wav*, reproducirlo y hacer uso del ecualizador con barras móviles en cada filtro.

También es posible modificar el volumen de reproducción y seleccionar un modo predefinido de ecualización.

Por otro lado, la interfaz cuenta con estimadores de energía en cada filtro con los cuales es posible observar el comportamiento del filtrado del ecualizador en tiempo real.

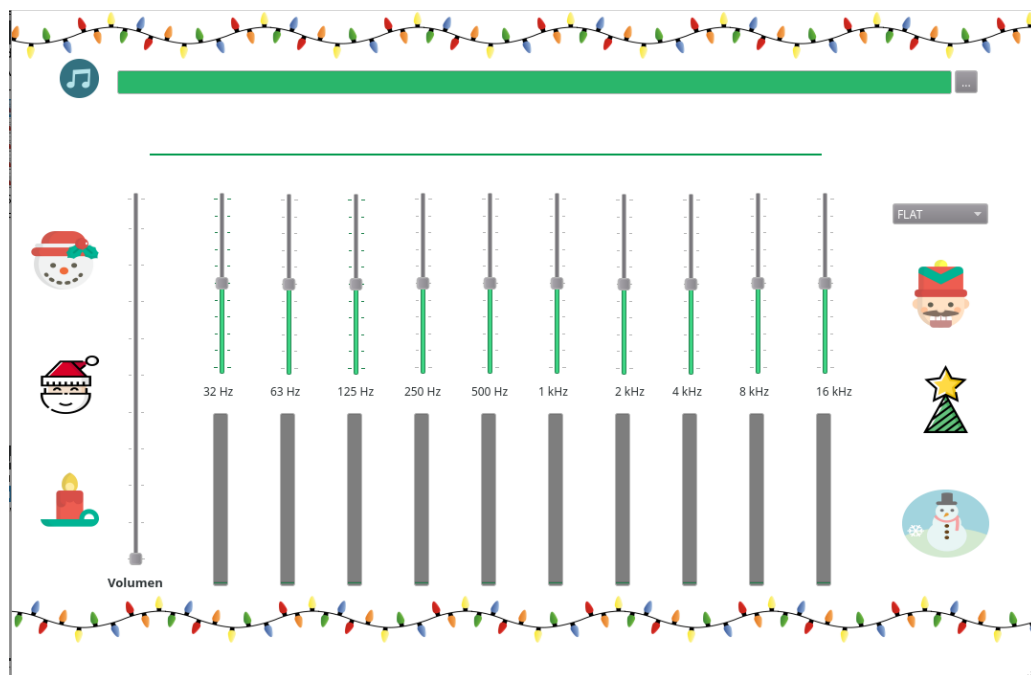


Figura 5: Interfaz gráfica del ecualizador digital.

5. Problemas de implementación

A pesar de que usar los filtros de tipo IIR prometen un mejor comportamiento del sistema, se presentaron problemas en la implementación: eran necesarias muchas muestras de la respuesta al impulso para que cada filtro del ecualizador funcionara correctamente y este procesamiento es muy pesado para el computador, tanto que no podía mantener en funcionamiento más de 2 o 3 filtros a la vez.

Debido a esto se optó por hacer uso de filtros tipo FIR, opción muy poco eficiente, pues como se mencionó antes, se necesita de órdenes muy grandes para tener la respuesta en magnitud deseada en cada filtro.

En este caso, el requisito para los filtros era que tuviera una respuesta en frecuencia con la banda bien definida, ganancia unitaria en la banda de paso y mínimo 10 dB de atenuación en las frecuencias de corte.

Los órdenes de los filtros debían aumentar mucho a menor frecuencia para satisfacer este requisito, tanto así que el filtro de 32 Hz no se implementó de esta forma, ya que debía tener alrededor de 800 muestras para ello.

El diseño fue utilizando el método de enventanado, con ventanas rectangulares.

En la tabla 2 se muestran los órdenes de cada filtro FIR diseñado. Nótese que en esta tabla no está el filtro de 32 Hz ni el de 16 kHz; este último porque se dejó el diseñado de tipo IIR, con 300 muestras de la respuesta impulsional, con el fin de comparar eficiencias.

Tabla 2: Orden de los filtros FIR.

Filtro	Orden
64 Hz	350
125 Hz	300
250 Hz	220
500 Hz	100
1 kHz	50
2 kHz	35
4 kHz	30
8 kHz	15

Tabla 3: Configuración en FDATool para los filtros IIR. Parte 1.

Filtro de 32 Hz	Valor
Orden	2
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.01
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	20
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	45
Filtro de 64 Hz	Valor
Orden	2
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.01
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	45
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	91
Filtro de 125 Hz	Valor
Orden	2
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.05
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	91
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	177
Filtro de 250 Hz	Valor
Orden	4
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.05
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	177
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	353
Filtro de 500 Hz	Valor
Orden	4
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.05
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	353
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	707

Tabla 4: Configuración en FDATool para los filtros IIR. Parte 2.

Filtro de 1 kHz	Valor
Orden	6
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.1
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	707
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	1414
Filtro de 2 kHz	Valor
Orden	6
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.5
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	1414
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	2828
Filtro de 4 kHz	Valor
Orden	6
Atenuación rechaza banda - A stop (dB)	80
Rizado - A pass (dB)	0.5
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	2828
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	4000
Filtro de 8 kHz	Valor
Orden	6
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.5
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	5657
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	11314
Filtro de 16 kHz	Valor
Orden	8
Atenuación rechaza banda - Astop (dB)	80
Rizado - Apass (dB)	0.5
Frecuencia corte inicial - Fpass1 (Hz)	11314
Frecuencia corte final - Fpass2 (Hz)	20000