



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLAS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS DE
ORDEN SUPERIOR”***

**PARA OBTENER EL GRADO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

JOSÉ ALBERTO GARCÍA VARGAS.

ASESOR:

DR. GILBERTO GONZÁLES AVALOS.



MORELIA, MICHOACÁN OCTUBRE 2018.

AGRADECIMIENTOS

*A mi padre Tomás García Salazar,
por todos los consejos,
el tiempo dedicado y por todo su trabajo y
esfuerzo que él realizó para que mis sueños se hicieran realidad.*

*A mi madre Dorotea Vargas Cruz,
por siempre estar conmigo apoyándome
en los buenos y más aún en los malos momentos,
por todo su sacrificio y amor.*

*A mis hermanos Tommy, Gaby y Daisy,
por siempre estar ahí para mi
y demostrarme con el ejemplo como hacer bien las cosas.*

*A mis profesores que han sido parte de mi formación académica,
especialmente al Dr. Gilberto Gonzáles Avalos.*

¡GRACIAS!

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a la memoria de mi padre

Tomás García Salazar

*que a pesar de que hoy no se encuentra conmigo
estoy cumpliendo el sueño que ambos teníamos.*

A mi madre, mis hermanos, cuñados y sobrinos.

INDICE

Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Índice	iv
Resumen	vii
Palabras clave	vii
Abstract	viii
Key words	viii
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xii
Abreviaturas	xiii
CAPITULO 1 INTRODUCCION	1
1.1 Importancia de los filtros activos analogicos	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	2
1.4 Metodología	2
1.5 Contenido de la tesis.	3
CAPITULO 2 ANTECEDENTES DE LOS FILTROS	4
2.1 Introducción	4
2.2 Amplificador operacional	5
2.2.1 Definición	5
2.2.2 Un poco de historia	5
2.2.3 Características ideales de un amplificador operacional.	6
2.2.4 Aplicaciones de los amplificadores operacionales.	7
2.2.5 Ganancia de un amplificador	10
2.2.6 Concepto de décadas y octavas	11
2.3 Filtros activos	11
2.3.1 Definición.	12
2.3.2 Ventajas e inconvenientes de los filtros activos	12

2.3.3 Aplicaciones de los filtros activos.....	13
2.3.4 Clasificación de los filtros activos.....	13
2.3.5 Selección de la técnica de diseño.....	19
2.3.6 Desfases en los filtros activos.....	24
2.4 Sensitividad	26
CAPITULO 3 DISEÑO DE FILTROS DE ORDEN SUPERIOR.....	27
3.1- Introducción	27
3.2 Factor de amortiguamiento (df por sus siglas en ingles).....	27
3.3 Diseño de filtros activos de primer orden.....	29
3.3.1 Diseño de un filtro pasa-baja de primer orden	30
3.3.2 Diseño de un filtro pasa-alta	32
3.4 Diseño de filtros de segundo orden	35
3.4.1 Diseño de un filtro pasa-baja de segundo orden.....	36
3.4.2 Diseño de un filtro pasa-alta de segundo orden.....	40
3.5 Diseño de filtros de orden superior.	44
3.6 Diseño de filtros de tercer orden.....	44
3.6.1 Diseño de filtro de tercer orden pasa-baja.	44
3.6.2 Diseño de filtro de tercer orden pasa-alta.	47
3.7 Diseño de filtros de quinto orden.	48
3.7.1 Diseño de un filtro pasa-baja de quinto orden.....	49
3.7.2 Diseño de un filtro pasa-alta de quinto orden.	52
CAPITULO 4 IMPLEMENTACION DE FILTROS DE ORDEN SUPERIOR	55
4.1 Introducción	55
4.2 Estación de trabajo ni elvis	55
4.3 Implementación de filtros activos de primer orden.....	56
4.3.1 Implementación de filtro pasa-baja de primer orden.....	56
4.3.2 Implementación de filtro pasa-alta de primer orden.....	58
4.5 Implementación de filtros activos de segundo orden.....	61
4.5.1 Implementación filtro pasa-baja de segundo orden.	61
4.5.2 Implementación de filtro pasa-alta de segundo orden.	63
4.6 Implementación de filtros de tercer orden.....	65
4.6.1 Implementación de filtro pasa-baja de tercer orden.....	66

4.6.2 Implementación de filtro pasa-alta de tercer orden.	69
4.7 Implementación de filtros activos de quinto orden.	71
4.7.1 Implementación de filtro pasa-baja de quinto orden.	71
4.7.2 Implementación de filtro pasa-alta de quinto orden.	74
CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1 Conclusiones.	78
5.2 Recomendaciones	79
Bibliografía.....	80

RESUMEN

El presente trabajo está enfocado en el diseño e implementación de filtros activos de orden superior, las distintas tipologías que existen y las distintas técnicas de diseño.

Se estudiaron los elementos principales para construir un filtro activo, el elemento primordial para la creación de un filtro es el amplificador operacional, el cual se define y se muestran distintas características en el marco teórico de este trabajo.

Se utilizó un software muy completo y didáctico para el usuario PROTEUS con el cual una vez diseñados los filtros se obtuvo su diagrama de bode.

En la parte de la implementación se utiliza parte el software LABVIEW y la estación de trabajo NI ELVIS las cuales son herramientas muy útiles para construir este tipo de circuitos. Ya que cuentan con todo lo necesario para obtener la respuesta en el tiempo y en la frecuencia de los filtros activos de orden superior.

PALABRAS CLAVE

Butterworth, Chebyshev, Sallen-Key, PROTEUS, LABVIEW, NI ELVIS, Diagramas de bode



ABSTRACT

The present work is focused on the design and implementation of active filters of superior order, the distinct typologies that exist and the distinct techniques of design.

I studied the principal elements to build an active filter. The principal element to create a filter is the operational amplifier, this is defined and shows different characteristics in the theoretical frameworks of this work.

I used a very complete and didactic software for the user. Its name is PROTEUS, which has designed the filters I got its Bode Diagram.

In the part of the implementation I used the software LABVIEW and the work station NI ELVIS. Both are very efficient tools to build this type of circuit. Because they have all the necessary tools to get the response time and frequency response of the active filter of the high order.

KEY WORDS

Butterworth, Chebyshev, Sallen-Key, PROTEUS, LABVIEW, NI ELVIS, Bode Diagrams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Interfaz Ni ELVISmx.....	2
Figura 2.1. Simbología del amplificador operacional.....	8
Figura 2.2. Op-Amp 741 y 351.....	8
Figura 2.3. Tipos de encapsulamientos.....	9
Figura 2.4 Símbolo de un amplificador.....	10
Figura 2.5(a) frecuencia de corte.....	14
Figura 2.5 (b). Ganancias de filtros pasa-baja.....	15
Figura 2.6 (a) y (b). Frecuencia de corte y ganancias filtro pasa-alta.....	16
Figura 2.7 Respuesta filtro pasa-banda.....	17
Figura 2.8. Respuesta filtro rechaza-banda.....	18
Figura 2.9 Curvas de respuesta.....	20
Figura 2.10. Gráfica para diferentes valores de n.....	22
Figura 2.12. Curva de respuesta filtro elíptico.....	24
Figura 2.13. Linealidad de fase.....	26
Figura 3.1 filtro activo.....	28
Figura 3.2. Respuestas filtro de segundo orden pasa-baja.....	29
Figura 3.3. Filtro pasa-baja y respuesta en frecuencia.....	30
Figura 3.4 (a). Filtro pasa-baja 1er orden.....	31
Figura 3.4 (b). Respuesta en frecuencia.....	32
Figura 3.5 Filtro pasa-alta primer orden.....	33
Figura 3.6 (a). Filtro pasa-alta 1er orden.....	34
Figura 3.7. Filtro pasa-baja de orden superior.....	35

Figura 3.8. Filtro pasa-baja segundo orden.....	37
Figura 3.9 (a). Filtro pasa-baja de segundo orden.....	38
Figura 3.9 (b). Respuesta en frecuencia.....	39
Figura 3.10. Respuesta en frecuencia ($\zeta = 1$)	40
Figura 3.11. Filtro pasa-alta segundo orden.....	40
Figura 3.12. Filtro pasa-alta segundo orden.....	42
Figura 3.13. Respuesta en frecuencia.....	42
Figura 3.15. Respuesta en frecuencia ($\zeta = 1$)	43
Figura 3.16. Filtro activo de tercer orden.....	44
Figura 3.17. Filtro pasa-baja de tercer orden.....	46
Figura 3.18. Respuesta en frecuencia filtro pasa-baja tercer orden.....	47
Figura 3.19 filtro pasa-alta de tercer orden.....	48
Figura 3.20. Respuesta en frecuencia filtro pasa-alta de tercer orden.....	48
Figura 3.21 filtro activo de quinto orden.....	49
Figura 3.22. Filtro pasa-baja de quinto orden.....	50
Figura 3.23 Respuesta en frecuencia filtro pasa-baja de quinto orden.....	51
Figura 3.24. Filtro pasa-alta de quinto orden.....	53
Figura 3.25. Respuesta en frecuencia filtro pasa-alta de quinto orden.....	54
Figura 4.1. NI ELVIS.....	55
Figura 4.2 Circuito filtro pasa-baja.....	56
Figura 4.3. Medición de filtro pasa-baja con 1Khz.....	57
Figura 4.4. Diagrama de Bode filtro pasa-baja de primer orden.....	58
Figura 4.5 Circuito filtro pasa-alta.....	59

Figura 4.6. Medición filtro pasa-alta con 10Khz.....	59
Figura 4.7. Diagrama de Bode filtro pasa-alta de primer orden.....	60
Figura 4.8. Filtro pasa-baja de segundo orden.....	61
4.9 Medición filtro pasa-baja a 1 Khz.....	62
4.10 Diagrama de bode filtro pasa-baja de segundo orden.....	63
Figura 4.11. Filtro pasa-alta de segundo orden.....	64
Figura 4.12. Medición filtro pasa-alta a 10Khz.....	64
En la figura 4.13. Diagrama de bode obtenido para el filtro pasa-alta de segundo orden.....	65
Figura 4.14. Filtro pasa-baja de tercer orden.....	66
Figura 4.14. Medición filtro pasa-baja 1Khz.....	67
Figura 4.15. Medición filtro pasa-baja a 10 Khz.....	67
Figura 4.16. Diagrama de bode obtenido para filtro pasa-baja de tercer orden.....	68
Figura 4.17. Filtro pasa-alta de tercer orden.....	69
Figura 4.18. Medición filtro pasa-alta a 10 Khz.....	69
Figura 4.19 Medición filtro pasa-alta a 1 Khz.....	70
Figura 4.20. Diagrama de bode filtro pasa-alta tercer orden.....	71
Figura 4.21. Filtro pasa-baja de quinto orden.....	72
Figura 4.22 Medición filtro pasa-baja a 1 KHz.....	72
Figura 4.23. Medición filtro pasa-baja a 10 Khz.....	73
Figura 4.24. Diagrama de bode filtro pasa-baja de quinto orden.....	74
Figura 4.25 Filtro pasa-alta de quinto orden.....	74
Figura 4.26. Medición filtro pasa-alta a 10 Khz.....	75
Figura 4.27 Medición filtro pasa-alta a 1 Khz.....	76



Figura 4.28. Diagrama de bode filtro pasa-alta de quinto orden.....77

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Filtros Butterworth.....36

ABREVIATURAS

TERMINOS	DESCRIPCION
Op-Am	Amplificador operacional
dB	Decibeles.
Khz	Kilo-hertz.
Ω	Ohms.
μ F	Microfaradios.
mV	mili-volt
V	Volt

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 IMPORTANCIA DE LOS FILTROS ACTIVOS ANALOGICOS

Dentro del área de la electrónica se pueden encontrar diferentes ramas de estudio como las comunicaciones, la microelectrónica, el diseño de circuitos integrados, entre otras. Así al tener un campo tan amplio que explorar; uno se puede abocar a una rama determinada, pero ésta a su vez depende de otra. El tema que se eligió está envuelto dentro de las comunicaciones y el diseño de circuitos integrados debido a que es muy interesante para muchos estudiosos de la Electrónica, porque podemos aplicar los conocimientos abstractos, adquiridos en las aulas, a conocimientos prácticos corroborados en el nivel experimental, ya sea en el laboratorio o en el desarrollo intelectual.

Todos tenemos una idea, aunque sea intuitiva, del concepto de filtro, dispositivo que existe en casi todos los circuitos electrónicos, sobre todo en los destinados a las telecomunicaciones y a la instrumentación industrial. En la actualidad, por ejemplo las de comunicación de datos se han beneficiado mucho de los filtros activos, ya que los ordenadores se conectan a la red telefónica a través de equipos denominados modem (Modulador-Demodulador), cuyos filtros activos son parte fundamental en el filtrado de la señal para que esta comunicación se lleve a cabo.

Los filtros activos son de suma importancia, porque son utilizados con frecuencia en los sistemas electrónicos; ya que estos tienen como función manipular y modificar el espectro de frecuencia de la señal de entrada para obtener en la salida la función que se quiera aplicar a los diferentes sistemas.

Un filtro es un elemento que tiene como función:

- Separar componentes que se encuentran mezclados.
- Ser capaz de rechazar los componentes indeseables.
- Tener la capacidad de darnos como resultado únicamente los componentes deseados.

1.2 OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar filtros activos pasa-baja y pasa-alta, de primer orden, segundo orden y de orden superior. Mostrar las simulaciones de los distintos filtros diseñados e implementarlos con la ayuda de la estación de trabajo NI ELVIS.

1.3 JUSTIFICACION

Los filtros activos es un circuito esencial hoy en día para la electrónica, se sabe que un filtros activos de primer y segundo orden son circuitos sencillos de diseñar y de implementar.

Se tiene la idea de que un filtro activo de mayor orden es demasiado complejo tanto para su diseño como su implementación, en este documento se muestra que esa es una idea errónea.

Se diseñaron filtros activos tanto pasa-baja como pasa-alta de orden superior que fueron simulados con el software Proteus donde se obtuvo su diagrama de bode para observar su funcionamiento.

Para llevar a cabo la implementación se utilizó la estación de trabajo NI ELVIS la cual es una herramienta muy completa ya que cuenta con distintos instrumentos y aplicaciones los cuales se muestran en la figura 1.1

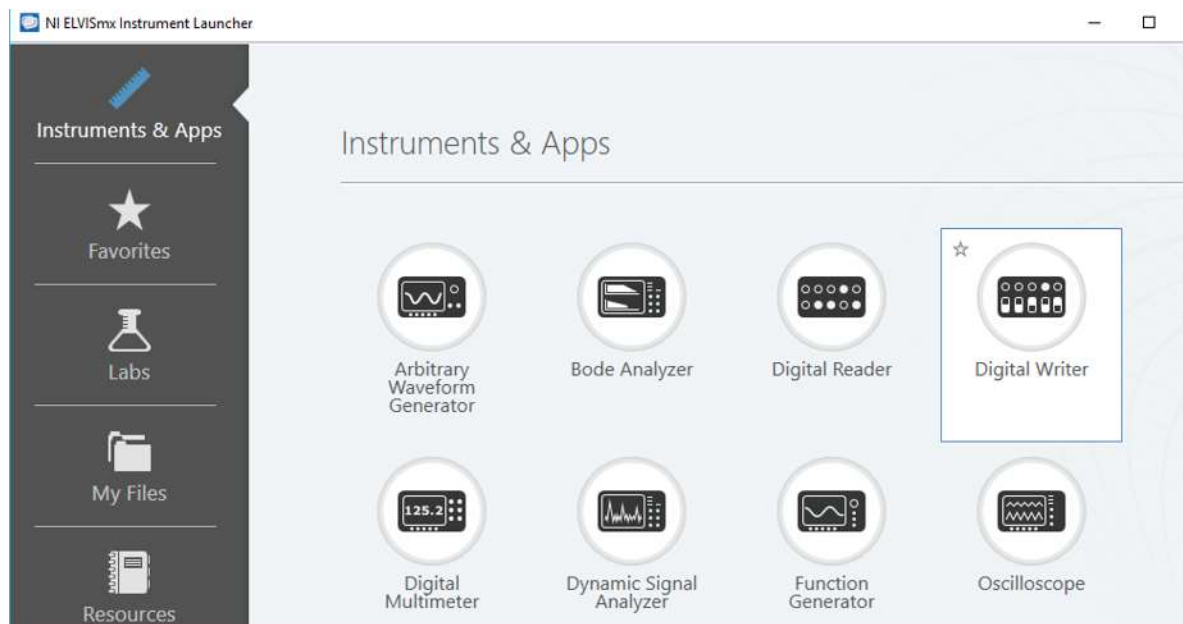


Figura 1.1. Interfaz Ni ELVISmx.

1.4 METODOLOGIA

Se realizó una investigación para obtener los conceptos y conocer el funcionamiento de los elementos que fueron utilizados para este proyecto, los cuales son:

- Amplificadores operacionales.
- Topologías de los filtros activos Butterworth, Chebyshev y Sallen-Key.
- Métodos para el diseño de filtros activos.
- Software Proteus.

Se investigó la estación de trabajo NI ELVIS para conocer su funcionamiento y conocer los drivers que deben instalarse para realizar la comunicación entre la estación y la computadora.

1.5 CONTENIDO DE LA TESIS.

El presente trabajo consta de cinco capítulos, en los cuales se presentan los conceptos básicos, necesarios para el diseño de filtros activos tanto pasa-baja y pasa-alta.

En el capítulo 1 se muestra la organización, justificación, objetivo y contenido del trabajo.

En el capítulo 2 se presenta un marco teórico que es la base para el desarrollo de esta tesis, en donde se mencionan los antecedentes de los primeros filtros, se presenta el amplificador operacional del cual se muestra su definición, antecedentes y algunas de sus aplicaciones. Se presenta la definición de filtro activo, los diferentes tipos de filtros que existen y algunas de sus aplicaciones, también se mencionan los diferentes tipos de topologías que existen.

En el capítulo 3 se diseñan los filtros pasa-baja y pasa-alta, los filtros diseñados son de primero, segundo, tercero y quinto orden, cada filtro diseñado fue simulado y se muestra su diagrama de bode.

A continuación en el capítulo 4 se implementaron los filtros que habían sido previamente diseñados, se muestra su circuito, la atenuación que arroja a la salida en osciloscopio y se obtuvo el diagrama de bode.

Por ultimo en el capítulo 5 se describen las conclusiones y recomendaciones del trabajo presentado.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES DE LOS FILTROS

2.1 INTRODUCCION

A inicios del siglo XX, se empezaron a emplear los filtros tanto por Campbell en Estados Unidos como por Wagner en Alemania, estos filtros estaban contruidos con elementos pasivos: resistencias, capacitores e inductores (RLC) cuya técnica era complicada matemáticamente. Así más tarde en los años 30's se desarrolló otra teoría matemática para el diseño de filtros conocida como "síntesis por inserción de pérdida", ésta fue publicada por W. Cauer en Alemania, y por S. Darlington en Estados Unidos, siendo también complicada para diseñar filtros pasivos por necesitar una gran cantidad de cálculos.

En 1955 los investigadores Sallen y Key, publicaron un artículo en el que se presentaban circuitos que realizaban las mismas características de los circuitos pasivos RLC pero sin emplear inductores. Estos circuitos estaban contruidos con resistencias, capacitores y amplificadores (elementos activos), los cuales se conocen como filtros activos-RC y en honor a sus inventores se conocen como filtros Sallen-Key. Poco después en 1965 se publicó un circuito activo-RC creado por W. Kerwin, L.P. Huelsman y R.Newcomb, el cual estaba constituido por tres amplificadores operacionales para realizar un par de polos, pero que tiene sensibilidades comparables con las de los circuitos RLC, alcanzando su desarrollo en la década de los 70's.

A inicios de los 60's se propusieron esquemas de filtros empleando capacitores e interruptores, los cuales sólo dependían de la relación de los capacitores, por lo que en 1972 se sugiere emplear la tecnología MOS (Metal Oxido Semiconductor) para el muestreo de señales analógicas, permitiendo un rápido crecimiento en sistemas que empleaban datos de señales muestreadas. Esta nueva innovación permitió que se pudieran crear filtros con Capacitores Conmutados (CC), que se forman a partir de un filtro activo RC sobre el que se sustituyen las resistencias por capacitores e interruptores los cuales pueden ser contruidos con tecnología MOS.

Las técnicas de diseño de filtros con capacitores conmutados están basadas en gran parte en topologías de filtros activos-RC.

Hoy en día cualquier sistema que conste de varios bloques, se debe diseñar en un solo módulo general, para que ocupe menos área y disipe menos potencia, es decir, se deben reducir los costos de la elaboración del sistema. Existen diversas técnicas que nos permiten desarrollar cada bloque cumpliendo las reglas anteriores. Una de estas técnicas, que es la más empleada para el diseño de circuitos, es la de capacitores conmutados y se emplea para diseñar circuitos integrados analógicos y de tiempo discreto.

2.2 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

2.2.1 DEFINICION

En [3]. El Amplificador Operacional también llamado OpAmp, o Op-Amp es un circuito integrado. Su principal función es amplificar el voltaje con una entrada de tipo diferencial para tener una salida amplificada y con referencia a tierra.

2.2.2 UN POCO DE HISTORIA

En [5]. Los amplificadores operacionales se fueron desarrollando en la década de los años 40 construyéndose con válvulas. Evidentemente, las características de estos primitivos Amplificadores operacionales con características razonables. En 1963 surgió el primer amplificador operacional monolítico (Circuito integrado) comercializado por la FAIRCHILD (USA), que presentaba una serie de problemas, tales como baja resistencia de entrada, baja ganancia, alta sensibilidad a los ruidos, necesidad de alimentación positiva y negativa de valores diferentes (por ejemplo, -6V y +12V), etc. Entonces la propia FAIRCHILD, gracias a los esfuerzos de un equipo dirigido por Robert Widlar, fabricó en 1965 el conocido uA709, considerado como el primer amplificador operacional comercializado realmente “fiable”. A continuación, en 1968, el mismo equipo proyectó el famoso uA741. Hasta hoy estos dos amplificadores operacionales vienen ocupando posiciones destacadas, aunque en la actualidad existen diversos amplificadores operacionales con características superiores a las de los 709 o 741, por ejemplo, LF 351 (NATIONAL), CA 3140 (RCA), etc.

La tecnología utilizada en la fabricación del 741 y del 709 se denomina bipolar, ya que su estructura interna utiliza transistores bipolares. Por otro lado, el 351 utiliza tecnología BIFET por utilizar su estructura interna una combinación de transistores BIPOLARES con transistores JFET (de ahí la denominación de BIFET para esta tecnología). Dicha tecnología permite que se aprovechen los méritos de ambos transistores y tiene como ventaja la altísima resistencia de entrada del AOP, gracias a la utilización de transistores FET en la etapa de entrada.

En la virtud de lo expuesto, podemos clasificar los amplificadores operacionales en función de las diversas tecnologías utilizadas desde que nacieron en la década de los años 40. Así, tenemos:

- 1945 (1ª generación): amplificadores operacionales con válvulas.
- 1955 (2ª generación): amplificadores operacionales con transistores.
- 1965 (3ª generación): amplificadores operacionales monolíticos bipolares.
- 1975 (4ª generación): amplificadores operacionales monolíticos BIFET.
- 1985: existen muchas innovaciones, pero en el aspecto comercial todavía no hay una tendencia tecnológica definida que se pueda adoptar como 5ª generación de amplificadores operacionales.

2.2.3 CARACTERISTICAS IDEALES DE UN AMPLIFICADOR OPERACIONAL.

Las principales características de un amplificador operacional ideal son:

- a) Resistencia de entrada infinita.
- b) Resistencia de salida nula.
- c) Ganancia de tensión infinita.
- d) Respuesta de frecuencia infinita (CC a infinitos Hz).
- e) Insensibilidad a la temperatura.

2.2.4 APLICACIONES DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES.

Además de amplificar una señal (o en general, llevar a un intervalo adecuado para procesamiento y análisis), los amplificadores operacionales tienen muchos otros usos, a continuación se mencionan algunos:

- **Acondicionamiento de señales:** aumentar su potencia, además de su intensidad, para que no sufra distorsión o atenuación por el proceso de medición, sobre todo si la impedancia de entrada del circuito sensor no es suficientemente alta; esto se logra garantizando que la señal a medir tenga un nivel mínimo de potencia entregada; el acondicionamiento también incluye: paso a escala logarítmica, cambiar offset, polaridad, modulación, mayor inmunidad a ruido y estabilidad, etc.
- **Acoplamiento de impedancias:** aunque puede considerarse parte del acondicionamiento, es más general; acoplamiento de circuitos.
- **Circuitos osciladores, generadores de pulsos y de formas de onda.**
- **Procesamiento analógico de señales:** comparadores, sumadores, integradores, derivadores, elementos de retardo, cambios de fase, rectificadores, etc.
- **Procesamiento lógico de señales:** en ciertas aplicaciones se obtiene el mismo efecto de las compuertas lógicas digitales, entregando ya sea un valor de voltaje cero (falso) o de saturación (verdadero).
- **Simulación analógica de sistemas dinámicos:** ventajas de mayor velocidad y mayor resolución que con circuitos digitales.
- **Solución analógica de ecuaciones:** ecuaciones integro-diferenciales inclusive no lineales, entre otras.
- **Filtros activos:** pasa altas, pasa baja, pasa banda, rechaza banda.

Es muy difícil enumerar la totalidad de las aplicaciones de este circuito denominado amplificador operacional, debido a que es uno de los componentes más importantes para la electrónica.

La simbología utilizada para describir un amplificador operacional se muestra en la figura 2.1

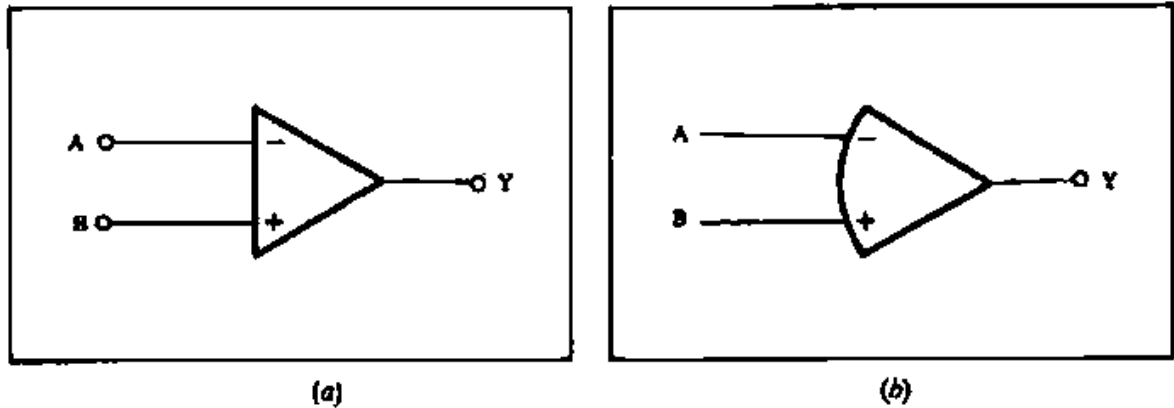


Figura 2.1. Simbología del amplificador operacional.

En la realidad, los amplificadores operacionales tienen al menos 8 terminales. En la figura 2.2 se toma como ejemplo el Op-Amp 741 y el 351.

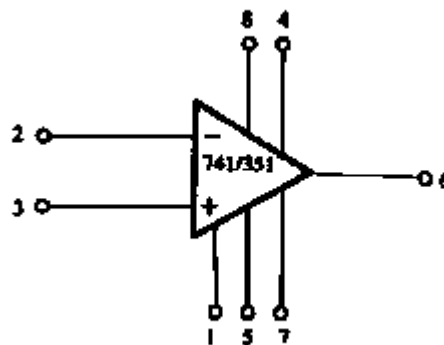


Figura 2.2. Op-Amp 741 y 351.

La descripción de los pines es la siguiente:

- 1 y 5 destinados al equilibrio de Op-Amp (ajuste de la tensión OFFSET).
- 2 entrada inversora.
- 3 entrada no inversora.
- 4 alimentación negativa (-3 V a -18V).
- 7 alimentación positiva (+3V a 18V).
- 6 salida.
- 8 no utilizada.

En la figura 2.3: se tienen los encapsulados más comunes, en el inciso (a) tenemos un encapsulamiento plano de 14 pines, en el inciso (b) otro metálico de 8 pines y finalmente en el inciso (c) hay dos tipos de encapsulamiento en línea doble.

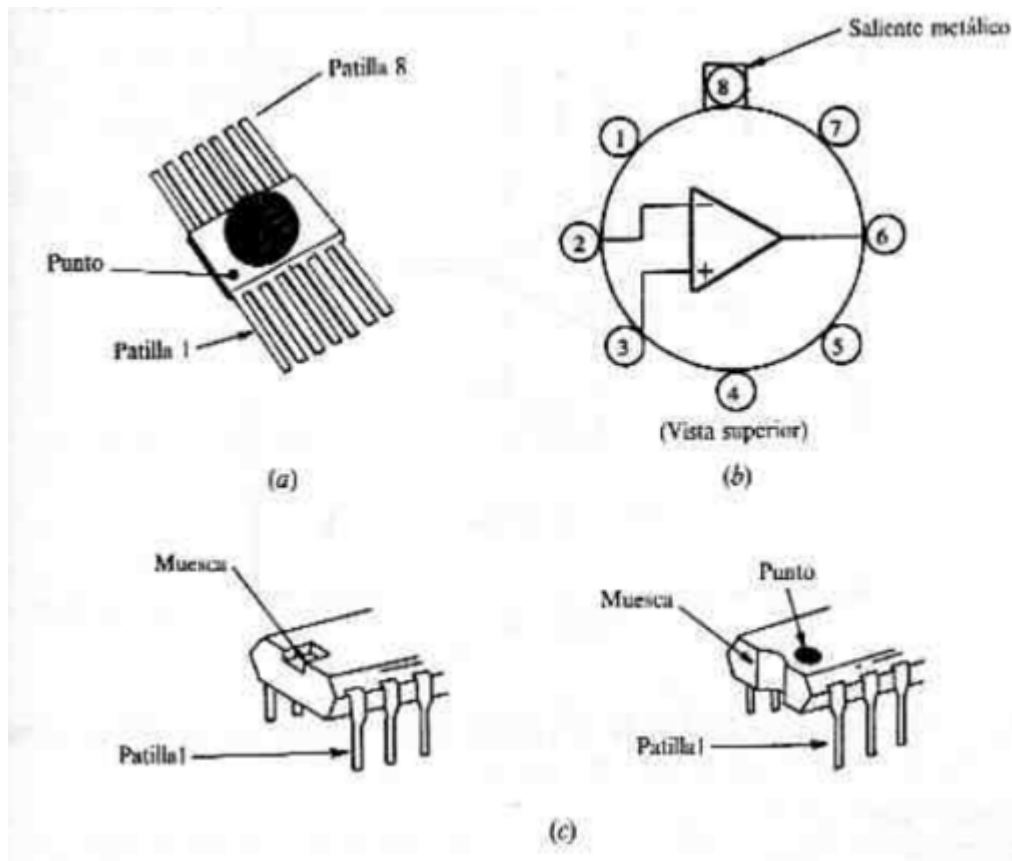


Figura 2.3. Tipos de encapsulamientos.

Para todos ellos se muestran las diferentes formas de identificación adoptados por los fabricantes.

Para el Op-Am 741, fabricado por la FAIRCHILD, podemos encontrar encapsulamientos de línea doble de 8 y 14 pines. También podemos encontrar los encapsulamientos FLAT-PACK de 10 pines y METAL CAN de 8. La distribución de las patillas en el encapsulamiento DIP de 8 patillas se corresponde exactamente con la del metálico, también de 8 pines.

2.2.5 GANANCIA DE UN AMPLIFICADOR

En la figura 2.4 se muestra el símbolo de un amplificador genérico.

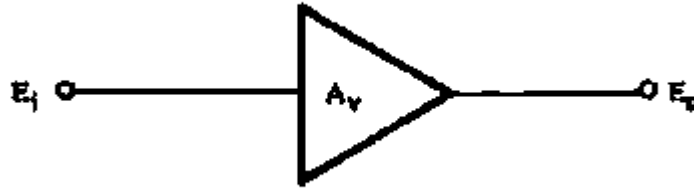


Figura 2.4 Símbolo de un amplificador

Definiremos los siguientes parámetros:

E_i = señal de entrada.

E_o = señal de salida.

A_v = ganancia.

Así, podemos escribir

$$A_v = \frac{E_o}{E_i} \quad (2.1)$$

En decibelios tenemos

$$A_v(dB) = 20 \log \frac{E_o}{E_i} \quad (2.2)$$

La importancia de utilizar la ganancia en decibeles (dB) está justificada cuando se utilizan valores grandes de A_v , por ejemplo:

$$A_v = 1 \rightarrow A_v(dB) = 0$$

$$A_v = 10 \rightarrow A_v(dB) = 20$$

$$A_v = 10^2 \rightarrow A_v(dB) = 40$$

$$A_v = 10^3 \rightarrow A_v(dB) = 60$$

De modo general

$$A_v = 10^n \rightarrow A_v(dB) = 20n \quad (2.3)$$

La utilización de decibelios facilita la representación gráfica de magnitudes que tienen un amplio margen de variación.

2.2.6 CONCEPTO DE DÉCADAS Y OCTAVAS

Decimos que una frecuencia f_1 varía una década cuando toma un nuevo valor, f_2 , de modo que

$$f_2 = 10f_1 \quad (2.4)$$

Generalmente decimos que

$$f_2 = 10^n f_1 \quad (2.5)$$

Decimos que una frecuencia f_1 varía una octava cuando toma un nuevo valor, f_2 , de forma que

$$f_2 = 2f_1 \quad (2.6)$$

De modo general, decimos que f_1 varía n octavas cuando

$$f_2 = 2^n f_1 \quad (2.7)$$

Los conceptos de décadas y octavas serán muy útiles para el estudio de amplificadores operacionales y filtros activos.

2.3 FILTROS ACTIVOS.

Un filtro es un elemento que tiene como función separar componentes que se encuentran mezclados, ser capaz de rechazar los indeseables y así darnos como resultado únicamente los deseados.

Desde tiempos pasados los filtros han sido de gran utilidad para las diferentes necesidades del ser humano, por ejemplo: los sistemas de filtrado de agua que como función principal separar los contaminantes de dejar pasar el agua ya purificada. Un filtro electrónico tiene como principal utilidad, se parar señales de diferentes frecuencias.

2.3.1 DEFINICIÓN.

En [4]. Un filtro activo es un cuadripolo capaz de atenuar determinadas frecuencias del espectro de la señal de entrada y permitir el paso de las demás.

En otras palabras un filtro activo es un sistema que tiene como función manipular y modificar el espectro de frecuencia de la señal de entrada para obtener en la salida la función que se requiera aplicar a los diferentes sistemas.

Se denomina espectro de una señal a su descomposición en una escala de amplitudes respecto a la frecuencia, y se hace por medio de las series de Fourier o con el analizador de espectro.

En resumen, los filtros activos son sistemas de dos puertos, uno de entrada y otro de salida, que funcionan en el dominio de la frecuencia. El espectro de frecuencia de la señal de salida tiene relación directa con respecto a la señal de entrada.

- Filtro activo ideal

Los filtros ideales son selectores de frecuencia que permiten el paso sin distorsión de las componentes espectrales comprendidas en la o las bandas de paso, anulando completamente las componentes ubicadas fuera de ellas

2.3.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS FILTROS ACTIVOS.

En comparación con los pasivos, los filtros activos poseen una serie de ventajas, las cuales son:

- Permiten eliminar las inductancias que, en bajas frecuencias, son voluminosas, pesadas y caras.
- Facilitan el diseño de filtros complejos mediante la asociación de etapas simples.
- Proporcionan una gran amplificación de la señal de entrada (ganancia), lo que es importante al trabajar con señales de niveles muy bajos.
- Permiten mucha flexibilidad en los proyectos.

Por otro lado, tienen una serie de inconvenientes, que son:

- Exigen una fuente de alimentación.
- Su respuesta de frecuencia está limitada por la capacidad de los amplificadores operacionales utilizados.
- Es imposible su aplicación en sistemas de media y alta potencia (por ejemplo, en los filtros que emplean los convertidores e inversores contruidos con tiristores que se utilizan en la industria).

A pesar de estas limitaciones, los filtros activos presentan cada vez un mayor servicio en el campo de la electrónica, especialmente en las áreas de instrumentación y telecomunicaciones. Dentro de la primera es interesante destacar la electro-medicina o bioelectrónica, cuyos equipos hacen gran uso de ellos, principalmente cuando operan en bajas frecuencias.

2.3.3 APLICACIONES DE LOS FILTROS ACTIVOS.

[6]Estas son algunas de las aplicaciones de los filtros activos, en realidad su campo de aplicación es demasiado extenso:

- Demodular señales.
- Ecuatizar y así obtener una calidad de audio con mayor fidelidad.
- Eliminar ruidos en los diferentes sistemas de comunicación.
- Convertir señales muestreadas en señales continuas.
- Detectar señales, como la de la T.V o la radio
- En laboratorio de investigación para estudiar los componentes de frecuencias de señales tan diversas como: ondas cerebrales, vibraciones mecánicas.

2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS FILTROS ACTIVOS.

En [1]. Los filtros pueden clasificarse atendiendo a tres aspectos:

- A la función que llevan a cabo.
- A la tecnología empleada.
- A la función matemática utilizada para conseguir la curva de respuesta.

Al primer grupo pertenecen los cuatro tipos siguientes:

- a) Filtro pasa-baja
- b) Filtro pasa-alta
- c) Filtro pasa-banda
- d) Filtro rechaza-banda

A continuación se describen los filtros mencionados.

- a) Filtro pasa-baja: la banda de paso para este filtro es definida desde los 0 Hz hasta la frecuencia de corte, f_c , en el cual la salida de voltaje es del 70.7 por ciento del voltaje de la banda de paso, como se indica en la figura 2.5(a). La banda de paso ideal, se muestra en la región sombreada, se observa que tiene un rechazo de banda instantánea en f_c . El ancho de banda de este filtro es igual a f_c ,

$$BW = f_c \quad (2.8)$$

Aunque la respuesta ideal no se puede realizar en la práctica, para el filtro pasa bajas de primer orden la ganancia es de -20 dB/década y se pueden obtener mayores. En la figura 2.5 (b) se muestra un filtro pasa baja ideal y las curvas con diferentes ganancias.

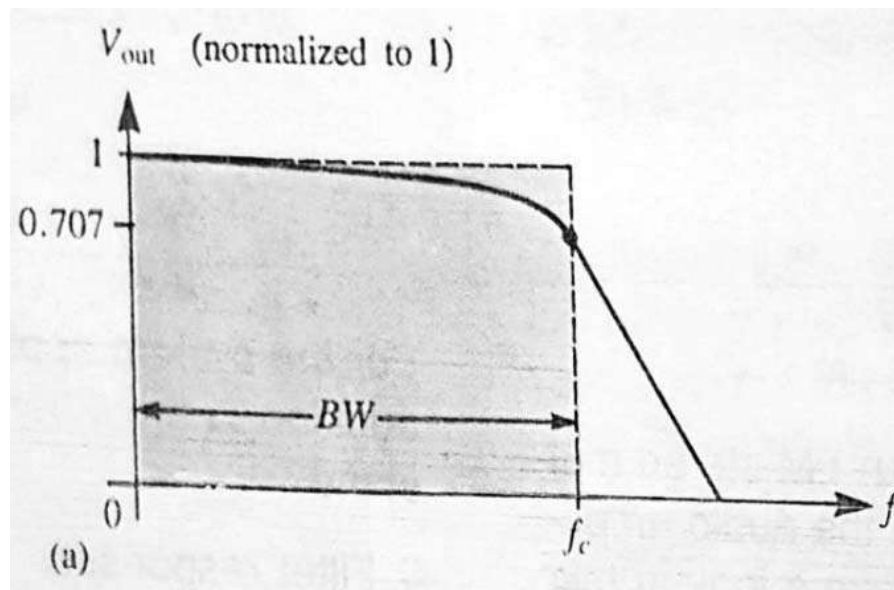


Figura 2.5(a) frecuencia de corte

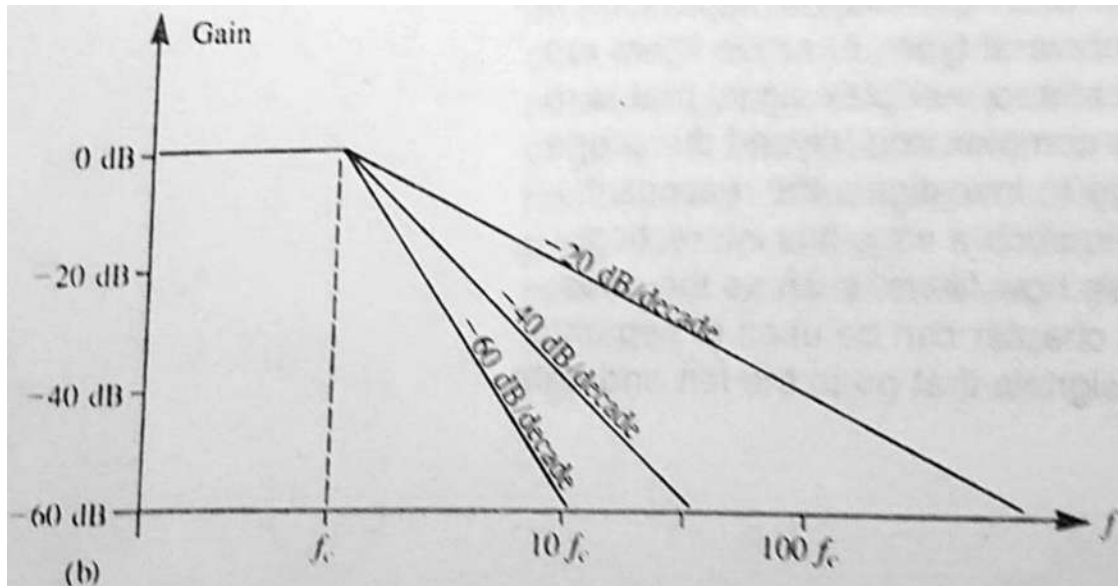


Figura 2.5 (b). Ganancias de filtros pasa-baja

La ganancia de -20 dB/década es obtenida con un circuito RC que consta de un resistor y un capacitor. Para obtener ganancias más altas se requiere colocar más circuitos RC. Cada circuito RC se le llama polo.

La frecuencia de corte del filtro pasa bajas RC ocurre cuando $X_c = R$, donde

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.9)$$

- b) Filtro pasa alta: un filtro pasa alta atenúa todas las frecuencias que están por debajo de f_c y pasa todas las frecuencias que están encima de la f_c . La frecuencia de corte es, desde luego, la frecuencia a la que la salida de voltaje es 70.7% del voltaje de la banda de paso, como se muestra en la figura 2.6(a). La respuesta ideal, se muestra en la región sombreada, se observa que tiene una caída instantánea en f_c , la cual, desde luego, no es realizable. Se pueden realizar atenuaciones de 20 dB/década/pole.

La figura ilustra la respuesta de filtros pasa alta con diferentes ganancias.

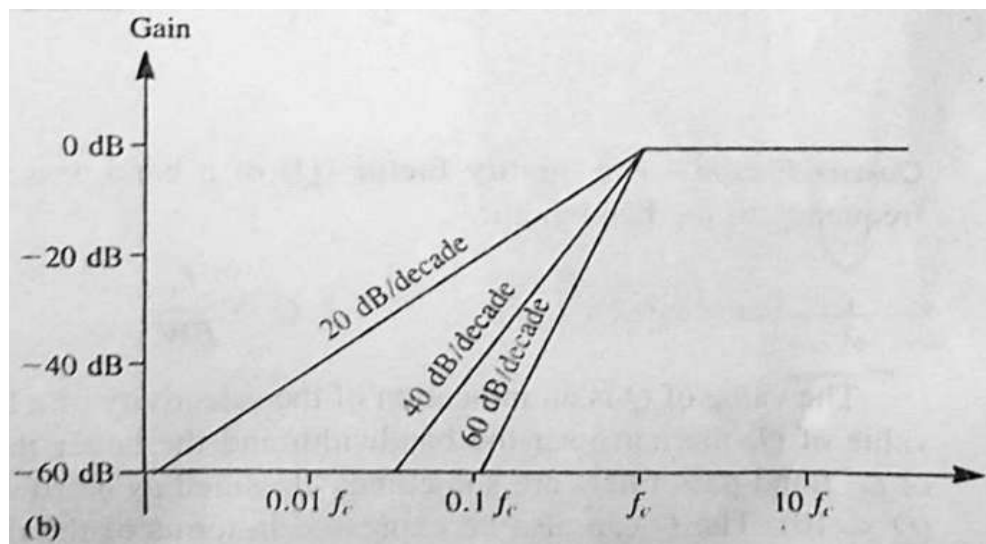
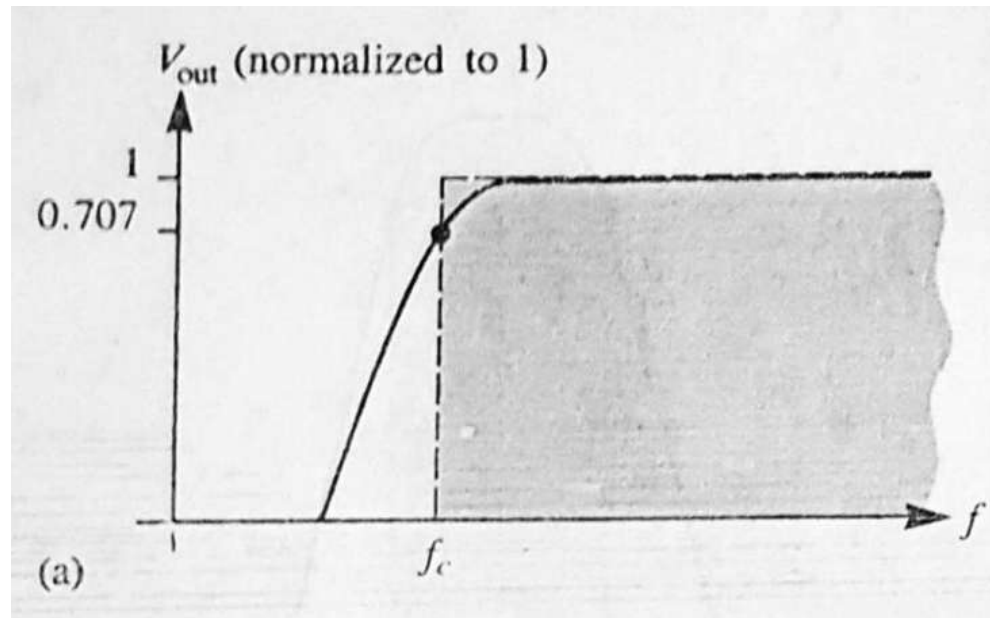


Figura 2.6 (a) y (b). Frecuencia de corte y ganancias filtro pasa-alta.

Como con el filtro pasa bajas RC, la frecuencia de corte del pasa altas es $X_c = R$ y es calculada con la formula (2.9).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

La respuesta de un filtro pasa alta se extiende desde la frecuencia de corte hasta la frecuencia que es determinada por la limitación del elemento activo (op-amp) usado.

- c) Filtro pasa banda: permite el paso de todas las señales que están en medio de una la banda de paso, dicha banda está conformada por una frecuencia de corte baja y una alta. Rechazando todas las frecuencias que están fuera de la banda especificada. En la figura 2.7 se muestra la respuesta de un filtro pasa banda. La banda de paso está definida como la diferencia entre la frecuencia de corte alta (f_{c2}) y la frecuencia de corte baja (f_{c1}).

$$BW = f_{c2} - f_{c1} \quad (2.10)$$

Las frecuencias de corte son los puntos en los que la curva de respuesta es 70.7 por ciento de su valor máximo. La frecuencia que esta al centro de la banda de paso es llamada frecuencia central, f_o , definida como la media geométrica de las frecuencias de corte.

$$f_o = \sqrt{f_{c1}f_{c2}} \quad (2.11)$$

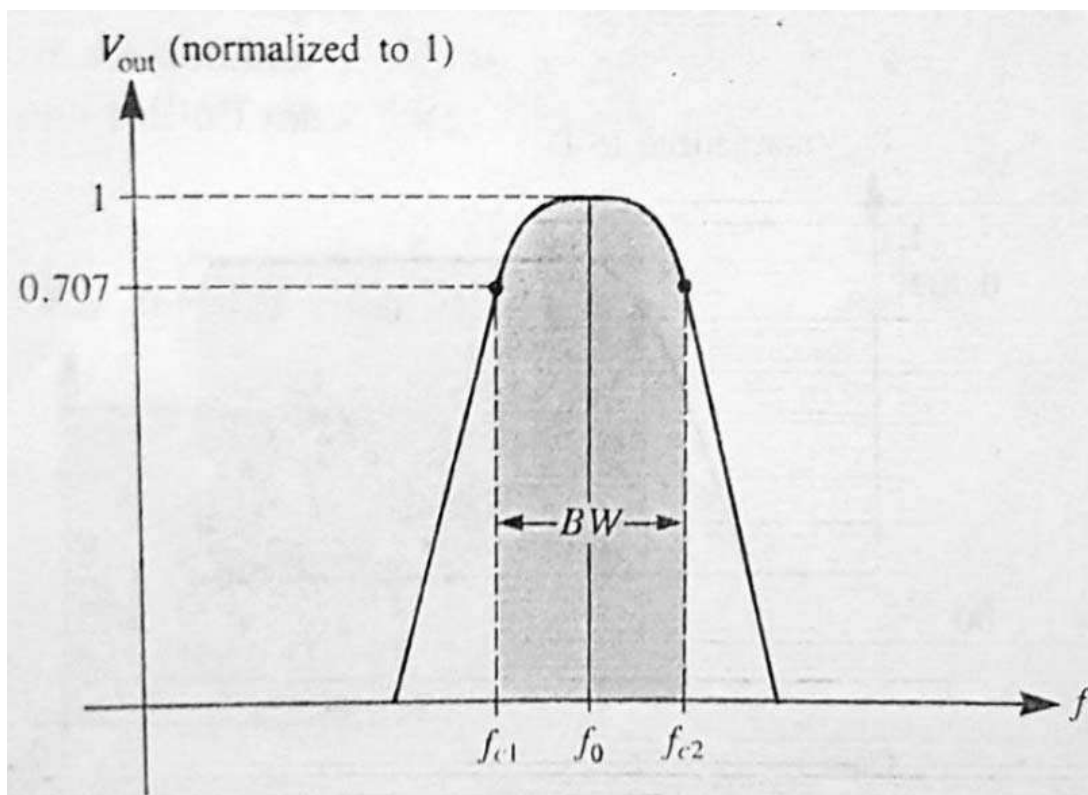


Figura 2.7 Respuesta filtro pasa-banda.

Factor de calidad (Q) el factor de calidad de un filtro pasa banda es la división de la frecuencia central entre la banda de paso.

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (2.12)$$

El valor de Q es una indicación de la selectividad de un filtro pasa banda. Entre más alto sea el valor de Q , más estrecha será la banda de paso y mejor selectividad para un valor dado de f_0 . Los filtros pasa banda algunas veces son clasificados como banda-estrecha ($Q > 10$) o banda-amplia ($Q < 10$).

- d) Filtro rechaza banda: otra categoría de filtros activos es el rechaza banda, también conocido como filtro eliminador de banda. Podemos pensar que su operación es opuesta a la del filtro pasa banda, porque las frecuencias dentro de la banda de paso son rechazadas y las frecuencias fuera de la banda de paso son aceptadas. La respuesta general para un filtro rechaza banda se muestra en la figura 2.8. Nótese que la banda de paso es la banda de frecuencias entre el punto de 3 dB. Precisamente como en el caso del filtro pasa banda.

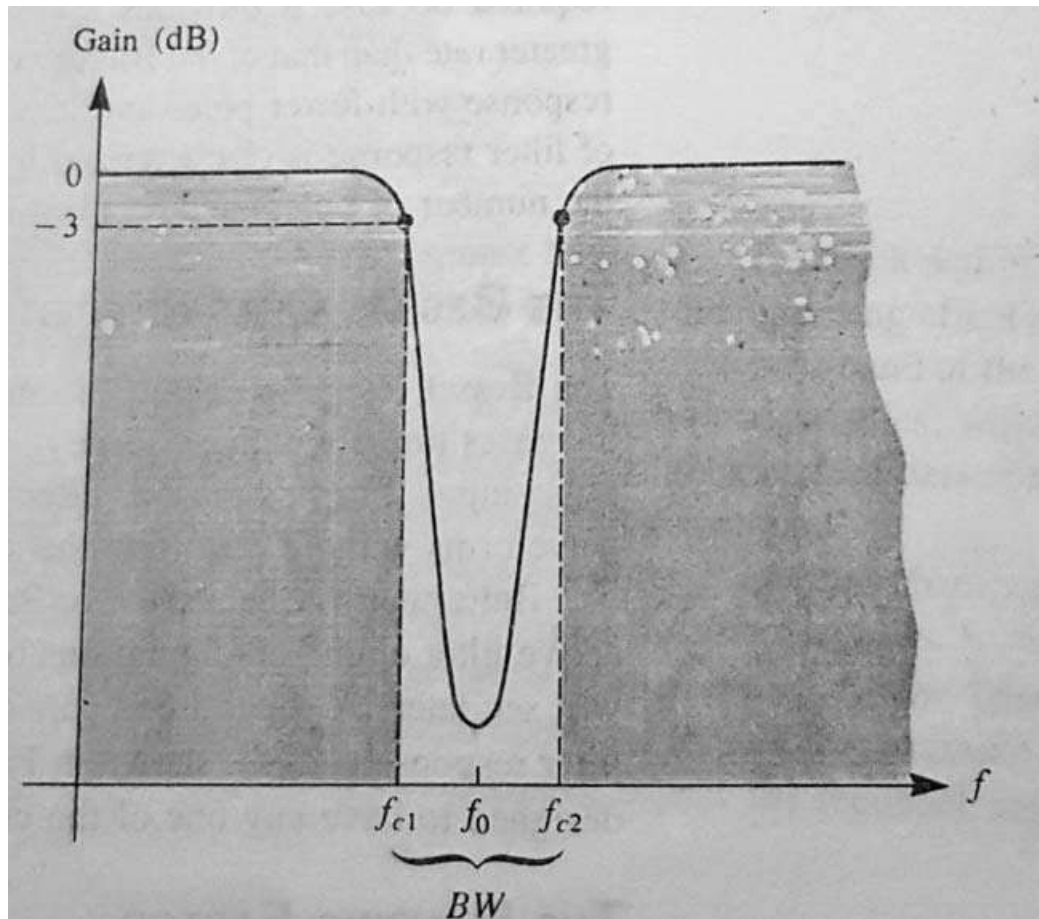


Figura 2.8. Respuesta filtro rechaza-banda.

2.3.5 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE DISEÑO

En las figuras anteriores se mostró la respuesta y magnitud de cada tipo de filtro. El problema es que esas representaciones son ideales y en realidad tenemos variaciones de acuerdo a la aproximación utilizada para diseñar el filtro. A continuación veremos las diferentes aproximaciones que existen:

- Aproximación de Butterworth
- Aproximación de Chebyshev
- Aproximación de Cauer

- Filtros de Butterworth

Su respuesta viene dada por la siguiente función:

$$|H(j\omega)| = \frac{K_{PB}}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}} \quad (2.13)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ (aproximación para un filtro PB)

Donde K_{PB} es la ganancia correspondiente a una frecuencia ω nula; ω_c es la frecuencia de corte y n el orden del filtro.

En este punto se necesario explicar el concepto de orden de un filtro. En términos matemáticos es el número de polos de su función de transferencia y en términos físicos el número de redes de retardo presentes en su estructura. Adoptaremos esta última definición, ya que la primera incluye conceptos (función de transferencia y polos) que serán tratados este texto. Es interesante señalar que cuando mayor sea el orden de un filtro, tanto más se aproximara a su respuesta a una de las curvas ideales mostradas anteriormente.

La figura 2.9 muestra diversas curvas de respuesta, obtenidas de la ecuación, tomando $K_{PB} = 1$, y $n = 2, 4, 6$ y 8 .

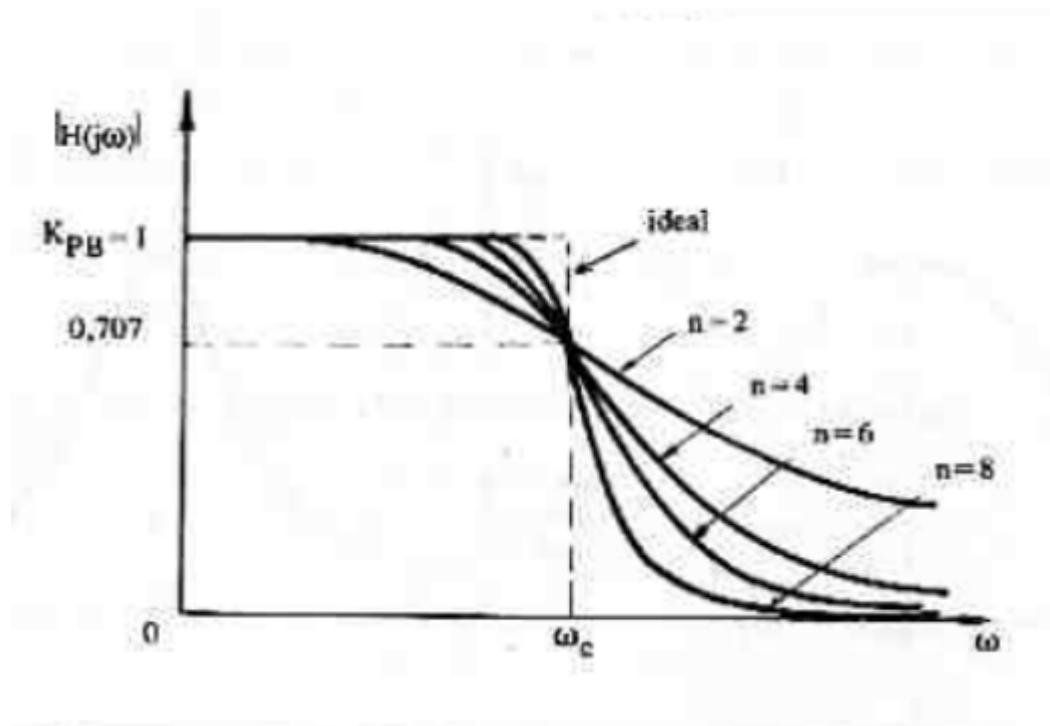


Figura 2.9 Curvas de respuesta.

Si se observa la figura 2.9, puede comprobarse cómo la curva de respuesta se aproxima gradualmente a la ideal del filtro a medida que n aumenta.

A partir de las estructuras utilizadas para construir filtros PB se consiguen los demás tipos de filtros, como veremos posteriormente.

La curva de respuesta Butterworth se denomina también de <<respuesta plana>>, debido a que no presenta rizado. Es, entonces, una curva monótona decreciente en todas las frecuencias, la máxima aproximación a la curva ideal tiene lugar en las proximidades del punto $\omega = 0$, como puede verse en la figura.

Si en la ecuación se hace $\omega \gg \omega_c$ se tendrá

$$|H(j\omega)|(dB) = 20 \log K_{PB} - 20n \log \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \quad (2.13)$$

Lo que permite calcular la atenuación, que viene dada por

$$TA = -20n \log \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \quad (2.14)$$

Esto es, un filtro Butterworth de primer orden tiene una atenuación de 20dB/década, uno de segundo orden de 40dB/década, uno de tercero de 60dB/década, etc. Estas atenuaciones son relativas al valor de ganancia máximo, que es $20\log K_{PB}$.

- Filtros de Chebyshev

Para frecuencias próximas a la de corte (w_c), la curva de respuesta de Butterworth no es aceptable, sobre todo si el filtro es de orden bajo. Por ello veremos los filtros de Chebyshev, que poseen mejor respuesta para frecuencias cercanas a w_c , considerando un filtro de Butterworth y otro de Chebyshev, ambos del mismo orden e idéntica estructura, la respuesta del filtro Chebyshev será mejor en las proximidades de la frecuencia de corte, es decir, en la banda de transición su curva tendrá una pendiente mayor que la correspondiente al filtro de Butterworth. Sin embargo, el filtro Chebyshev presenta rizado en la banda pasante, como se verá a continuación.

La función (o aproximación) dada por Chebyshev es la siguiente:

$$|H(jw)| = \frac{K_{PB}}{\sqrt{1 + E^2 C_n^2(w/w_c)}} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

($0 < E \leq 1$)
(función para el filtro PB)

Donde K_{PB} es la ganancia del filtro PB cuando la frecuencia es nula ($w = 0$), w_c es la frecuencia de corte, E una constante que determina la amplitud (PR) del rizado y C_n el polinomio de Chebyshev, cuya expresión es

$$C_n(w) = \cos(n \arccos w)$$

Se puede demostrar la siguiente formula recurrente:

$$C_{n+1}(w) = 2wC_n(w) - C_{n-1}(w) \quad (2.15)$$

Representando la ecuación cuando $K_{PB} = 1$ y $w_c = 1$ rad/s, para diversos valores de n , tendremos la gráfica de la figura 2.10.

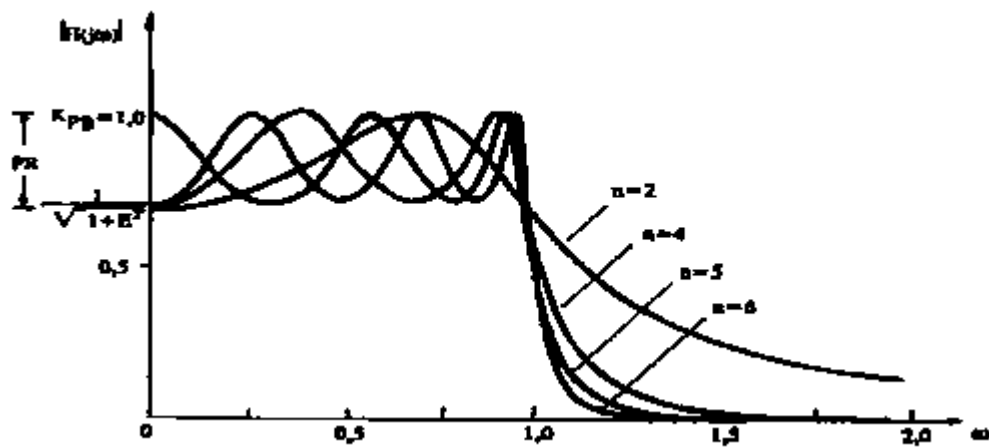


Figura 2.10. Gráfica para diferentes valores de n.

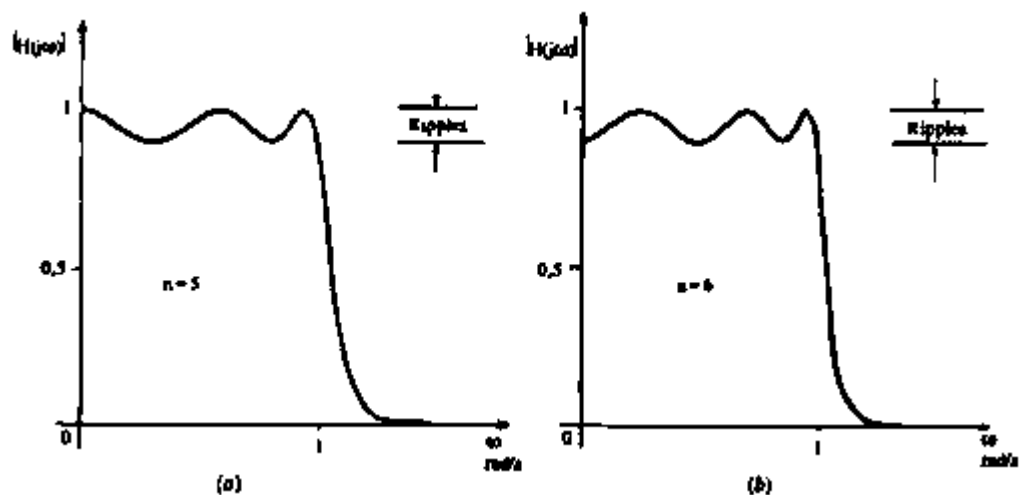


Figura 2.11. Rizos en la banda de paso.

El número de rizos presentes en la banda de paso es igual al orden del filtro y su amplitud (PR) depende del parámetro E. Obsérvese que en el punto $w = 0$ los rizos toman su valor máximo o mínimo según el orden sea impar o par, respectivamente, la figura 2.11 ilustra todo esto.

El porcentaje de atenuación (TA) del filtro Chebyshev es en la mayoría de los casos, superior a 20dB/década. Su valor puede calcularse por la siguiente expresión:

$$|H(jw)|(dB) \cong 20 \log K_{PB} - 20 \log E - 6(n - 1) - 20n \log(w/w_c) \quad (2.16)$$

De la que se obtiene

(2.17)

$$TA = -20 \log E - 6(n - 1) - 20n \log(w/w_c)$$

La amplitud de los rizados (PR) en decibelios está relacionada con E por la expresión

$$E = \sqrt{10^{PR/10} - 1} \quad (2.18)$$

de donde se deduce que

$$PR(dB) = 20 \log \sqrt{1 + E^2} \quad (2.19)$$

El valor de PR caracteriza al filtro Chebyshev.

Conviene observar un hecho curioso, y a la vez contradictorio, sobre los filtros de Chebyshev: a mayor amplitud del rizado corresponde una mayor atenuación en la banda de transición. Esto coloca al diseñador del filtro en una situación confusa, ya que, por otra parte, los rizados no son convenientes, y, por otra, es importante conseguir un porcentaje de atenuación alto en la banda de transición. Habrá, pues, que elegir lo que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

Por último, se debe entender, según la ecuación, que cuando $E = 1$ y $n = 1$ los filtros Butterworth y Chebyshev tienen la misma atenuación, 20dB/década, por lo que no se acostumbra a diferenciar los filtros de primer orden en términos de la función de respuesta.

- Filtros de Cauer o elípticos

Los filtros de Cauer presentan rizado en la banda de paso y en la de corte. Son los de mayor definición en términos de frecuencia de corte, esto es, su banda de transición es bastante estrecha. Este tipo de filtro es utilizado en equipos que exigen mucha precisión en el punto de corte y una atenuación elevada en la banda de corte.

La figura 2.12 muestra una curva de respuesta típica de un filtro elíptico de quinto orden, donde $w_c = 1 \text{ rad/s}$.

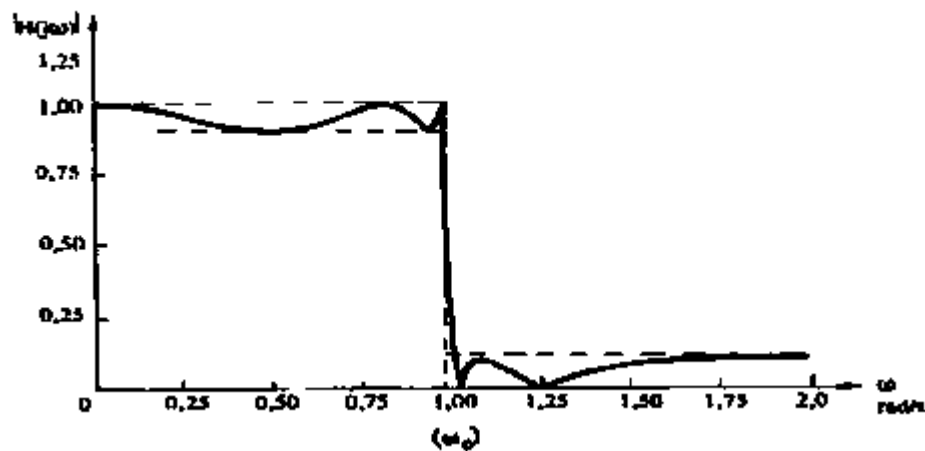


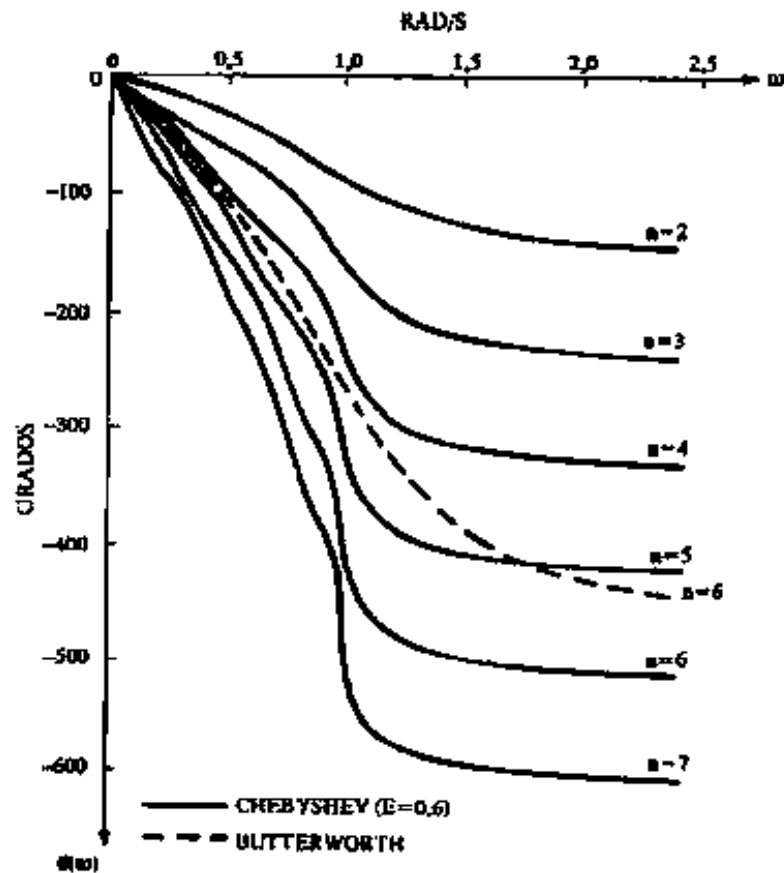
Figura 2.12. Curva de respuesta filtro elíptico.

Comparándola con la figura se constata una mejora en las características de este filtro con relación al de Chebyshev.

2.3.6 DESFASES EN LOS FILTROS ACTIVOS

Hasta el momento, solo se han estudiado las características de ganancia y atenuación de los filtros. En este apartado trataremos sobre el desfase que se produce entre las señales de entrada y salida de un filtro activo.

La ganancia y la atenuación de un filtro de Chebyshev son, para un orden determinado, mejores que las del filtro Butterworth. Sin embargo, la linealidad de fase del primero es menor que la del segundo, como se muestra en la figura 2.13, en la que se consideran ambos filtros de orden 6.



2.13. Linealidad de fase.

Hay situaciones en las que el desfase entre la entrada y la salida puede perjudicar las prestaciones de un sistema, como es el caso de la transmisión de señales a través de la línea telefónica. En este tipo de transmisión el sincronismo es fundamental, y las demoras provocadas por los desfases pueden causar serias perturbaciones. Hay circuitos especiales, denominados correctores o compensadores de fase, que corrigen estos retardos. Tales circuitos se colocan en serie con la línea de transmisión y no afectan a la amplitud de las señales transmitidas, permitiendo, eso sí, el restablecimiento del sincronismo del sistema. Algunos textos denominan a estos circuitos ecualizadores de fase.

2.4 SENSITIVIDAD

Teóricamente existen filtros ideales al analizar y calcular sus especificaciones, sin embargo en la vida real esto no es posible, ya que siempre habrá pérdidas por ello al realizar los diseños requeridos dependiendo de su operación, hacemos aproximaciones al más cercano comportamiento ideal.

Los elementos electrónicos tienen una cierta tolerancia, es decir no tienen un valor ideal. Esto crea fallas en el comportamiento del circuito, a mayores fallas la sensibilidad es mayor y entre menos fallas existan habrá una sensibilidad menor como en los elementos pasivos. Para conocer los cambios de comportamiento de un circuito es necesario un análisis de sensibilidad que se realiza con la siguiente formula.

$$\frac{\Delta F}{F} = S_x^F \frac{\Delta x}{x} \quad (2.20)$$

CAPITULO 3

DISEÑO DE FILTROS DE ORDEN SUPERIOR

3.1- INTRODUCCION

Una vez que ya se describió un poco del concepto e importancia de los filtros a lo largo de la historia.

Ya se conoce los diferentes tipos de filtros que existen y como son sus respuestas tanto en decibels como en voltaje, ahora bien el siguiente paso será diseñar algunos de estos filtros con frecuencias de corte iguales pero aumentando el orden del filtro para observar su comportamiento.

El proceso de diseño de filtros consiste en encontrar una función de transferencia que cumpla las especificaciones dadas. Una vez conseguida, tenemos que implementar un circuito electrónico cuya función de transferencia sea precisamente ésta.

A la hora de implementar un filtro podemos elegir entre diferentes tipos que ya se han mencionado anteriormente, todo dependerá de la aplicación en cuestión.

3.2 FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO (DF por sus siglas en ingles)

Ahora bien antes de entrar de lleno al diseño de los filtros activos es importante mencionar el factor de amortiguamiento

[5] Como ya se mencionó, un filtro activo puede ser diseñado por cualquiera de las aproximaciones ya sea Butterworth, Chebyshev o Bessel independientemente de que sea un pasa-baja, pasa-alta, pasa-banda o rechaza-banda. El factor de amortiguamiento (ζ) de un filtro activo determina la respuesta característica que el filtro presentara. Para explicar el concepto básico, se muestra un filtro activo generalizado en la figura 3.1.

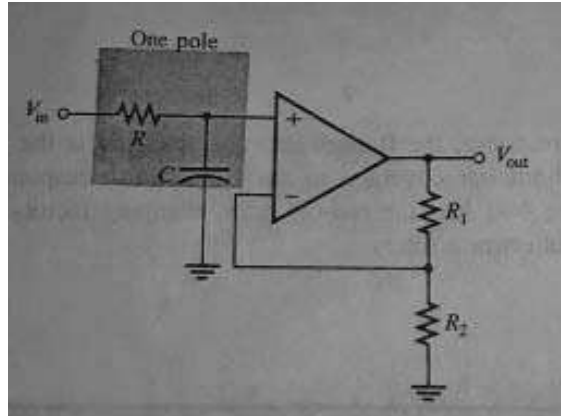


Figura 3.1 filtro activo

Se incluye un amplificador, una retroalimentación negativa y la sección de filtrado. La retroalimentación es conectada al amplificador en la terminal inversora. El factor de amortiguamiento es determinado por la retroalimentación negativa y se define por la siguiente ecuación:

$$\zeta = \frac{(3 - k)}{2} \quad (3.1)$$

Donde K es la ganancia del circuito, y como tenemos una retroalimentación negativa sabemos que la ecuación que define a K es la siguiente:

$$k = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (3.2)$$

Básicamente, el factor de amortiguamiento afecta la respuesta del filtro por la acción de la retroalimentación negativa.

En la figura 3.2 se muestra las distintas respuestas que entrega un filtro de segundo orden con distintos valores en el factor de amortiguamiento.

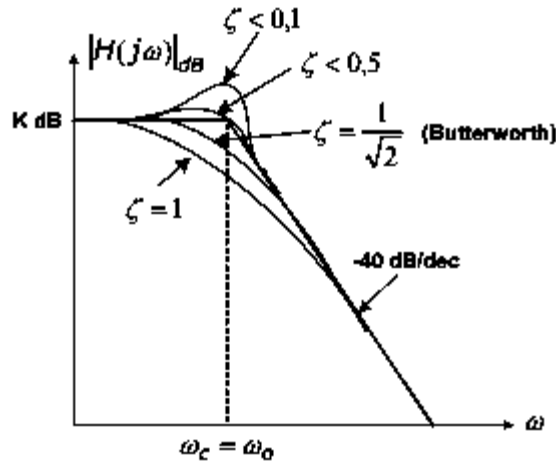


Figura 3.2. Respuestas filtro de segundo orden pasa-baja

Es importante observar que a diferencia de la función de 1er orden, la corrección respecto a la curva asintótica en $\omega = \omega_0$ depende de ζ . Es decir no siempre es de -3 dB.

Dependiendo del valor que tenga el factor de amortiguamiento el sistema es llamado de diferentes maneras:

Si $\zeta < 1$ (Sistema subamortiguado)

Si $\zeta = 1$ (Sistema amortiguamiento crítico)

Si $\zeta > 1$ (Sistema sobreamortiguado)

El valor del factor de amortiguamiento requerido para producir una respuesta característica deseada depende del orden (número de polos) del filtro. Un polo, para nuestros propósitos, es simplemente un circuito con un capacitor y una resistencia. Entre más polos tenga el filtro, más rápida será la atenuación.

3.3 DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS DE PRIMER ORDEN.

Los filtros activos de primer orden son los más sencillos de diseñar y construir, debido a que cuentan solo con una red RC.

Lo que significa que son filtros con un solo polo, a continuación diseñaremos dos filtros de primer orden el pasa baja y el pasa alta.

3.3.1 DISEÑO DE UN FILTRO PASA-BAJA DE PRIMER ORDEN

La figura 3.3 muestra un filtro activo pasa-baja con circuito RC que nos da una atenuación de 20dB/década sobre la frecuencia de corte, como indica su curva de respuesta en la figura 3.3. La frecuencia de corte de un filtro con un solo polo es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.3)$$

El amplificador operacional en este filtro es conectado como un amplificador no inversor con una ganancia de voltaje en lazo cerrado en la banda de paso establecido por los valores de R_1 y R_2 .

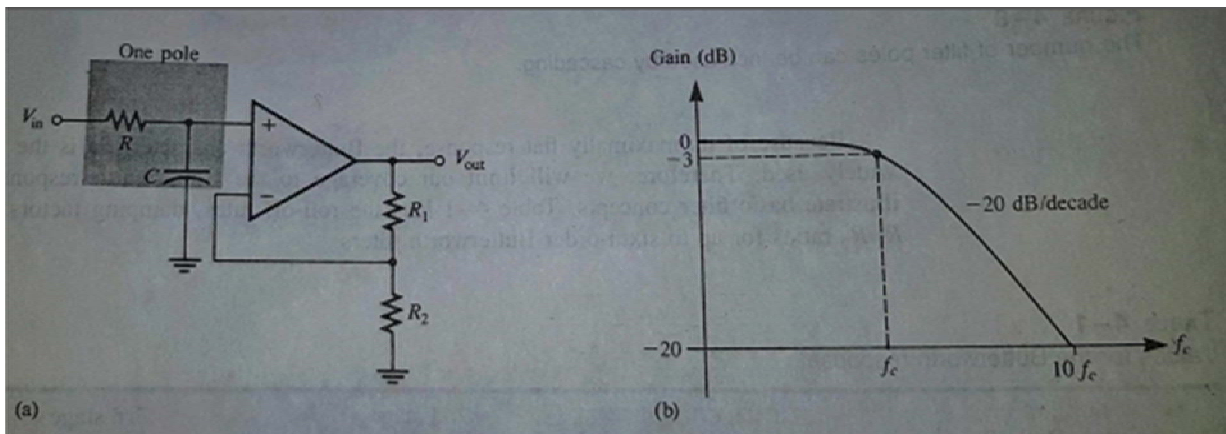


Figura 3.3. Filtro pasa-baja y respuesta en frecuencia.

Ahora bien para la primera prueba se diseñara un filtro pasa-baja con una frecuencia de corte de 1KHz, una vez diseñado se realizara la simulación de dicho filtro para comprobar que los cálculos fueron los correctos y observar su comportamiento.

En esta ocasión como ya tenemos una frecuencia de corte sugerida, partimos de dicha frecuencia para comenzar el diseño del filtro, se sugiere un capacitor de valor comercial para comenzar hacer los cálculos.

Una vez que ya tenemos la frecuencia de corte y el valor sugerido del capacitor, la única incógnita que tenemos sería el valor de la resistencia, la cual para calcularla debe ser despejada de la ecuación (3.3), entonces la ecuación nos queda de la siguiente manera:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

Para este ejercicio el capacitor sugerido será uno de $1\mu\text{F}$, haciendo cálculos:

$$R = \frac{1}{(2\pi)(1\text{KHZ})(1\mu\text{F})} = \frac{1}{0.0062831}$$

$$R = 159.15\Omega$$

Una vez calculado la resistencia se tienen todos los datos necesarios para nuestro filtro pasa-baja de primer orden. Ahora bien con la ayuda de un software de simulación llamado PROTEUS, se realizara la simulación del circuito para comprobar que nuestros cálculos hayan sido los correctos.

En la figura 3.4 (a) se muestra el circuito con los valores correspondientes de capacitor y resistencia, en la figura 3.4 (b) se muestra el diagrama de bode resultante del filtro, donde se comprueba que efectivamente la frecuencia de corte esta en -3dB.

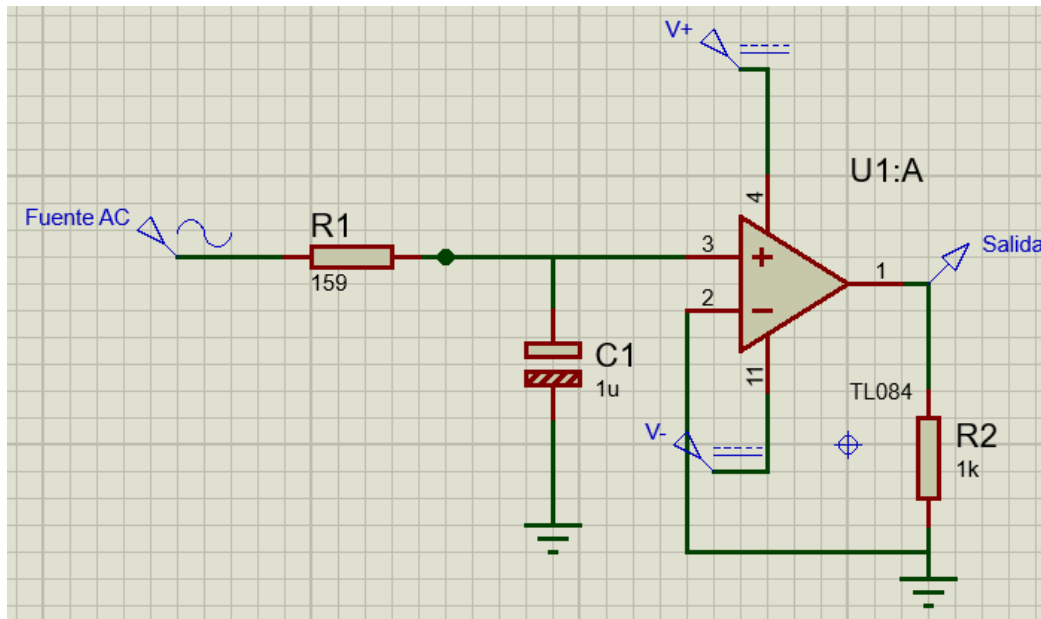


Figura 3.4 (a). Filtro pasa-baja 1er orden.

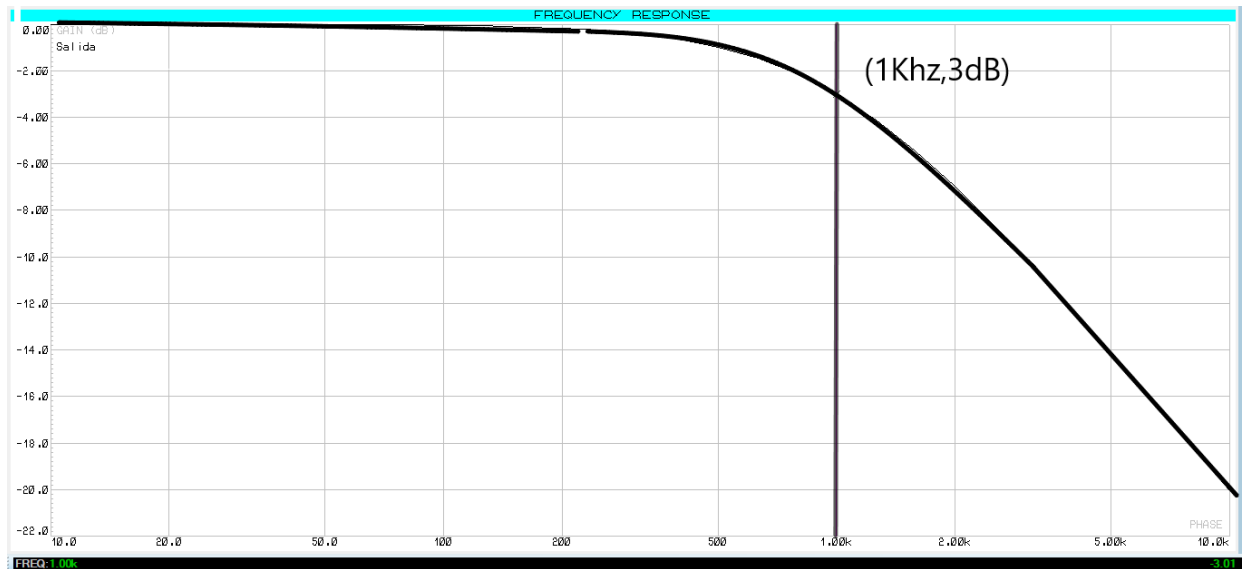


Figura 3.4 (b). Respuesta en frecuencia.

3.3.2 DISEÑO DE UN FILTRO PASA-ALTA

Ahora se diseñara un filtro activo pasa-alta con una frecuencia de corte de 10Khz. Para el diseño de este filtro los parámetros se calculan de la misma forma que el filtro pasa-baja con la ecuación (3.3).

El diseño de un filtro pasa-alta de primer orden se muestra en la figura 3.5 donde observamos que al igual que el filtro pasa-baja cuenta con un circuito de filtrado RC, solo que en este el acomodo de dichos componentes distinto.

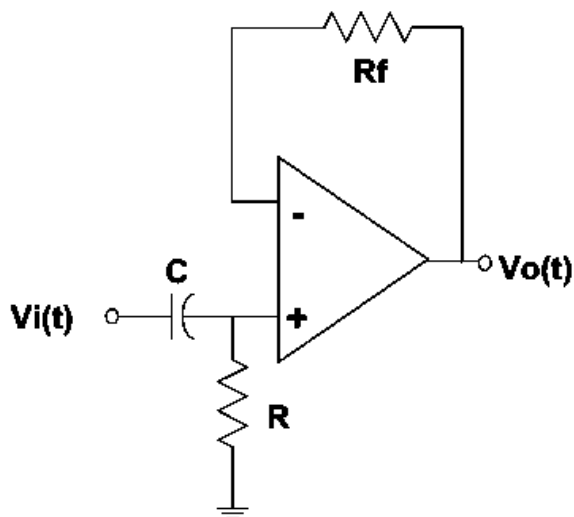


Figura 3.5 Filtro pasa-alta primer orden.

Al igual que en el ejercicio anterior una vez que tenemos el valor de la frecuencia de corte deseado, proponemos el valor del capacitor y se despeja la resistencia de la ecuación (3.3) que queda de la siguiente manera:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

Para este ejercicio el capacitor sugerido será uno de $0.1\mu\text{F}$, haciendo cálculos:

$$R = \frac{1}{(2\pi)(10\text{KHZ})(0.1\mu\text{F})} = \frac{1}{0.0062831}$$

$$R = 159.15\Omega$$

Una vez que se tienen calculados los valores de los componentes del filtro procedemos a simularlo en el software PROTEUS.

En la figura 3.6 (a) se muestra el diagrama del circuito que fue simulado con los valores de capacitor y resistencia calculados. En la figura 3.6 (b) se muestra el diagrama de bode correspondiente a este circuito, donde corroboramos que los cálculos son correctos, y que la frecuencia de corte se encuentra en -3dB.

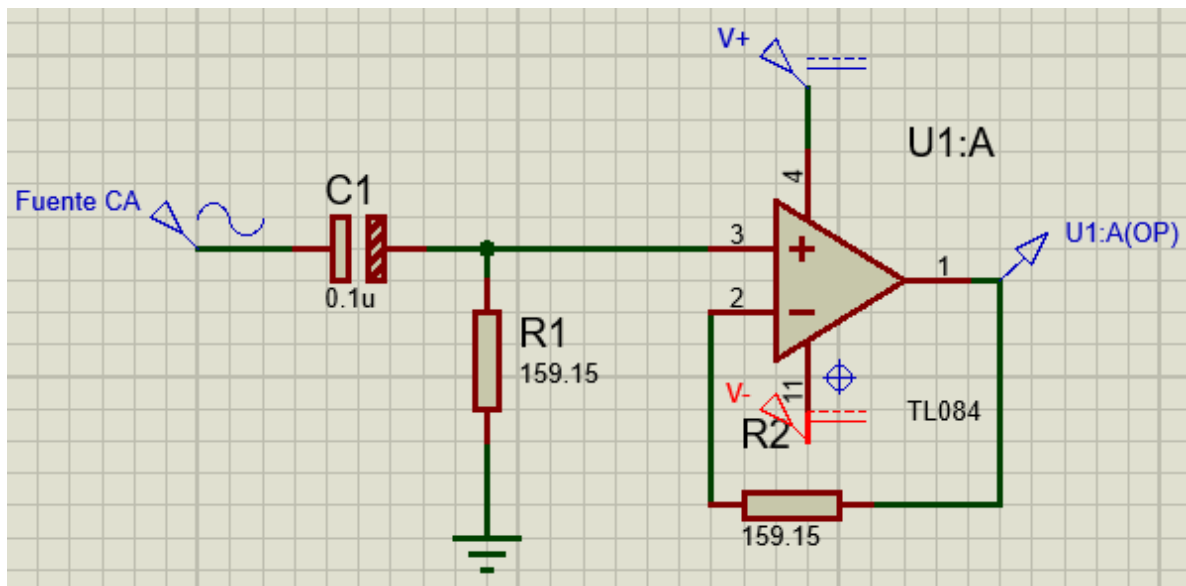


Figura 3.6 (a). Filtro pasa-alta 1er orden.



Figura 3.6 (b). Respuesta en frecuencia

A diferencia del diagrama del filtro activo pasa-baja observamos que el filtro pasa-alta cuenta con una resistencia R_f la cual es igual a R . Esto se hace para compensar el efecto de las corrientes de polarización del amplificador operacional.

Dicha resistencia no influirá en la función de transferencia (AC), ya que su única misión la realiza en continua.

3.4 DISEÑO DE FILTROS DE SEGUNDO ORDEN

Generalmente, para obtener un filtro con tres o más polos, un filtro de primer orden y uno de segundo son colocados en cascada. Como se muestra en la figura 3.7. Por ejemplo para obtener un filtro de tercer orden se coloca en cascada uno de segundo orden y uno de primer orden, para obtener uno de cuarto orden colocamos en cascada dos de segundo orden y así.

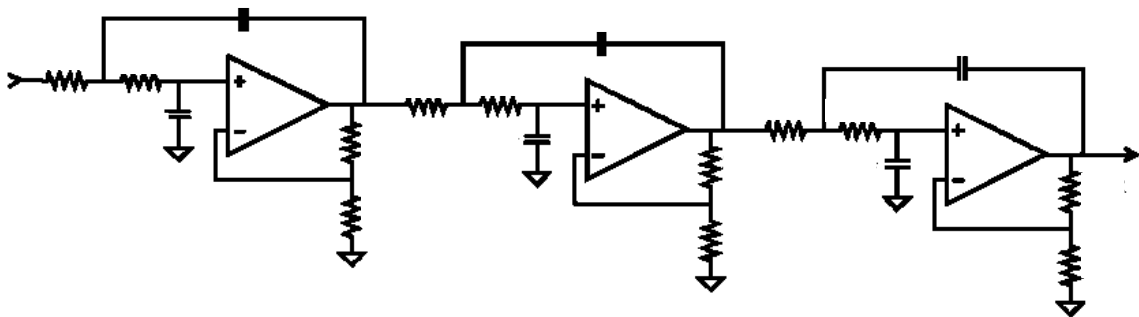


Figura 3.7. Filtro pasa-baja de orden superior

Cada filtro que se colocan en cascada es llamado etapa o sección.

El filtro de Butterworth es el más usado comúnmente, debido a que su respuesta es máximamente plana. Por lo tanto, limitaremos nuestra cobertura a la respuesta de Butterworth para ilustrar los conceptos básicos del filtro.

En la tabla 3.1 se muestra la lista de atenuaciones en dB/década, factor de amortiguamiento y los valores de R_1/R_2 . Hasta para un filtro de Butterworth de sexto orden.

Tabla 3.1 Filtros Butterworth.

	Atenuación	1er etapa			2da etapa			3er etapa		
Orden	dB/década	Polos	ζ	R1/R2	Polos	ζ	R1/R2	Polos	ζ	R1/R2
1	20	1	opcional							
2	40	2	1.414	0.586						
3	60	2	1.00	1	1	1.00	1			
4	80	2	1.848	0.152	2	0.765	1.235			
5	100	2	1.00	1	2	1.618	0.382	1	1.618	1.382
6	120	2	1.932	0.068	2	1.414	0.586	2	0.518	1.482

3.4.1 DISEÑO DE UN FILTRO PASA-BAJA DE SEGUNDO ORDEN

El sellen-key es una de las configuraciones más comunes para un filtro de segundo orden (dos-polos). Este también es llamado VCVS (voltaje-controlled voltaje source). En la figura 3.8 se muestra la versión de un filtro Sallen-Key. Nótese que hay dos circuitos RC que dan una respuesta de -40dB/década sobre la frecuencia de corte (asumiendo las características de Butterworth). La primera red RC consiste en R_a y C_a , y la segunda red consiste en R_B y C_B . Una característica única es el capacitor C_a que proporciona una retroalimentación para darle forma a la respuesta cerca de la banda de paso.

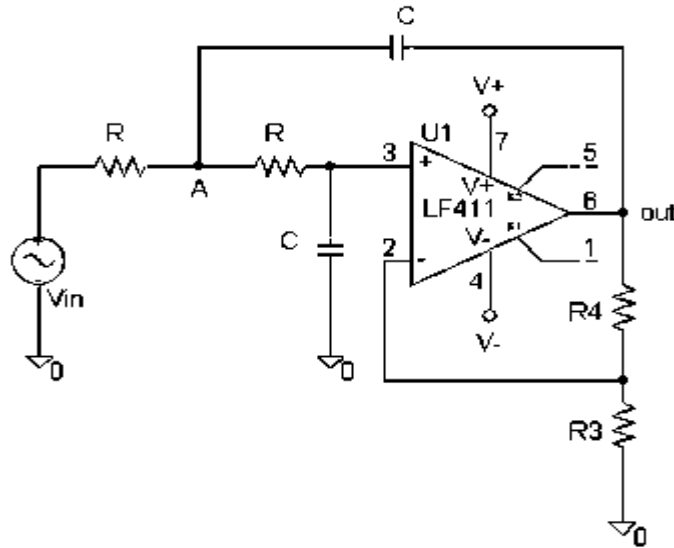


Figura 3.8. Filtro pasa-baja segundo orden.

La frecuencia de corte para el filtro de segundo orden es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_A R_B C_A C_B}} \quad (3.4)$$

Por simplicidad, los valores de los componentes pueden ser igual $R_A = R_B = R$ y $C_A = C_B = C$. En este caso, la expresión para la frecuencia de corte se simplifica a:

$$f_c = 1/2\pi RC$$

Como en el filtro de primer orden, el amplificador operacional en el filtro de segundo orden actúa como un amplificador no inversor con retroalimentación negativa proporcionada por R_1/R_2 . Como ya sabemos, el factor de amortiguamiento es establecido por los valores de R_1 y R_2 .

Haciendo así la respuesta del filtro ya sea Butterworth, Chebyshev, o Bessel. Por ejemplo, en la tabla 3.1, el resultado de R_1/R_2 debe ser 0.586 esto para producir el factor de amortiguamiento requerido para la respuesta de un filtro Butterworth (sistema subamortiguado) de segundo orden.

En esta ocasión diseñaremos un filtro pasa-baja de segundo orden con una frecuencia de corte de 1Khz, en este caso la frecuencia de corte que deseamos es la misma con la que se diseñó el filtro pasa-baja de primer orden, esto con el fin de observar las diferencias entre uno y otro.

Como lo se menciona anteriormente la ecuación (3.4) para la frecuencia de corte del filtro de segundo orden, puede simplificarse de tal forma que queda igual a la ecuación (3.3) (frecuencia de corte para un filtro de primer orden).

Al igual que para el diseño de un filtro pasa-baja de primer orden se propone el valor de un capacitor y despejamos la ecuación 3.3 para encontrar el valor de la resistencia. La ecuación nos queda de la siguiente manera:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

En esta ocasión se sugiere usar un valor de 1uF para los capacitores, calculando:

$$R = \frac{1}{(2\pi)(1KHZ)(1\mu F)} = \frac{1}{0.0062831}$$

$$R = 159.15\Omega$$

Para la respuesta de Butterworth, $R_1/R_2 = 0.586$, calculando R_1 tenemos:

$$R_1 = 0.586R_2 = 0.586(1k\Omega) = 586\Omega$$

Una vez que se tienen todos los valores para el filtro lo que sigue es simularlo, en la figura 3.9 (a) se muestra el circuito para una respuesta de Butterworth (sistema subamortiguado) y en la figura 3.9 (b) se muestra la gráfica correspondiente al sistema.

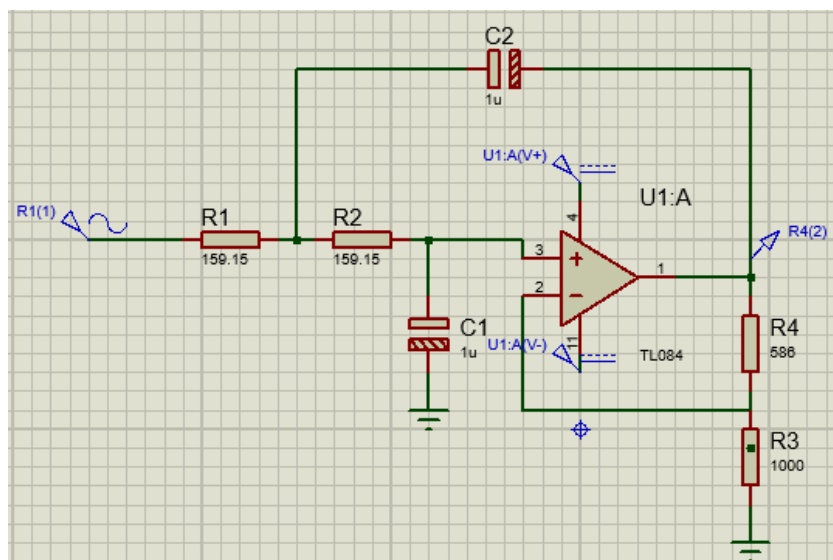


Figura 3.9 (a). Filtro pasa-baja de segundo orden.

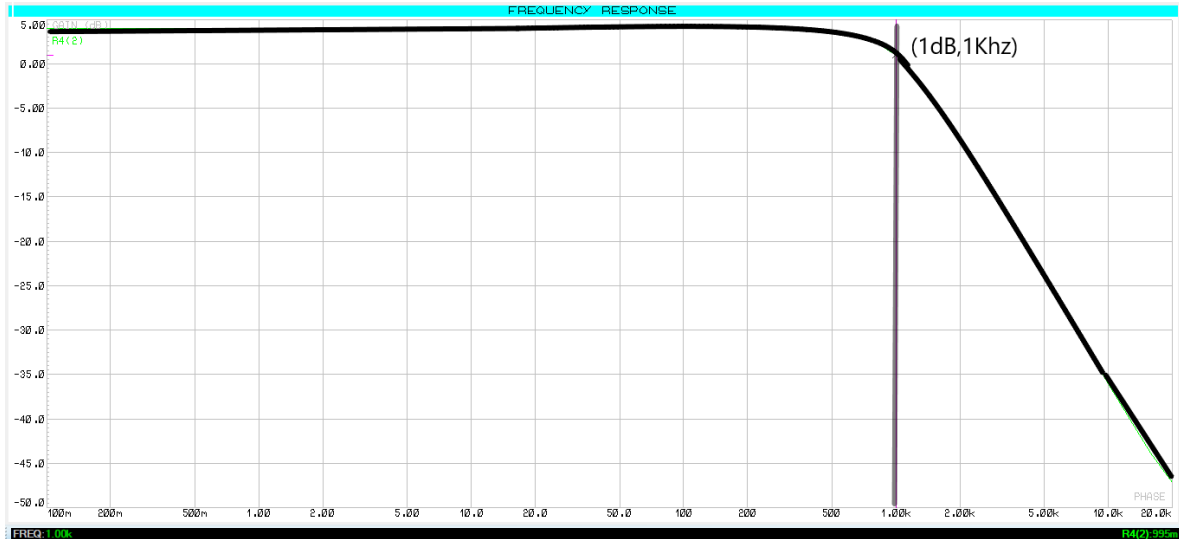


Figura 3.9 (b). Respuesta en frecuencia.

Ahora bien si deseamos diseñar un sistema con amortiguamiento crítico, es decir, que el factor de amortiguamiento sea igual a 1.

Para ello, ponemos el factor de amortiguamiento (ζ) en función de la ganancia (k) obtenemos lo siguiente:

$$\zeta = \frac{3 - (1 + \frac{R_4}{R_3})}{2} \quad (3.5)$$

Simplificando tenemos:

$$\zeta = 1 - \frac{R_4}{2R_3}$$

Para calcular nuestra resistencia R_4 la despejamos de la ecuación, y tenemos:

$$R_4 = (1 - \zeta) \cdot 2R_3$$

De la ecuación podemos observar que si el factor de amortiguamiento vale 1 el resultado sería cero, entonces solo tendríamos R_3 que ya se había definido con anterioridad.

Como se observa en la gráfica de la figura 3.2 que cuando el factor de amortiguamiento es igual a 1, la frecuencia de corte debe caer en los -6dB.

En la figura 3.10 que arroja la simulación se puede observar que efectivamente la frecuencia de corte se encuentra en los -6dB.

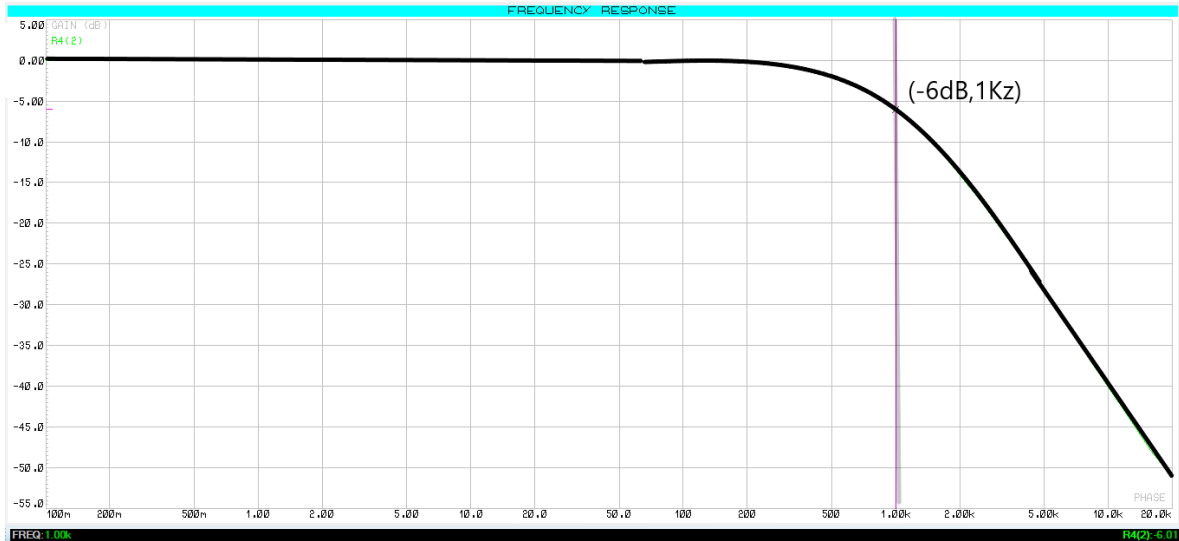


Figura 3.10. Respuesta en frecuencia ($\zeta = 1$).

De esta manera se demuestra que podemos variar el factor de amortiguamiento al diseñar el filtro, dependiendo del tipo de filtro o respuesta que se desee.

3.4.2 DISEÑO DE UN FILTRO PASA-ALTA DE SEGUNDO ORDEN.

En la figura 3.11 se muestra la configuración de un filtro pasa-alta Sallen-Key. La componente R_A , C_A , R_B y C_B forman la red de frecuencia selectiva de dos polos. Nótese que la posición de los resistores y capacitores en la red de frecuencia selectiva son opuestos la configuración del filtro pasa-baja.

Al igual que el filtro pasa-baja la respuesta característica puede ser modificada por la selección de los resistores de retroalimentación, R_1 y R_2 .

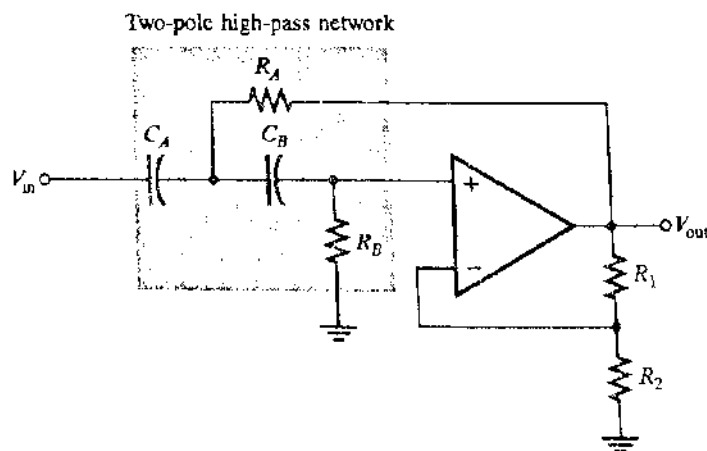


Figura 3.11. Filtro pasa-alta segundo orden.

Al igual que el filtro pasa-baja la ecuación que determina la frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Se diseñará un filtro pasa-alta de segundo orden con la frecuencia de corte en 10Khz esto para comparar la diferencia en la atenuación que se presenta con uno de primer orden.

Al igual que en las ocasiones anteriores una vez que ya tenemos nuestra frecuencia de corte, propones el valor de un capacitor para después calcular las resistencias del filtro.

El valor que se propone de capacitor será el de 0.1μF.

Una vez que se tiene el valor del capacitor y la frecuencia de corte, se calculan las resistencias, con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$
$$R = \frac{1}{2\pi(10KHz)(0.1\mu F)} = 159.15\Omega$$

Para una respuesta de Butterworth, el factor de amortiguamiento debe ser 1.414 y $R_1/R_2 = 0.586$. (Véase la tabla 3.1.)

Calculando R_1 se tiene:

$$R_1 = 0.586R_2 = 0.586(1K\Omega) = 586\Omega$$

Con todos los datos calculados para el filtro pasa-alta se procede a simularlo para comprobar nuestros cálculos. En la figura 3.12 se muestra el filtro simulado con los respectivos valores de resistencias y capacitores.

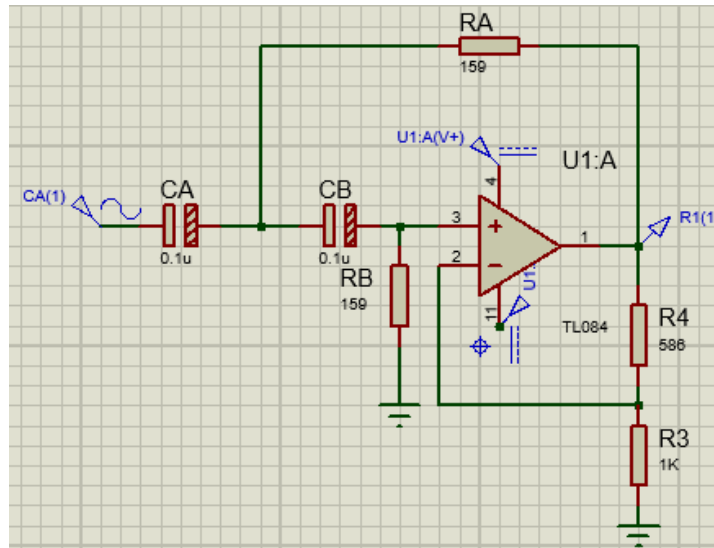


Figura 3.12. Filtro pasa-alta segundo orden.

En la figura 3.13 se muestra la gráfica obtenida para un filtro pasa-alta de segundo orden con respuesta a la frecuencia de Butterworth (sistema subamortiguado).

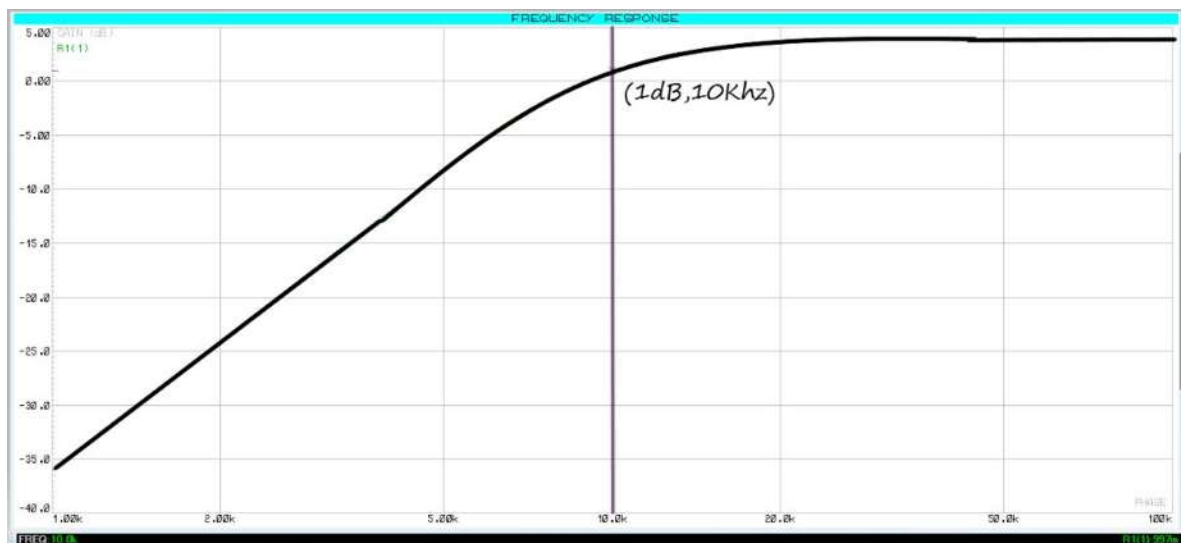


Figura 3.13. Respuesta en frecuencia.

Ahora se diseñará un filtro pasa-alta con un factor de amortiguamiento igual a 1 (amortiguamiento crítico).

Al igual que en filtro pasa-baja, ponemos el factor de amortiguamiento (ζ) en función de la ganancia (k) se obtiene lo siguiente:

$$\zeta = \frac{3 - (1 + \frac{R_4}{R_3})}{2}$$

Simplificando se tiene:

$$\zeta = 1 - \frac{R_4}{2R_3}$$

Para calcular nuestra resistencia R_4 la se despeja de la ecuación, y se tiene:

$$R_4 = (1 - \zeta) \cdot 2R_3$$

De la ecuación se puede observar que si el factor de amortiguamiento vale 1 el resultado sería cero, entonces solo se tiene R_3 que ya se había definido con anterioridad.

En la figura 3.15 se muestra la respuesta del filtro pasa-altas de segundo orden con las modificaciones en la red de retroalimentación.

Al definir el factor de amortiguamiento en 1, observamos que la respuesta del filtro es diferente ahora la frecuencia de corte se encuentra en -6 dB y ahora es más clara la atenuación de -40 dB/década.

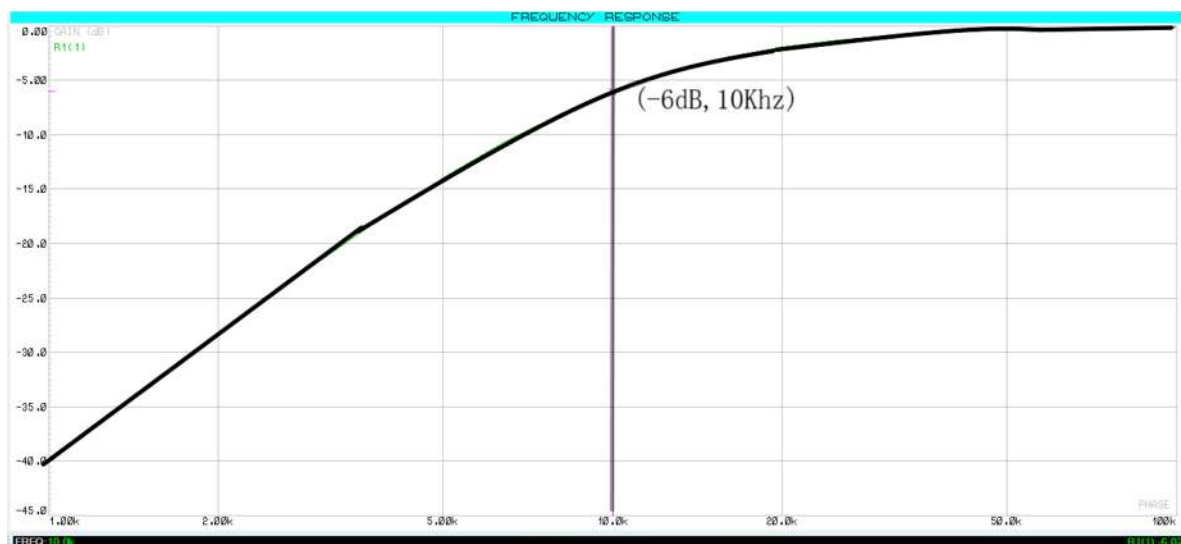


Figura 3.15. Respuesta en frecuencia ($\zeta = 1$).

3.5 DISEÑO DE FILTROS DE ORDEN SUPERIOR.

Existe un concepto erróneo entre los diseñadores de filtros principiantes, que los filtros de orden alto pueden ser producidos por filtros de orden bajo colocados en cascada del mismo tipo. Esto no es verdad. Por ejemplo, tres filtros Butterworth de segundo orden con frecuencia de corte de 10KHz colocados en cascada no podrían producir un filtro Butterworth de sexto orden con frecuencia de corte de 10KHz.

Una inspección rápida revela porque este no es el caso: un filtro de primer orden mostrara una pérdida de 3dB en la frecuencia de corte, por definición (en este caso 10KHz). Si tres filtros del mismo tipo son colocados en cascada, cada filtro producirá una pérdida de 3dB en la frecuencia de corte, lo que significa una pérdida total de 9dB.

Sin embargo, en realidad un filtro de orden superior requiere un número secciones individuales, cada una con sus diferentes especificaciones. Cada sección será basada en los filtros de segundo orden, para hacer un filtro de orden impar, se agrega un filtro de primer orden.

3.6 DISEÑO DE FILTROS DE TERCER ORDEN.

Una vez estudiados los filtros activos de primero y segundo orden, ya se conoce como es su diseño y su respuesta en frecuencia. Ahora se diseñaran filtros de tercer orden tanto pasa-baja como pasa-alta.

Estos filtros no son mas que la combinacion de los dos filtros vistos anteriormente.

3.6.1 DISEÑO DE FILTRO DE TERCER ORDEN PASA-BAJA.

El filtro activo pasa-baja de tercer orden o tres polos no es mas que la combinacion de un filtro pasa-baja de segundo orden y uno de primer orden.

En la figura se muestra el mencionado filtro donde se observa lo que ya se ha comentado.

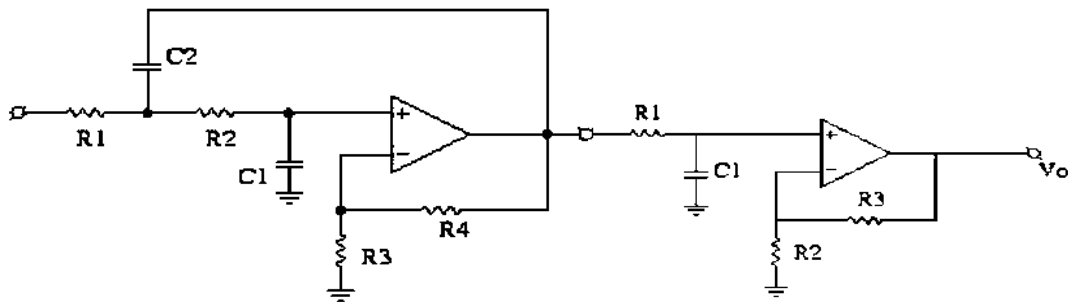


Figura 3.16. Filtro activo de tercer orden.

Se desea que el filtro cuente con una frecuencia de corte de 1Khz al igual que los diseñados anteriormente, esto para observar las diferencias en la respuesta.

Ahora bien para comenzar con el diseño se sugiere el valor de un capacitor que será el mismo que el de los filtros anteriores de $1\mu\text{F}$.

Después de la ecuación 3.3 despejamos la resistencia para poder calcular su valor y nos queda:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

Calculando:

$$R = \frac{1}{2\pi(1\text{KHz})(1\mu\text{F})} = 159.15\Omega$$

Una vez que se calcula el valor de las resistencias, nos basamos en la tabla 3.1 para calcular los valores de retroalimentación de cada estación del filtro.

En este ocasión la tabla 3.1 indica un factor de amortiguamiento de 1 para las dos estaciones del filtro por lo tanto el valor de las resistencias será el mismo.

Por simplicidad igualamos R con R2 y tenemos:

$$\zeta = 1, \frac{R_1}{R_2} = 1$$

Calculando:

$$R_1 = 1(R_2) = 159.15\Omega$$

Una vez que tenemos todos los componentes del filtro lo siguiente es realizar la simulación.

La simulación se realizó con la ayuda del software PROTEUS, el circuito simulado se muestra en la figura 3.17.

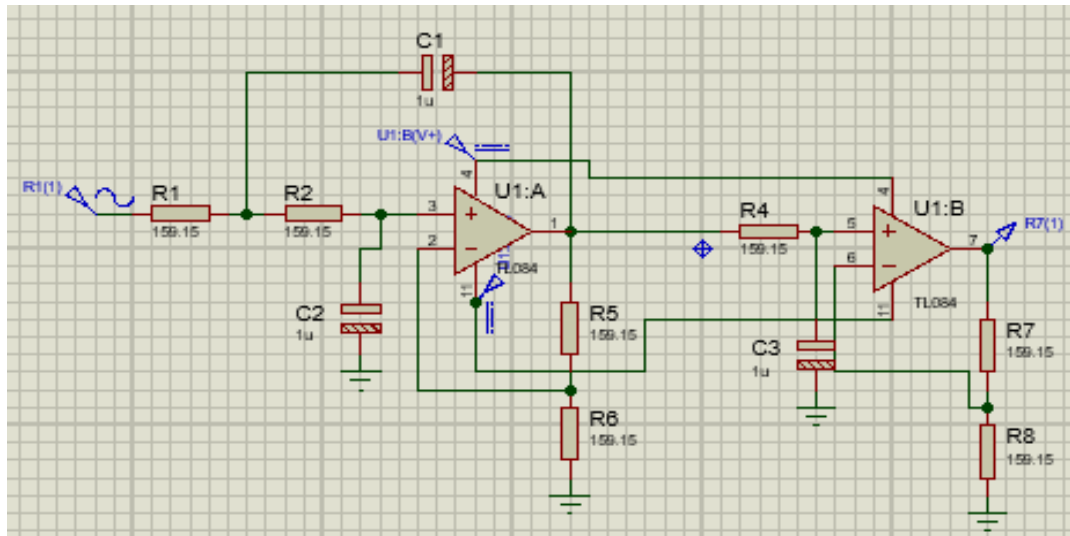


Figura 3.17. Filtro pasa-baja de tercer orden.

En la figura 3.18, tenemos la gráfica del filtro pasa-baja de tercer orden donde se observa que efectivamente la atenuación era la esperada 60 dB/década.

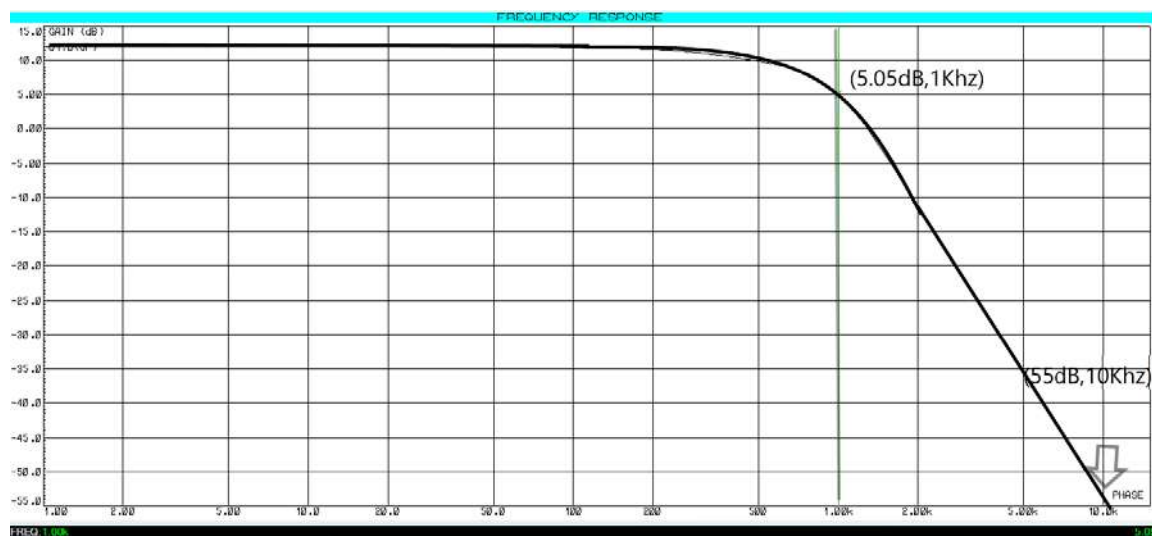


Figura 3.18. Respuesta en frecuencia filtro pasa-baja tercer orden.

3.6.2 DISEÑO DE FILTRO DE TERCER ORDEN PASA-ALTA.

Al igual que el filtro pasa-baja de tercer orden, el filtro pasa-alta de tercer orden está estructurado por dos estaciones, en la primera se tiene un filtro pasa-alta de segundo orden y en la segunda se tiene un filtro pasa-alta de primer orden. Dichos filtros están conectados en cascada para formar un filtro de tres polos o tercer orden.

Se diseñara un filtro pasa-alta de tercer orden el cual tendrá un frecuencia de corte de 10 KHz esto para observar las diferencias con los de orden inferior diseñados anteriormente.

Ahora bien para comenzar con el diseño se sugiere el valor de un capacitor que será el mismo que el de los filtros anteriores de $0.1\mu F$.

Después de la ecuación (3.3) se despeja la resistencia para poder calcular su valor y nos queda:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

Calculando:

$$R = \frac{1}{2\pi(10KHz)(0.1\mu F)} = 159.15\Omega$$

Una vez que se calcula el valor de las resistencias, haciendo referencia a la tabla 3.1 para calcular los valores de retroalimentación de cada estación del filtro.

En este ocasión la tabla 3.1 indica un factor de amortiguamiento de 1 para las dos estaciones del filtro por lo tanto el valor de las resistencias será el mismo.

Por simplicidad igualamos R con R2 y tenemos:

$$\zeta = 1, \frac{R_1}{R_2} = 1$$

Calculando:

$$R_1 = 1(R_2) = 159.15\Omega$$

Una vez que tenemos todos los componentes del filtro lo siguiente es realizar la simulación.

En la figura 3.19, se muestra el filtro pasa alta de tercer orden del cual se realizó la simulación.

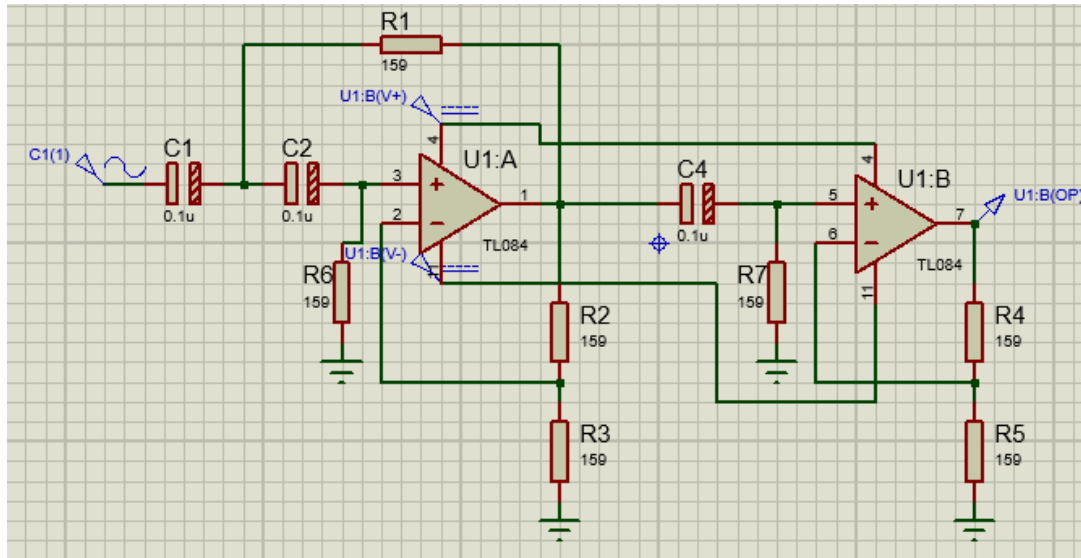


Figura 3.19 filtro pasa-alta de tercer orden.

En la figura 3.20, tenemos la gráfica del filtro pasa-baja de tercer orden donde observamos que efectivamente la atenuación era la esperada 60 dB/década.

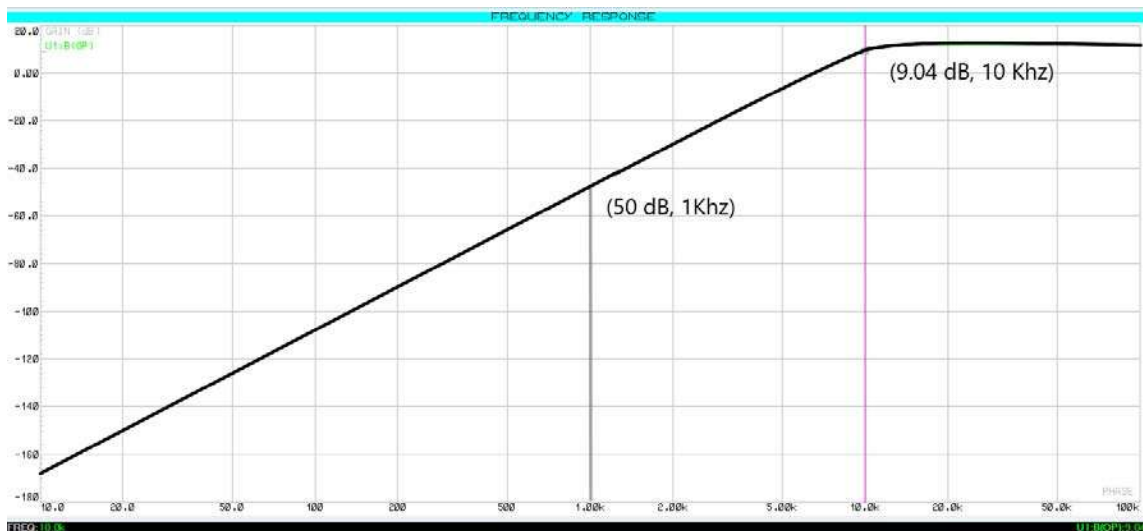


Figura 3.20. Respuesta en frecuencia filtro pasa-alta de tercer orden.

3.7 DISEÑO DE FILTROS DE QUINTO ORDEN.

Una vez estudiados los filtros activos de primero y segundo orden, ya se conoce como es su diseño y su respuesta en frecuencia. Ahora se diseñaran filtros de tercer orden tanto pasa-baja como pasa-alta.

Estos filtros no son mas que la combinacion de los dos filtros vistos anteriormente.

La diferencia es que las retroalimentaciones son diferentes basándonos en la tabla 3.1.

3.7.1 DISEÑO DE UN FILTRO PASA-BAJA DE QUINTO ORDEN.

Como ya se mencionó con anterioridad un filtro activo de orden superior al segundo requiere de la colocación de varios filtros en cascada.

Esto depende del número de polos (orden) que deseemos obtener en el filtro, en esta ocasión se diseñará un filtro pasa-baja de quinto orden, es decir, se colocaran en cascada dos filtros pasa-baja de segundo orden y un filtro pasa-baja de primer orden.

En la figura 3.21 podemos observar la configuración de un filtro pasa-baja de quinto orden.

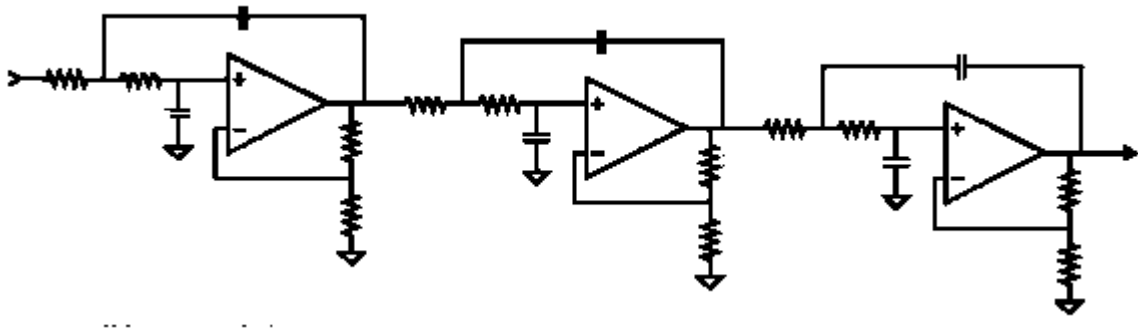


Figura 3.21 filtro activo de quinto orden.

Se diseñará un filtro pasa-baja de quinto orden con un frecuencia de corte de 1KHz, esta frecuencia de corte es igual a las de los filtros pasa-baja de primer y segundo orden diseñados anteriormente, esto con la finalidad de observar las diferentes respuestas entre uno y otro.

Ahora bien para comenzar con el diseño se sugiere el valor de un capacitor que será el mismo que el de los filtros anteriores de 1μF.

Después de la ecuación (3.3) se despeja la resistencia para poder calcular su valor y nos queda:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

Calculando:

$$R = \frac{1}{2\pi(10KHz)(1\mu F)} = 159.15\Omega$$

Ahora por simplicidad igualamos $R=R_2$ y tomando como referencia la tabla 3.1 para una respuesta de Butterworth en la primera sección.

$$\zeta = 1, \frac{R_1}{R_2} = 1$$

Calculando:

$$R_1 = 1(R_2) = 159.15\Omega$$

Para todos los estados del filtro la frecuencia de corte debe ser igual, por lo tanto los valores en los capacitores y resistencia serán igual.

Sin embargo las especificaciones en la retroalimentación son diferentes para cada uno de acuerdo a la tabla 3.1.

Ahora se calculara la retroalimentación para la segunda sección del filtro que en este caso es otro filtro segundo orden.

Para la segunda sección los valores indicados en la tabla 3.1 son:

$$\zeta = 1.618, \frac{R_1}{R_2} = 0.382$$

Calculando:

$$R_1 = 0.382(R_2) = 0.382(159.15) = 60.79 \Omega$$

Finalmente para la última sección del filtro que en esta ocasión es el filtro de primer orden.

Los valores que se indican en la tabla 3.1 son los siguientes:

$$\zeta = 1.618, \frac{R_1}{R_2} = 1.382$$

Calculando:

$$R_1 = 1.382(R_2) = 1.382(159.15) = 219.9\Omega$$

Una vez que se calculan los valores para las diferentes etapas del filtro, el siguiente paso es simularlo.

La simulación se realizó con la ayuda del software PROTEUS, el circuito simulado se muestra en la figura 3.22.

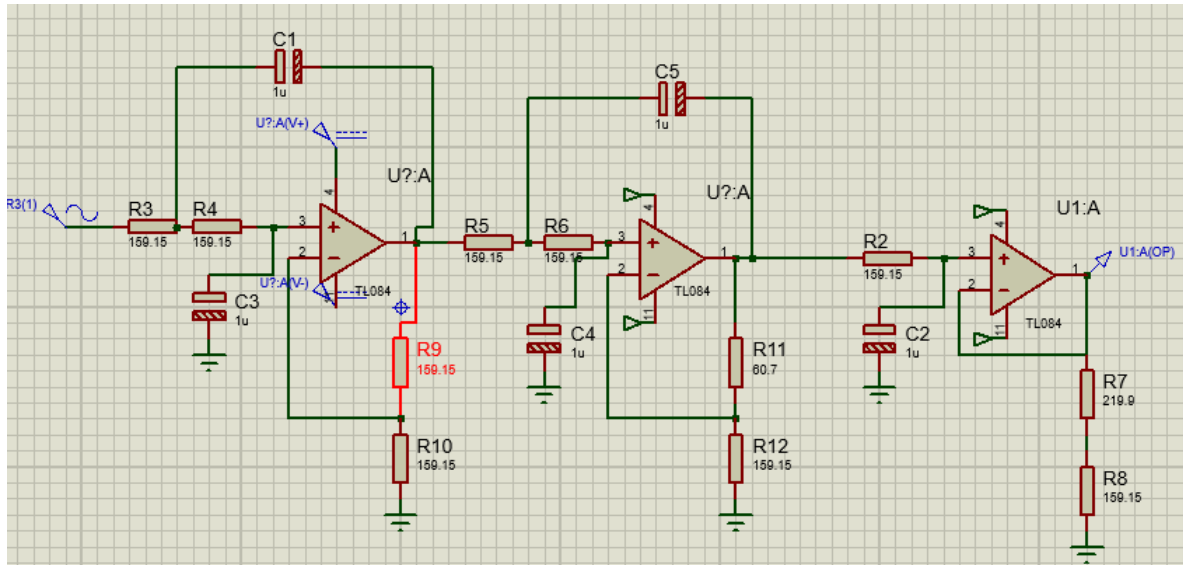


Figura 3.22. Filtro pasa-baja de quinto orden.

En la figura 3.23 se tiene la gráfica del filtro pasa-baja de quinto orden donde se tiene una atenuación de 95.6 dB/década

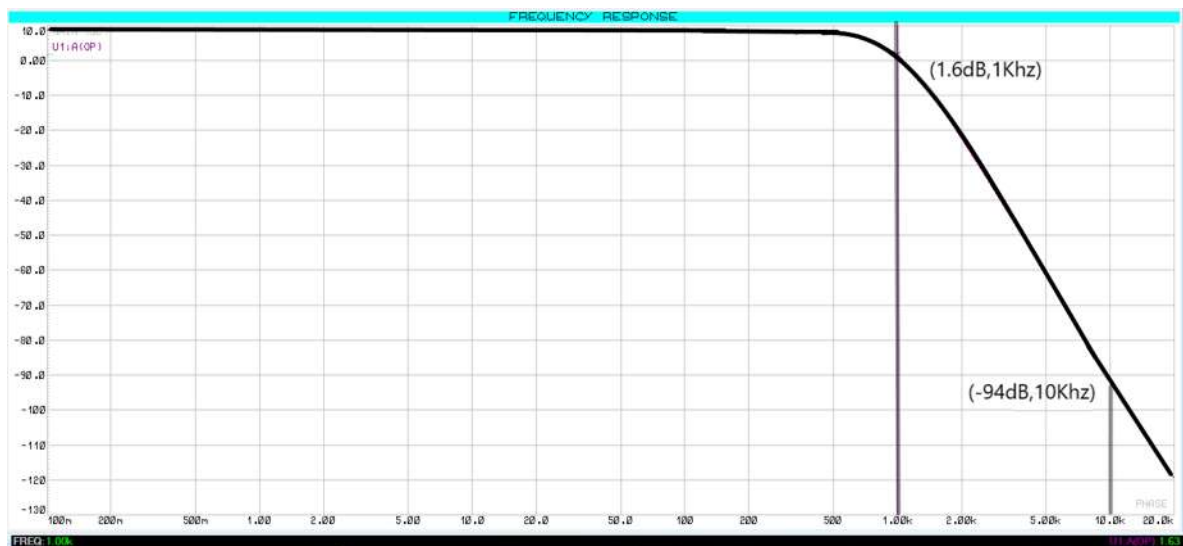


Figura 3.23 Respuesta en frecuencia filtro pasa-baja de quinto orden.

3.7.2 DISEÑO DE UN FILTRO PASA-ALTA DE QUINTO ORDEN.

Al igual que los filtros pasa-baja de orden superior para crear un filtro pasa-alta de quinto orden es necesario colocar en cascada dos filtros pasa-alta de segundo orden y uno de primer orden.

El diseño de este tipo de filtro es muy similar al filtro pasa-baja de quinto orden con respuesta Butterworth.

El filtro pasa-alta contara con una frecuencia de corte de 10Khz al igual que los dos filtros pasa-alta diseñados anteriormente, esto con la finalidad de notar la diferente atenuación entre uno y otro.

Ahora bien para comenzar con el diseño se sugiere el valor de un capacitor que será el mismo que el de los filtros anteriores de 0.1μF.

Después de la ecuación 3.3 despejamos la resistencia para poder calcular su valor y nos queda:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

Calculando:

$$R = \frac{1}{2\pi(10KHz)(0.1\mu F)} = 159.15\Omega$$

Ahora por simplicidad igualamos $R=R_2$ y tomando como referencia la tabla 3.1 para una respuesta de Butterworth en la primera sección.

$$\zeta = 1, \frac{R_1}{R_2} = 1$$

Calculando:

$$R_1 = 1(R_2) = 159.15\Omega$$

Para todos los estados del filtro la frecuencia de corte debe ser igual, por lo tanto los valores en los capacitores y resistencia serán igual.

Sin embargo las especificaciones en la retroalimentación son diferentes para cada uno de acuerdo a la tabla 3.1.

Ahora se calculara la retroalimentación para la segunda sección del filtro que en este caso es otro filtro segundo orden.

Para la segunda sección los valores indicados en la tabla 3.1 son:

$$\zeta = 1.618, \frac{R_1}{R_2} = 0.382$$

Calculando:

$$R_1 = 0.382(R_2) = 0.382(159.15) = 60.79 \, \Omega$$

Finalmente para la última sección del filtro que en esta ocasión es el filtro de primer orden.

Los valores que se indican en la tabla 3.1 son los siguientes:

$$\zeta = 1.618, \frac{R_1}{R_2} = 1.382$$

Calculando:

$$R_1 = 1.382(R_2) = 1.382(159.15) = 219.9 \, \Omega$$

Una vez que se calcula el valor de los componentes del filtro procedemos a simularlo para comprobar su funcionamiento y observar su respuesta en frecuencia.

En la figura 3.24 se muestra el circuito que se simuló, se observa que consta de 3 etapas, dos filtros pasa-alta de segundo orden y uno más de primer orden.

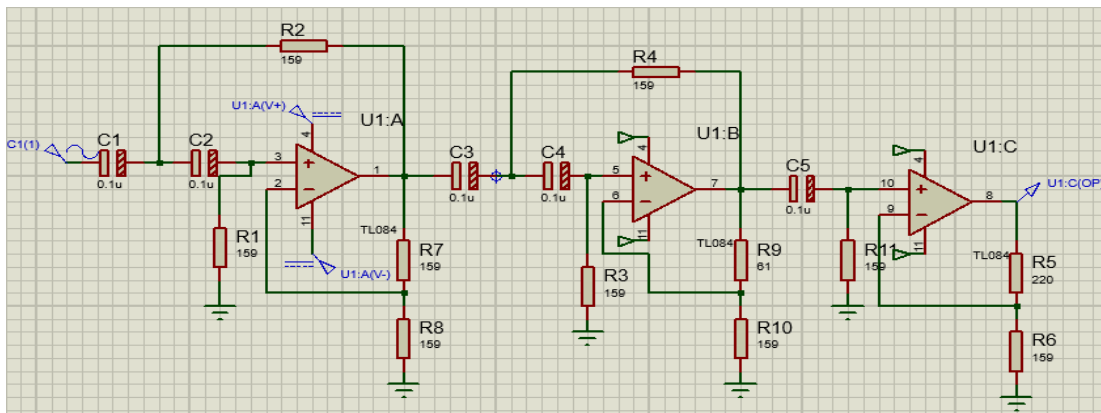


Figura 3.24. Filtro pasa-alta de quinto orden.

En la figura 3.25 se muestra la respuesta en frecuencia del filtro pasa-alta de quinto orden se observa que la atenuación es prácticamente de 100 dB/década.

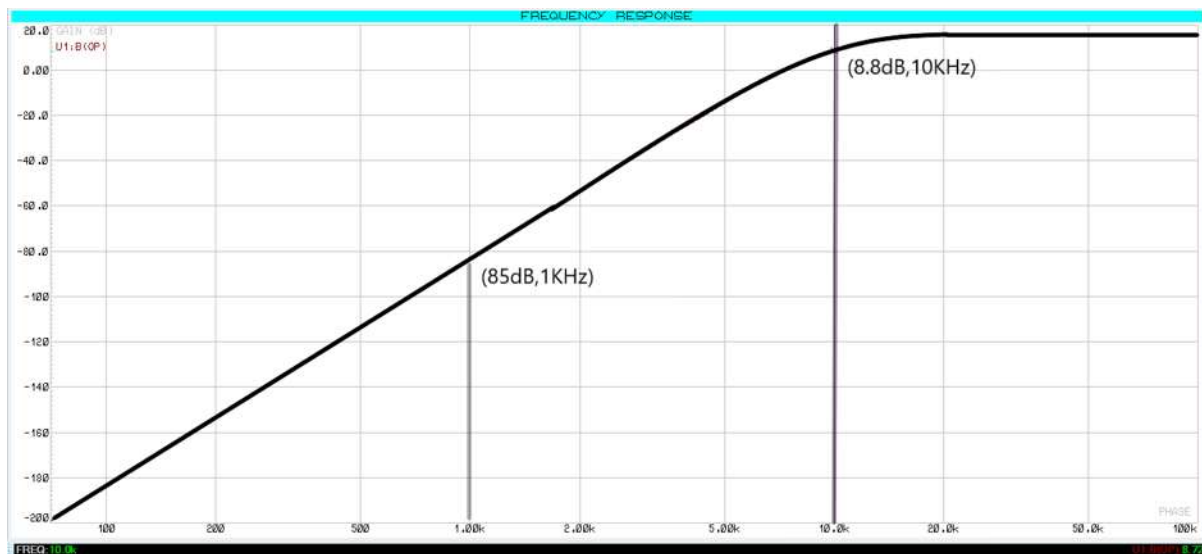


Figura 3.25. Respuesta en frecuencia filtro pasa-alta de quinto orden.

CAPITULO 4

IMPLEMENTACION DE FILTROS DE ORDEN SUPERIOR

4.1 INTRODUCCION

Una vez que ya se diseñaron y simularon los diferentes tipos de filtros activos que se han estudiado hasta el momento. El siguiente paso es implementar el circuito físicamente, para observar que el filtro activo funcione de acuerdo a lo esperado y comparar nuestros resultados de diseño y simulación con los del circuito implementado.

4.2 ESTACION DE TRABAJO NI ELVIS

Antes de entrar de lleno en la implementación de los filtros activos cabe mencionar la herramienta utilizada para obtener los resultados de los diferentes filtros que se implementaron.

Esta herramienta proporciona una experiencia de aprendizaje basada en proyectos, usando medidas en línea y diseño práctico y embebido. En la figura 4.1 se muestra la estación de trabajo NI ELVIS.



Figura 4.1. NI ELVIS

El NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite (NI ELVIS) es un dispositivo modular de laboratorio educativo de ingeniería desarrollado específicamente para la academia. Con este enfoque práctico, los profesores pueden ayudar a los estudiantes a aprender habilidades de ingeniería prácticas y experimentales. NI ELVIS incluye un osciloscopio, multímetro digital, generador de funciones, fuente de alimentación variable, analizador de Bode y otros instrumentos comunes de

laboratorio. Puede conectar una PC al NI ELVIS usando USB y desarrollar circuitos en su protoboard desmontable.

4.3 IMPLEMENTACION DE FILTROS ACTIVOS DE PRIMER ORDEN

Como ya se mencionó anteriormente los filtros activos de primer orden es el filtro más sencillo, ya que este tipo de filtro solo consta de una red RC.

Estos son filtros de un solo polo y pueden considerarse circuitos lineales debido a su función de transferencia.

A continuación se implementaran dos filtros activos de primer orden, un pasa baja y un pasa alta.

4.3.1 IMPLEMENTACION DE FILTRO PASA-BAJA DE PRIMER ORDEN.

En la figura 4.2 se muestra el circuito de un filtro pasa-baja de primer orden que fue implementado en un protoboard.

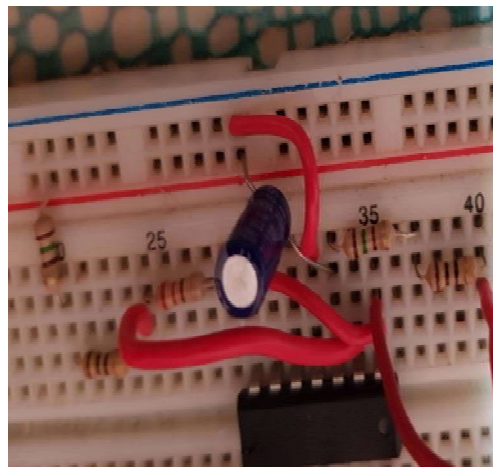


Figura 4.2 Circuito filtro pasa-baja

Los valores de capacitancia y resistencia para este circuito fueron calculados en el capítulo 3.

Con la ayuda de NI ELVIS se obtuvieron las mediciones en el osciloscopio en la figura 4.3 se muestra los resultados obtenidos, donde se puede observar que la frecuencia de corte es la esperada.

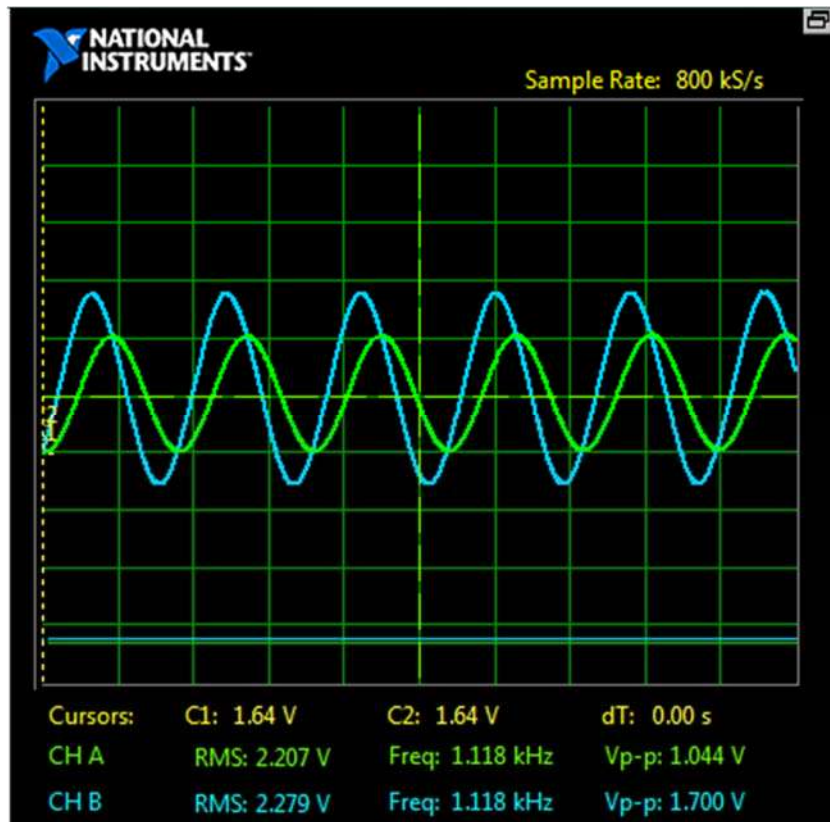


Figura 4.3. Medición de filtro pasa-baja con 1Khz.

Una de las ventajas de utilizar NI ELVIS para comprobar el funcionamiento de los filtros activos; es que se puede obtener el diagrama de Bode y de esta manera podemos comparar de una forma más correcta los resultados de la practica con los obtenidos en la simulación. En la figura 4.4 se puede observar el diagrama de Bode obtenido del filtro pasa-baja de primer orden.

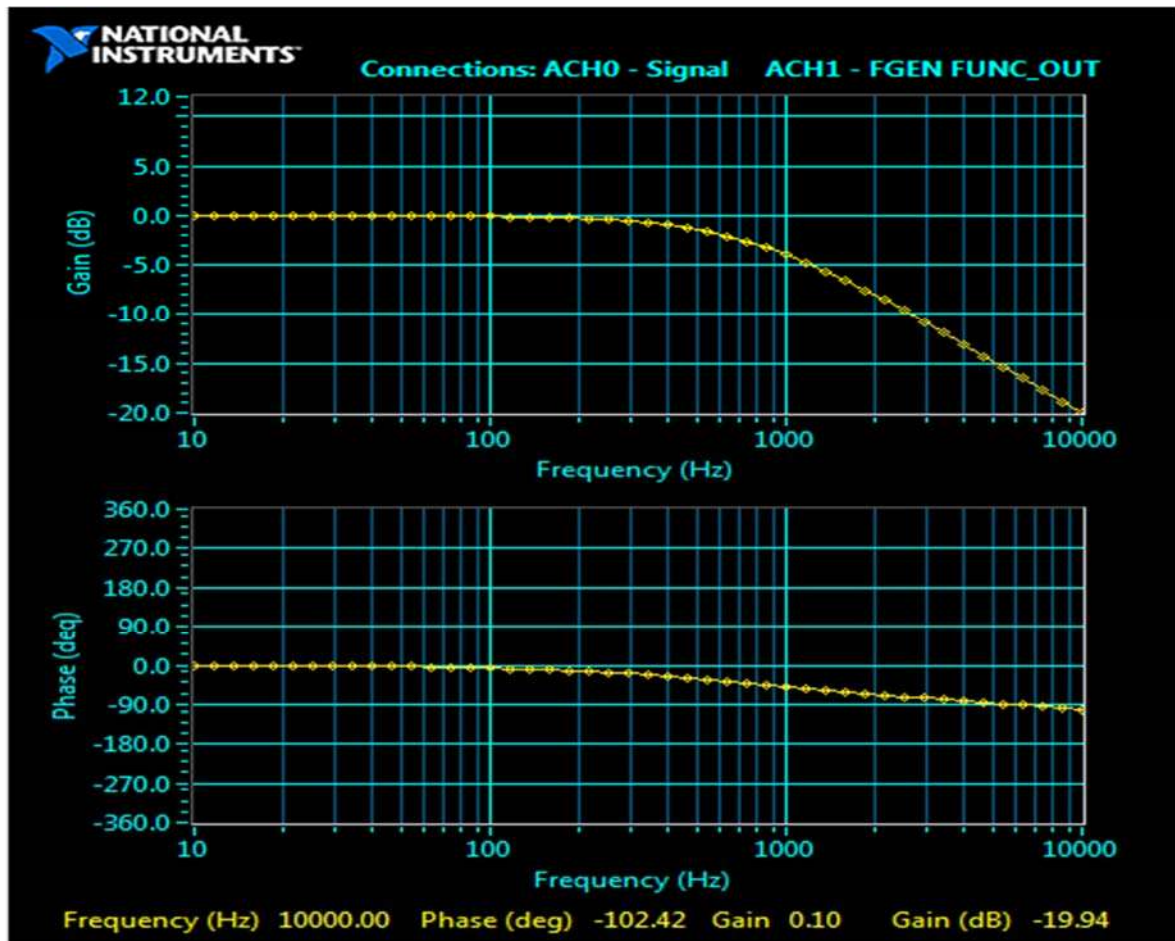


Figura 4.4. Diagrama de Bode filtro pasa-baja de primer orden.

En la figura 4.4 se puede observar que el filtro está funcionando acorde a lo esperado, esto se nota al ver que la ganancia es de -3 dB cuando la frecuencia es de 1Khz. Y después disminuye a cerca de los -20dB cuando la frecuencia alcanza los 10Khz.

3.4.2 IMPLEMENTACION DE FILTRO PASA-ALTA DE PRIMER ORDEN.

En la figura 4.5 se muestra el circuito de un filtro pasa-alta de primer orden que fue implementado en un protoboard.

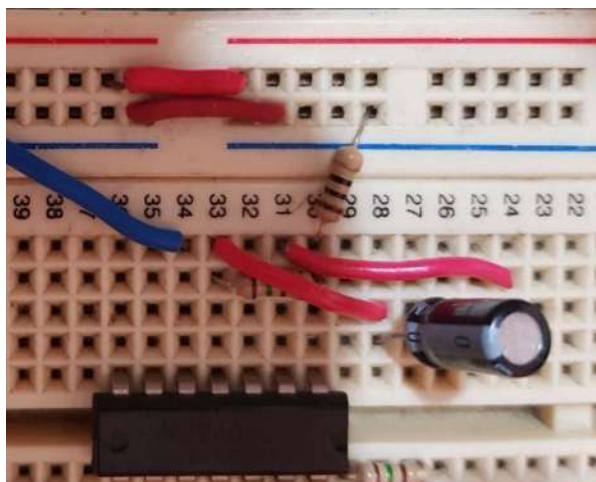
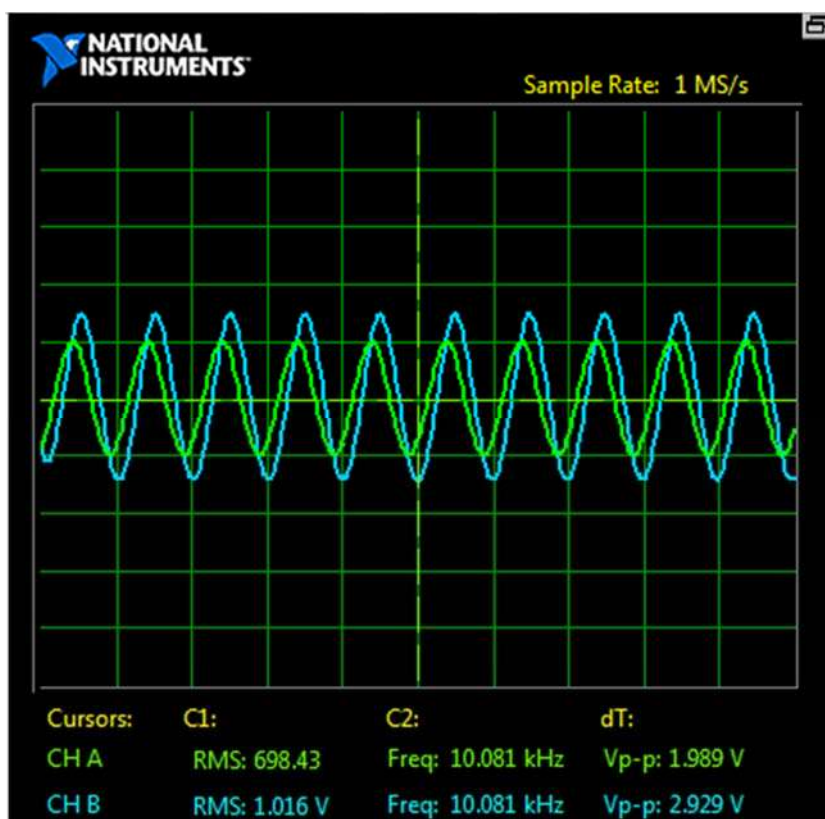


Figura 4.5 Circuito filtro pasa-alta.

Los valores de capacitancia y resistencia para este circuito fueron calculados en el capítulo 3.

Con la ayuda de NI ELVIS se obtuvieron las mediciones en el osciloscopio en la figura 4.6 se muestra los resultados obtenidos, donde se puede observar que la frecuencia de corte es la esperada.



4.6. Medición filtro pasa-alta con 10Khz.

Con la ayuda de NI ELVIS se obtuvo el diagrama de Bode para el filtro pasa-alta en la figura 4.7 se observa el diagrama obtenido.

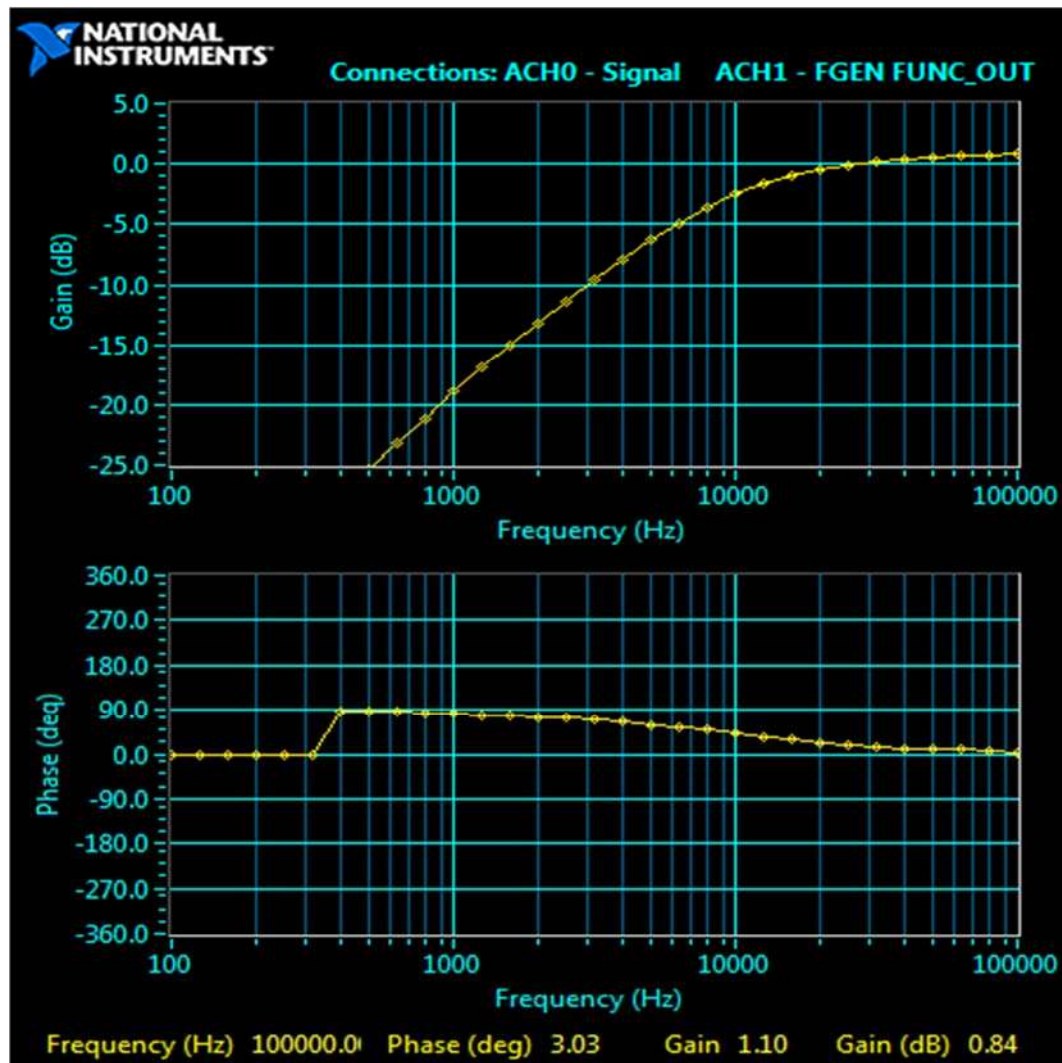


Figura 4.7. Diagrama de Bode filtro pasa-alta de primer orden.

Se observa que cuando la frecuencia esta de 10Khz (frecuencia de corte) la ganancia es aproximadamente de -3 dB como se espera y cuando la frecuencia disminuye una década la ganancia pasa aproximadamente a -20 dB.

4.5 IMPLEMENTACION DE FILTROS ACTIVOS DE SEGUNDO ORDEN.

Los filtros de segundo orden como su nombre lo indica cuentan con dos redes RC, esto quiere decir que son filtros con dos polos, por lo tanto su comportamiento no puede considerarse como un circuito lineal.

A continuación se implementaran dos filtros activos de segundo orden (pasa-baja y pasa-alta). Donde se espera que la atenuación sea el doble que la de los filtros de primer orden.

4.5.1 IMPLEMENTACION FILTRO PASA-BAJA DE SEGUNDO ORDEN.

En la figura 4.8 se tiene el filtro de segundo orden que fue implementado en protoboard, para realizar las mediciones.

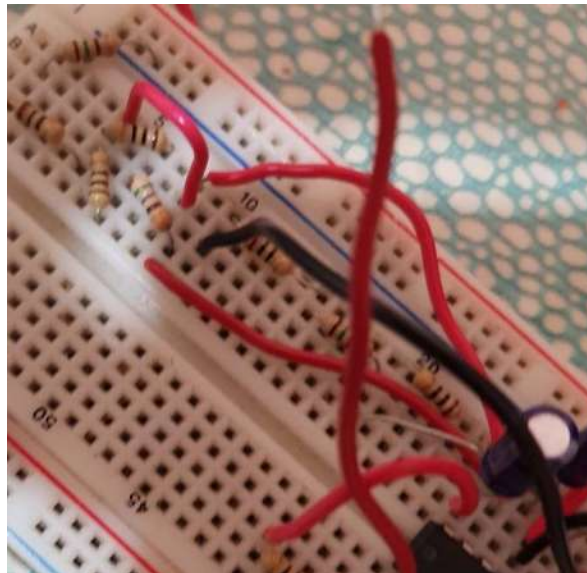
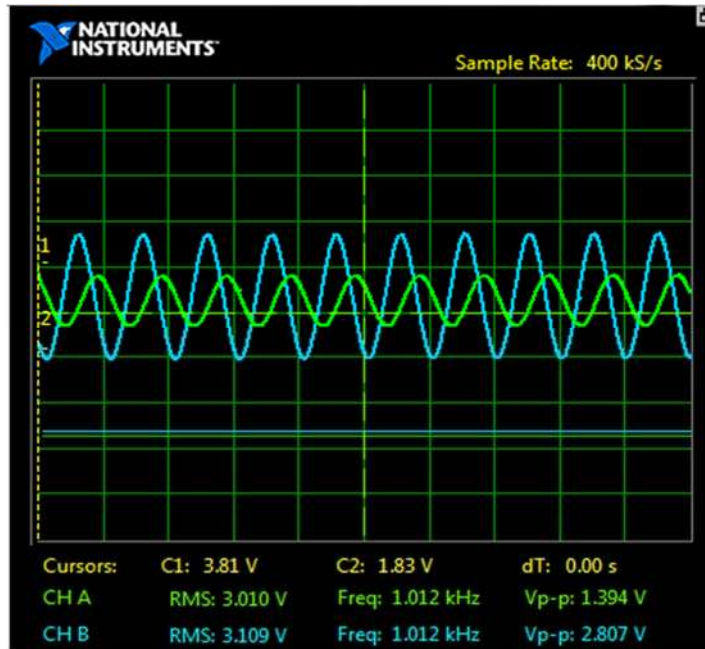


Figura 4.8. Filtro pasa-baja de segundo orden.

Los valores de capacitancia y resistencia para este circuito fueron calculados en el capítulo 3.

Con ayuda de NI ELVIS se realizaron las mediciones de este circuito. En la figura 4.9 se observa la señal de entrada y de salida del filtro a una frecuencia de 1Khz que en este caso es la que se eligió como frecuencia de corte.



4.9 Medición filtro pasa-baja a 1 KHz.

Lamentablemente como ya se mencionó anteriormente, este tipo de circuitos no son lineales y la herramienta de NI ELVIS *Bode Analyzer*, únicamente calcula el diagrama de bode para circuitos lineales.

En esta ocasión para calcular la ganancia del filtro pasa-baja en la frecuencia de corte se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{|V_{out}|}{|V_{in}|} \quad 4.1$$

Sustituyendo los valores tenemos:

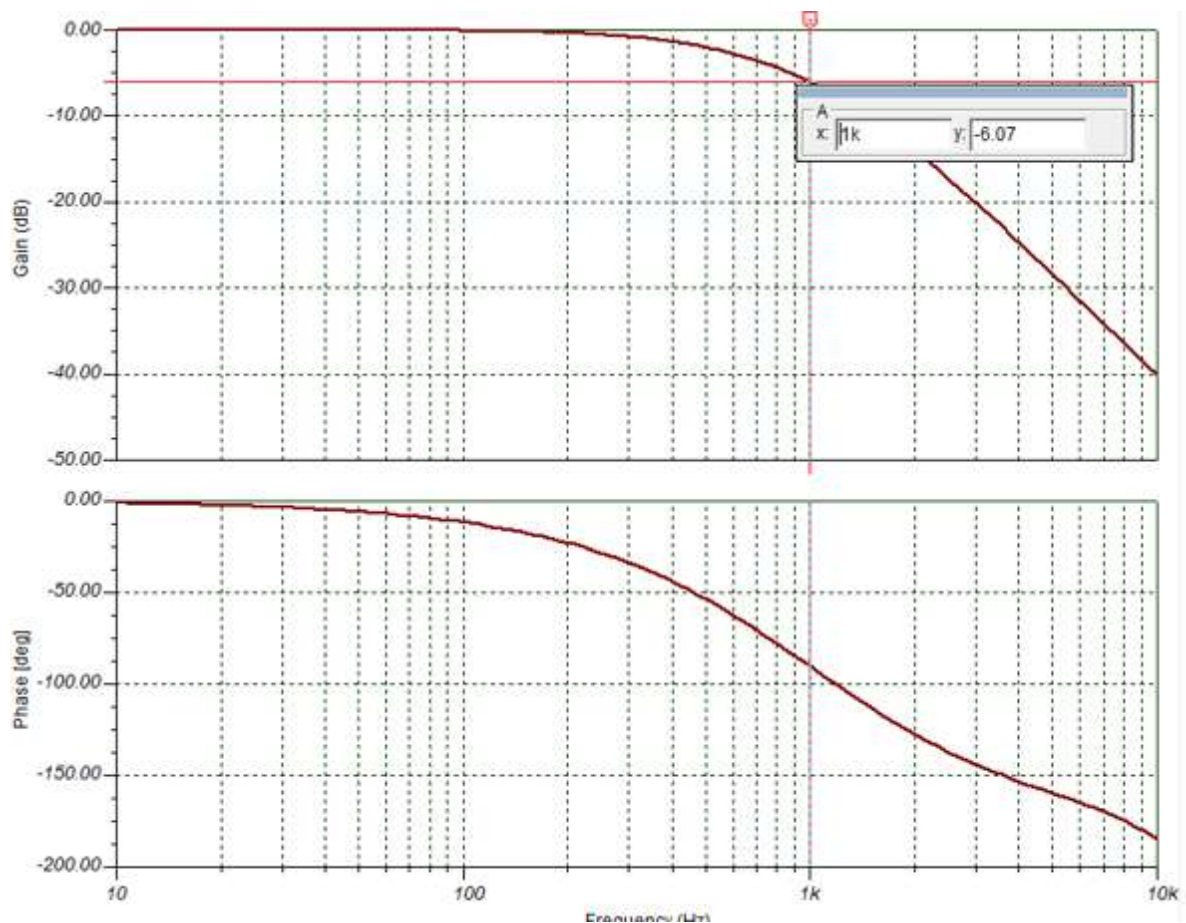
$$G_{dB} = 20 \log \frac{1.394V}{2.807V} = -6.07 \text{ dB}$$

El resultado obtenido es prácticamente igual al que se obtuvo en la simulación.

Utilizando la ecuación 4.1 se realizó un barrido de frecuencia, esto con la finalidad de obtener más puntos y poder construir el diagrama de bode para este filtro.

Este proceso se realizó con la ayuda de ni Elvis y el software Labview, donde el voltaje en entrada y salida de la señal fueron las variables las cuales se colocaron en la ecuación 4.1 y posteriormente se graficaron en un diagrama de bode

En la figura 4.9 podemos observar el diagrama de bode que se obtuvo después de realizar el barrido de frecuencia.



4.10 Diagrama de bode filtro pasa-baja de segundo orden.

4.5.2 IMPLEMENTACION DE FILTRO PASA-ALTA DE SEGUNDO ORDEN.

En la figura 4.11 se tiene el filtro de segundo orden que fue implementado en protoboard, para realizar las mediciones.

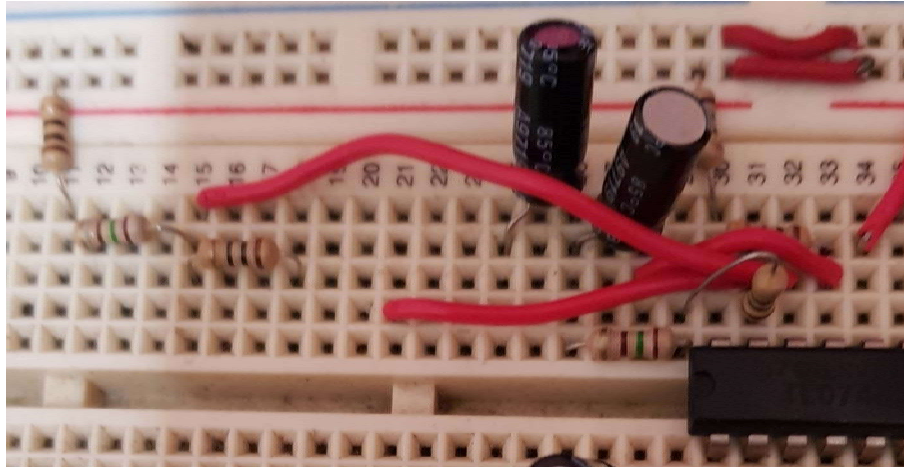


Figura 4.11. Filtro pasa-alta de segundo orden.

Los valores de capacitancia y resistencia para este circuito fueron calculados en el capítulo 3.

Con ayuda de NI ELVIS se realizaron las mediciones de este circuito. En la figura 4.12 se observa la señal de entrada y de salida del filtro a una frecuencia de 10Khz que en este caso es la que se eligió como frecuencia de corte.

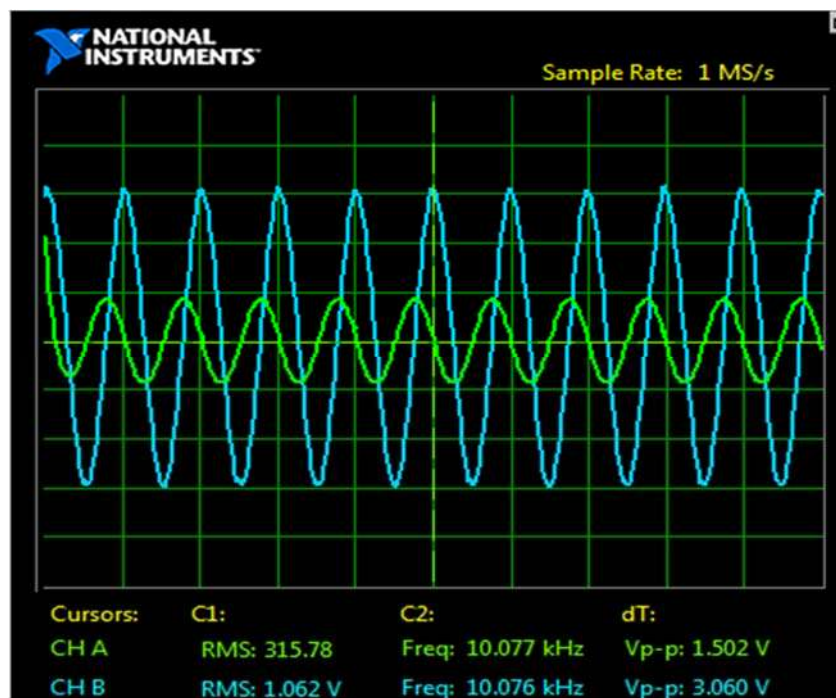


Figura 4.12. Medición filtro pasa-alta a 10Khz.

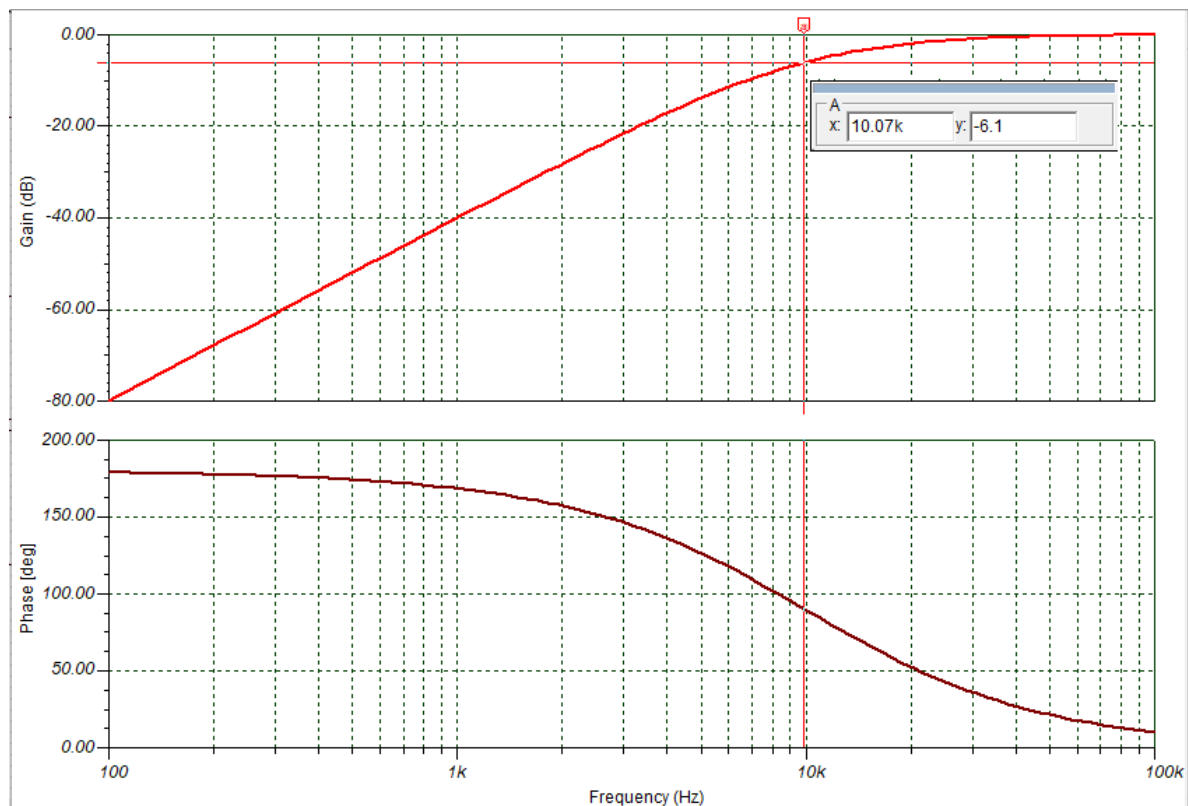
De la misma manera que se calculó la ganancia en el filtro pasa-baja de segundo orden se hará para este filtro.

Sustituyendo valores en la ecuación 4.1, tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{1.502V}{3.060 V} = -6.1 \text{ dB}$$

Se tiene una ganancia de -6.1 dB, que es el valor para un filtro de segundo orden.

Para obtener el diagrama de bode de este filtro se hizo el mismo procedimiento que en el filtro anterior.



En la figura 4.13. Diagrama de bode obtenido para el filtro pasa-alta de segundo orden.

4.6 IMPLEMENTACION DE FILTROS DE TERCER ORDEN.

Un filtro de tercer orden como su nombre lo indica consta de 3 polos, para obtener este filtro es necesario la combinación de un filtro de segundo orden conectado en cascada con uno de primer orden, esto para obtener los 3 polos.

A continuación se implementarán dos filtros activos de tercer orden (pasa-baja y pasa-alta).

4.6.1 IMPLEMENTACION DE FILTRO PASA-BAJA DE TERCER ORDEN.

En la figura 4.14 se muestra el filtro pasa-baja de tercer orden que se implementó en protoboard.

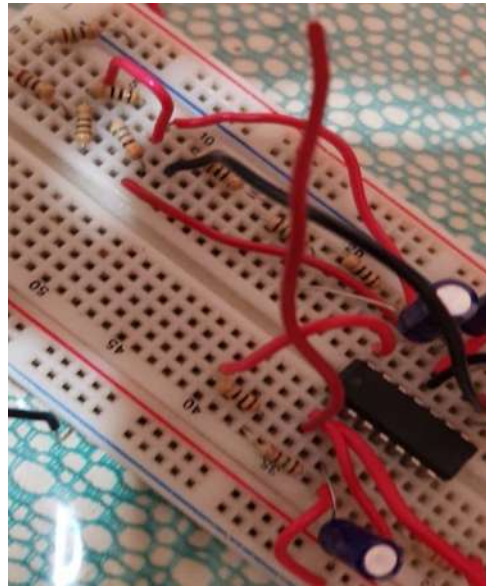


Figura 4.14. Filtro pasa-baja de tercer orden.

Cabe mencionar que estos filtros fueron diseñados con la topología de Butterworth, los cálculos tanto de resistencia y capacitancia fueron realizados en el capítulo 3.

Con ayuda de NI ELVIS se realizaron las mediciones de este circuito. En la figura 4.13 se observa la señal de entrada y de salida del filtro a una frecuencia de 1Khz que en este caso es la que se eligió como frecuencia de corte.

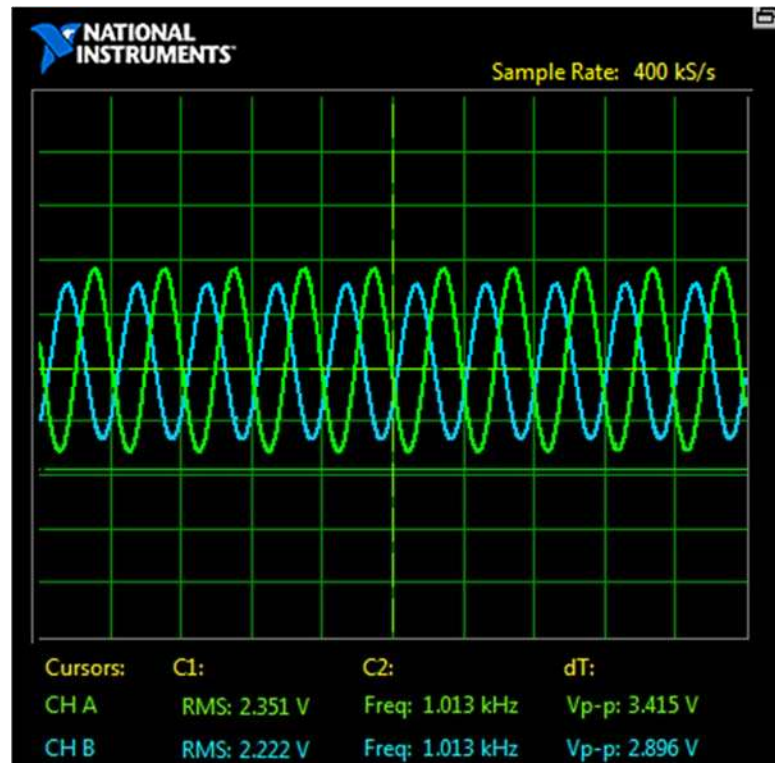


Figura 4.14. Medición filtro pasa-baja 1Khz.

Ahora para comprobar el funcionamiento de este filtro se tomó otra medición a los 10 KHz, es decir, una década después. En la figura 4.15 se muestra la medición realizada.

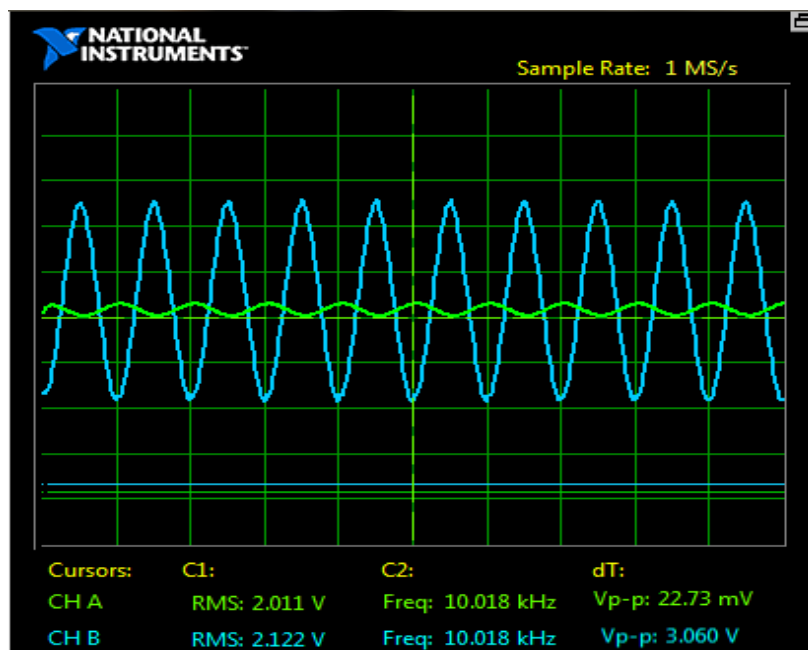


Figura 4.15. Medición filtro pasa-baja a 10 Khz.

Ahora se calcula la ganancia en la frecuencia de corte (1Khz), tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{3.415V}{2.896V} = 1.43 \text{ dB}$$

Calculando una década después (10 KHz), tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{22.73mV}{3.060V} = -42.58 \text{ dB}$$

Para este filtro tenemos una atenuación de 45 dB/década aproximadamente, este es un valor aceptable debido a que los valores reales de los componentes algunas veces no son tan exactos.

Al igual que los filtros de segundo orden los filtros de tercer orden son considerados circuitos no lineales, se realizó el barrido de frecuencia para obtener el diagrama de bode.

En la figura 4.16 se muestra el diagrama de bode obtenido para este filtro.

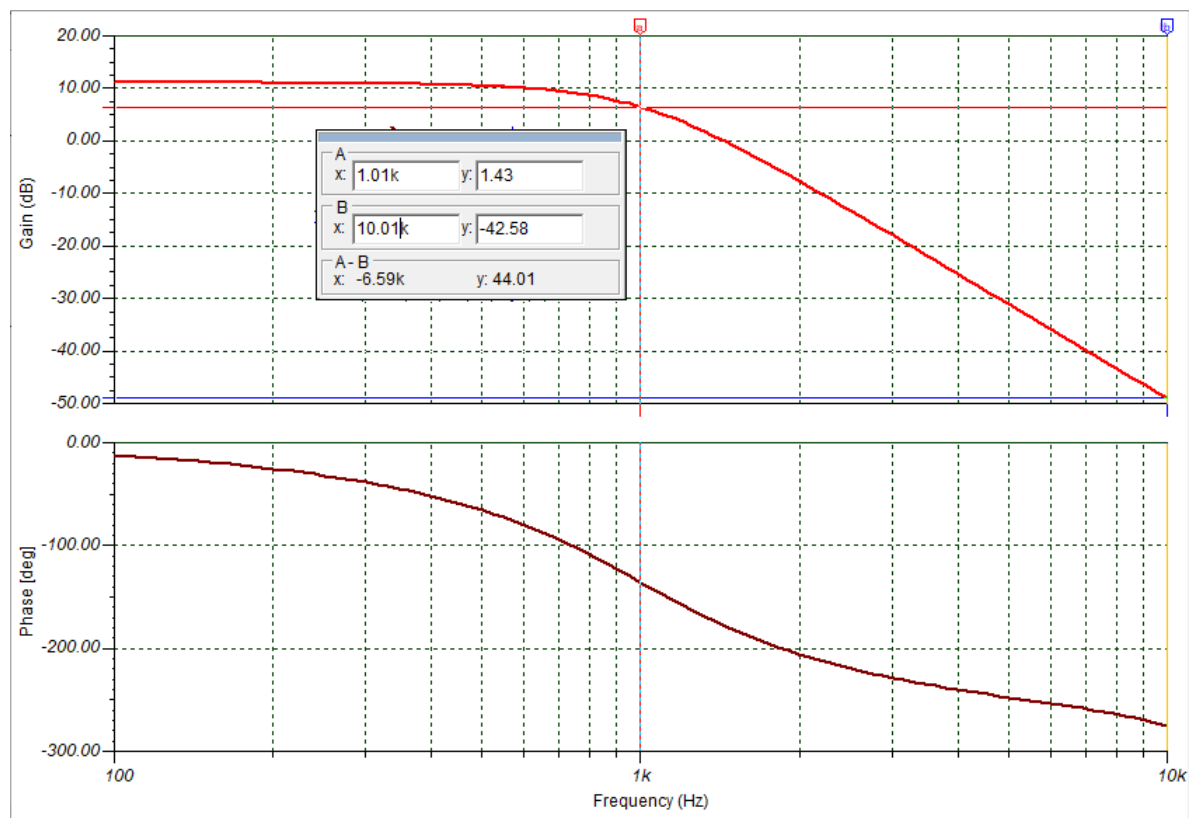
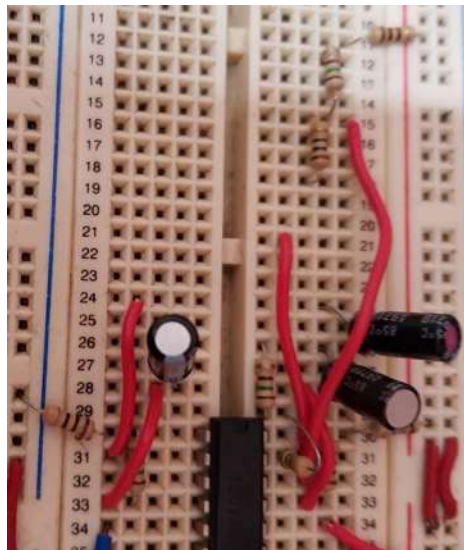


Figura 4.16. Diagrama de bode obtenido para filtro pasa-baja de tercer orden.

4.6.2 IMPLEMENTACION DE FILTRO PASA-ALTA DE TERCER ORDEN.

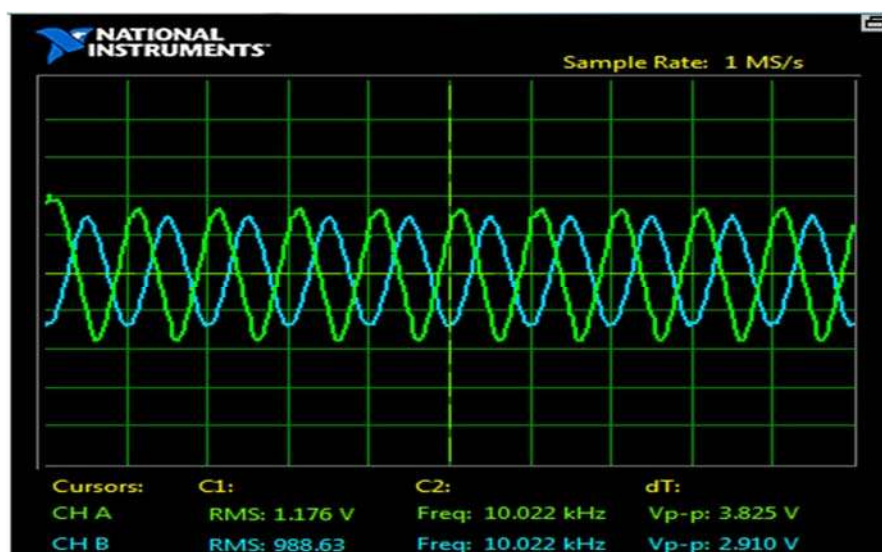
En la figura 4.17 se muestra el filtro pasa-alta de tercer orden que se implementó en protoboard.



Filtro 4.17. Filtro pasa-alta de tercer orden.

Cabe mencionar que estos filtros fueron diseñados con la topología de Butterworth, los cálculos tanto de resistencia y capacitancia fueron realizados en el capítulo 3.

Con ayuda de NI ELVIS se realizaron las mediciones de este circuito. En la figura 4.18 se observa la señal de entrada y de salida del filtro a una frecuencia de 10Khz que en este caso es la que se eligió como frecuencia de corte.



4.18. Medición filtro pasa-alta a 10 Khz.

Ahora para comprobar el funcionamiento de este filtro se tomó otra medición a los 1 KHz, es decir, una década después. En la figura 4.19 se muestra la medición realizada.

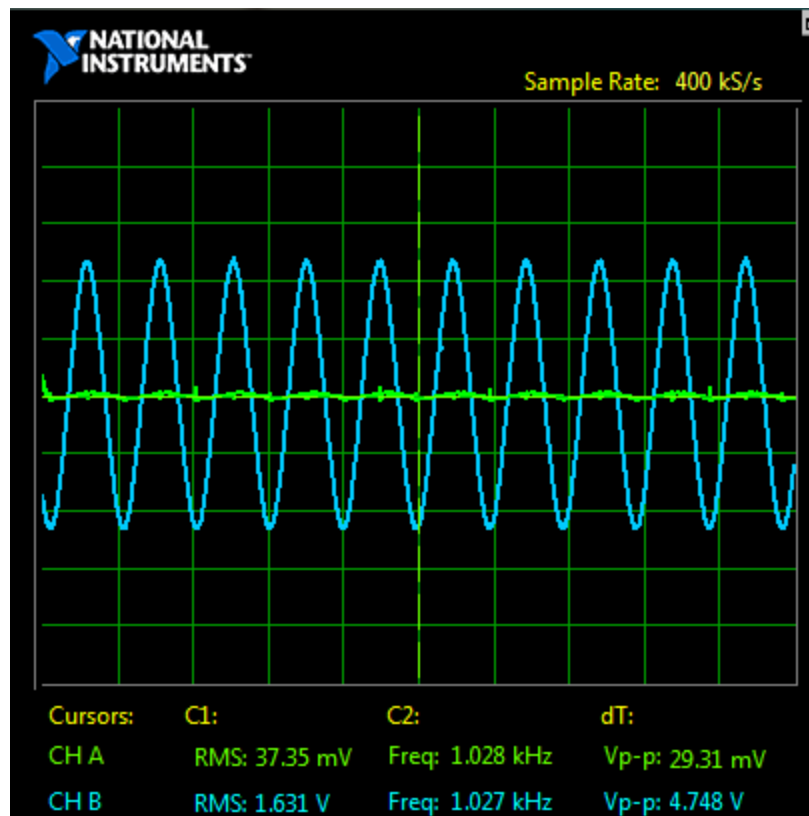


Figura 4.19 Medición filtro pasa-alta a 1 KHz.

Ahora se calcula la ganancia en la frecuencia de corte (10Khz), tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{3.825V}{2.910V} = 2.37 \text{ dB}$$

Calculando una década después (1 KHz), tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{29.31mV}{4.748 V} = -44.2 \text{ dB}$$

En esta ocasión tenemos una atenuación de 46.57 dB/década.

Para obtener el diagrama de bode que se muestra en la figura 4.20 se realizó el mismo proceso que para el filtro pasa-baja de tercer orden.

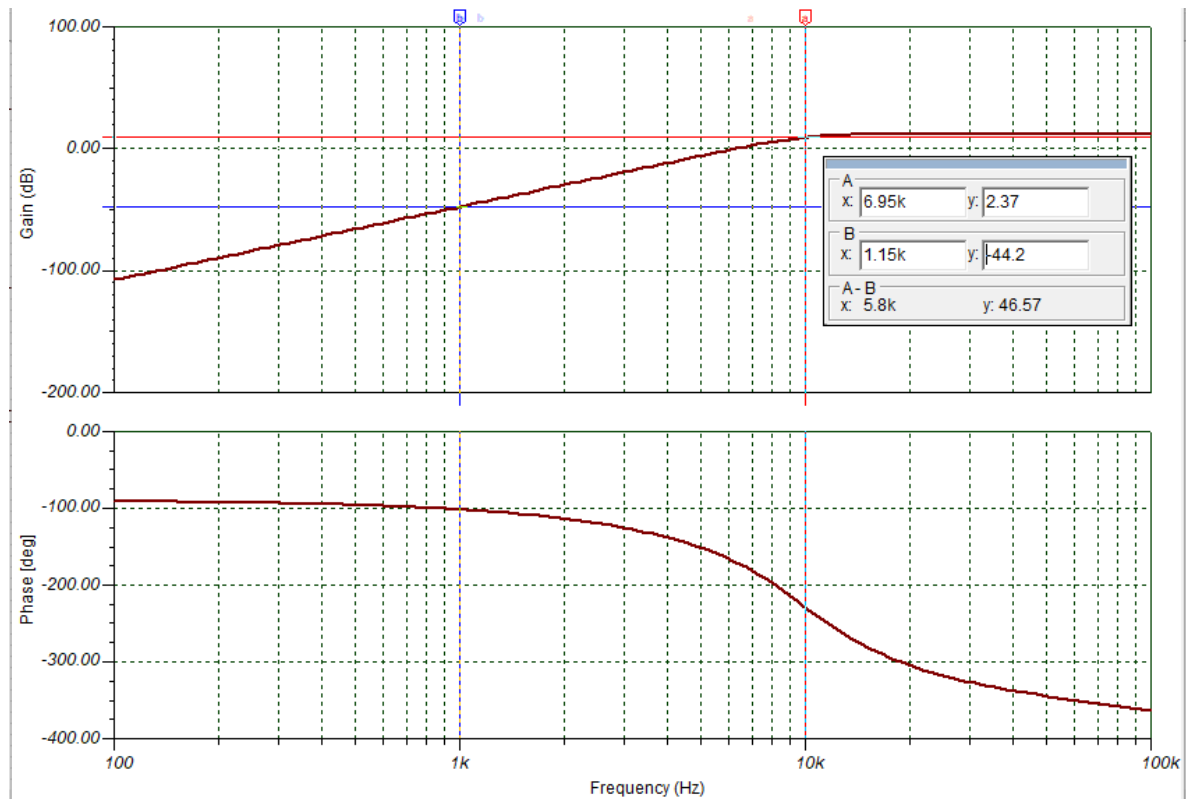


Figura 4.20. Diagrama de bode filtro pasa-alta tercer orden.

4.7 IMPLEMENTACION DE FILTROS ACTIVOS DE QUINTO ORDEN.

Por último se implementar un filtro activo de quinto orden, es decir, con 5 polos. Para que este filtro se pueda construir se requiere de 3 filtros conectados en cascada, dos filtros de segundo orden y uno más de primer orden.

A continuación se implementaran dos filtros de quinto orden un pasa-baja y un pasa-alta.

4.7.1 IMPLEMENTACION DE FILTRO PASA-BAJA DE QUINTO ORDEN.

En la figura 4.21 se muestra el filtro pasa-baja que se implementó en protoboard, para realizar las distintas mediciones.

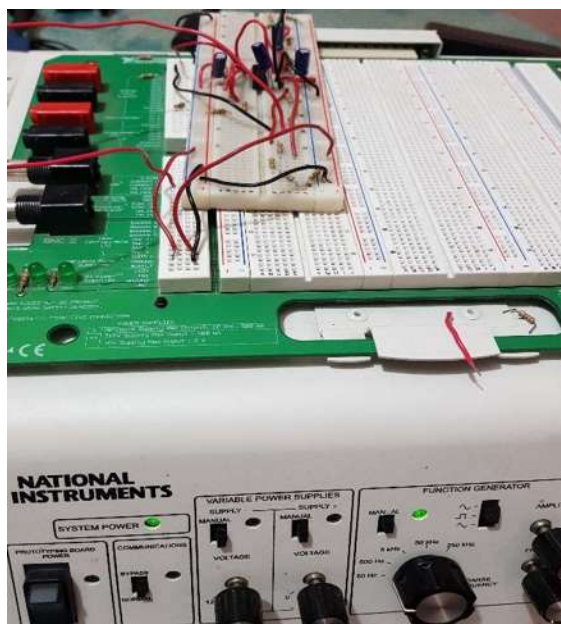


Figura 4.21. Filtro pasa-baja de quinto orden.

Cabe mencionar que estos filtros fueron diseñados con la topología de Butterworth, los cálculos tanto de resistencia y capacitancia fueron realizados en el capítulo 3.

Con ayuda de NI ELVIS se realizaron las mediciones de este circuito. En la figura 4.22 se observa la señal de entrada y de salida del filtro a una frecuencia de 1Khz que en este caso es la que se eligió como frecuencia de corte.

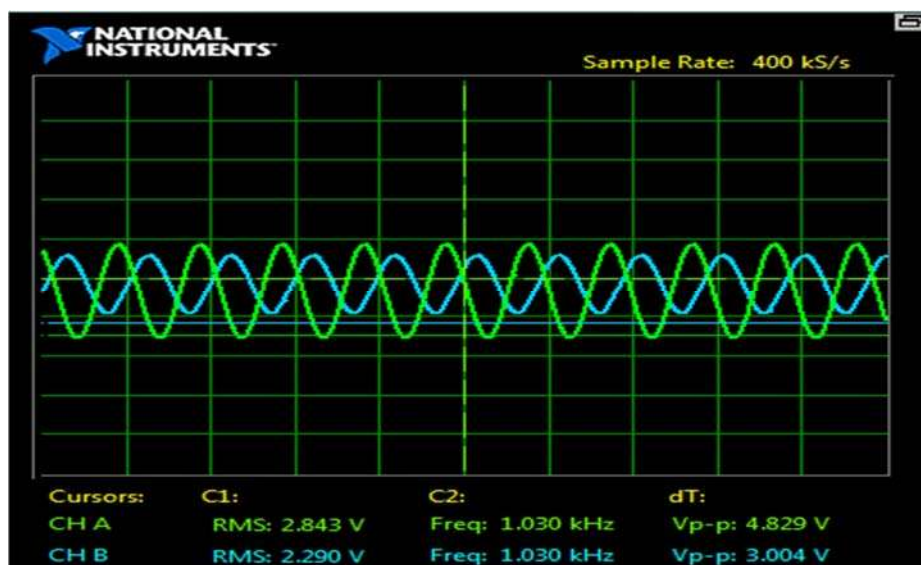
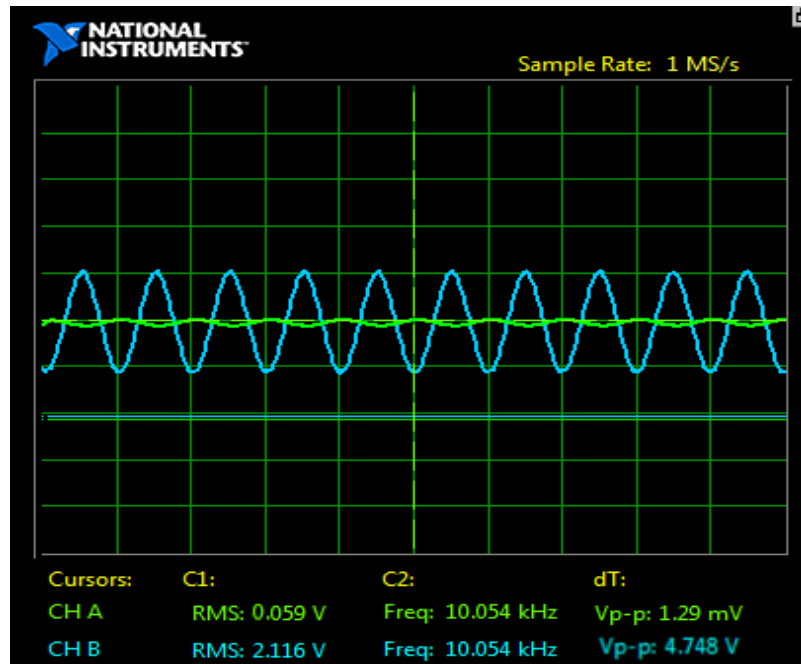


Figura 4.22 Medición filtro pasa-baja a 1 KHz.

Se tomó una medida una década después de la frecuencia de corte para poder calcular la atenuación del filtro. En la figura 4.23 se observa la medición a 10 KHz.



4.23. Medición filtro pasa-baja a 10 KHz.

Ahora se calcula la ganancia en la frecuencia de corte (10KHz), tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{4.829V}{3.004V} = 4.12 \text{ dB}$$

Calculando una década después (1 KHz), tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{1.29mV}{2.221V} = -71.31 \text{ dB}$$

En esta ocasión tenemos una atenuación de 75.43 dB/década.

Para obtener el diagrama de bode del filtro pasa-baja de quinto, se utilizó el mismo método que en los filtros anteriores.

En la figura 4.24 se muestra el diagrama, con las ganancias en la frecuencia de corte (1 KHz) y una década después (10 KHz) también se puede observar la atenuación total del filtro.

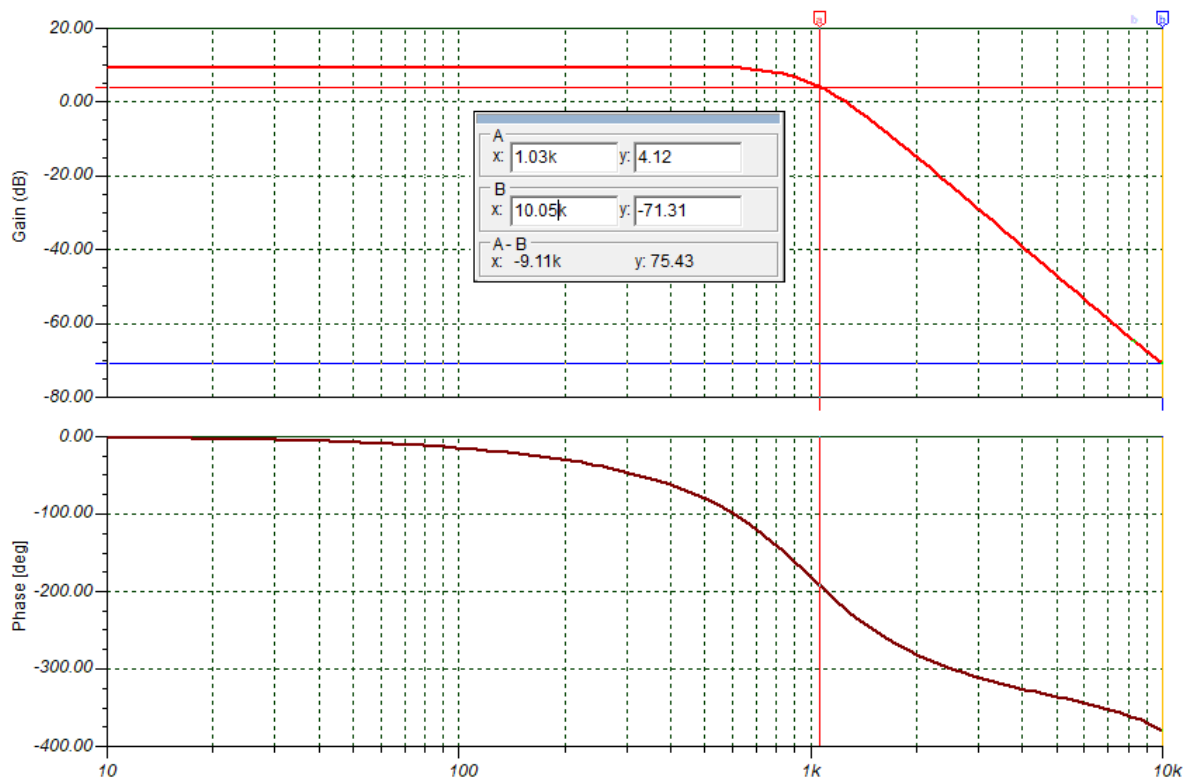


Figura 4.24. Diagrama de bode filtro pasa-baja de quinto orden.

4.7.2 IMPLEMENTACION DE FILTRO PASA-ALTA DE QUINTO ORDEN.

En la figura 4.25 se muestra el filtro pasa-alta que se implementó en protoboard, para realizar las distintas mediciones.

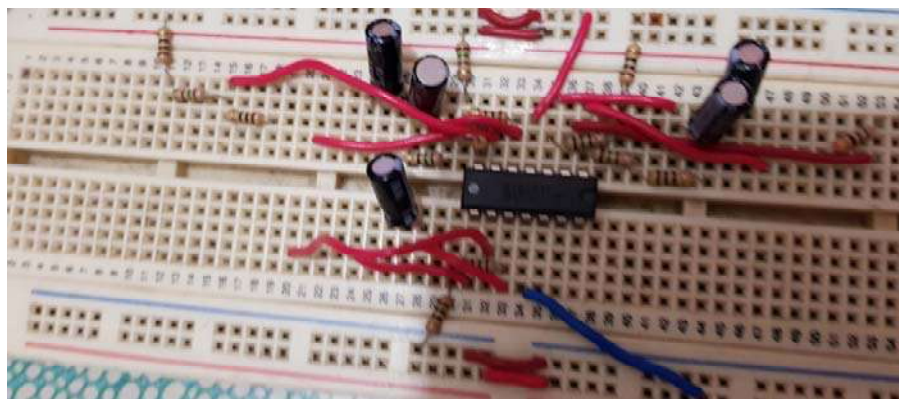


Figura 4.25 Filtro pasa-alta de quinto orden.

Cabe mencionar que estos filtros fueron diseñados con la topología de Butterworth, los cálculos tanto de resistencia y capacitancia fueron realizados en el capítulo 3.

Con ayuda de NI ELVIS se realizaron las mediciones de este circuito. En la figura 4.26 se observa la señal de entrada y de salida del filtro a una frecuencia de 10Khz que en este caso es la que se eligió como frecuencia de corte.

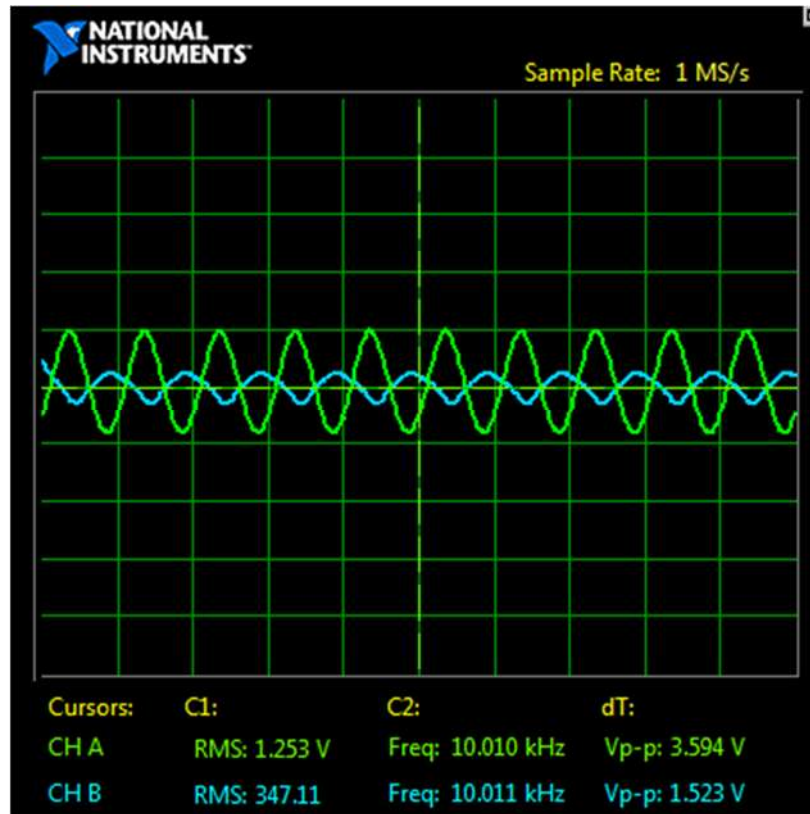


Figura 4.26. Medición filtro pasa-alta a 10 KHz.

Se tomó una medida una década después de la frecuencia de corte para poder calcular la atenuación del filtro. En la figura 4.27 se observa la medición a 1 KHz.

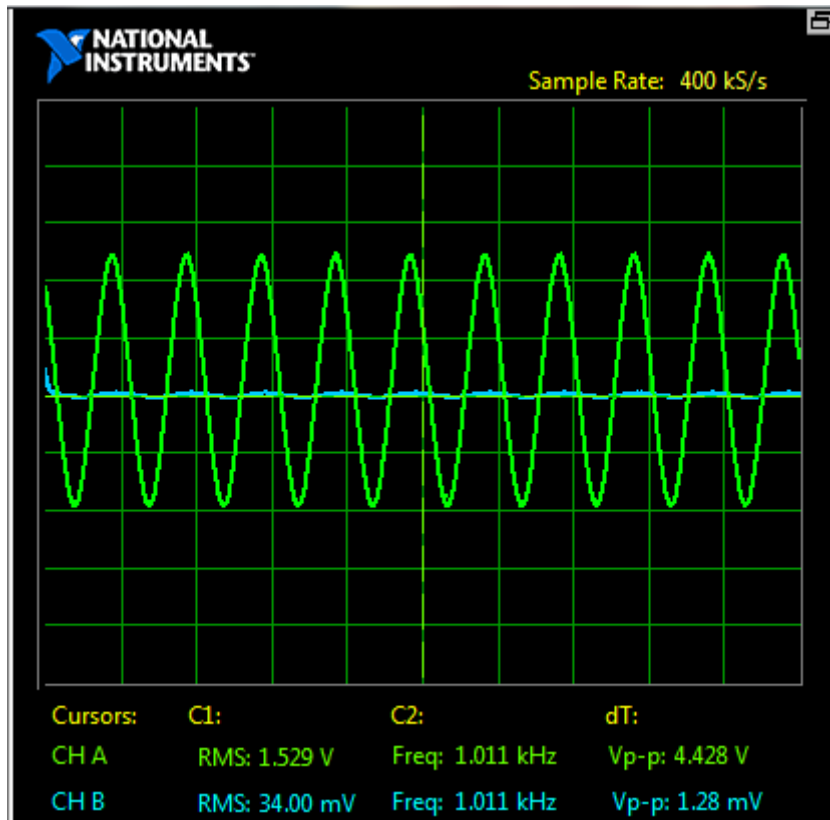


Figura 4.27 Medición filtro pasa-alta a 1 KHz.

Ahora se calcula la ganancia en la frecuencia de corte (10Khz), tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{3.594V}{1.523V} = 7.45 \text{ dB}$$

Calculando una década después (1 KHz), tenemos:

$$G_{dB} = 20 \log \frac{1.28mV}{4.428 V} = -70.77 \text{ dB}$$

En esta ocasión se tiene una atenuación de 78.22 dB/década.

Para obtener el diagrama de bode del filtro pasa-alta de quinto, se utilizó el mismo método que en los filtros anteriores.

En la figura 4.28 se muestra el diagrama, con las ganancias en la frecuencia de corte (10 KHz) y una década después (1 KHz) también se puede observar la atenuación total del filtro.

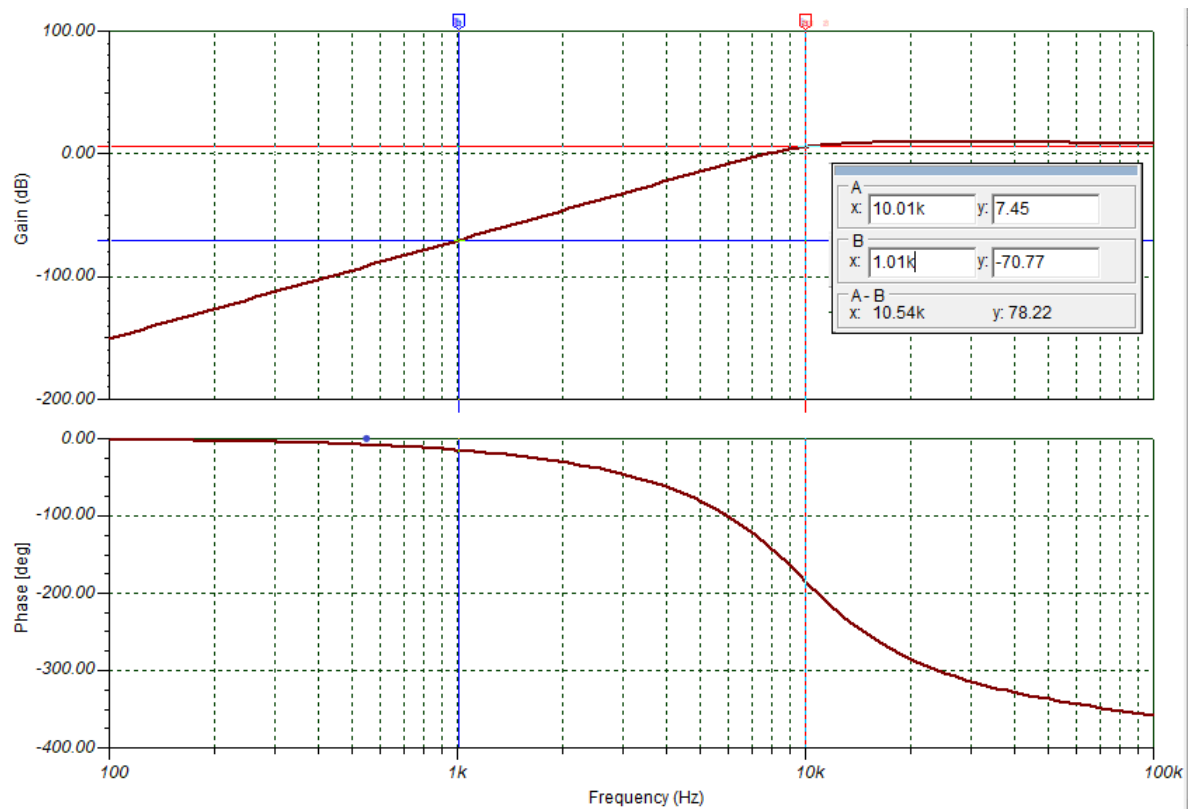


Figura 4.28. Diagrama de bode filtro pasa-alta de quinto orden.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

En este trabajo se presentaron los diferentes tipos de filtros que existen, así como los parámetros que caracterizan a cada uno de ellos. También se mencionaron las técnicas más comunes que existen para elaborar un filtro en tiempo discreto, así como la teoría para conocer su importancia para la electrónica y quienes fueron los pioneros en la creación de estos circuitos.

Se investigó acerca del amplificador operacional el cual es esencial para construir un filtro activo, se habla sobre un poco de su historia, su definición, sus diferentes tipos de encapsulamiento, su comportamiento ideal y más características importantes.

Se muestran algunas de las tantas aplicaciones que tienen los filtros activos, así como sus ventajas y desventajas, que tienen sobre los filtros pasivos.

Se investigaron las diferentes topologías que existen para diseñar filtros activos pasa-baja y pasa-alta. Se eligió la topología Butterworth para diseñar los filtros de orden superior.

Una vez que se recabo la información suficiente acerca de los tipos de filtros y de las distintas formas de diseño, lo siguiente fue calcular los componentes tanto resistivos como capacitivos, se diseñaron filtros de primer, segundo, tercero y quinto orden tanto pasa-baja como pasa-alta, los filtros pasa-baja contaban con una frecuencia de corte de 1 Khz y los pasa-alta con una de 10 Khz. Una vez que se diseñaron se simularon con la ayuda del software PROTEOUS se eligió la misma frecuencia de corte en los filtros y solo se modificó el orden del filtro esto para observar que en la medida que el orden del filtro aumentaba la atenuación sería mayor.

Después de diseñar y simular los filtros activos lo siguiente fue implementarlos para comprobar que nuestros cálculos fueran los correctos. Los filtros fueron implementados en la estación de trabajo NI ELVIS la cual es una herramienta muy completa que será descrita un poco más a fondo en el tema 5.2.

El resultado de los filtros tanto de primero y segundo orden fueron prácticamente iguales a los obtenidos en las simulaciones, para los filtros de orden superior esto debido a que los componentes no siempre cuentan con el valor indicado y pueden variar un poco, recordemos que para filtros de orden superior el número de componentes utilizado es mayor.

5.2 RECOMENDACIONES

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo los filtros activos son de mucha importancia para la rama de la electrónica hoy en día, pero a menudo se tiene el concepto erróneo de que su construcción es demasiado compleja, más aun con los filtros de orden superior.

En este trabajo queda demostrado que hoy en día se cuenta con muchas herramientas que te facilitan tanto el diseño como la implementación de este tipo de circuitos.

Una de estas herramientas es la estación de trabajo NI ELVIS la cual es muy útil para la creación de cualquier tipo de circuitos y es una herramienta muy poderosa y completa para el uso de los estudiantes de ingeniería, esta estación cuenta con distintos instrumentos y aplicaciones que son:

- Arbitrary waveform generator
- Digital multimeter
- Bode analyzer
- Dynamic signal analyzer
- Digital reader
- Digital writer
- Oscilloscope

Además cuenta con un protoboard desprendible para armar los circuitos y después sean probados sobre la estación, también cuenta con fuentes de voltaje tanto variables como constantes.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Thomas L Floyd, Basic Operacional Amplifiers and Linear Integrated Circuits, Merrill Macmillan, New York.
- [2] James M. Fiore, Operacional Amplifiers and Linear Integrated Circuits: Theory and Aplication, WEST PUBLISHING COMPANY, United States of America, 1992.
- [3] Jerald G. Grame and Gene E. Tobey, Operational Amplifiers, McGRAW-HILL Kogakusha, Arizona 1971.
- [4] Jorge A. Márquez Flores – Introducción a Instrumentación y Señales -CCADET-UNAM 2013.
- [5] Antonio P. Junior, Amplificadores Operacionales y filtros activos, MacGraw-Hill, Madrid, 1999.
- [6] Adel S. Sedra, Circuitos Microelectronicos, MacGraw-Hill, Oxford, 1999.