

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE FILTROS
ACTIVOS
SoDFiAc UIS 1.0**

**JACKSON ALIRIO PÉREZ PARADA
ALFREDO PARDO RIAÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga, octubre de 2007

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE FILTROS
ACTIVOS
SoDFiAc UIS 1.0**

**JACKSON ALIRIO PÉREZ PARADA
ALFREDO PARDO RIAÑO**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Electrónico.**

Director:

M.I.(c). JOSÉ ALEJANDRO AMAYA PALACIO

Codirector:

MI. OSCAR MAURICIO REYES TORRES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga, octubre de 2007

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por permitirnos existir, bendecir nuestros hogares e iluminar nuestro camino.

A la Universidad Industrial de Santander, por habernos soportado durante estos 5 años y brindarnos todas las herramientas para cumplir con nuestro propósito.

A nuestros familiares, por su gran apoyo, cariño y comprensión a lo largo de toda nuestra carrera.

A los profesores José Alejandro Amaya, Oscar Mauricio Reyes, Gabriel Ordoñez Plata, Cesar Duarte Gualdrón y Elkim Felipe Roa, por sus valiosas orientaciones para nuestra formación y realización de este proyecto.

A nuestro amigo Heriberto Rojas Picón, por su incondicional apoyo y significativas sugerencias sobre nuestro trabajo.

Al primo José Enrique Rueda Parada, por su asesoría y colaboración.

A nuestros amigos, compañeros y allegados, a quienes nos gustaría nombrar uno a uno, los cuales nos aportaron en lo que pudieron para mejorar continuamente, Mil Gracias.

DEDICATORIA

*En especial a DIOS,
por haberme regalado la madre que tengo;
este logro es de ella.*

*A mi madre, MARIA SMITH PARADA,
por su incondicional amor, apoyo y sacrificio.*

*A Alirio, Jessica, Ingrid, Carmen y Cinthia.
Y en sí, a la gran mayoría de mis familiares,
que me transmiten su afecto.
Y a los que me apoyaron durante estos 5 años.*

*Por último a mis amigos y compañeros,
por los momentos agradables
y aquellos momentos en los que me demostraron una verdadera amistad.*

*JACK
-MIKE-*

“Gracias a Dios por permitirme cumplir con mis propósitos,
Gracias a mi familia por incondicional apoyo”.

Alfredo

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	4
1.1 TÍTULO	4
1.2 OBJETIVO GENERAL	4
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 PROCESO DE DISEÑO DE UN FILTRO	6
2.1.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	7
2.1.2 CAUSALIDAD	7
2.1.3 ESTABILIDAD	8
2.1.4 LOCALIDAD.....	9
2.2 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL DISEÑO DE FILTROS	10
2.2.1 ESPECIFICACIONES DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	11
2.2.2 APROXIMACIONES MATEMÁTICAS.....	13
2.2.3 SÍNTESIS DE LOS FILTROS REALES.....	15
2.2.4 VERIFICACIÓN.....	25
2.3 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN FILTRO.....	29
3. INGENIERÍA DEL SOFTWARE	37
3.1 INGENIERÍA DE ANÁLISIS Y SISTEMA.....	37
3.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA ESPECÍFICA (VISUAL BASIC).....	38
3.2.1 MODO DE DISEÑO Y MODO DE EJECUCIÓN	39
3.2.2 FORMULARIOS Y CONTROLES.....	39
3.2.3 OBJETOS Y PROPIEDADES.....	40
3.2.4 MÉTODOS Y EVENTOS.....	40
3.3 PROCESO DE DISEÑO DE SOFTWARE	41
3.4 IMPLEMENTACIÓN.....	42
3.4.1 SECCIÓN DE INGRESO DE DATOS	42
3.4.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS DE DISEÑO.....	44
3.4.3 ELECCIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE DISEÑO	45

3.4.4 CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DE CIRCUITO	46
3.4.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	56
3.4.6 IMPLEMENTACIONES ADICIONALES	58
3.4.6 GENERACIÓN DEL PROYECTO “INSTALADOR”	58
3.5 DOCUMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA	59
3.5.1 AYUDA EN PANTALLA.....	59
3.5.2 ACERCA DE.....	62
3.6 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	63
3.7 CARACTERÍSTICAS Y POTENCIALIDADES DE SoDFiAc UIS 1.0	64
4. PRUEBAS DEL SOFTWARE	65
4.1 FORMATO DE PRUEBA DE SOFTWARE	66
4.2 PRUEBAS DESARROLLADAS	67
4.2.1 Prueba #1. Especificaciones iguales.....	67
4.2.2 Prueba #2. Comparación de estándares.....	70
4.2.3 Prueba #3. Comparación de resultados con otro software de diseño ...	73
4.2.4 Prueba #4. Comparación de respuestas de las funciones de transferencia	76
4.3 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS	79
4.4 ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE SoDFiAc UIS 1.0.....	80
4.4.1 FORMATO DE ENCUESTA.....	80
4.4.2 RESULTADOS DE LA ENCUESTA	82
4.4.3 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES REALIZADAS POR LOS ENCUESTADOS.....	84
4.4.4 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES DE LA ENCUESTA REALIZADA.....	86
5. CONCLUSIONES.....	87
6. RECOMENDACIONES	89
7. BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXO A	92
ANEXO B	103

ANEXO C	119
ANEXO D	133
ANEXO E	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Filtro como un sistema	7
Figura 2. (a) Respuesta no causal y (b) respuesta causal	8
Figura 3. Pasos para el diseño de filtros analógicos	11
Figura 4. Especificaciones reales de un filtro pasa bajo.....	11
Figura 5. Especificaciones y respuesta en magnitud para un filtro pasa banda... 13	
Figura 6. Magnitud de la función de transferencia pasa bajo de primer orden.....	17
Figura 7. Magnitud de la función de transferencia pasa alto de primer orden.....	18
Figura 8. Magnitud de la función de transferencia pasa bajo de segundo orden. .	20
Figura 9. Magnitud de la función de transferencia pasa alto de segundo orden. ..	21
Figura 10. Magnitud de la función de transferencia pasa banda de segundo orden.	22
Figura 11. Magnitud de la función de transferencia muesca pasa bajo de segundo orden	23
Figura 12. Magnitud de la función de transferencia muesca pasa alto de segundo orden.	24
Figura 13. Magnitud de la función de transferencia muesca de segundo orden. ..	24
Figura 14. Filtro pasa bajo Sallen-Key de segundo orden.....	27
Figura 15. Especificaciones reales de un filtro pasa bajo.....	30
Figura 16. Topología Sallen Key pasa bajo.....	34
Figura 17 Validación de datos ingresados.....	43
Figura 18. Validación para las especificaciones del filtro a diseñar.....	44
Figura 19. Diagrama de flujo del cálculo de los parámetros de diseño	45
Figura 20 Diagrama de flujo para la selección de la topología de circuito.....	46
Figura 21. Diagrama de flujo para el cálculo de los elementos pasivos	47
Figura 22. Diagrama de flujo “obtención de valores de los elementos pasivos”	48
Figura 23. Cálculo de los valores para los componentes pasivos de diseño	49
Figura 24. Topología sellen key de segundo orden.....	52
Figura 25. Topología Realimentación Múltiple de segundo orden Pasa Bajo	54
Figura 26. Topología Friend’s SAB segundo orden pasa-bajo notch	55

Figura 27. Topología Twin-tee de segundo orden pasa bajo	56
Figura 28. Presentación de resultados I.....	57
Figura 29. Presentación de Resultados II.....	57
Figura 30. Conversor dB—V/V y viceversa	58
Figura 31. Pantalla de inicio de HelpNDoc.....	60
Figura 32. Selección de las propiedades generales y tipo de proyecto.....	60
Figura 33. Interfaz principal para la creación de las páginas.	61
Figura 34. Archivo de ayuda final	62
Figura 35. Acerca de SoDFiAc UIS 1.0	63
Figura 36. Topología de primer y segundo orden.....	69
Figura 37. Respuesta de Butterworth y Chebyshev de la prueba #1.	69
Figura 38. Topología Twin Tee de segundo orden.....	72
Figura 39. Respuesta del filtro Chebyshev Inverso prueba #2.....	73
Figura 40. Resultados de Simulación prueba #3.....	75
Figura 41. Detalle de la frecuencia de Corte de la figura 40	75
Figura 42. Respuestas en magnitud de la función de primero, segundo y tercer orden para la topología Sallen-Key	78
Figura 43. Respuestas de la aproximación de Butterworth -teórica y la obtenida mediante la herramienta SoDFiAc UIS 1.0-	78
Figura 44. Detalle de las frecuencias de corte de la Fig.43.....	79
Figura 45. Resultados sección de diseño y presentación en pantalla	83
Figura 46. Resultados sección de diseño e implementación de ayudas visuales	83
Figura 47. Calidad y eficiencia de los resultados arrojados por la herramienta ...	84

RESUMEN

TÍTULO: HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS, SoDFiAc UIS 1.0*

AUTORES: ALFREDO PARDO RIAÑO Y JACKSON ALIRIO PÉREZ PARADA**

PALABRAS CLAVES: Filtros, activos, diseño, software

DESCRIPCIÓN

La aplicación desarrollada es un software que brinda soporte para el diseño de filtros activos de fácil manejo.

SoDFiAc UIS 1.0 realiza diseños de filtros activos, los cuales incluyen los tipos de filtrado pasa bajo, pasa alto, pasa banda y rechaza banda, para las funciones de aproximación (Butterworth, Chebyshev, Bessel, Elíptico y Chebyshev inverso), las cuales se implementan por medio de topologías adecuadas, logrando un diseño de filtro apropiado para unas especificaciones dadas.

Esta herramienta nace como un proyecto de profundización en el análisis y diseño de filtros activos, para satisfacer aquellas necesidades que se puedan presentar a lo largo de una asignatura en particular ó en la realización de aquellos sistemas que involucren tratamiento de señales analógicas.

SoDFiAc UIS 1.0 es una herramienta que pretende apoyar tanto a estudiantes como a profesionales del área, en el aprendizaje, comprensión, cálculo e interpretación de sus propios diseños.

* Trabajo de investigación

** FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MECANICAS, INGENIERÍA ELECTRÓNICA, JOSE ALEJANDRO AMAYA

SUMMARY

TITLE I: SOFTWARE TOOL FOR THE DESIGN OF ACTIVE FILTERS, SoDFiAc UIS 1.0*

AUTHORS: ALFREDO PARDO RIAÑO and JACKSON ALIRIO PÉREZ PARADA**

KEY WORDS: Filters, active, design, software

ABSTRACT

The developed application is a software that offers support for the design of active filters of easy use.

SoDFiAc UIS 1.0 makes designs of active filters, which include the types of filters known as low pass, high pass, band pass and stop band for the functions of approximation (Butterworth, Chebyshev, Bessel, Elliptic and Inverse Chebyshev) that are implemented through adequate topologies, making it possible the design of an appropriate filter with certain given specifications.

This tool appeared as a project of deepening in the analysis and design of active filters, with the purpose of satisfying those needs that can arise throughout a particular subject or during the execution of those systems that involve the treatment of analogical signals.

SoDFiAc UIS 1.0 is a tool whose purpose is to support either students or professionals in the field, in the learning, understanding, calculation and interpretation of their own designs.

* Trabajo de investigación

** FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MECANICAS, INGENIERÍA ELECTRÓNICA, JOSE ALEJANDRO AMAYA

INTRODUCCIÓN

Hoy en día podemos decir, sin temor a equivocarnos, que no existe afición, trabajo o cualquier tipo de actividad que no haya sido de uno u otro modo afectado por el auge de la electrónica. Esta rama ha sido y será la base de los avances tecnológicos. Debido a esto la bioelectrónica, la cibernética, la robótica, la electrónica industrial, la informática, los sistemas automáticos de control y muchos campos más, tienen como base esta rama.

Una de las áreas importantes de estudio y de mayor uso en la electrónica, desde sus inicios, es la teoría de filtros, esto se debe a la necesidad de poder limitar y controlar las señales eléctricas, en el dominio de la frecuencia, para que un sistema responda de manera diferente a señales de una u otra frecuencia.

La tecnología más antigua para la construcción de filtros, utiliza inductores y capacitores y los circuitos resultantes se llaman filtros LC pasivos. Éstos funcionan bien a altas frecuencias; sin embargo, a niveles de frecuencias menores a 100 kHz, los inductores requeridos son grandes y voluminosos y sus características se alejan bastante de lo ideal, además, son imposibles de construir de forma monolítica y son incompatibles con cualquiera de las técnicas modernas de ensamblaje de sistemas electrónicos. Por consiguiente, ha existido un considerable interés en la fabricación de filtros que no requieran inductores; un ejemplo de este tipo, son los filtros activos (RC, analógicos y discretos), los cuales serán estudiados en este trabajo de grado.

Dada la corta profundización en el curso de electrónica III sobre el tema de filtros activos y observando su utilidad en la mayoría de aplicaciones que impliquen tratamiento de señales, especialmente en la rama de comunicaciones, se planteó la posibilidad de contar con una herramienta software, que permitiera de manera fácil y amigable, obtener diferentes posibilidades en el diseño de filtros activos

(RC, analógicos y discretos), para luego, seleccionar la que mejor se adapte a las necesidades del usuario.

Anteriormente, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, carecía de un paquete de software propio de soporte en el diseño de circuitos discretos. Con este trabajo de grado, se dejó un precedente para futuros desarrollos, concretamente en el diseño de filtros.

Adicionalmente, contar con un software de diseño, permite potenciar el desarrollo del curso de instrumentación electrónica, pues en algunas aplicaciones ha de recurrirse al diseño e implementación de filtros como parte de un circuito de acondicionamiento de señales. Con este software se posibilita la comprensión y actualización con respecto a la temática de filtros, al tiempo que se agiliza el procedimiento y la obtención de los elementos requeridos.

Este trabajo requirió de un estudio y consideración de topologías, las cuales se caracterizaron, para determinar la relación y compromiso entre los parámetros del circuito y las especificaciones del filtro. El diseño de filtros que se planteó, involucró la definición de especificaciones en el dominio de la frecuencia (ganancia máxima en la banda de paso, ganancia mínima en la banda de rechazo y frecuencias de paso y rechazo). A partir de éstas se determinan los coeficientes de la función de transferencia. Entre las posibilidades de funciones de transferencia, se aplicaron las aportadas por Butterworth, Chebyshev, Bessel, Cauer y Chebyshev inverso. El algoritmo involucró el manejo de datos, iteraciones, evaluación de eficiencia, etc.

Así mismo, la programación del software, se desarrolló en Visual Basic; cuya base es el lenguaje C, el cual es uno de los más rápidos y potentes usados hoy en día y ha sido la base de desarrollo de algunos sistemas operativos. Una ventaja adicional de Visual Basic, es que se obtuvo una aplicación compilada, lo cual redundará en reducción de costos para el usuario. Igualmente, se eligió este

lenguaje de programación, ya que la Universidad cuenta con las respectivas licencias para su ejecución.

El resultado de este trabajo, fue una herramienta confiable, útil y de fácil manejo. Está constituida por una interfaz gráfica, una documentación y una ayuda, donde se describieron las opciones, para soportar el diseño de filtros activos.

En el capítulo I se presenta el título y los objetivos de este trabajo de grado. En el capítulo II se incluyen las definiciones y fundamentos, requeridos para la comprensión de los conceptos, asociados al diseño de filtros activos (RC, analógicos y discretos).

En el capítulo III se encuentra un resumen sobre los fundamentos de la programación orientada a objetos; además, se comenta el proceso de diseño para el desarrollo de la herramienta SoDFiAc UIS 1.0 (HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS).

El capítulo IV contiene los resultados de las pruebas realizadas al software, en las cuales se evaluó el desempeño del mismo y la validez de los diseños proporcionados por la herramienta; así mismo, se presenta una encuesta, por medio de la cual se logró conocer la percepción de algunos posibles usuarios, en relación al manejo, diseño y presentación de resultados de la herramienta SoDFiAc UIS 1.0.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones y bibliografía de este trabajo.

1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 TÍTULO

HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS
SoDFiAc UIS 1.0

1.2 OBJETIVO GENERAL

Implementar mediante el lenguaje de programación Visual Basic una interfaz gráfica que permita dar soporte al diseño de filtros activos, utilizando mínimo 2 configuraciones; así como las aproximaciones de la función de transferencia de Butterworth, Chebyshev, Bessel, Elíptico y Chebyshev inverso.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar las especificaciones de diseño de filtros activos y seleccionar cuáles pueden ser ejecutadas por la herramienta. Asimismo, definir topologías y funciones de transferencia que se implementarán en el software.
- Especificar los valores de elementos de circuito (resistencias y condensadores) comerciales en una base de datos, con el fin de brindar la posibilidad de obtener un diseño real con componentes que se adquieran en el entorno local.

- Implementar y evaluar el algoritmo para procesamiento de los datos y cálculo de los parámetros del circuito.
- Diseñar la interfaz y realizar la documentación para obtener una herramienta software de fácil manejo para el usuario.

2. MARCO TEÓRICO

Cada uno de nosotros, probablemente ha tenido contacto con algún tipo de filtro en la vida, tal vez haya sido con un filtro de café, el cual suele separar los granos del líquido; alguien trabajando en una oficina a menudo filtra el trabajo sin importancia del trabajo importante. En esencia, el acto de filtración es el acto de separar artículos deseados de artículos indeseados. Desde luego, cuando hablamos sobre filtros en este trabajo, no hablamos del café ó el trabajo administrativo, pero si de señales electrónicas.

Existen varios tipos de filtros electrónicos y muchos caminos para clasificarlos [1-6,11-18]. Con la herramienta desarrollada, se pueden obtener diseños de filtros Activos -RC, analógicos y discretos-.

2.1 PROCESO DE DISEÑO DE UN FILTRO

En este capítulo, se estudia el proceso de diseño de un filtro, éste se puede describir como un problema de optimización, donde cada requisito contribuye con un término a una función de error, la cual debe ser reducida al mínimo. Ciertas partes del proceso de diseño pueden ser automatizadas, pero se requieren de algunos tipos de análisis para conseguir un buen resultado.

Los requisitos típicos que se consideran en el proceso de diseño de un filtro son:

- El filtro debe tener una función de transferencia
- El filtro debe ser causal
- El filtro debe ser estable
- El filtro debe ser localizado

A continuación se presentan brevemente cada uno de estos requisitos, para mayor información, refiérase a las referencias expuestas al inicio de este capítulo.

2.1.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Un filtro puede ser descrito en el dominio de la frecuencia, por una función de transferencia $H(s)$. La función de transferencia de un sistema puede ser determinada encontrando la transformada de Laplace a la respuesta al impulso $h(t)$. La figura 1 indica que un filtro puede ser considerado en cualquiera de los dos dominios, en el del tiempo y en el de la frecuencia. Sin embargo, la descripción de la función de transferencia es el método predominante usado para el diseño de filtros.

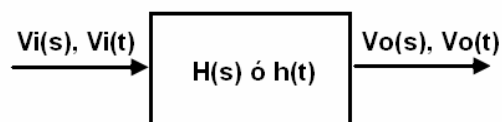


Figura 1. Filtro como un sistema

2.1.2 CAUSALIDAD

En general, la causalidad se refiere al hecho que no puede haber ningún resultado sin la causa. En el caso de interés aquí, una red causal no responderá antes de que una excitación haya sido aplicada a sus terminales. Así, la respuesta al impulso unitario es cero para el tiempo $t < 0$. La respuesta de la figura 2(a) no es causal; por lo tanto, no puede ser realizada. De otra parte, la repuesta de la figura 2(b) es causal, por lo tanto es realizable. Así, un filtro ideal pasa bajo no es realizable, porque su respuesta al impulso no es causal.

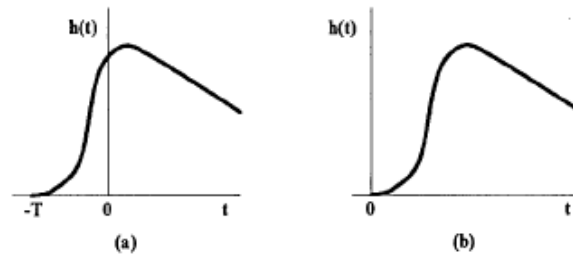


Figura 2. (a) Respuesta no causal y (b) respuesta causal

En el dominio de la frecuencia, la causalidad es determinada mediante el criterio de Paley-Wiener –ver Ec.(2)-. Considere la respuesta al impulso $h(t)$, que posee una transformada de Fourier $H(j\omega)$ para la cual:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega < \infty \quad (1)$$

Para que $H(j\omega)$ sea causal, debe cumplir el siguiente criterio:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\log|H(j\omega)||}{1 + \omega^2} d\omega < \infty \quad (2)$$

Algunas consecuencias de este criterio son las siguientes:

- La función de magnitud $|H(j\omega)|$ no puede ser cero para una banda de frecuencias finita. Sin embargo, ésta puede ser cero en un número finito de frecuencias distintas
- La magnitud $|H(j\omega)|$ no puede decrecer más rápido que una exponencial.
- Por esta restricción, el filtro ideal no es realizable.

2.1.3 ESTABILIDAD

Un filtro estable asegura que cada señal de entrada limitada produce una respuesta limitada. Esto quiere decir: si $h(t)$ es la respuesta de impulso de la red, entonces:

$$\int_0^{\infty} h(t) dt < \infty \quad (3)$$

Y $h(t) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$

En el dominio de la frecuencia, la estabilidad implica que:

- La función $H(s)$ no tiene polos en la región lateral derecha del plano s
- No puede haber polos ubicados sobre el eje $j\omega$
- El grado del polinomio del numerador, no puede ser más alto que el grado del polinomio del denominador.

Sin embargo, para un filtro ser útil, su función $H(s)$ tiene que ser estrictamente estable, por ejemplo, todos sus polos deben estar localizados en la región lateral izquierda del plano s excluyendo el eje $j\omega$.

Adicionalmente, la estabilidad puede evaluarse por medio del margen de fase, margen de ganancia, criterio de Nyquist, etc. Queda a criterio del diseñador optar por el método, que crea más conveniente aplicar, para evaluar esta característica [11-17].

2.1.4 LOCALIDAD

En ciertas aplicaciones tenemos que tratar con señales que contienen componentes que pueden ser descritos como fenómenos locales, por ejemplo pulsos y escalones, los cuales tienen cierta duración en tiempo. Una consecuencia de aplicar un filtro a una señal como ésta, en términos intuitivos, es que la duración del fenómeno local se extiende a razón del ancho del filtro. Esto implica que a veces es importante mantener, tan corta como sea posible, la anchura de la función respuesta impulso del filtro.

De acuerdo con la relación de incertidumbre de la transformada de Fourier, el producto del ancho de la respuesta impulso del filtro y el ancho de su función de frecuencia, debe exceder cierta constante. Esto significa que cualquier requerimiento en la localidad del filtro también implica un compromiso con el ancho de la función de frecuencia. Consecuentemente, puede no ser posible llenar simultáneamente los requerimientos en la localidad de la respuesta al impulso del filtro, como también en su función de frecuencia. Esto es un ejemplo típico de requerimientos contradictorios.

2.2 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL DISEÑO DE FILTROS

El proceso de diseño de los filtros tratados en este trabajo, usa una metodología que consta, básicamente, de 4 pasos -ver Fig.3.-. Los pasos descritos no tienen una única solución, ni siguen necesariamente un orden secuencial. A menudo, al llegar a cierto punto se comprueba que es necesario volver atrás para modificar alguna decisión previa ó en algunos casos, puede ser preciso reexaminar y flexibilizar algunas especificaciones. De los requisitos típicos presentados en la sección 2.1, la herramienta SoDFiAc UIS 1.0, utiliza las frecuencias de paso y rechazo, el orden del filtro y las atenuaciones máximas y mínimas, especificaciones necesarias para calcular la función de transferencia.

La herramienta desarrollada, sirve de soporte en los pasos de diseño 1, 2 y 3, indicados en el diagrama de la Fig.3., en el sentido, de minimizar los tiempos de cálculo y evitar errores que se cometen al diseñar el filtro de forma manual.

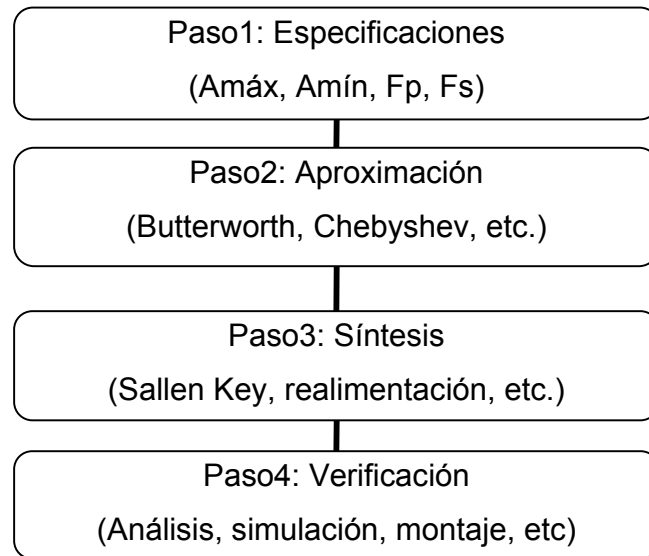


Figura 3. Pasos para el diseño de filtros analógicos

2.2.1 ESPECIFICACIONES DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

El proceso utilizado para el diseño de un filtro, comienza especificando las curvas características de transmisión requeridas. En la Fig.4., se ilustran las especificaciones reales para las curvas de transmisión de un filtro pasa bajo.

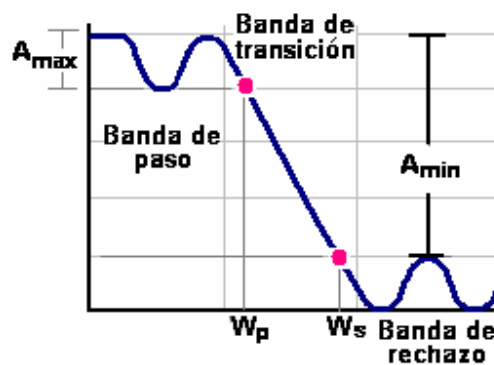


Figura 4. Especificaciones reales de un filtro pasa bajo

Un filtro real no puede dar transmisión constante para todas las frecuencias de la banda de paso, por tal razón, las especificaciones toman en cuenta la desviación

de la transmisión de la banda de paso desde lo ideal de 0 dB hasta una cota superior ($A_{\max}(\text{dB})$), esta desviación, dependiendo de la aplicación, oscila típicamente en un rango comprendido entre 0.05 y 3 dB .

Igualmente, dicho filtro no puede dar transmisión cero para todas las frecuencias de la banda de rechazo, por lo cual las especificaciones requieren que las señales sean atenuadas a un valor mínimo ($A_{\min}(\text{dB})$) con respecto a las señales de la banda de paso. Dependiendo de la aplicación, generalmente este valor puede variar entre 20 y 100 dB .

Ya que la transmisión del filtro no puede cambiar abruptamente en el borde de la banda de paso, las especificaciones de la Fig.4., muestran una banda de frecuencias sobre las cuales la atenuación aumenta de 0 dB hasta A_{\min} , dicha banda se denomina banda de transición y se extiende desde el borde de la banda de paso W_p hasta el borde de la banda de rechazo W_s .

La razón $\frac{W_s}{W_p}$ suele utilizarse como medida de precisión de la respuesta para un filtro pasa bajo, ésta es conocida como el factor de selectividad del filtro. La respuesta del filtro resultante será más cercana a la ideal cuando, éste posea valores de; A_{\max} cercano a cero, alto valor de A_{\min} y/o un factor de selectividad cercano a la unidad.

Además de especificar la magnitud de transmisión, hay aplicaciones en las cuales la respuesta en fase del filtro es de gran interés; dicho diseño es más complejo cuando se especifican magnitud y fase al mismo tiempo.

En la Fig.5., se muestran las especificaciones para un filtro pasa banda y su respuesta en magnitud.

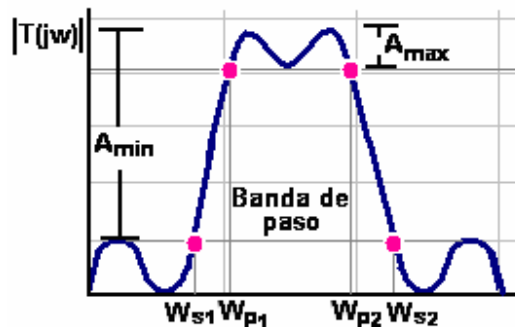


Figura 5. Especificaciones y respuesta en magnitud para un filtro pasa banda.

2.2.2 APROXIMACIONES MATEMÁTICAS

Como se mencionó anteriormente, un filtro ideal debe transmitir sin ningún cambio una gama de frecuencias llamada banda de paso, y eliminar las frecuencias restantes llamada banda de rechazo. Esto en la práctica no es posible de lograr, razón por la cual se hace necesario el uso de una serie de aproximaciones matemáticas que cumplan con las características deseadas dependiendo de las especificaciones de diseño. Cada una de estas aproximaciones busca optimizar una característica específica del filtro.

A continuación se presentan brevemente las aproximaciones matemáticas a implementar en el presente trabajo y su desarrollo matemático se puede observar en el **anexo B** [12].

2.2.2.1 APROXIMACIÓN DE BUTTERWORTH

La aproximación de Butterworth es la de mayor compromiso entre la respuesta en fase y la atenuación. Ésta no posee rizado en la banda de paso ni en la de rechazo y es frecuentemente llamada de respuesta máximamente plana. Esta aproximación, alcanza una respuesta plana en la banda de paso, a cambio de una

banda de transición relativamente ancha y posee características transitorias promedio.

Los filtros implementados por medio de la aproximación de Butterworth son mucho más prácticos; los valores de los elementos del filtro son menos críticos que muchos otros tipos de aproximación.

2.2.2.2 APROXIMACIÓN DE CHEBYSHEV

La aproximación de Chebyshev tiene una banda de transición más angosta para el mismo orden que la aproximación de Butterworth, a cambio de un rizado en la banda de paso.

Esta aproximación posee una atenuación de 0 dB relativa, para la componente de dc. Los filtros de Chebyshev, tienen en la banda de paso una desviación en la magnitud que se extiende desde 0 dB hasta el valor del rizado. El número de ciclos de rizado en la banda de paso, es igual al orden del filtro.

2.2.2.3 APROXIMACIÓN DE CHEBYSHEV INVERSA

Este tipo de aproximación es menos común ya que no decae tan rápido como la aproximación de Chebyshev y requiere de más componentes. Ésta no tiene ningún rizado en la banda de paso, pero si lo posee en la banda de rechazo.

2.2.2.4 APROXIMACIÓN ELÍPTICA

Las aproximaciones mencionadas anteriormente, son funciones todo polo (excepto Chebyshev inversa), ya que todos los ceros se encuentran ubicados en el infinito. Una forma de reducir el ancho de la banda de transición se logra colocando ceros

de transmisión a lo largo del eje imaginario. Una solución de este tipo se logra haciendo uso de funciones elípticas, obteniendo mayor selectividad.

2.2.2.5 APROXIMACIÓN DE BESSEL

La aproximación de Bessel es una optimización para obtener una mejor respuesta transitoria, debido a que posee una fase lineal (retardo de grupo constante) en la banda de paso, con lo cual habrá una respuesta en frecuencia relativamente más pobre.

2.2.3 SÍNTESIS DE LOS FILTROS REALES

Existen tres alternativas para la síntesis de filtros: síntesis directa, en cascada y por realimentaciones múltiples. La síntesis directa fue históricamente la primera en surgir, ya que permite lograr filtros de órdenes altos con muy pocos amplificadores (típicamente 1 ó 2). Esto era muy conveniente debido al elevado costo de los amplificadores de entonces, a pesar de las dos grandes desventajas de este tipo de síntesis las cuales son la dificultad de ajuste y los altos valores de sensibilidad. En la actualidad la síntesis directa ha caído en desuso.

La síntesis en cascada se basa en que las funciones racionales pueden descomponerse como producto de funciones de primer y segundo orden. Entonces se plantea una conexión en cascada de células de dichos órdenes. Dado que estas células se construyen con amplificadores operacionales cuya resistencia de salida es despreciable, no son cargadas por la célula siguiente. Por lo tanto sus funciones de transferencia son independientes, lo cual facilita notablemente el diseño y el ajuste, pero sensibiliza el filtro ante variaciones en los parámetros. La síntesis en cascada es la más difundida en la actualidad, debido a su sencillez, a la gran variedad de circuitos para realizar células de segundo orden

que se han desarrollado y a las satisfactorias prestaciones que se obtienen en general [11].

Los métodos de síntesis por realimentaciones múltiples se han introducido para los casos en que la sensibilidad de los filtros en cascada es demasiado grande para ser viables, por ejemplo, en los filtros pasa banda de orden elevado. Este tipo de síntesis utiliza también células de primer y segundo orden, pero introduciendo realimentaciones múltiples que hacen que la modificación de los parámetros de una de las células repercuta en todos los polos y no sólo en los propios, produciendo una compensación, cuyo resultado global es una reducción en la sensibilidad del filtro final.

A continuación se presentan las funciones de transferencia de primer y segundo orden para los diferentes tipos de filtrado, teniendo en cuenta que la herramienta desarrollada en este trabajo de grado, usa la síntesis en cascada mencionada anteriormente.

2.2.3.1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE PRIMER ORDEN

Existen 2 únicos tipos de respuesta de primer orden, pasa bajo y pasa alto. Los filtros implementados con este tipo de funciones se les pueden controlar la frecuencia central y el nivel de impedancia. A continuación se detallan estos dos tipos de respuesta.

2.2.3.1.1 FUNCIONES PASABAJO DE PRIMER ORDEN

La función de transferencia para una sección pasa bajo es de la forma:

$$T(s) = \frac{k\omega_0}{s + \omega_0} \quad (4)$$

Para $s = jw$ se obtiene:

$$T(jw) = \frac{k\omega_0}{jw + \omega_0} \quad (5)$$

Donde la magnitud de la función pasa bajo es:

$$|T(jw)| = \frac{k\omega_0}{\sqrt{w^2 + \omega_0^2}} \quad (6)$$

Y la fase

$$\phi(w) = -\arctg \frac{w}{\omega_0} \quad (7)$$

La gráfica para la magnitud de la función de transferencia de primer orden pasa bajo se muestra en la Fig.6., donde;

$$M = \frac{k}{\sqrt{2}}$$

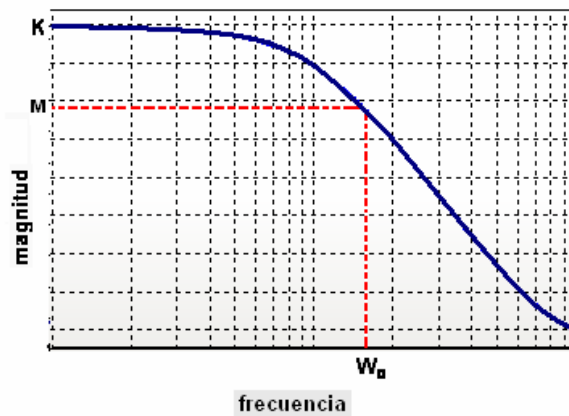


Figura 6. Magnitud de la función de transferencia pasa bajo de primer orden.

2.2.3.1.2 FUNCIÓN PASAALTO DE PRIMER ORDEN

La expresión general para la función de transferencia de una sección pasa alto de primer orden es:

$$T(s) = k \frac{s}{s + \omega_0} \quad (8)$$

Para $s = jw$ se obtiene:

$$T(jw) = k \frac{jw}{jw + \omega_0} \quad (9)$$

La magnitud de la función pasa alto de primer orden es:

$$|T(jw)| = \frac{k w}{\sqrt{w^2 + \omega_0^2}} \quad (10)$$

Y la fase viene dada por:

$$\phi(w) = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{w}{\omega_0} = \arctg \frac{\omega_0}{w} \quad (11)$$

La gráfica de la Fig.7., muestra la magnitud de la función de transferencia de primer orden pasa alto, donde;

$$M = \frac{k}{\sqrt{2}}$$

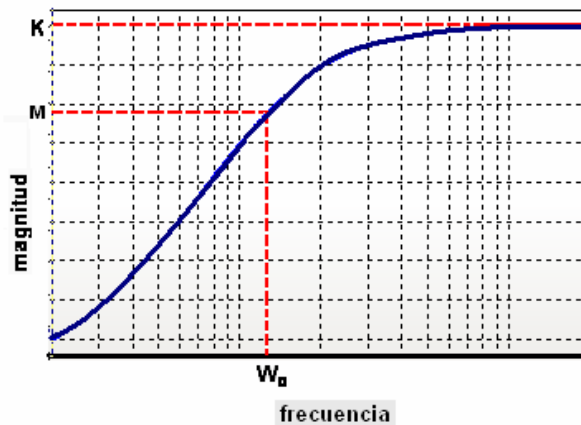


Figura 7. Magnitud de la función de transferencia pasa alto de primer orden.

2.2.3.2 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE SEGUNDO ORDEN

La respuesta pasa bajo, pasa alto, pasa banda son las repuestas de segundo orden principales y de estas se derivan las respuestas restantes. A los filtros implementados con este tipo de funciones se les puede controlar el nivel de impedancia, la frecuencia central y el parámetro denominado factor de calidad “ Q ”. El cual proporciona una medida del valor pico producido en la magnitud alrededor de la frecuencia de corte o de 3 dB “ ω_0 ”.

Generalmente, las secciones de primer orden no son usadas por si solas para el diseño de filtros, ya que las respuestas obtenidas no son muy buenas. El diseño y síntesis de filtros se realiza por medio de la combinación en cascada de secciones de primer y segundo orden.

Para las secciones de segundo orden, la función de transferencia es de la forma:

$$T(s) = \frac{as^2 + bs + c}{s^2 + a_1s + b_1} = \frac{a(s - z_1)(s - z_2)}{(s - p_1)(s - p_2)} \quad (12)$$

Esta función es comúnmente llamada *función bicuadrática* y se utiliza para obtener una gran variedad de filtros. Si los ceros y polos de la función bicuadrática son complejos se cumple que:

$$z_1 = z_2^* \quad \text{y} \quad p_1 = p_2^*$$

La función bicuadrática se puede expresar también como:

$$T(s) = k \frac{s^2 + \left[\frac{w_z}{Q_z} \right] s + w_z^2}{s^2 + \left[\frac{w_p}{Q_p} \right] s + w_p^2} \quad (13)$$

Esta última expresión es la notación estándar, ya que en ella se puede identificar claramente los parámetros característicos más importantes del filtro. A partir de la expresión general de la función bicuadrática, surgen diversos casos los cuales se presentan a continuación.

2.2.3.2.1 FUNCIÓN PASA BAJO DE SEGUNDO ORDEN

Se presenta cuando en la Ec.(13), $a = b = 0$.

$$T(s) = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + \left[\frac{\omega_0}{Q}\right]s + \omega_0^2} \quad (14)$$

La función pasa bajo posee dos ceros en el infinito, tiene una ganancia de dc de valor k y para $\omega \gg \omega_0$ su magnitud decrece según $1/\omega^2$ ó -40 dB/década. La gráfica de magnitud para una función de este tipo se muestra en la Fig.8., en donde;

$$H = \frac{kQ}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}} \quad \text{y} \quad W_H = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \quad (15)$$

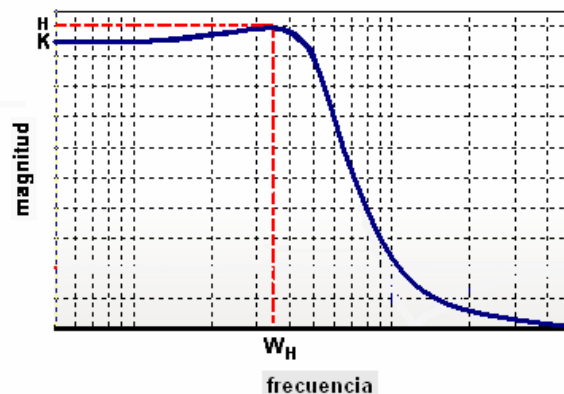


Figura 8. Magnitud de la función de transferencia pasa bajo de segundo orden.

2.2.3.2 FUNCIÓN PASA ALTO DE SEGUNDO ORDEN

Se obtiene de la Ec.(13), cuando $b = c = 0$.

$$T(s) = \frac{ks^2}{s^2 + \left[\frac{\omega_0}{Q} \right] s + \omega_0^2} \quad (16)$$

Donde k es la ganancia para altas frecuencias y para $\omega \ll \omega_0$ su magnitud crece a razón de ω^2 ó 40 dB/década . En la Fig.9., se presenta la gráfica de magnitud para la respuesta en frecuencia de esta función, en donde:

$$H = \frac{kQ}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}} \quad \text{y} \quad W_H = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}} \quad (17)$$

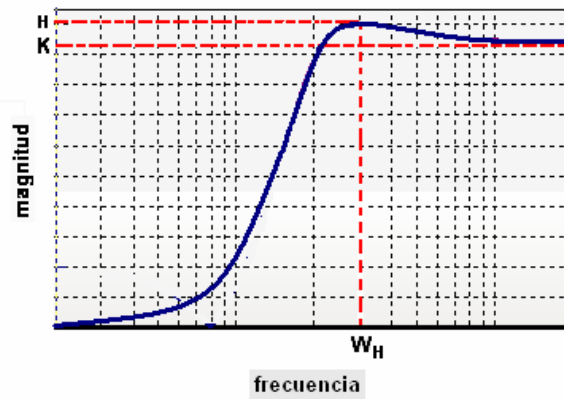


Figura 9. Magnitud de la función de transferencia pasa alto de segundo orden.

2.2.3.2.3 FUNCIÓN PASABANDA DE SEGUNDO ORDEN

Se presenta cuando $a = c = 0$ en la Ec.(13).

$$T(s) = \frac{k \left[\frac{\omega_0}{Q} \right] s}{s^2 + \left[\frac{\omega_0}{Q} \right] s + \omega_0^2} \quad (18)$$

En la Ec.(18), k es la ganancia en el centro de la banda de paso, dicha función posee un cero en el origen y otro en el infinito. Para $\omega \ll \omega_0$ la ganancia crece, mientras que para $\omega \gg \omega_0$, ésta decrece a razón de 20 dB/década . Para valores de Q mayores a 1, la magnitud de la función bicuadrática es aproximadamente simétrica alrededor de la frecuencia central ω_0 .

En la Fig.10., se presenta la gráfica de magnitud de la función de transferencia, en la cual:

$$M = \frac{k}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad D = \frac{\omega_0}{Q}$$

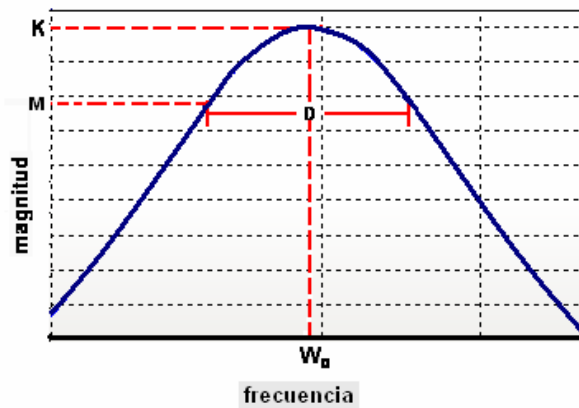


Figura 10. Magnitud de la función de transferencia pasa banda de segundo orden.

2.2.3.2.4 FUNCIONES MUESCA DE SEGUNDO ORDEN

Se presentan cuando $b = 0$, la función de transferencia es de la forma:

$$T(s) = \frac{k(s^2 + \omega_z^2)}{s^2 + \left[\frac{\omega_0}{Q}\right]s + \omega_0^2} \quad (19)$$

Donde k es la ganancia para altas frecuencias, esta función presenta atenuación infinita para $\omega = \omega_z$. Este tipo de función presenta tres casos, dependiendo del valor que tome ω_z :

- **MUESCA PASA BAJO**

Se da cuando $\omega_z > \omega_p$, su magnitud se muestra en la Fig.11., donde:

$$H = kQ_p \left[\left[\frac{\omega_z}{\omega_p} \right]^2 - 1 \right] ; \quad W_H = \omega_p \sqrt{1 + \frac{1}{2Q_p^2 [1 - (\omega_p \omega_z)^2]}} \quad \text{y} \quad D = k \frac{\omega_z^2}{\omega_p^2}$$

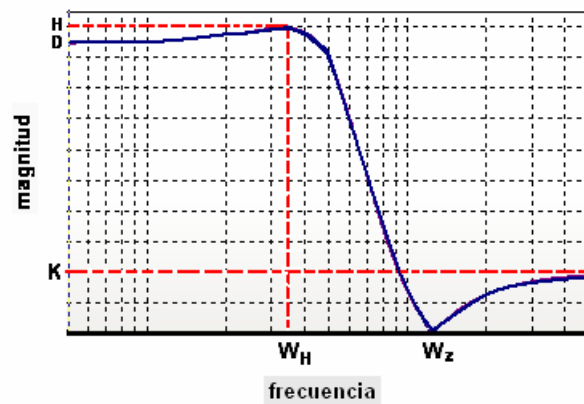


Figura 11. Magnitud de la función de transferencia muesca pasa bajo de segundo orden

- **MUESCA PASA ALTO**

Se presenta cuando $\omega_z < \omega_p$, su magnitud es de la forma mostrada en la Fig.12., en la cual:

$$H = kQ_p \left[1 - \left[\frac{\omega_z}{\omega_p} \right]^2 \right] ; \quad W_H = \omega_p \sqrt{1 + \frac{1}{2Q_p^2 [1 - (\omega_p \omega_z)^2]}} \quad \text{y} \quad D = k \frac{\omega_z^2}{\omega_p^2}$$

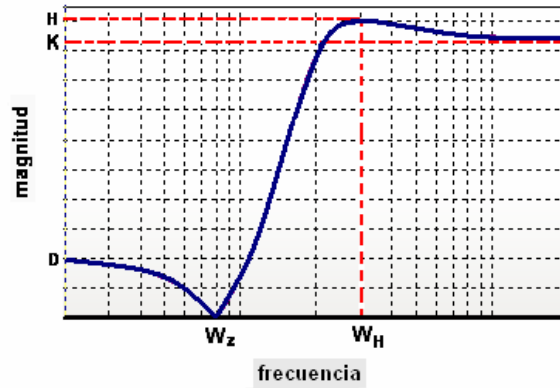


Figura 12. Magnitud de la función de transferencia muesca pasa alto de segundo orden.

- **MUESCA REGULAR**

Se obtiene al hacer $\omega_z = \omega_p$, en la Fig.13., se presenta la magnitud de esta función, donde:

$$M = \frac{k}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad D = \frac{\omega_p}{Q_p}$$

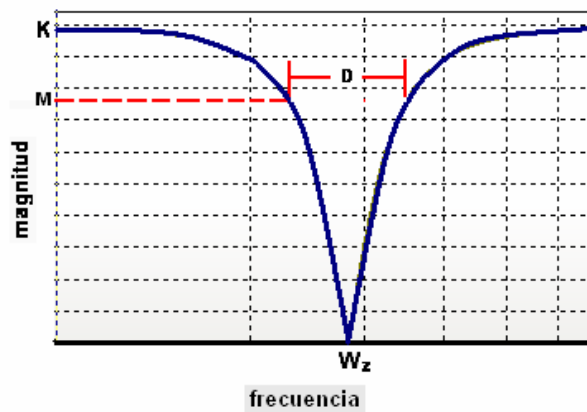


Figura 13. Magnitud de la función de transferencia muesca de segundo orden.

2.2.4 VERIFICACIÓN

Confirmación del funcionamiento y aprobación de características como costo, tamaño, consumo, estabilidad, causalidad, análisis de sensibilidad, etc.

A continuación se describe el análisis de sensibilidad y la importancia de éste en la aprobación de un diseño particular.

2.2.4.1 ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD

Después de obtener los valores de los componentes para el filtro activo-RC, es importante identificar, cuáles de estos componentes tiene la mayor parte de efecto, sobre el funcionamiento total del circuito. Ya que ningún componente es perfecto y ellos cambiarán con la edad, la temperatura y otras influencias. Estos efectos sobre la respuesta pueden ser reducidos al mínimo, seleccionando los componentes más críticos (influyentes) y cambiarlos, para tener en su lugar tolerancias menores. Podemos determinar los componentes de mayor influencia en un diseño, realizando un análisis de sensibilidad. Un análisis de sensibilidad es el proceso de averiguar cómo alguna o todas las características de un filtro son afectadas por todos ó cada uno de los componentes del filtro [12].

Como puede observarse en la Ec.(20), la sensibilidad es una medida de cambio en una función F a consecuencia de la variación en x . La sensibilidad también depende de los valores nominales de F y x . Por lo tanto, la sensibilidad considera el cambio por unidad de la función F , con respecto al cambio por unidad del parámetro x .

Usando la definición de la Ec.(20), otras relaciones de sensibilidad pueden ser determinadas utilizando las propiedades que se presentan en las Ecs.(21-26). (El valor c es considerado una constante y G es otra función de x).

$$S_x^F = \frac{x}{F} * \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial(\ln(F))}{\partial(\ln(x))} \quad (20)$$

$$S_x^{cx} = 1 \quad (21)$$

$$S_x^{1/F} = -S_x^F \quad (22)$$

$$S_x^{FG} = S_x^F + S_x^G \quad (23)$$

$$S_x^{F/G} = S_x^F - S_x^G \quad (24)$$

$$S_x^{F^c} = c * S_x^F \quad (25)$$

$$S_{x^c}^F = \frac{1}{c} * S_x^F \quad (26)$$

En el diseño de filtros activos, se obtienen funciones de transferencia, en términos de valores de resistencias y condensadores, que constituyen el circuito. En general, aquellas funciones pueden ser especificadas en términos de las frecuencias de polo (ω_p), frecuencias de cero (ω_z) y factores de calidad (Q_z , Q_p) como se visualiza en la Ec.(27):

$$H(s) = K \frac{s^2 + \left(\frac{\omega_z}{Q_z}\right)s + \omega_z^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_p}{Q_p}\right)s + \omega_p^2} \quad (27)$$

Si se considera el filtro pasa bajo RC-activo de la Fig.14., el cual posee una función de transferencia como se indica en la Ec.(28), fácilmente podemos

emparejar los términos, para identificar la frecuencia de polo y el factor de calidad Q, en términos de los valores de los componentes como se presenta en las Ecs.(29 y 30).

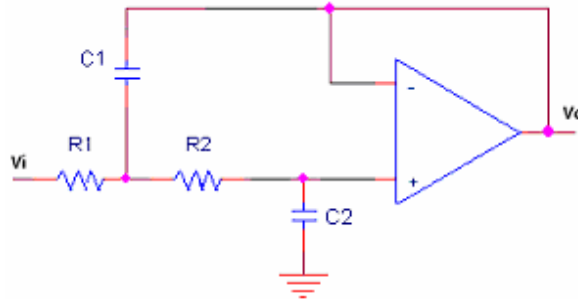


Figura 14. Filtro pasa bajo Sallen-Key de segundo orden

$$H(s) = \frac{\frac{K}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \left[\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-K}{R_2 C_2} \right] s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (28)$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (29)$$

$$Q_p = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2} \left[\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-K}{R_2 C_2} \right]} \quad (30)$$

La sensibilidad para cada uno de los parámetros mencionados, con respecto a un elemento, puede ser determinada de la siguiente forma, por ejemplo la sensibilidad de ω_p con respecto a R1 se obtiene así:

$$S_{R_1}^{\omega_p} = \frac{R_1}{\omega_p} * \frac{\partial(\omega_p)}{\partial(R_1)} \quad (31)$$

$$S_{R_1}^{\omega_p} = \frac{R_1}{\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}} * \frac{\partial \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \right)}{\partial(R_1)} \quad (32)$$

$$S_{R_1}^{\omega_p} = R_1 \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2} * \frac{-1}{2R_1 \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (33)$$

$$S_{R_1}^{\omega_p} = -0.5 \quad (34)$$

Lo cual indica, que para cada aumento del 1.0 % de R1 hay una disminución del 0.5 % en ω_p . Igualmente, se puede encontrar que:

$$S_{R_1}^{Q_p} = -0.5 + Q_p \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} \quad (35)$$

La cual para valores de resistencias y condensadores iguales se reduce a:

$$S_{R_1}^{Q_p} = -0.5 + Q_p \quad (36)$$

La Ec.(36), indica que la sensibilidad de Q_p con respecto a R1 puede ser bastante alta, ya que los valores de Q_p pueden llegar a 50 ó incluso 100. Por lo tanto, la selección de los valores de R y C para los filtros activos, juega un papel importante en la sensibilidad total del circuito. No tenemos el espacio para un tratamiento lleno de análisis de sensibilidad. Sin embargo, las referencias [15] y [16] proporcionan mejores detalles sobre ésta y sobre los métodos de seleccionar valores de componentes, con el fin de obtener valores de sensibilidad bajos.

Un análisis de sensibilidad, provee al diseñador información valiosa sobre los valores de los componentes usados en el circuito. Con aquella información, podemos determinar cuales componentes son críticos en el control de la variación de los parámetros claves del filtro. Sin embargo, es también importante realizar un análisis del peor caso sobre el circuito, este análisis usaría los valores de

sensitividad que ya han sido determinados para poner cada componente al límite extremo de su tolerancia, para ver el efecto sobre el funcionamiento del circuito total. Por ejemplo, todos los componentes cuyas sensitividades son negativas serían puestos a su límite de tolerancia inferior, mientras que todos los componentes con sensitividades positivas serían puestos a sus límites superiores. El circuito entonces sería analizado, para ver si bajo estos criterios cumple con las especificaciones. Si el circuito pasa esta prueba, éste debería funcionar cumpliendo con las especificaciones, bajo las posibles situaciones aleatorias que se puedan presentar y que modifiquen los valores seleccionados y usados cuando el circuito sea montado.

Otro tipo de prueba estadística que es menos rigurosa que una prueba del peor caso, pero probablemente conduzca a predecir lo que pasará en la vida real, es el análisis de Monte Carlo. En esta prueba, los valores de los componentes son seleccionados al azar dentro de su gama de tolerancias y el circuito es probado para ver si éste cumple con las especificaciones requeridas. En la mayor parte de paquetes de software de simulación de circuitos, los valores pueden ser caracterizados teniendo en cuenta una distribución Gaussiana o uniforme. Un número de pruebas de Monte Carlo por lo general son controladas, para simular la variación de los valores de los componentes en el funcionamiento normal del circuito.

2.3 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN FILTRO

A continuación se presenta un ejemplo de diseño siguiendo los pasos presentados en la Fig.3.:

1. **Especificación:** Planteamiento del problema en términos de parámetros característicos del filtro.

Se desea obtener a la salida del sistema, señales con frecuencias menores a los 10 kHz y atenuar las señales cuyas frecuencias sean mayores a ésta, con ganancia unitaria en la banda de paso. Ya que ningún circuito físico permite realizar transmisión constante en todas las frecuencias de la banda de paso, las especificaciones estándar permiten desviarse de la transmisión de la banda de paso a partir de 0 dB ideales, pero imponiendo un límite superior, $A_{\text{máx}}$ (dB) (Fig.15.) para esta desviación. Igualmente como el circuito no puede proporcionar transmisión cero con todas las frecuencias rechazadas, las especificaciones permiten algo de transmisión dentro de esta banda, sin embargo, las especificaciones requieren que estas señales sean atenuadas por lo menos $A_{\text{mín}}$ (dB) (Fig.15.), con respecto a las señales de la banda de paso.

Continuando con las especificaciones estándar y como el circuito físico no puede cambiar de forma abrupta en la banda de paso, las especificaciones estándar proveen una banda de frecuencias dentro de la cual la atenuación se incrementa desde 0 dB ó $A_{\text{máx}}$ hasta $A_{\text{mín}}$. Esta banda de **transición** se extiende desde el borde de la banda de paso ω_p hasta el de la banda de rechazo ω_s . El cociente ω_s/ω_p recibe el nombre de **factor de selectividad** y se utiliza como medida de la agudeza de la respuesta del filtro.

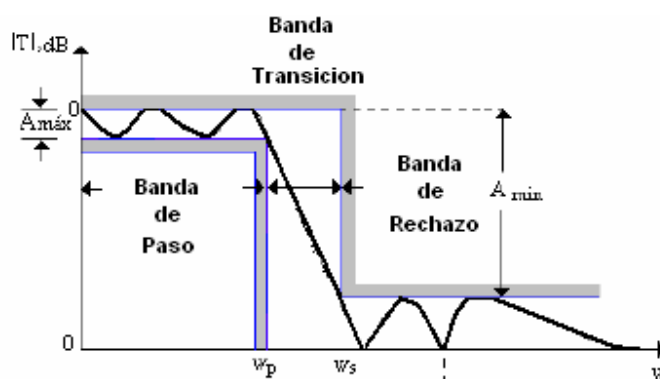


Figura 15. Especificaciones reales de un filtro pasa bajo

En resumen, cuatro parámetros especifican la transmisión de un filtro pasa bajo:

1. El borde en la banda de paso ω_p
2. La variación máxima permitida en la transmisión de la banda de paso A_{\max} .
3. El borde de la banda de rechazo ω_s
4. La atenuación de la banda de rechazo mínima requerida A_{\min} .

Continuando con el diseño del filtro requerido las especificaciones estándar pueden ser:

$F_p=10$ kHz, $A_{\max}=1$ dB, $F_s= 15$ kHz, $A_{\min}= 25$ dB.

2. **Aproximación:** obtención de una función matemática que satisfaga los parámetros especificados.

Una vez determinadas las especificaciones, es necesario proponer una función de transferencia que satisfaga dichas especificaciones y que sea realizable circuitalmente. Existen diversas familias de funciones matemáticas capaces de resolver este problema, la selección de una de ellas se basa en las propiedades de cada una y de las características deseadas o permitidas en la aplicación. Por ejemplo algunas permiten diseños muy económicos pero tiene respuestas transitorias poco convenientes y otras tienen un retardo de grupo casi constante en la banda de paso pero requieren muchos componentes para satisfacer las condiciones de diseño.

Dentro de las aproximaciones más conocidas se encuentran la de Butterworth, la cual permite obtener una ganancia plana en la banda de paso. Chebyshev, la cual aporta un mejor factor de selectividad con menor orden del filtro con respecto a la anterior, a cambio de un rizado en la banda de paso. Chebyshev Inverso, la cual

cambia el rizado de la banda de paso por un rizado en la banda de rechazo de la aproximación de Chebyshev.

Continuando con el diseño de nuestro filtro, en este paso del proceso de diseño, se debe seleccionar una aproximación a la función de transferencia, en nuestro caso seleccionaremos la aproximación de Chebyshev cuyo desarrollo matemático se encuentra en el anexo B, a continuación se realiza dicha aproximación para las especificaciones del paso 2.

En primer lugar se debe encontrar el parámetro ε , el cual determina la variación máxima de la transmisión o rizado en la banda de paso.

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{A_{\min}}{10}} - 1} \quad (37)$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{25}{10}} - 1}$$

$$\varepsilon = 0.5088$$

Con este parámetro calculado, se procede a encontrar el orden necesario para el filtro.

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{\frac{A_{\min}}{10}} - 1}{\varepsilon^2}}}{\cosh^{-1} \left(\frac{w_s}{w_p} \right)} \quad (38)$$

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{\frac{25}{10}} - 1}{(0.5088)^2}}}{\cosh^{-1} \left(\frac{2\pi 15000}{2\pi 10000} \right)}$$

$$n \geq 4.41$$

$$n = 5$$

El orden requerido para la aproximación de Chebyshev es 5. Igualmente, realizando los cálculos respectivos para las demás aproximaciones, se obtienen órdenes de 9, 5 y 3 para las de Butterworth, Chebyshev Inverso y Elíptica respectivamente.

Posteriormente se procede a calcular los polos de la función de transferencia.

$$p_k = \sigma_k + j\omega_k \quad (39)$$

Donde σ_k y ω_k están dados por:

$$\sigma_k = -\text{sen} \frac{2k-1}{2n} \pi * \text{senh} \left(\frac{1}{n} \text{senh}^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \right) \quad (40)$$

$$\omega_k = -\text{cos} \frac{2k-1}{2n} \pi * \text{cosh} \left(\frac{1}{n} \text{senh}^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \right) \quad (41)$$

Para $k = 1, 2, \dots, n$

Realizados los respectivos cálculos se obtienen los siguientes resultados.

	σ_k	ω_k
P _{1,5}	-0.8089	±j0.9901
P _{2,4}	-0.2342	±j0.6119
P ₃	-0.2895	j0

La función de transferencia se obtiene al sustituir estos valores en:

$$T(s) = \frac{k\omega_p^n}{\varepsilon 2^{n-1} (s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_n)} \quad (42)$$

$$T(s) = \frac{\omega_p^5}{8.1408(s + 0.2895\omega_p) (s^2 + s0.4684\omega_p + 0.4293\omega_p^2) (s^2 + s0.1789\omega_p + 0.9883\omega_p^2)}$$

Donde,

$$\omega_p = 2\pi * 10^4 \text{ rad / s}$$

3. **Síntesis:** obtención de un circuito (pasivo, activo ó digital) que realice la función proporcionada por la etapa anterior.

En esta etapa, se selecciona una de las numerosas estructuras de circuito con las que es posible implementar la función de aproximación obtenida anteriormente y se determinan los correspondientes parámetros circuitales. La selección puede estar orientada por la mayor o menor complejidad, la mayor o menor sensibilidad con respecto a variaciones de los componentes, la mayor o menor facilidad de ajuste, etc.

Se selecciona la topología Sallen Key (Fig.16.) para la implementación del filtro, la cual es una topología que presenta pocos componentes circuitales, lo cual reduce en un menor costo. Además, permite ser ajustada fácilmente y es usada típicamente en muchas aplicaciones.

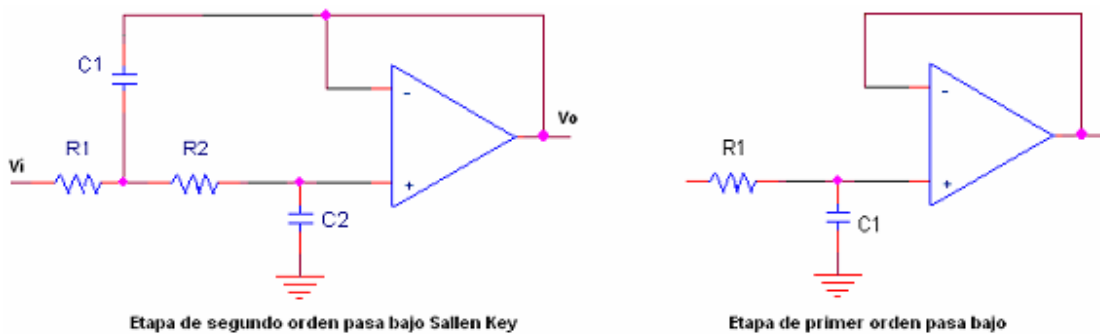


Figura 16. Topología Sallen Key pasa bajo

Para el cálculo de los componentes se tiene en cuenta las ecuaciones para cada etapa de segundo orden derivadas de la comparación de la función de transferencia de la topología:

$$\frac{V_0}{V_i}(s) = \frac{1}{s^2(R1R2C1C2) + sC1(R1 + R2) + 1} \quad (43)$$

Con la función bicuadrática del mismo orden.

$$T(s) = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + \left[\frac{\omega_0}{Q}\right]s + \omega_0^2} \quad (44)$$

Realizada la comparación de estas dos funciones se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$Q = \frac{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}{R_1C_1 + R_2C_1} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (45)$$

A partir de los polos de la aproximación seleccionada calculados en el paso anterior del proceso de diseño, se procede a calcular los parámetros Q y ω_0 de cada etapa de segundo orden:

$$Q_k = \frac{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}}{2\sigma_k} \quad \omega_{0,k} = \omega_p \sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2} \quad (46)$$

Para el filtro que se está diseñando en esta sección, los valores de los parámetros calculados son los siguientes:

Etapa	Q_k	ω_0 (Krad/s)
1	5.55	62.46
2	1.40	41.17
3	0.5	18.19

Una vez obtenidos los valores de los parámetros para cada etapa, se procede a hacer el cálculo de los valores de los elementos de circuito de cada etapa, por comodidad para la solución del sistema de ecuaciones, se supone que las resistencias de todas las etapas son iguales, en éste caso, dicho valor será 10 k Ω .

Con lo cual el sistema de ecuaciones utilizado para este cálculo es:

$$Q = \frac{\sqrt{C1}}{2\sqrt{C2}} \quad \omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C1 * C2}} \quad (47)$$

Los valores de los elementos de circuito calculados para todas las etapas se tabulan a continuación:

Etapa	R1,R2 (kΩ)	C1(nF)	C2(nF)
1	10	17.77	0.14
2	10	6.8	0.87
Polo real	10	5.5	--

Los valores de los componentes de la etapa para el polo real ó etapa de primer orden se obtuvieron de la ecuación:

$$\omega_0 = \frac{1}{R * C1} \quad (48)$$

4. **Verificación:** una vez completado el diseño es necesaria una revisión completa del proyecto, deteniéndose en cuestiones como la influencia de la tolerancia de los componentes, su disponibilidad comercial, su costo de fabricación según el volumen de producción, su costo inicial y operativo para el usuario, su necesidad de mantenimiento, etc. Algunas de estas cuestiones pueden llevar a la conclusión de que el circuito no es viable y por lo tanto debe volverse al inicio del proceso de diseño.

3. INGENIERÍA DEL SOFTWARE

Se considera que "la **Ingeniería del Software** es la rama de la ingeniería que aplica los principios de la ciencia, de la computación y las matemáticas para lograr soluciones costo-efectivas (eficaces en costo o económicas) a los problemas de desarrollo de software", es decir, "permite elaborar consistentemente productos correctos, utilizables y costo-efectivos" ¹⁴.

En este capítulo se presentan aspectos relacionados con la programación orientada a objetos y el proceso de diseño que se efectuó para la elaboración de SoDFiAc UIS 1.0.

3.1 INGENIERÍA DE ANÁLISIS Y SISTEMA

Debido a que el software hace parte de un sistema mayor, el trabajo de desarrollo comienza estableciendo los requisitos de todos los elementos del sistema y luego asignando un conjunto de estos requisitos al software. Este planteamiento del sistema es esencial cuando el software debe interrelacionarse con otros elementos tales como hardware, bases de datos y personas.

¹⁴ Cota A. 1994 "Ingeniería de Software". Soluciones Avanzadas. Julio de 1994. pp. 5-13.

En el caso de **SoDFiAc UIS 1.0** (Software para el diseño de filtros activos) la interacción se hace con el usuario. Partiendo de esta premisa se estableció el concepto inicial de software a diseñar, el lenguaje a utilizar en el desarrollo y el estilo de programación más adecuado. A partir de estos requisitos se decidió utilizar el lenguaje de desarrollo **Visual Basic 2005**, el cual utiliza la programación orientada a objetos, además, actualmente la universidad cuenta con la licencia respectiva, gracias al convenio MSDN ACADEMIC ALLIANCE con Microsoft.

En el proceso de desarrollo, la recopilación de los requisitos se centra especialmente en el cumplimiento de los objetivos trazados durante la etapa de planificación del trabajo de grado. En esta fase, el aporte intelectual es la parte más importante para el desarrollo de la herramienta, y éste representa el mayor costo en el proyecto.

3.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA ESPECÍFICA (VISUAL BASIC).

Visual Basic, es uno de los lenguajes de programación que más entusiasmo despierta entre los desarrolladores de software, tanto expertos como novatos. En el caso de programadores expertos esto se debe a la facilidad con que se desarrollan aplicaciones complejas en un tiempo relativamente corto (comparando con lo que cuesta desarrollar las mismas aplicaciones en otros lenguajes de programación por ejemplo Visual C++). En el caso de los programadores novatos se debe al hecho de ser capaz de desarrollar una aplicación al poco tiempo de iniciar su aprendizaje.

Visual Basic, como su nombre lo indica es un lenguaje visual, también conocido como lenguaje de cuarta generación, lo cual quiere decir que un gran número de tareas se realizan sin escribir código, simplemente con operaciones gráficas sobre una pantalla o con el Mouse (Ratón). Además, Visual Basic es un lenguaje cuya programación está orientada a objetos.

3.2.1 MODO DE DISEÑO Y MODO DE EJECUCIÓN

Las aplicaciones de Visual Basic para Windows generalmente se trabajan en dos modos de operación, *modo de diseño* y *modo de ejecución*. En el modo de diseño, el desarrollador ubica sobre una pantalla formularios, botones, controles, etc. define las propiedades de cada uno de ellos como color de fondo, tamaño de letra, tamaño del control, nombre, entre otros, y puede gestionar funciones para los eventos de estos controles.

En el modo de ejecución, la aplicación se pone a prueba. En este caso, el programador actúa sobre la aplicación, introduciendo eventos, funciones, procedimientos, bucles, métodos etc. También puede cambiar algunas propiedades de los controles y formularios y en general aquí es donde se prueba cómo responde la aplicación a los distintos eventos.

3.2.2 FORMULARIOS Y CONTROLES.

Las aplicaciones típicas desarrolladas en Visual Basic, constan de *formularios* y *controles*, los cuales son los elementos básicos de desarrollo que se usan para crear la interfaz de la aplicación.

Los ***formularios*** son objetos que exponen las propiedades que definen su apariencia, con métodos que precisan su comportamiento y eventos que especifican la forma en que interactúan con el usuario. Mediante el establecimiento de las propiedades del formulario y la escritura de código de Visual Basic para responder a sus eventos, se personaliza el objeto para cubrir las necesidades de la aplicación.

Un formulario (*Form* en el lenguaje de Visual Basic), es una ventana de Windows que puede ser considerado como un contenedor de los controles. Dependiendo de la aplicación se pueden tener uno o más formularios en un proyecto.

Los **controles** son objetos que están contenidos en los objetos formularios. Cada tipo de control tiene su propia gama de propiedades, métodos y eventos, que lo hacen adecuado para una finalidad determinada. Algunos controles son cajas de texto, botones de comando, botones de selección, botones de opción, barras de desplazamiento, cuadros de imágenes entre otros.

Cada control debe tener un nombre diferente con el cual se hace referencia a él en la programación. En general la mayoría de las propiedades de los controles no pueden ser cambiadas por el usuario, no obstante algunas pueden modificarse por ejemplo el tamaño de la ventana de aplicación.

3.2.3 OBJETOS Y PROPIEDADES.

Los formularios y los distintos controles son entidades genéricas de las que puede haber varias copias en un programa. En la programación basada en objetos se llama *clase* a cada una de estas entidades, mientras que cada ejemplar de una clase se conoce como **objeto**. En un programa pueden existir varios botones cada uno de los cuales es un *objeto* del tipo control *command button*, la cual sería la entidad genérica ó clase.

Las **propiedades** son las características de cada objeto, las cuales pueden definir su aspecto gráfico (tamaño, color, posición en el formulario, tamaño y tipo de letra, etc.), otras propiedades pueden definir el estado del objeto (visible, activo etc.).

3.2.4 MÉTODOS Y EVENTOS

Los **métodos** de los controles y objetos son las acciones que pueden desarrollar, las acciones son a diferencia de los procedimientos, funciones ya pre-programadas en el lenguaje para los objetos, por ejemplo centrar el formulario ó ventana en la pantalla ó graficar una línea en un objeto de imágenes.

Los **eventos** son las respuestas de los objetos, son eventos típicos el hacer clic sobre un botón, hacer doble clic sobre el nombre de un fichero para abrirlo, pulsar una tecla para la introducción de un dato en una caja de texto, elegir una opción en un menú ó simplemente mover el ratón.

Cada vez que sucede o se produce un evento sobre un control, Visual Basic inicializa un procedimiento o función que realiza la acción programada por el desarrollador para responder al evento.

3.3 PROCESO DE DISEÑO DE SOFTWARE

El proceso de resolución de un problema con un ordenador (computador) conduce a la escritura de un programa, y a su ejecución en el mismo. Aunque el proceso de diseñar programas es esencialmente, un proceso creativo, se pueden considerar una serie de fases o pasos comunes que generalmente deben seguir todos los programadores. Las fases de resolución de un problema con computador son las siguientes:

- Análisis del problema
- Diseño del algoritmo solución
- Codificación
- Compilación y Ejecución
- Verificación
- Depuración
- Documentación

Las dos primeras fases conducen a un diseño detallado escrito en forma de algoritmo. Un algoritmo es un método para resolver un problema mediante una serie de pasos (instrucciones) precisos, definidos y finitos. Durante la tercer etapa (codificación) se implementa (poner en funcionamiento) el algoritmo en un código escrito en un lenguaje de programación, reflejando las ideas desarrolladas en la fase de análisis y diseño.

La fase de compilación y ejecución traduce y ejecuta el programa al lenguaje de la máquina. En las fases de verificación y depuración el desarrollador busca errores de las etapas anteriores y los elimina. Cuanto más tiempo se invierta en la fase de análisis y diseño, menor será el tiempo necesario para depurar el programa. Por último, debe realizarse la documentación del mismo para que el usuario final tenga mayores facilidades en su utilización.

3.4 IMPLEMENTACIÓN

Una vez terminada la etapa de diseño se procede a traducir este a un lenguaje legible para la máquina, ésta es la tarea que se desarrolla en la etapa de implementación. Si el proceso de diseño es muy detallado, la implementación será muy mecánica, lo cual redundará en un menor tiempo en la fase de depuración, detección y corrección de errores.

A continuación se describen los aspectos importantes en el funcionamiento de SoDFiAc UIS 1.0.

3.4.1 SECCIÓN DE INGRESO DE DATOS

El objetivo es crear una presentación que permita un ingreso de datos coherente, por medio de validaciones y controles internos, así como un manejo de lenguaje propio del área de aplicación (Diseño de filtros activos).

3.4.1.1 VALIDACIÓN DE DATOS INGRESADOS

Una vez se han ingresado los datos (especificaciones), a la herramienta, y antes de proceder a hacer los cálculos de los parámetros de diseño se hacen dos tipos de validaciones.

- A cada una de las cajas de texto en las cuales se recogen los datos de las especificaciones, se les hace una validación como la mostrada en el diagrama de flujo de la Fig.17.

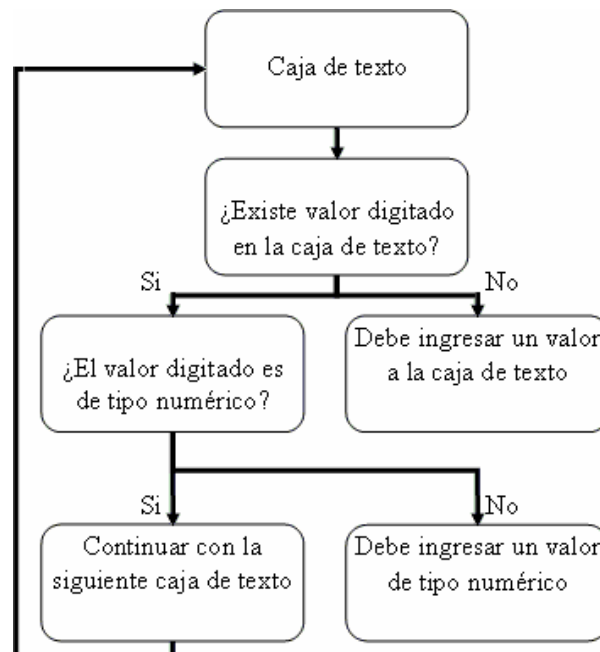


Figura 17 Validación de datos ingresados.

- Una vez obtenidos todos los valores de las especificaciones con la aprobación anterior, se procede a validar si estas son adecuadas para el tipo de diseño que se desea desarrollar. El diagrama de flujo mostrado en la Fig.18., ilustra la validación que debe hacerse para las especificaciones del tipo de filtrado pasa bajo.

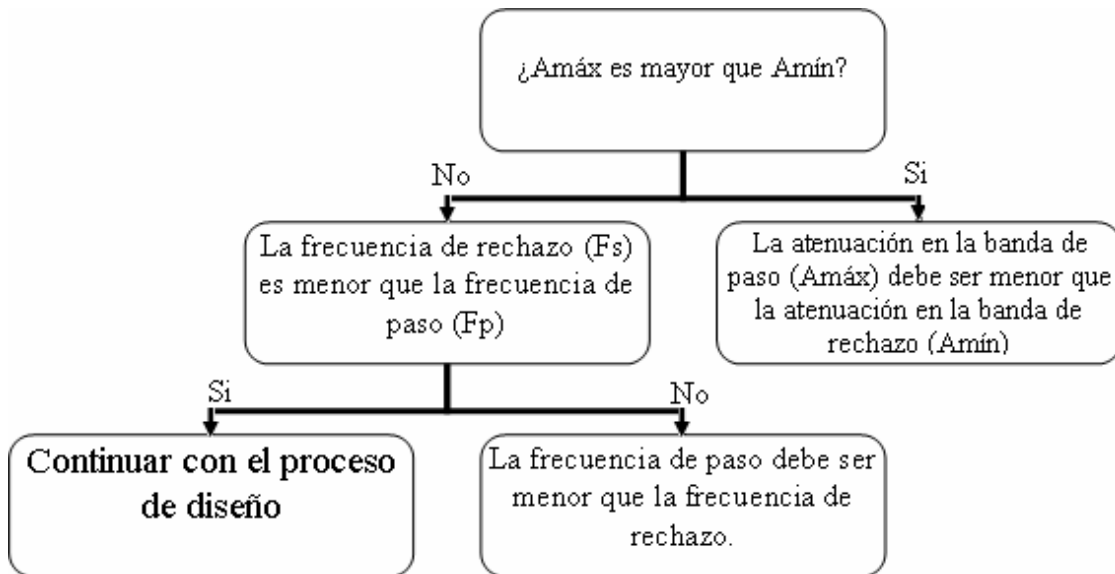


Figura 18. Validación para las especificaciones del filtro a diseñar

3.4.2 CÁLCULO DE PARÁMETROS DE DISEÑO

Inmediatamente hechas las validaciones a las especificaciones de diseño se procede a calcular los parámetros de diseño de cada una de las aproximaciones de la función de transferencia (Butterworth, Chebyshev, Chebyshev Inverso y Elíptica) para el tipo de filtrado propuesto. Los parámetros que se deben calcular son:

- Orden del filtro
- Frecuencia de corte o de 3 dB
- Factor de calidad de los polos
- Frecuencia de los ceros (Chebyshev Inverso, Elíptica)

Estos parámetros son necesarios para calcular las funciones de segundo orden bicuadráticas, las cuales permiten el cálculo de los componentes de circuito necesarios para realizar el filtro. Igualmente el cálculo de los parámetros (Fig.19.)

se hace utilizando las ecuaciones de cada una de las aproximaciones que se explican en el **ANEXO B**.

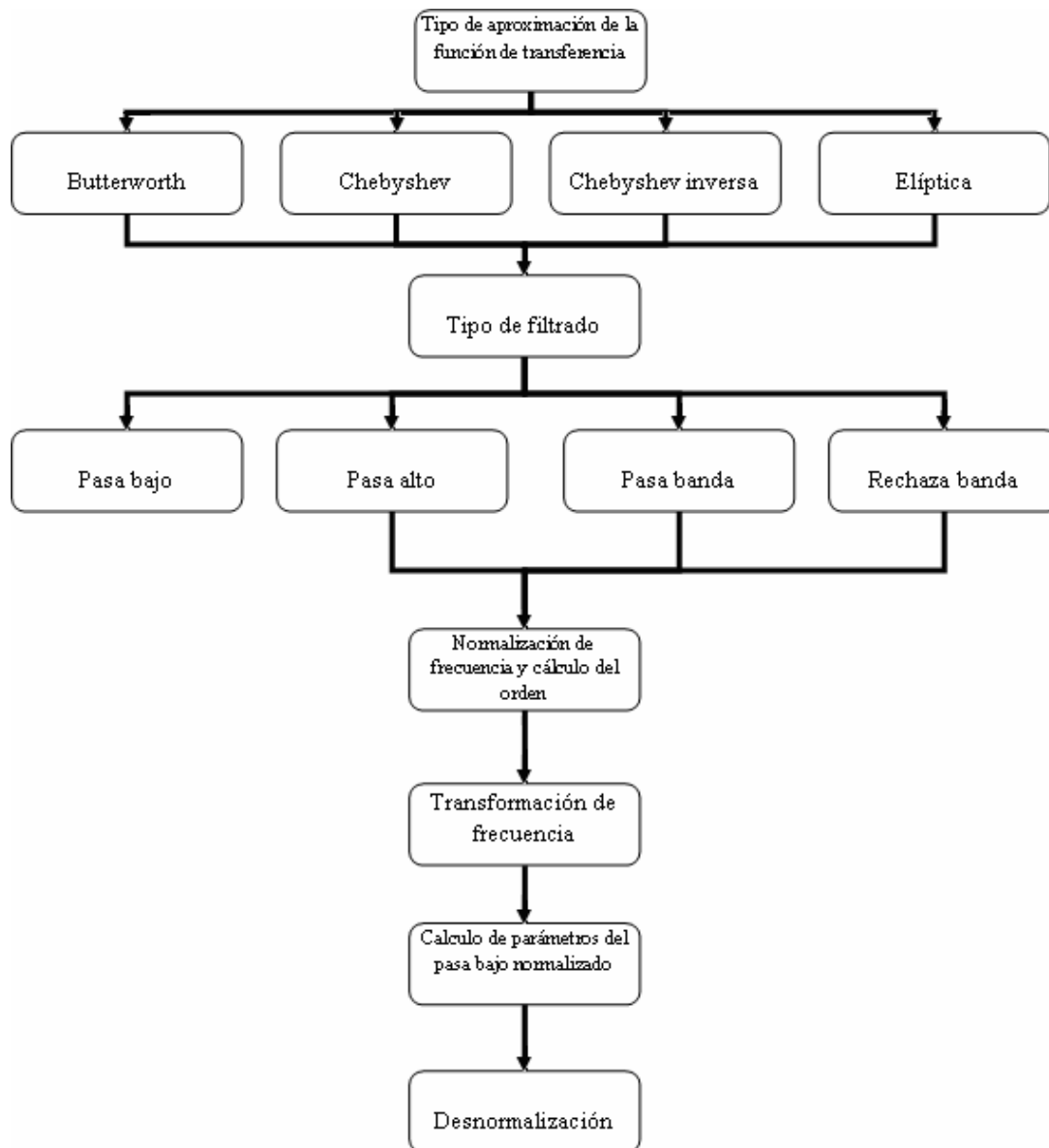


Figura 19. Diagrama de flujo del cálculo de los parámetros de diseño

3.4.3 ELECCIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE DISEÑO

Después de realizar el cálculo de los parámetros para cada una de las etapas, se debe seleccionar alguna de las aproximaciones a la función de transferencia. De acuerdo con esta última elección, se elige la topología para la implementación del filtro. En la Fig.20., se ilustra el diagrama de flujo de esta etapa de diseño.

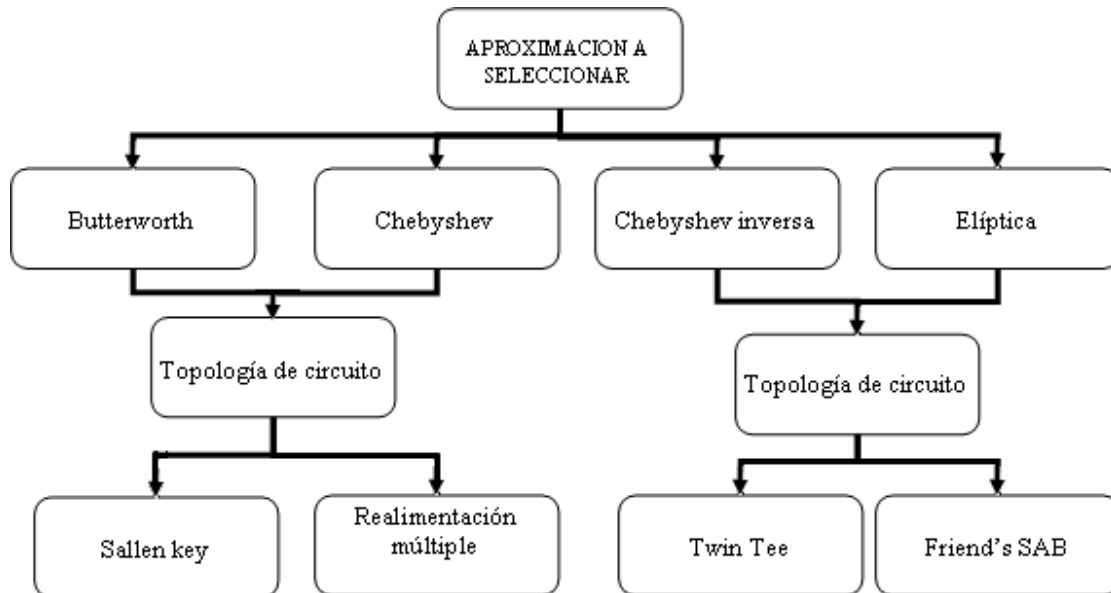


Figura 20 Diagrama de flujo para la selección de la topología de circuito

3.4.4 CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DE CIRCUITO

El cálculo de los componentes de circuito para todas las topologías se realiza teniendo en cuenta los estándares para los valores de los elementos pasivos (resistencias y condensadores). Así como, las ecuaciones de diseño que involucran los parámetros “factor de calidad y la frecuencia de corte” para cada etapa. Este cálculo se realiza a partir de las funciones de transferencia de segundo orden de cada topología, comparándola con la función bicuadrática de segundo orden y resolviendo el sistema de ecuaciones generado.

La Fig.21., presenta el diagrama de flujo que describe este proceso:

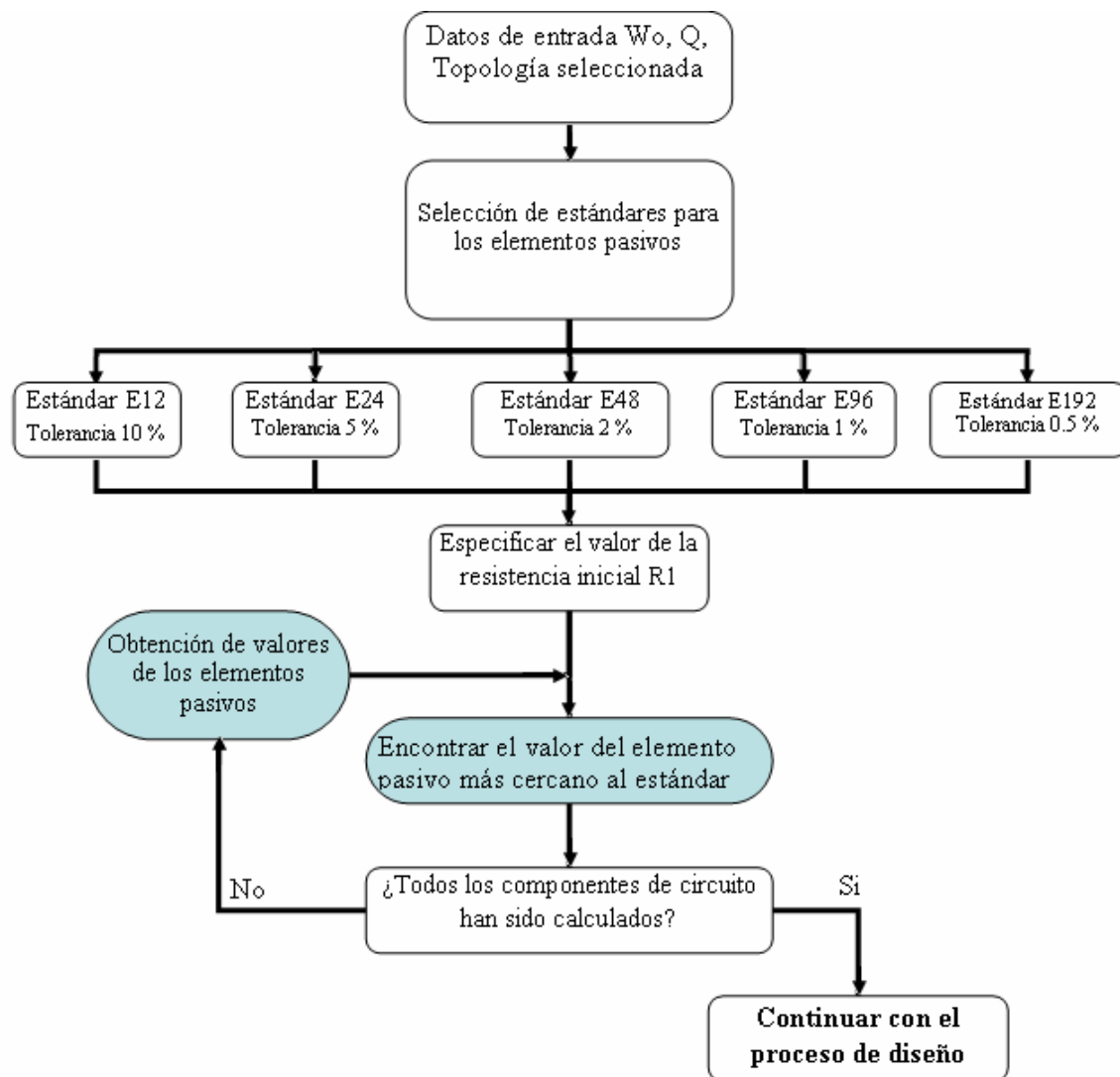


Figura 21. Diagrama de flujo para el cálculo de los elementos pasivos

El cálculo de los valores de los componentes para las diferentes topologías se realiza mediante la subrutina “**obtención de valores de los elementos pasivos**” resaltada en la Fig.21. El diagrama de flujo de esta subrutina se ilustra en la Fig.22., para el caso de la topología sellen key pasa bajo de segundo orden

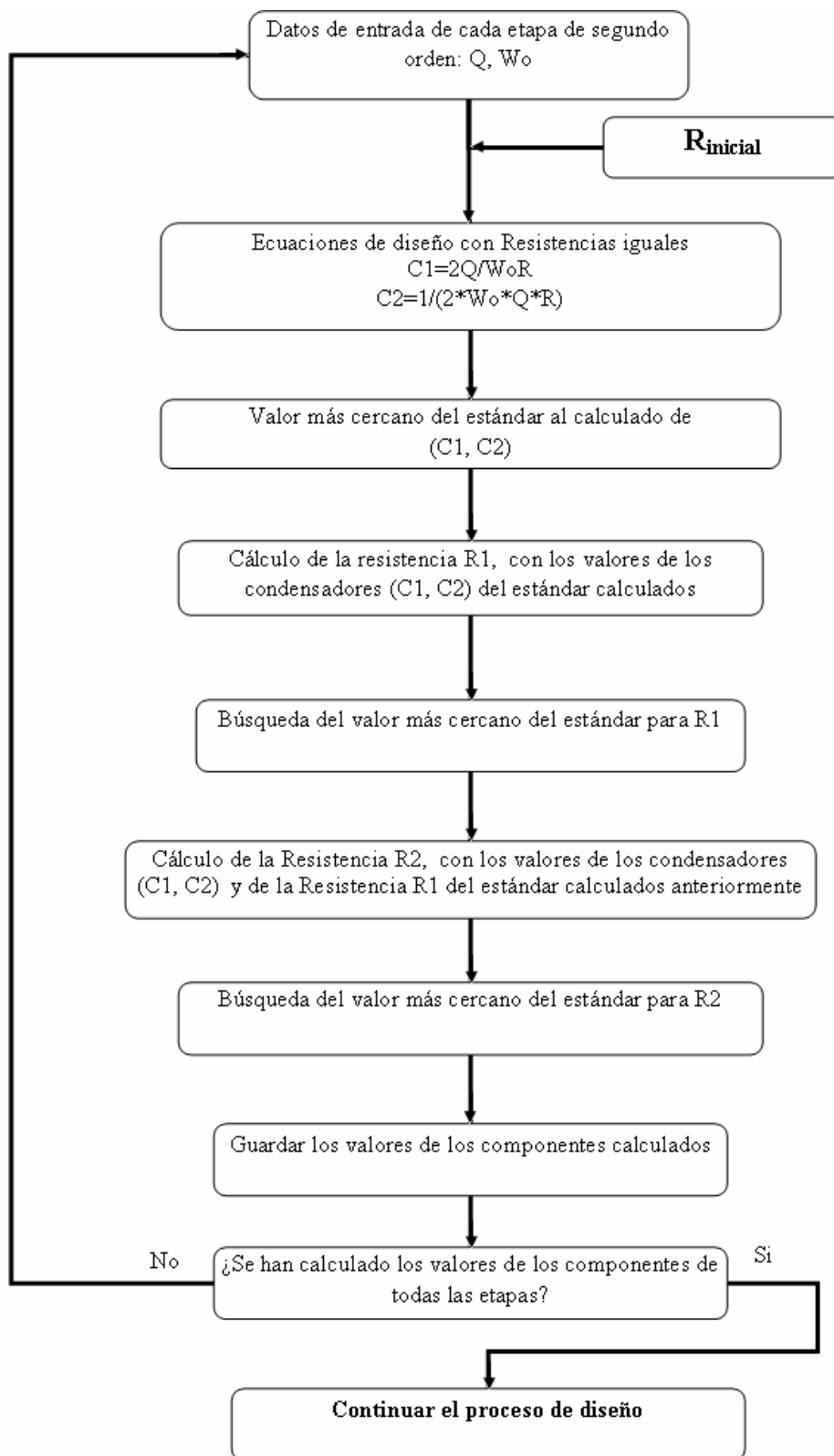


Figura 22. Diagrama de flujo “obtención de valores de los elementos pasivos”

La subrutina para la obtención de los valores del estándar de los elementos pasivos del filtro, demarcada en la Fig.21., con el nombre de **“encontrar el valor del elemento pasivo más cercano al estándar”**, toma cada valor calculado mediante las ecuaciones de diseño y encuentra dentro de la lista del estándar seleccionado el valor más cercano a éste. En la Fig.23., se presenta el diagrama de flujo de esta subrutina.

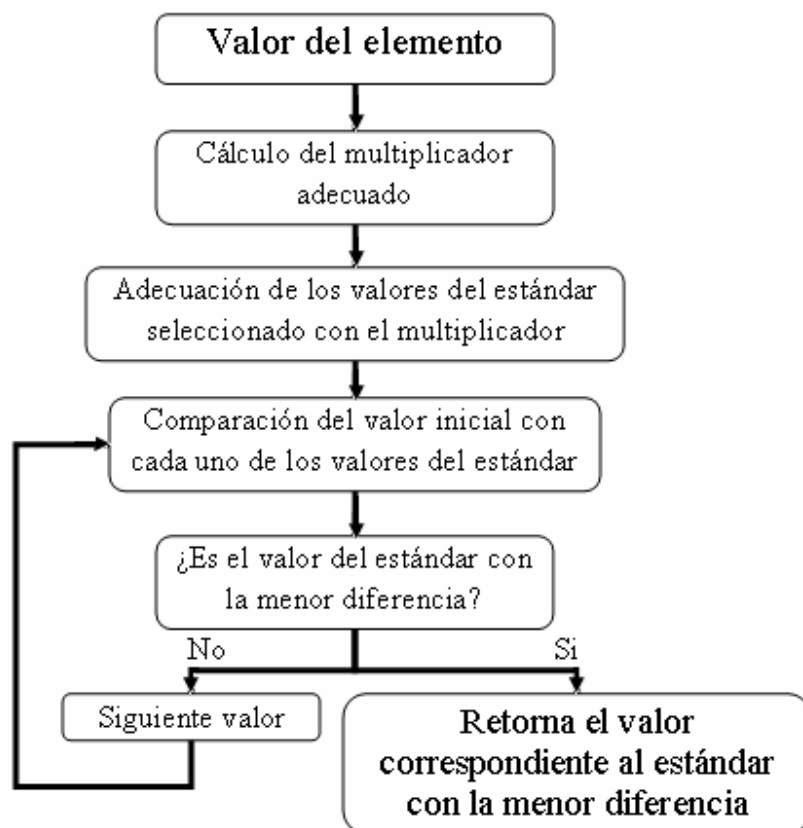


Figura 23. Cálculo de los valores para los componentes pasivos de diseño

El cálculo de los valores de los componentes pasivos de cada una de las topologías de circuito implementadas en la herramienta, se realiza de manera similar siguiendo el procedimiento descrito anteriormente en esta sección, teniendo en cuenta en cada caso, las aproximaciones y suposiciones iniciales para el desarrollo y solución de las ecuaciones de diseño particulares de cada topología.

3.4.4.1 EVALUACIÓN DEL ALGORITMO DE SoDFiAc UIS 1.0

Como medida de la eficiencia de un algoritmo, se suelen estudiar los recursos (memoria y tiempo) que consume el algoritmo. El análisis de algoritmos se ha desarrollado para obtener valores que de alguna forma indiquen (o especifiquen) la evolución del gasto de tiempo y memoria en función del tamaño de los valores de entrada.¹⁵

El análisis y estudio de los algoritmos es una disciplina de las ciencias de la computación, en la mayoría de los casos, su estudio es completamente abstracto sin usar ningún tipo de lenguaje de programación ni cualquier otra implementación; por eso, en ese sentido, comparte las características de las disciplinas matemáticas. Así, el análisis de los algoritmos se centra en los principios básicos del algoritmo, no en los de la implementación particular.

El proceso de diseño del algoritmo de SoDFiAc UIS 1.0 se inició, determinando las subrutinas necesarias para obtener a partir de las especificaciones, los parámetros y características de cada una de las aproximaciones de la función de transferencia, (Butterworth, Chebyshev tipo I y tipo II, Elíptica y Bessel). Entre los principales cálculos que deben ser realizados, se encuentran:

- El cálculo del orden del filtro requerido para satisfacer las especificaciones de la función de transferencia.
- La característica de polos y ceros de la función de transferencia.
- Si el tipo de filtrado no es pasa bajo, se debe hacer una normalización de frecuencia, luego, se hace una transformación de frecuencia y inmediatamente después, se realiza el cálculo de los parámetros

¹⁵ <http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo>

nombrados anteriormente. Por último se efectúa la desnormalización correspondiente al tipo de filtrado seleccionado.

- Descomposición de la función de transferencia en funciones de segundo y primer orden (si existe, para órdenes de filtros impares).
- Cálculo de las frecuencias y factores de calidad de cada una de las parejas de polos conjugados que conforman las funciones bicuadráticas de segundo orden.

Una vez seleccionada la función de aproximación y la topología de implementación, el algoritmo ejecuta el proceso de cálculo para los valores de los elementos de la topología seleccionada. Estas topologías generan sistemas de ecuaciones para los cuales hay múltiples formas de solución. Cada una de esas formas de solución acarrea distintos tiempos de ejecución, los cuales se buscan minimizar.

Las subrutinas implementadas inicialmente para la solución de los sistemas, conllevaban tiempos de procesamiento de los datos bastante prolongados, ya que para el cálculo de los componentes de circuito se realizaban todas las combinaciones posibles, entre todos los valores del estándar, siempre buscando la función con el menor error posible. Debido a la gran cantidad de cálculos, fue necesario replantear el algoritmo y desarrollar una metodología mejor para el cálculo de los elementos de circuito.

A continuación, se describe la metodología implementada, para encontrar la solución en la obtención de los valores de los elementos pasivos para la topología Sallen-Key (Fig.24.) y con el tipo de filtrado pasa bajo.

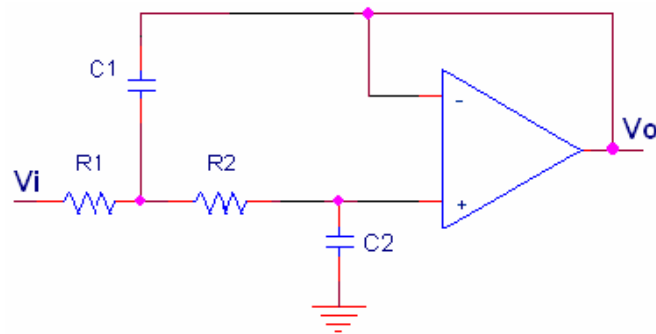


Figura 24. Topología sellen key de segundo orden

Si se supone el amplificador operacional (Op Amp) Ideal, la función de transferencia para una célula de segundo orden es la siguiente:

$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{1}{s^2(R1R2C1C2) + sC1(R1 + R2) + 1} \quad (49)$$

La función bicuadrática de segundo orden es la siguiente:

$$T(s) = k \frac{s^2 + \left[\frac{w_z}{Q_z} \right] s + w_z^2}{s^2 + \left[\frac{w_p}{Q_p} \right] s + w_p^2} \quad (50)$$

Al realizar la comparación entre la función de transferencia y la función bicuadrática de segundo orden se genera el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Q_p = \frac{\sqrt{R1R2C1C2}}{R1C1 + R2C1} \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{R1R2C1C2}} \quad (51)$$

Como puede notarse, sólo existen para éste caso, dos ecuaciones y el número de incógnitas es cuatro, éste valor corresponde al número de elementos pasivos presentes en la configuración. Para dar solución al problema, inicialmente se suponen que todas las resistencias tienen el mismo valor y luego se despejan los

condensadores del sistema de ecuaciones, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$C1 = \frac{2Q}{\omega_0 R} \quad C2 = \frac{1}{2\omega_0 QR} \quad (52)$$

Para obtener valores de los condensadores, inicialmente se supone un valor de resistencia "R". Una vez calculados dichos valores, se procede a buscar en los estándares, los valores comerciales más cercanos a los calculados. Ya obtenidos todos los valores comerciales de los elementos pasivos, el problema está solucionado. En el algoritmo programado, se realizan todos los cálculos de la misma forma hasta este punto, pero se ha agregado una segunda iteración para obtener valores que presenten un menor error en el cumplimiento de la función de transferencia. Esta segunda iteración consiste en lo siguiente:

Una vez calculados y encontrados en los estándares, los valores más cercanos correspondientes a los condensadores (C1 y C2), se realiza una nueva solución del sistema de ecuaciones, en esta oportunidad, se supone que los valores de los condensadores, son conocidos (los anteriormente calculados), así, se procede a calcular los valores de las resistencias "R1" y "R2", solucionando el sistema para estas incógnitas, por último, una vez calculados dichos valores, se buscan en los estándares, los valores más cercanos a estos últimos, con ello se tiene una solución completa del sistema, la cual tiene un menor error en el cumplimiento de las especificaciones de la función de transferencia.

Cada nueva etapa de segundo orden, requiere que se realicen todos los cálculos como se ha indicado anteriormente. Una vez realizados todos los cálculos, el algoritmo debe guardar todos los valores encontrados para después mostrarlos en pantalla.

Las metodologías de solución usadas para encontrar los valores de los elementos pasivos, para las topologías de Realimentación múltiple (Fig.25.), Friend's SAB

(Fig.26.) y Twin Tee (Fig.27.), implementadas en la herramienta para realizar la síntesis de la aproximación a la función de transferencia, se realizaron de manera similar, buscando obtener tiempos de ejecución menores. A continuación se presentan las topologías y sus respectivas funciones de transferencia, para el tipo de filtrado pasa bajo, asumiendo op-amp's ideales [11,18].

Topología Realimentación múltiple

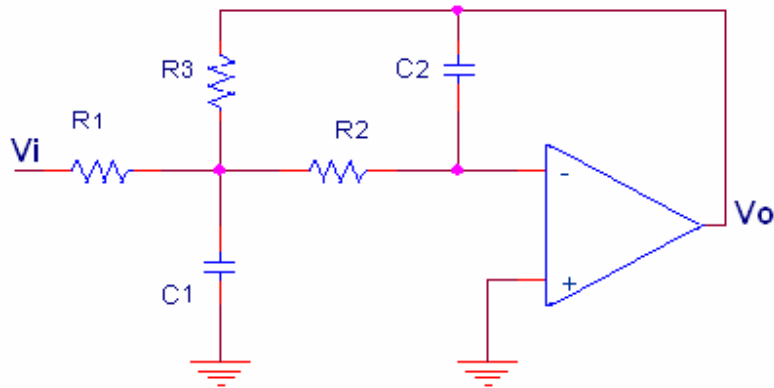


Figura 25. Topología Realimentación Múltiple de segundo orden Pasa Bajo

$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{-R1/R3}{s^2(R2R3C1C2) + sC2R2(R3/R1 + R3/R2 + 1) + 1} \quad (53)$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{\frac{R3}{R2} \frac{C1}{C2}}}{1 + \frac{R3}{R2} + \frac{R3}{R1}} \quad \omega_p = \frac{1}{R2C2\sqrt{\frac{R3}{R2} \frac{C1}{C2}}} \quad (54)$$

Topología Friend's SAB

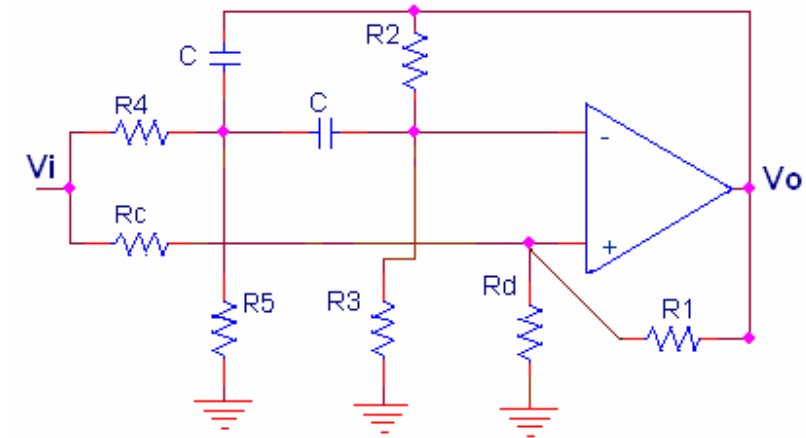


Figura 26. Topología Friend's SAB segundo orden pasa-bajo notch

Donde $G_i = \frac{1}{R_i}$, $G_1 = G_4 + G_5$, $K_c = \frac{G_c}{G_d + G_c}$, $K_b = \frac{G_1}{G_d + G_c}$

$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{K_c s^2 + \frac{K_c G_1 (G_3 + G_2)}{C^2}}{s^2 + \left[\frac{2G_2 - 2K_b (G_3 + G_1)}{C} \right] s + \frac{G_1 (G_2 - K_b G_3)}{C^2}} \quad (55)$$

$$Q_p = \frac{-\sqrt{G_1} \cdot \sqrt{G_2 - K_b G_3}}{2(G_1 K_b - G_2 + G_3 K_b)} \quad \omega_p = \frac{\sqrt{G_1} \cdot \sqrt{G_2 - K_b G_3}}{C} \quad (56)$$

Topología Twin Tee

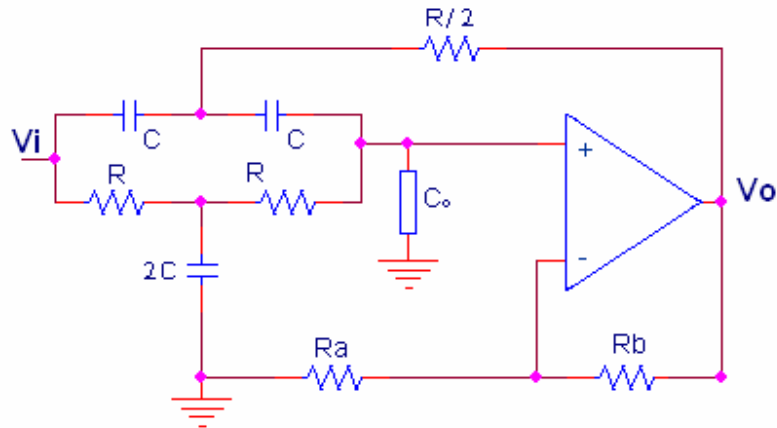


Figura 27. Topología Twin-tee de segundo orden pasa bajo

$$K = 1 + \frac{R_b}{R_a} \quad (57)$$

$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{\frac{KC}{C + 2C_0} \left[s^2 + \frac{1}{R^2 C^2} \right]}{s^2 + \left[\frac{(4 - 2K)C + 2C_0}{RC(C + 2C_0)} \right] s + \frac{C}{R^2 C^2 (C + 2C_0)}} \quad (58)$$

$$Q_p = \frac{-\sqrt{C} \cdot \sqrt{C + 2C_0}}{2(C(K - 2) - C_0)} \quad \omega_p = \frac{1}{R\sqrt{C} \cdot \sqrt{C + 2C_0}} \quad (59)$$

3.4.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los valores de los componentes pasivos, para cada una de las etapas, se procede a hacer una presentación de los resultados ordenadamente. Esta sección de implementación está comprendida por dos partes en la herramienta desarrollada.

La presentación preliminar consta de un diagrama de circuito de la topología seleccionada, donde se ubican los elementos pasivos, con el respectivo valor

calculado en la etapa anterior y los elementos activos que lo componen. En esta presentación se pueden observar todas las etapas que componen el filtro diseñado a través de dos botones (*siguiente* y *anterior*). Igualmente se incluye información concerniente con el número total de etapas y factor de calidad de cada una de ellas. En Fig. 28., se puede visualizar un ejemplo de este tipo de presentación.

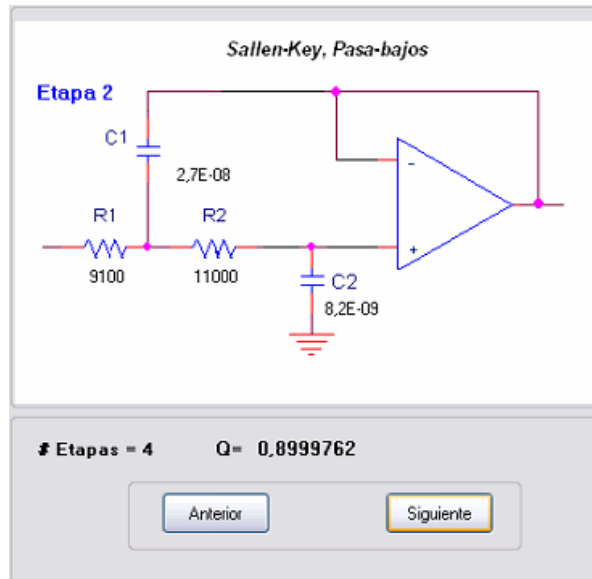


Figura 28. Presentación de resultados I

La segunda presentación de resultados incluye una tabla con la información de los valores de los elementos calculados. Esta tabla se encuentra organizada por etapas. La gráfica de la Fig.29., muestra un ejemplo de esta segunda presentación de resultados.

**Filtro Activo Diseñado
Butterworth Pasa Bajos**

Etapa	C1	C2	R1	R2
Etapa Polo Real	1,5E-08		10000	
Etapa 1	8,2E-08	2,7E-09	10000	10000
Etapa 2	2,7E-08	6,8E-09	12000	10000
Etapa 3	1,8E-08	1,2E-08	10000	10000
Etapa 4	1,5E-08	1,5E-08	9100	11000

Figura 29 Presentación de Resultados II

3.4.6 IMPLEMENTACIONES ADICIONALES

La herramienta cuenta con un formulario (Fig.30.) el cual permite realizar conversiones de unidades de ganancia y atenuación. El objetivo de este formulario es brindar la posibilidad de realizar conversiones de este tipo de forma rápida, ya que pueden ser necesarias al momento del ingreso de datos de las especificaciones del filtro.

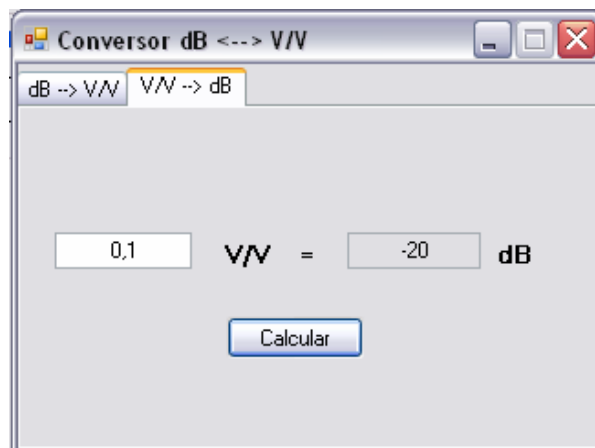


Figura 30. Conversor dB—V/V y viceversa

3.4.6 GENERACIÓN DEL PROYECTO “INSTALADOR”

Una vez implementadas, depuradas y probadas todas las subrutinas planeadas en la etapa de diseño (*Programación del algoritmo global*), se procede a generar un proyecto de instalación. Éste consta de una serie de archivos que serán empaquetados por el lenguaje de desarrollo y permitirán que la herramienta pueda ser utilizada en los equipos donde será instalada.

El proyecto de instalación forma parte de la fase de implementación de la solución, este es un tipo de proyecto especial con una serie de características que son definidas por el desarrollador y son particulares en cada aplicación.

Al generar el archivo de instalación se definen características como; nombre de la solución, directorio donde se va a instalar, tipo de archivos a los cuales el usuario puede tener acceso, requerimientos del sistema para un óptimo funcionamiento, información de la empresa o grupo de desarrollo, derechos de autor entre otros.

Una vez configuradas las propiedades del archivo de instalación se procede a generar la solución teniendo como resultado un archivo que permite tener una copia de la aplicación desarrollada (**SoDFiAc UIS 1.0**).

Este archivo compilado podrá ser instalado en cualquier ordenador (ver requerimientos sección 3.6 *REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA*) para ser usado como apoyo en el diseño de filtros activos.

3.5 DOCUMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

La documentación es una parte esencial de cualquier paquete de software, ésta tiene la finalidad de guiar al usuario en el manejo del mismo. A continuación se describe el proceso de desarrollo para la ayuda de SoDFiAc UIS 1.0.

3.5.1 AYUDA EN PANTALLA

El programa de desarrollo de la ayuda para SoDFiAc UIS 1.0, es **HelpNdoc**, éste fue seleccionado ya que es un software de fácil uso, eficaz e intuitivo para crear archivos de ayuda HTML. HelpNdoc proporciona una interfaz clara y eficiente para construir los archivos de ayuda HTML sin tener que preocuparse por el funcionamiento interno de generación del archivo. A demás, HelpNdoc es un software de uso libre.

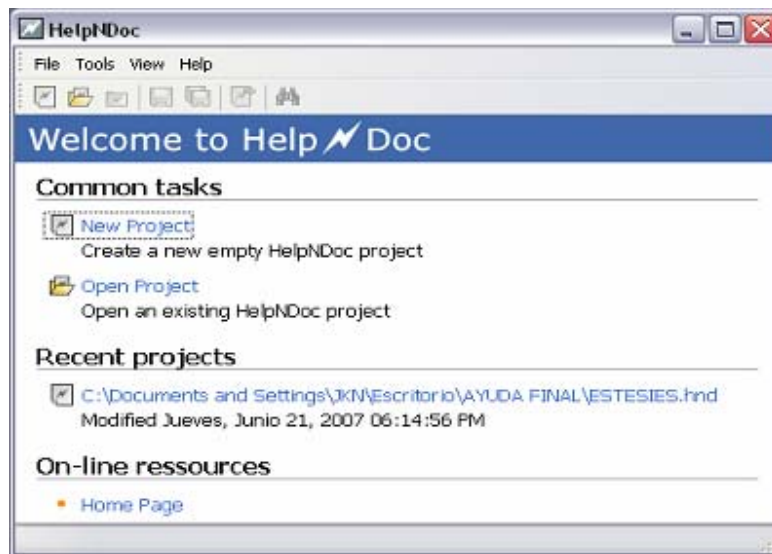


Figura 31. Pantalla de inicio de HelpNDoc

El procedimiento de diseño inicia con la creación de un nuevo proyecto (link New Project de la Fig.31.) del cual se despliega la pantalla que se muestra en la Fig.32. En la cual se tiene la opción de seleccionar el tipo de proyecto que se desea desarrollar (General ó HTML), así, como de insertar datos relacionados con el nombre del proyecto, datos del copyright, donde se debe tener en cuenta el año y el nombre de la compañía desarrolladora y el formato de letra deseado, entre otros.

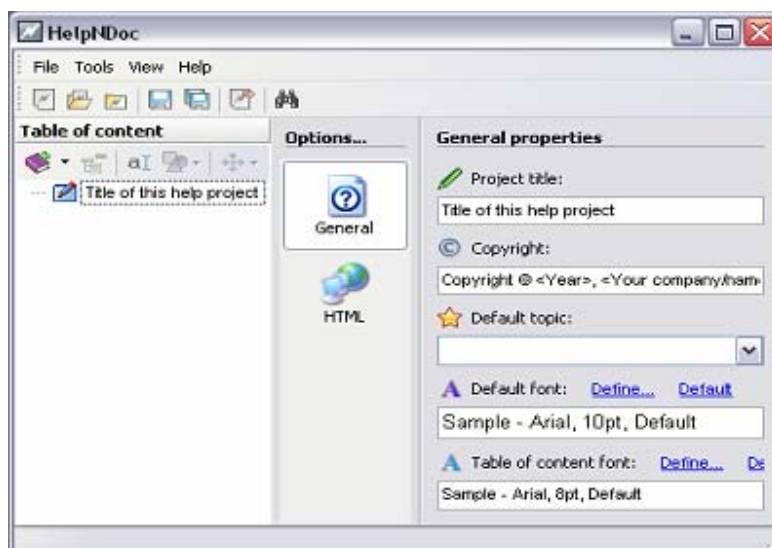


Figura 32. Selección de las propiedades generales y tipo de proyecto

Una vez seleccionada la opción General, la cual es la apropiada para la creación de la ayuda, se tiene acceso a la pantalla mostrada en la Fig.33., dividida en 4 secciones para una mejor descripción.

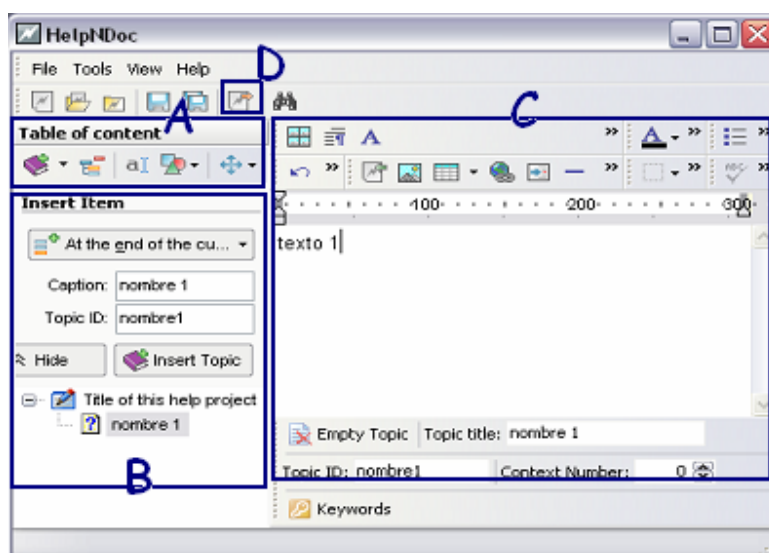


Figura 33. Interfaz principal para la creación de las páginas.

Sección A: en ella se realiza la creación de cada una de las páginas de la ayuda y despliega la sección B, así mismo, permite la selección de las características de cada página, entre las cuales se encuentran el tipo de ícono, la ubicación, el renombre y la eliminación de páginas existentes.

Sección B: en esta sección es asignado el nombre de las páginas. A demás presenta la opción de inserción y visualización de cada una de ellas.

Sección C: contiene el editor de texto de cada una de las páginas, el cual consta de las opciones básicas de cualquier editor, así como de la función (Empty Topic) usada para la creación de los libros.

Sección D: una vez creadas y ajustadas todas las páginas y libros se procede a la compilación del proyecto presionando el botón mostrado en D.

Realizado este proceso se elige la ubicación del proyecto y se obtiene el producto final presentado en la Fig.34.

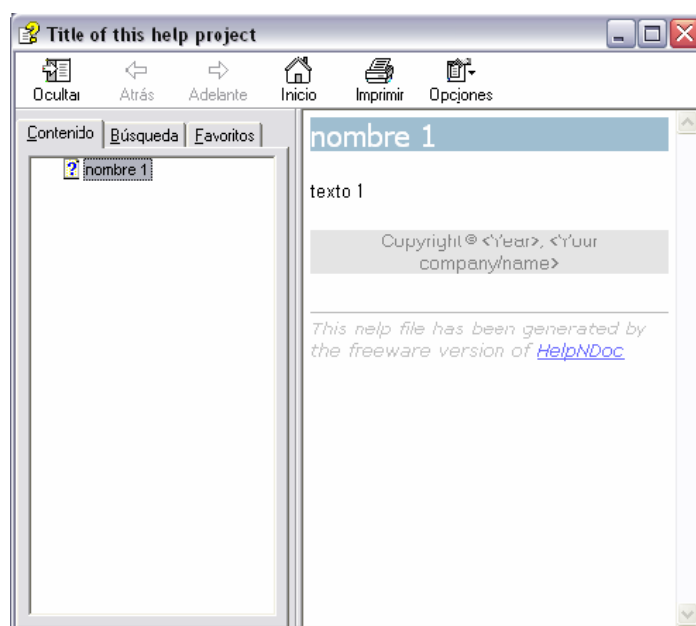


Figura 34. Archivo de ayuda final

3.5.2 ACERCA DE.

El formulario de la Fig.35., presenta información concerniente a los autores, compañía desarrolladora y versión del software SoDFiAc UIS 1.0

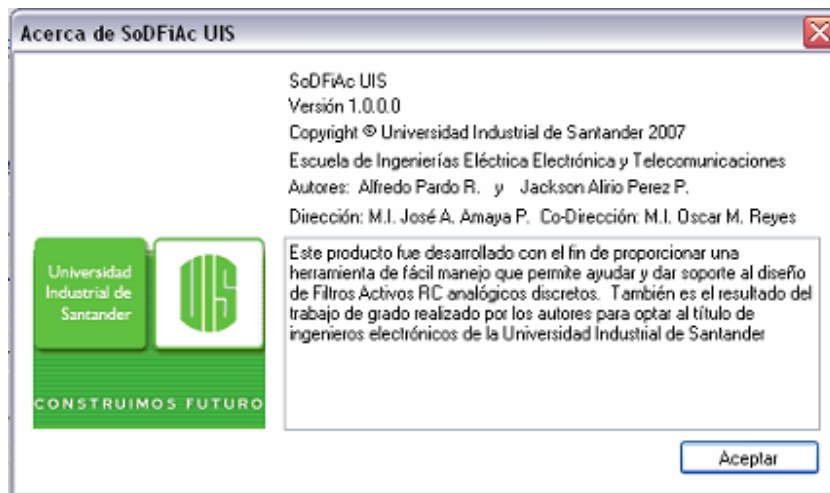


Figura 35. Acerca de SoDFiAc UIS 1.0

3.6 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

La descripción de los requisitos mínimos que debe tener el equipo de cómputo para que **SoDFiAc UIS 1.0** funcione en óptimas condiciones es el siguiente:

- Requerimientos de hardware
 - Procesador Pentium III o superior
 - Memoria RAM de 128 Mb o superior
 - Disco duro de 10 Gb o superior
 - Mouse (Ratón) genérico de 2 botones
 - Teclado estándar

- Requerimientos de software
 - Sistema operativo Windows XP Service Pack 2.0 ó superiores.

- Kit de desarrollo de software .NET Framework 2.0 (Paquete de instalación de uso libre de Microsoft).

Una vez satisfechos estos requerimientos se puede instalar y usar el software de diseño de filtros activos **SoDFiAc UIS 1.0**.

3.7 CARACTERÍSTICAS Y POTENCIALIDADES DE SoDFiAc UIS 1.0

Esta herramienta cuenta con la posibilidad de diseñar topologías adecuadas para los tipos de filtrado pasa banda y rechaza banda, que son de gran interés en la implementación de sistemas electrónicos, además, de filtros pasa bajo y pasa altos.

De otro lado, es una herramienta de fácil comprensión y manejo amigable que orienta al usuario tanto en el ingreso de datos, como en el diseño paso a paso de filtros activos (RC, analógicos y discretos).

Es un software que cuenta con la ayuda necesaria y controles de validación pertinentes para lograr una correcta utilización del mismo.

Los resultados son de fácil percepción, en este sentido, permite llegar a una implementación del montaje final de una forma sencilla, entendible y confiable para el usuario.

Es un software, computacionalmente liviano, con un peso de 6.67MB y con una versatilidad de trabajo sobre dos plataformas, Windows y Linux (www.monoproject.com).

El rango de trabajo en cuanto al orden del filtro se limitó a un valor de 10; justificamos la restricción dado que en la validación de la herramienta,

encontramos que para valores superiores al orden 10, se estarían diseñando filtros cuyos elementos pasivos -capacitores y resistores- no eran comercialmente factibles.

4. PRUEBAS DEL SOFTWARE

Una vez implementada y desarrollada la aplicación se pone a prueba de tal forma que las sentencias programadas sean aprobadas y las funciones del sistema se realicen y actúen en la forma esperada. De igual manera, se evalúan los

resultados presentados por la herramienta mediante simulaciones de las topologías.

El objetivo es evaluar la confiabilidad de los valores generados por el software, para esto se plantea la creación de unas pruebas de software cuyo formato se presenta más adelante en este capítulo (sección 4.1 FORMATO DE PRUEBA DE SOFTWARE).

Los objetivos generales de estas pruebas fueron:

1. Verificar que el prototipo generado cumpla con las especificaciones iniciales de diseño.
2. Obtener las diferencias producidas entre los datos ideales (especificaciones) y los logrados por simulación mediante porcentajes de error.
3. Determinar la influencia de la selección de los diferentes estándares en el proceso de diseño de un filtro en particular.
4. Comparar los resultados de la herramienta (SoDFiAc UIS 1.0) con los presentados por otro software de diseño.

4.1 FORMATO DE PRUEBA DE SOFTWARE

A continuación se presenta el formato para el desarrollo de las pruebas realizadas a la herramienta.

FORMATO DE PRUEBA DE SOFTWARE PARA SoDFiAc UIS 1.0

- 1. Objetivo de la prueba**
- 2. Especificaciones del filtro activo**
 - 2.1 Tipo de filtrado**
 - 2.2 Especificaciones de diseño**

3. **Tipo de aproximación de la función de transferencia**
4. **Selección de la topología de circuito**
5. **Estándar de los elementos pasivos**
6. **Análisis de resultados**
7. **Observaciones y Conclusiones**

4.2 PRUEBAS DESARROLLADAS

4.2.1 Prueba #1. Especificaciones iguales

1. **Objetivo:** comprobar el cumplimiento de las especificaciones de frecuencia y atenuación para las bandas de paso y rechazo del filtro seleccionado para la combinación de dos estándares de los elementos pasivos.
2. **Especificaciones del filtro**
 - 2.1 **Tipo de filtrado:** *pasa bajo*
 - 2.2 **Especificaciones de diseño**

Especificación	Valor
Amáx (dB)	1
Amín (dB)	100
Fp (Hz)	100
Fs (Hz)	1000

3. **Tipo de aproximación de la función de transferencia:**
Butterworth y Chebyshev.
4. **Topología de circuito:**
Sallen Key (Fig.36.)
5. **Estándar:**

Combinación #1

Elemento	Estándar
Resistencia	E48
condensador	E12

Combinación #2

Elemento	Estándar
Resistencia	E192
condensador	E12

6. Análisis de resultados

Para las especificaciones iniciales de diseño, la herramienta generó que para las aproximaciones Butterworth y Chebyshev el orden del filtro era 6 y 5 respectivamente. Los datos de los valores de los elementos para cada una de las aproximaciones se presentan a continuación.

Aproximación Butterworth de orden 6.

Etapa	C1(F)	C2(F)	R1(Ω)	R2(Ω)
1	$560n$	$39n$	9090	10000
2	$220n$	$100n$	9090	10000
3	$150n$	$150n$	9090	10000

Aproximación Chebyshev de orden 5.

Etapa	C1(F)	C2(F)	R1(Ω)	R2(Ω)
Polo real	$560n$		10000	

2	1.18u	150n	9100	10000
3	680n	820n	11000	9100

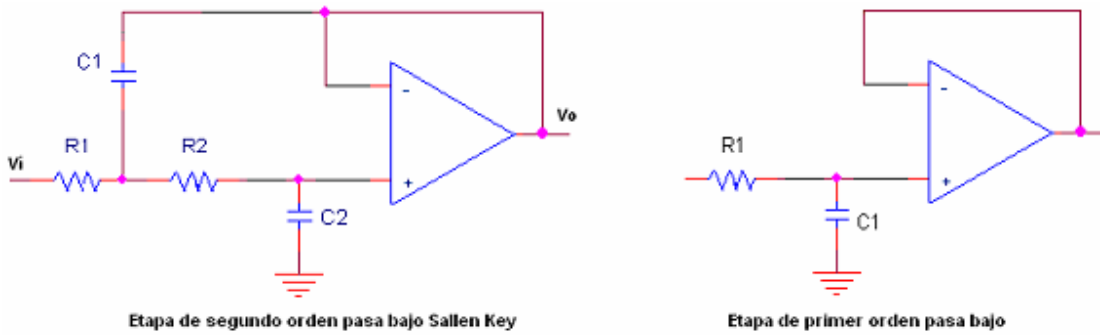


Figura 36. Topología de primer y segundo orden

Una vez obtenidos estos valores se procedió a realizar una simulación por medio de **Pspice** en el cual se implementó el circuito para las dos aproximaciones, donde se obtuvo los resultados presentados en la Fig.37.

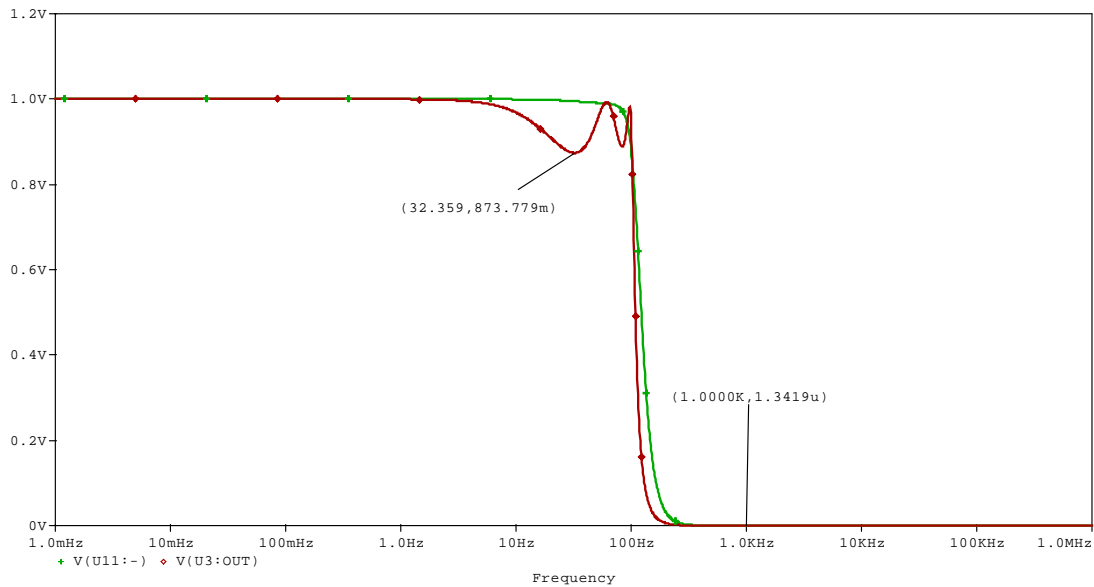


Figura 37. Respuesta de Butterworth y Chebyshev de la prueba #1.

Esta simulación se realizó para dos combinaciones de estándares diferentes, los resultados que se obtuvieron de las especificaciones a evaluar fueron:

Estándar de Resistencias E48, Condensadores E12

Aproximación	F. de paso	Amáx dB	F. de rechazo	Amín dB
Butterworth	100 Hz	1.11	1 kHz	114.18
Chebyshev	100 HZ	1.17	1 kHz	117.44

Estándar de Resistencias E192, Condensadores E12

Aproximación	F. de paso	Amáx dB	F. de rechazo	Amín dB
Butterworth	100 Hz	1.019	1 kHz	114.19
Chebyshev	100 HZ	1.022	1 kHz	117.35

Los resultados obtenidos para la combinación #1, arrojó para las atenuaciones máxima y mínimas desviaciones del 11 y 14.18 % respectivamente para la aproximación Butterworth y del 17 y 17.44 % para Chebyshev. La desviación en el caso de la atenuación mínima es favorable, ya que es mayor a la exigida por las especificaciones de diseño. Para la combinación #2 se obtuvieron resultados menores para la desviación de la atenuación máxima, siendo estas del 1.9 y 2.2 % para los mismos tipos de aproximación de la combinación #1, mientras que para la atenuación mínima mantuvieron la misma tendencia (14.19 y 17.35). Estos porcentajes se obtienen a partir de la Ec.(60).

$$\% Err = \frac{\text{Valor(Especificado)} - \text{Valor(Simulación)}}{\text{Valor(Especificado)}} * 100 \quad (60)$$

4.2.2 Prueba #2. Comparación de estándares

1. **Objetivo:** comprobar el cumplimiento de las especificaciones de frecuencia para las bandas de paso y rechazo del filtro seleccionado y resaltar la

importancia de la selección entre los diferentes estándares de los elementos pasivos.

2. Especificaciones del filtro

2.1 Tipo de filtrado: *pasa alto*

2.2 Especificaciones de diseño

Especificación	Valor
Amáx (dB)	1
Amín (dB)	20
Fp (Hz)	100
Fs (Hz)	60

3. Tipo de aproximación de la función de transferencia:

Chebyshev Inverso

4. Topología de circuito:

Twin Tee (Fig.38.)

5. Estándar:

Variación de los estándares para las resistencias E12 E48 E192, usando el E24 como estándar fijo para los condensadores.

6. Análisis de Resultados

Las especificaciones iniciales exigidas, acarrearón un orden 4 para el filtro, los valores de los elementos proporcionados por la herramienta para cada combinación de estándares fueron:

Resistencias: E12 condensadores: E24.

Etapas	C1(F)	C(F)	R1(Ω)	Z(Ω)	R(Ω)	Ra(Ω)	Rb(Ω)
--------	-------	------	----------------	---------------	---------------	----------------	----------------

1	910n	470n	4700	27000	10000	10000	10000
2	2.4u	1.2u	3900	3300	8200	10000	15000

Resistencias: E48 condensadores: E24.

Etapa	C1(F)	C(F)	R1(Ω)	Z(Ω)	R(Ω)	Ra(Ω)	Rb(Ω)
1	910n	470n	5110	24900	10000	10000	10500
2	2.4u	1.2u	4870	4220	9530	10000	12700

Resistencias: E192 condensadores: E24.

Etapa	C1(F)	C(F)	R1(Ω)	Z(Ω)	R(Ω)	Ra(Ω)	Rb(Ω)
1	910n	470n	5110	25800	10200	10000	10600
2	2.4u	1.2u	4810	4220	9650	10000	13000

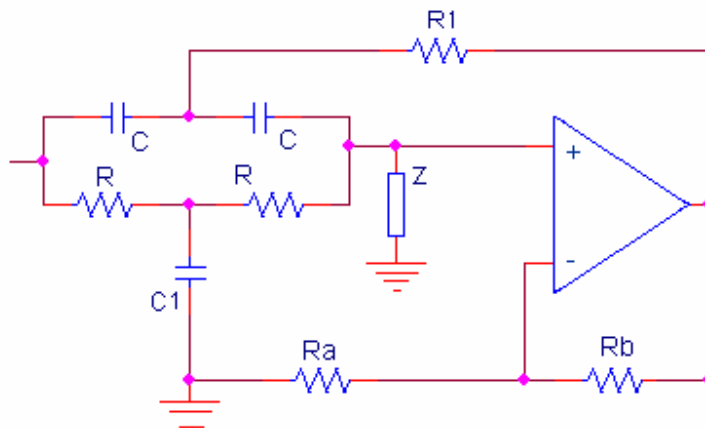


Figura 38. Topología Twin Tee de segundo orden

Los resultados obtenidos al realizar la simulación del anterior filtro, se presentan en la Fig.39. En ella se puede observar las respuestas del filtro para cada uno de los estándares, así como la respuesta del filtro con los elementos pasivos generados de los cálculos matemáticos realizados.

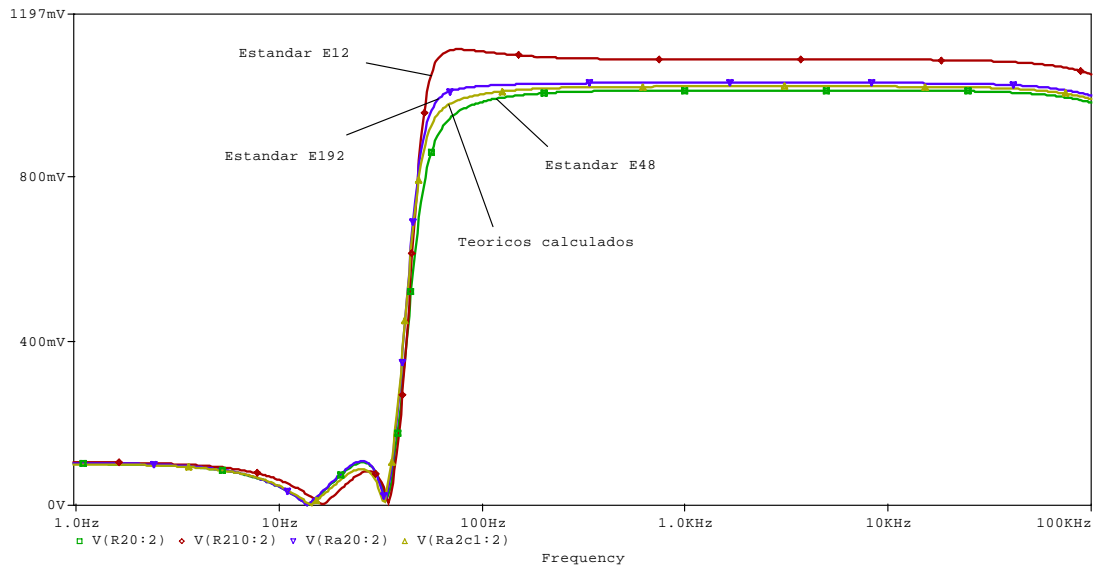


Figura 39. Respuesta del filtro Chebyshev Inverso prueba #2

La especificación inicial de frecuencia de paso es 100 Hz, para esta ubicación se obtuvieron las siguientes desviaciones en amplitud respecto a la curva teórica. Para el estándar E192 fue de 1.97%, para E48 de 2.01 % y para el E12 10.41 %.

4.2.3 Prueba #3. Comparación de resultados con otro software de diseño

1. **Objetivo:** Hacer una comparación de los resultados obtenidos con la herramienta SoDFiAc UIS versus Filter Pro, verificando las especificaciones de diseño.

2. Especificaciones del filtro

2.1 Tipo de filtrado: *pasa bajo*

2.2 Especificaciones de diseño

Especificación	Valor
Frecuencia de corte	1 kHz
Orden	3

3. Tipo de aproximación de la función de transferencia:

Butterworth

4. Topología de circuito:

Realimentación múltiple

5. Estándar:

Estándar	Valor
Resistencias	E96
Condensadores	E24

6. Análisis de Resultados

Los valores de los componentes calculados por Filter Pro son los siguientes:

Etapa	C1(F)	C2(F)	R1(Ω)	R2(Ω)	R3(Ω)
Polo Real 1	16 n 5,1 n	56 n	10 k 7,5 k	7,5 k	11,8 k

Los valores calculados por SoDFiAc UIS son:

Etapa	C1(F)	C2(F)	R1(Ω)	R2(Ω)	R3(Ω)
Polo Real 1	16 n 150 n	16 n	10 k 4,99 k	2,49 k	4,99 k

Al simular las topologías de circuito se obtuvieron resultados similares de las respuestas derivadas de ambas herramientas de diseño. En las Figs.40-41., se puede visualizar que en ambos casos las especificaciones de diseño se cumplen, a pesar de que los valores de los elementos sean diferentes. Los errores obtenidos fueron del 0.2% para el diseño proporcionado por Filter Pro y 1.3% para

SoDFiAc UIS. Este tipo de pruebas se realizó para otras topologías y funciones de aproximación obteniéndose resultados similares a los presentados en esta prueba, en algunos casos se encontraron errores menores para SoDFiAc UIS en comparación con el diseño de Filter Pro.

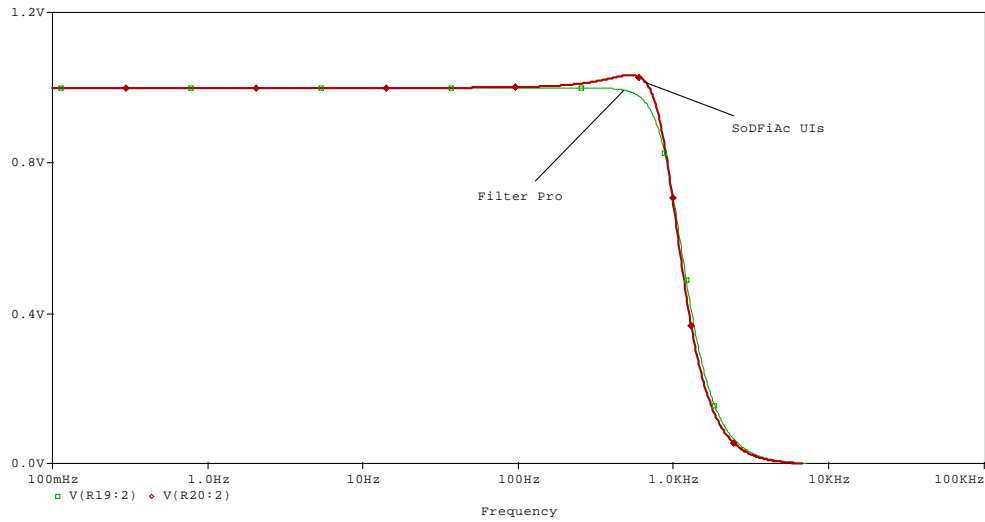


Figura 40. Resultados de Simulación prueba #3

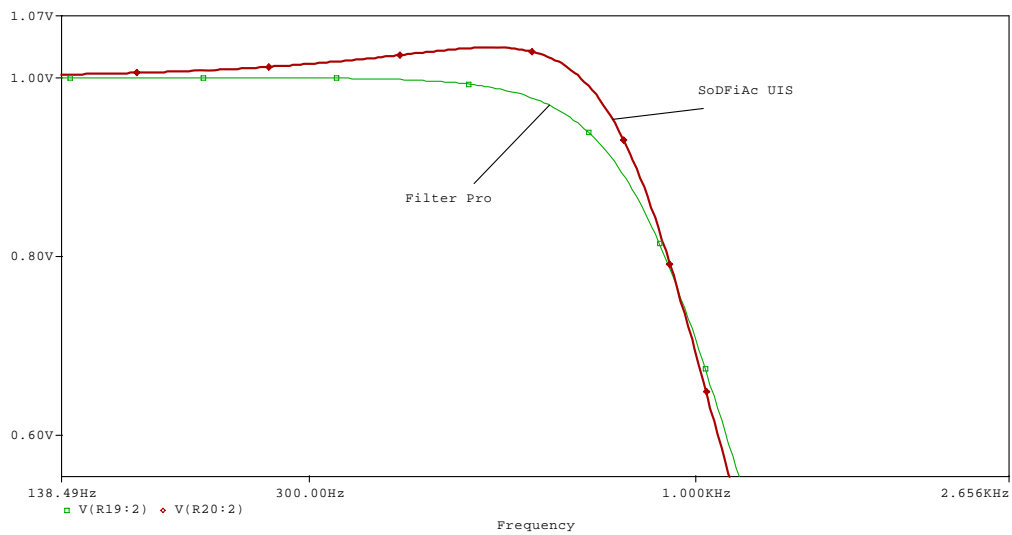


Figura 41. Detalle de la frecuencia de Corte de la figura 40

4.2.4 Prueba #4. Comparación de respuestas de las funciones de transferencia

1. **Objetivo:** realizar una comparación de las funciones de transferencia de un filtro Butterworth versus la obtenida de una topología implementada en la herramienta SoDFiAc UIS.

2. Especificaciones del filtro

2.1 **Tipo de filtrado:** *pasa bajo*

2.2 **Especificaciones de diseño**

Especificación	Valor
Frecuencia de corte	1 kHz
Orden	3

3. **Tipo de aproximación de la función de transferencia:**

Butterworth

4. **Topología de circuito:**

Sallen-Key

5. **Estándar:**

Estándar	Valor
Resistencias	E24
Condensadores	E24

6. Análisis de resultados

Para las especificaciones exigidas inicialmente para la aproximación seleccionada, se genera una función de transferencia normalizada dada por:

$$H(s) = \frac{1}{(s+1)(s^2+s+1)} \quad (61)$$

La respuesta en magnitud de la aproximación de butterworth esta dada por:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (62)$$

Donde ω_c corresponde a la frecuencia de corte o de 3 dB y n al orden del filtro.

Las funciones de transferencia para la topología Sallen Key de primer y segundo orden se presentan en las Ecs.(63-64).

$$H(s) = \frac{1}{1 + sR1C1} \quad (63)$$

$$H(s) = \frac{1}{s^2(R1R2C1C2) + sC2(R1 + R2) + 1} \quad (64)$$

Los valores calculados por SoDFiAc UIS son:

Etapa	C1(F)	C2(F)	R1(Ω)	R2(Ω)
Polo Real	16 n		10 k	
1	33 n	8,2 n	9,1 k	10 k

En la Fig.42., se presentan las respuestas en magnitud de las funciones de transferencia de primer –roja- y segundo –azul- orden, para la topología sellen key reemplazando los valores calculados por SoDFiAc UIS, igualmente, se presenta la respuesta –negro- de orden 3, obtenida al colocar en cascada las dos funciones anteriores.

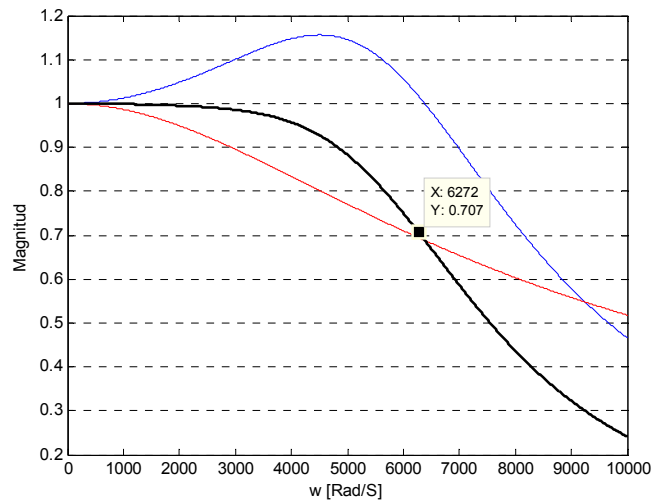


Figura 42. Respuestas en magnitud de la función de primero, segundo y tercer orden para la topología Sallen-Key

En la Fig.43., se presentan las respuestas obtenidas de las funciones de transferencia de Butterworth, derivadas tanto de la aproximación teórica –rojo- como la de la topología –azul- hallada anteriormente. En la Fig.44., se muestra en detalle las frecuencias de corte para las respuestas en magnitud de las funciones de transferencia.

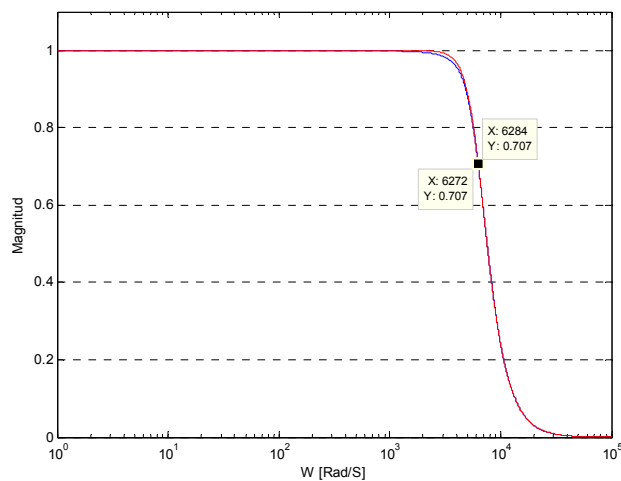


Figura 43. Respuestas de la aproximación de Butterworth -teórica y la obtenida mediante la herramienta SoDFiAc UIS 1.0-

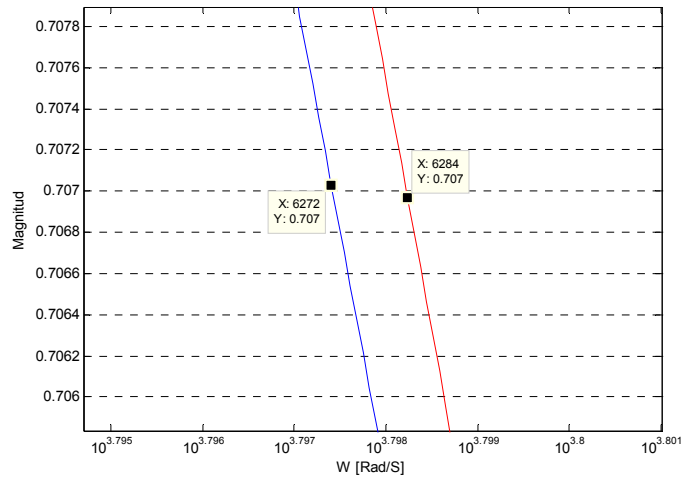


Figura 44. Detalle de las frecuencias de corte de la Fig.43.

La frecuencia de corte teórica es 6284 rad/s, como se puede observar en la Fig.44., para los estándares que fueron seleccionados para esta prueba, se obtuvo una frecuencia de corte de 6272 rad/s, con lo cual se obtiene un porcentaje de error de 0.19% -ver Ec.(60)-. Por tanto, la obtención de diseños con valores comerciales no presenta desviaciones tan considerables.

4.3 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Las desviaciones obtenidas para la atenuación mínima en la prueba #1, son favorables, ya que son mayores a las proporcionadas por el usuario al inicio del diseño. Lo cual implica un rizado en la banda de rechazo menor.

La selección de los estándares influyen en gran medida en la respuesta del filtro final, obteniéndose una mejor solución para estándares de mayor orden, es decir con mayor número de valores. Lo cual implica tolerancias en los elementos menores pero mayor costo de implementación.

Los datos proporcionados por la herramienta son confiables, ya que cumple con las especificaciones iniciales de diseño.

4.4 ENCUESTA PARA EVALUACIÓN DE SoDFiAC UIS 1.0

Una vez realizadas las pruebas de confiabilidad, de los datos proporcionados por el software, se procedió a realizar una encuesta con el fin de conocer la opinión de los futuros usuarios, acerca del diseño y funcionamiento del programa, aplicándose el formato de encuesta que se presenta en la sección 4.4.1.

4.4.1 FORMATO DE ENCUESTA

El formato de encuesta consta de 3 secciones, en la primera se evalúa la disposición de los botones de la interfaz y la presentación de los resultados. Luego se indaga por las recomendaciones de soporte y las ayudas que posee el software, finalmente se cuestiona sobre la presentación de los datos proporcionados por la herramienta y las ventajas que ésta aporta al usuario. A continuación se muestra el formato aplicado para la encuesta.

Herramienta software para el diseño de filtros activos

Califique dentro de los rangos especificados la apreciación personal que le genere cada uno de los siguientes aspectos del diseño, presentación y funcionamiento que ofrece la herramienta SoDFiAC UIS 1.0.

MB (muy bueno), B (bueno), R (regular) y M (Malo)

1. Diseño y Presentación en Pantalla

MB B R M

a). Distribución de los botones en pantalla				
b). Ubicación de las casillas de entrada de datos				
c). Presentación de resultados.				
d). Comprensión y manejo amigable del software				

2. Diseño e implementación de ayudas visuales

MB B R M

a). Recomendaciones explícitas de manejo en cada pantalla.				
b). Contenido y funcionalidad de la ayuda que sirve como soporte al software.				
c). Sugerencias en pantalla para no permitir el ingreso de datos erróneos.				

3. Calidad y eficiencia de los datos obtenidos.

- a). Considera que los cálculos de los elementos que genera el programa son suficientes para el diseño y montaje de un filtro activo.

Si _____ No _____

¿Por Qué?

- b). ¿En el transcurso de la realización de las pruebas encontré errores en los resultados?

Si _____ No _____

Especifique en que sección del software hallo errores y explique claramente la clase de errores que encontró.

- c). Considera que la herramienta para el diseño de filtros activos cumple con los siguientes objetivos.

Si No ¿Por Qué?

i). Ahorro de tiempo en el diseño de filtros activos			
ii). Presentación de resultados			
iii).Practicidad			

Observaciones y Sugerencias _____

Realice un breve comentario sobre la herramienta _____

Gracias por participar en la encuesta de evaluación de SoDFiAC UIS 1.0.

4.4.2 RESULTADOS DE LA ENCUESTA

Las pruebas se realizaron a un grupo de 10 personas, las cuales ya cursaron la asignatura Electrónica III, en la cual se trata el tema de filtros activos. Los resultados de cada una de las secciones se presentan en las Figs.45-46-47., respectivamente.

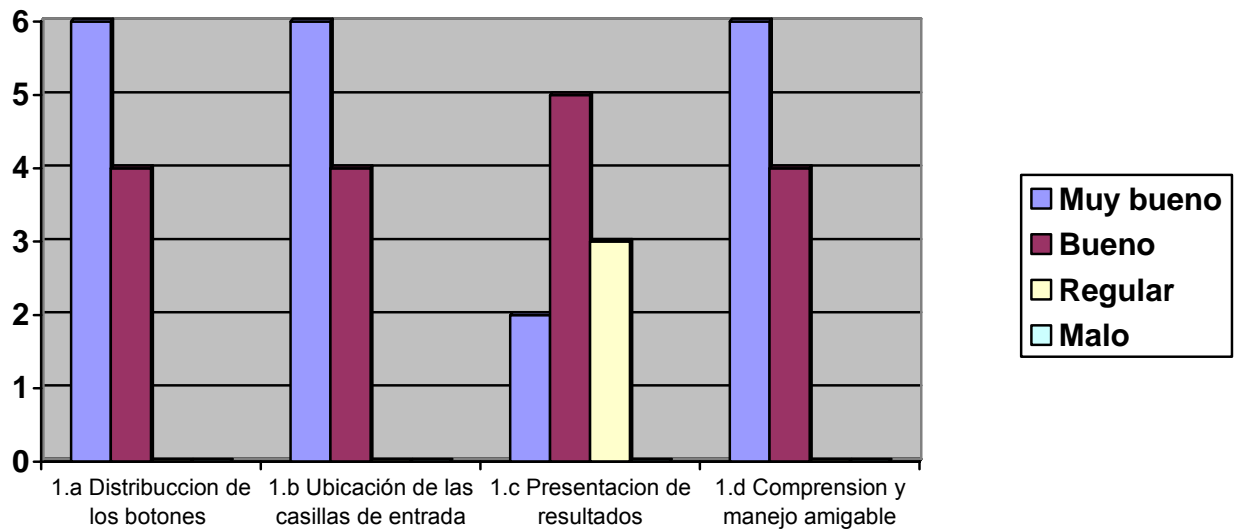


Figura 45. Resultados sección de diseño y presentación en pantalla

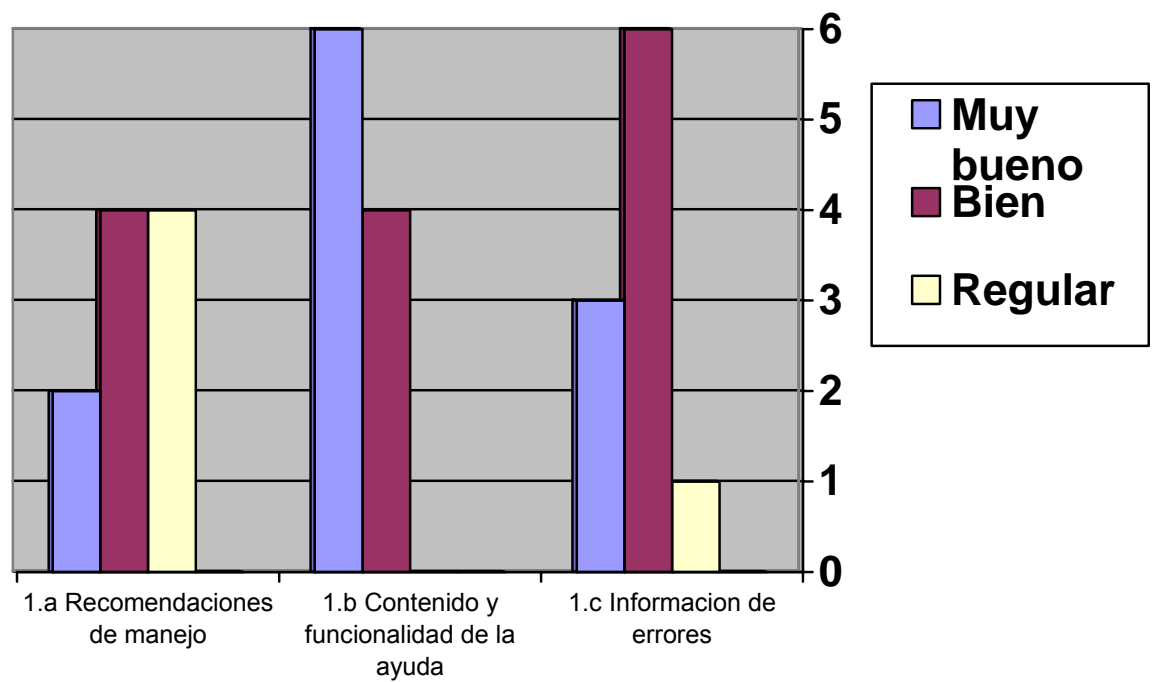


Figura 46. Resultados sección de diseño e implementación de ayudas visuales

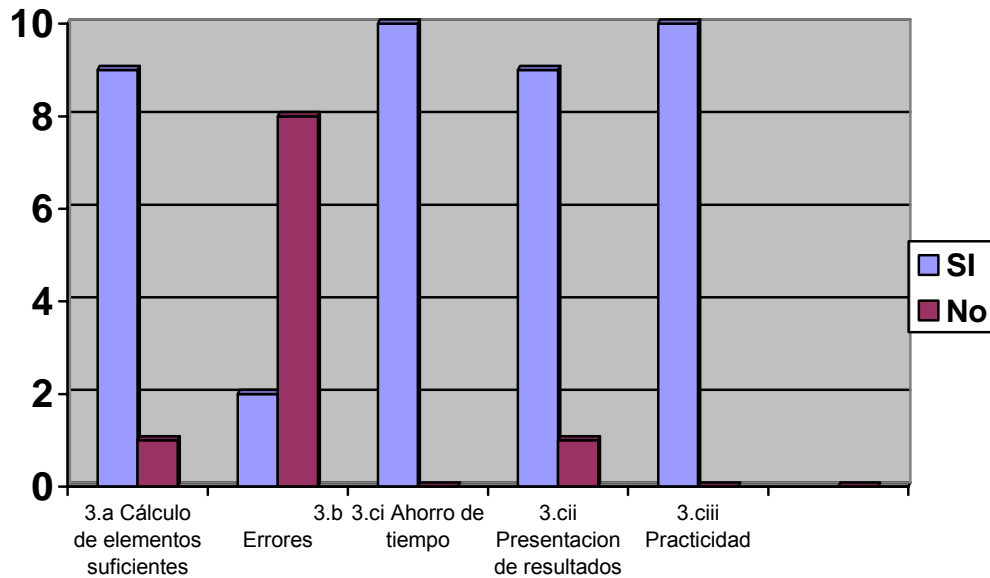


Figura 47. Calidad y eficiencia de los resultados arrojados por la herramienta

4.4.3 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES REALIZADAS POR LOS ENCUESTADOS

Al realizar la encuesta a los diferentes participantes, algunos de ellos, presentaron diferentes recomendaciones y observaciones sobre el funcionamiento de SoDFiAc UIS 1.0. A continuación se presentan algunas de éstas:

- Sería más amigable el programa, si el “setup” fuera uno solo y no hubiera que realizar diferentes pasos para ello; además no siempre se tiene una conexión a Internet para descargar el primer software.
- En general, este programa brinda una buena oportunidad de llevar a cabo el diseño de filtros con un muy buen criterio basándose simplemente en los resultados arrojados por este software; una vez obtenido el circuito propuesto por el programa, simplemente hay que proceder a simularlo para

evaluar su desempeño, de acuerdo a esto mejorar el diseño y posteriormente implementarlo.

- En la página de especificaciones, deberían darle más espacio a la tabla de resultados para poder compararlos mejor.
- Es una gran ayuda al momento de diseñar filtros activos analógicos reales para la implementación ingenieril, ya que facilita y agiliza los cálculos. También ofrece una presentación, muy intuitiva, tanto de los valores de entrada como de los resultados. Es fácil de manejar; incluso no necesité la ayuda, que a propósito no sirve, ya que nunca se desplegó.
- No me gustó el hecho de que si selecciono un filtro Tipo III no me permite luego devolverme a uno anterior, me toca cerrar el programa y volverlo a abrir. Tampoco permite el diseño con filtros Tipo IV.
- Es una gran ayuda para diseñar filtros activos. Lo que no me parece bien es que no se ajusta automáticamente a la pantalla, toca estar moviendo las barras para ajustarla, debería ser un poco más pequeña la pantalla. Pero en general está muy bien, es un software agradable.
- Me parece de gran ayuda la herramienta para el diseño, me gustaría que no me tocará remitirme tanto a la ayuda para saber que me ofrece un determinado botón o panel, por ejemplo, que pasándole el cursor por encima de un botón, aparezca una muy breve explicación de lo que puedo hallar o encontrar seleccionándolo. Esto aparece muy frecuentemente en Windows.

4.4.4 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES DE LA ENCUESTA REALIZADA

Al realizar el análisis de la evaluación de los diferentes aspectos del software se obtienen los siguientes resultados:

- La distribución de los botones y la ubicación de las casillas, fue aprobada tal y como se diseño, ya que en la prueba el mayor puntaje lo obtuvo la calificación muy buena con el 60% y el otro 40% la catalogó como buena.
- La presentación de resultados obtuvo la siguiente calificación: el 20% opinó que es muy buena, el 50% la calificaron como sólomente buena y finalmente el 30% piensa que la presentación de los resultados es regular. Sin embargo en la prueba el 70% aprobó la presentación los mismos.
- La comprensión y el manejo amigable del software fueron aprobadas, debido a que el 100% de los encuestados la calificaron como muy buena o buena en cada una de las pruebas.
- El 20% de los encuestados opinaron que las recomendaciones de manejo en cada pantalla son muy buenas, el 40% lo calificaron como buena y el 40% restante como regular.
- El 90% de los encuestados opinan que el cálculo de los elementos que genera el programa es suficiente para diseñar e implementar filtros activos.
- El 80% de los encuestados opina que el programa no tiene errores de operación y resultados, sin embargo se acogieron algunas recomendaciones que ellos mismos aportaron para el mejoramiento del programa, entre éstas se llevaron acabo las siguientes:

- Cambio del botón de selección del tipo de especificaciones III, ya que generó confusión en el manejo por parte de algunos usuarios.
 - Mejoramiento del paquete de instalación, por medio de la unificación del “setup” y mejoras en el archivo léame.
 - Correcciones en la ejecución del archivo de ayuda, ya que inicialmente presentaba problemas en el despliegue de la misma.
- Se cumplieron a cabalidad todos los objetivos que se planeo alcanzaría el programa, el ahorro de tiempo con una aprobación del 100%, la presentación de resultados con el 90% y la practicidad con el 100%.

5. CONCLUSIONES

- ◆ Todos los circuitos tratados en este trabajo de grado sirven como filtros, la elección depende de la aplicación y las características que el diseñador desee para su implementación.
- ◆ Una de las ventajas del desarrollo de software en nuestra Universidad, está en poder satisfacer aquellas necesidades que se pueden generar en determinados temas a lo largo del desarrollo de una asignatura en particular, logrando cumplir con las expectativas y requerimientos locales.

- ◆ SoDFiAc UIS 1.0 (Herramienta software para el diseño de filtros activos), es una herramienta software que brinda a sus usuarios, soporte en el diseño de filtros activos, tanto en la comprensión, cálculo e interpretación de sus propios diseños ó proyectos.
- ◆ Esta herramienta permite realizar diseños no sólo con componentes que se encuentran en el entorno local, si no con aquellos que pueden ser necesarios en situaciones de diseño críticas, las cuales requieran niveles de tolerancia bajos, con los cuales se obtienen diseños de filtros más eficientes para su posterior implementación.
- ◆ La herramienta software que se ha desarrollado, no pretende ser un producto acabado, sino por el contrario, ser un prototipo base de futuras versiones potenciadas, en cuanto a la inclusión de cálculo de características como el Slew Rate, Alimentación, Ancho de Banda, CMRR, Ruido, entre otras.
- ◆ Se comprobó la utilidad de cada uno de los componentes, mencionados en el presente documento. De igual forma, se demostró que desde esta área del saber es posible desarrollar este tipo de proyectos.
- ◆ Para poder operar conceptualmente con los elementos presentes en esta propuesta, es necesario que los usuarios finales, posean preconceptos en el área de diseño de filtros activos.
- ◆ Las actividades realizadas para el desarrollo de este proyecto están enmarcadas dentro de la metodología de ciclo de vida o en cascada, en la cual se describe claramente las fases de desarrollo. Ésta es una metodología aplicada en proyectos donde se tiene una definición clara del producto que se desea obtener.

- ◆ Para efectos de limitar la construcción de la herramienta, se utilizaron las especificaciones de frecuencia de paso y rechazo, orden del filtro y atenuaciones máximas y mínimas; queda como perspectiva de potenciar la herramienta, implementar un número mayor de especificaciones como estabilidad, sensibilidad, causalidad, localidad, resistencia al ruido, entre otras.
- ◆ Esta propuesta se desarrolló con el fin de disminuir costo en tiempo invertido, en las fases de cálculo de un filtro activo. Esto facilitará el análisis, interpretación de resultados y toma de decisiones adecuadas en el diseño de tales filtros.

6. RECOMENDACIONES

- ◆ Para utilizar adecuadamente el software de diseño de filtros activos **SoDFiAc UIS 1.0** se recomienda leer atentamente el manual de usuario que se encuentra en el anexo C y tener conocimientos previos acerca del diseño de filtros activos.
- ◆ La creciente manifestación del sistema operativo Linux y las diferentes distribuciones de herramientas de desarrollo para uso libre, justificarían el análisis de la viabilidad de un proyecto de migración de la herramienta hacia este tipo de plataformas.
- ◆ Para posteriores versiones de **SoDFiAc UIS** se recomienda:

- Ampliar a la herramienta la posibilidad de especificar características de los elementos activos presentes en el filtro (Op amp), profundizando en el estudio de sus hojas de datos (datasheet).
- Implementar funciones para que generen archivos que permitan hacer simulaciones en software especializados, del filtro diseñado, por ejemplo archivo de texto (.cir ó .sp) para la simulación en Pspice ó Hspice.
- Desarrollar una versión en la que el usuario pueda realizar diseños en el entorno web.
- Complementar la herramienta, para brindar la posibilidad al usuario de diseñar filtros pasivos y/o digitales.
- Considerar un mayor número de topologías, aportadas por otros autores, para realizar la síntesis en cascada.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] WAI-KAI, Chen. Pasive and Active Filters Theory and Implementations. John Wiley & Son. Inc, 1986.

[2] SEDRA, Adel S. SAMITH Kenneth C. Circuitos Microelectronicos. Oxford University Press 1999.

[3] OPPENHEIM, Alan V. WILLSKY Alan S. NAWAB Hamid. Señales y Sistemas. Prentice Hall, Pearson Education, : Addison-Wesley, 2a Edicion, 1998.

[4] VITALE DORI, Edmundo. Diseño de Filtros Pasivos, Activos y Digitales. ESTUDIOS DE POSTGRADO, 1991

- [5] GRAF F. Rudolf. Converter and Filter Circuits. Newnes, 1997.
- [6] DANIELS M. Richard. Approximation Methods For Electronics Filter Desing: With Applications To Passive, Active and Digital Networks. McGraw-Hill, 1974
- [7] SHAPIRO, Jeffrey R. Visual Basic.NET. McGraw-Hill, 2003
- [8] Microsoft Corporation. Microsoft Visual Basic 6.0: Manual del programador. McGraw-Hill, 1998
- [9] BRIAN C. Kernighan and DENNIS M. Ritchie. El lenguaje de Programación C. Prentice Hall, 1988.
- [10] HALVORSON, Michael. Aprenda Microsoft Visual Basic 6.0 Ya. McGraw-Hill. 1999
- [11] DELIYANNIS, T. SUN, Yichuang. FIDLER, J.K. Continuos-Time Active Filter Design. CRC Press.1999
- [12] THEDE, Les. Practical Analog and Digital Filter Design. Artech House, Inc. 2004.
- [13] NIEWIADOMSKI, Stefan. Filter Handbook a Practical design guide. Heinemann Newnes.1989
- [14] ANDERSON, Brian. MOORE, John. Optimal Filtering. Prentice Hall. 1979
- [15] DARYANANI, Gobind, Principles of Active Network Synthesis and Design, John Wiley & Sons, New York, 1976.

[16] HUELSMAN. L. P. ALLEN P. E., Introduction to the Theory and Design of Active Filters, McGraw-Hill, New York, 1980.

[17] GRAY, Paul R. HURST, Paul J. LEWIS, Stephen H. MEYER, Robert G. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, John Wiley & Sons, INC,2001.

[18] WAI-KAI, Chen. The Circuits and Filters - Handbook. CRC Press LLC,2003.

ANEXO A

El estudio de filtros eléctricos, es una de las áreas de la ingeniería en la cual más se ha profundizado, ya que para ésta, existe una teoría de diseño completa, que abarca desde las especificaciones hasta la realización de un circuito. Dichos dispositivos son ampliamente usados en sistemas de comunicación, procesamiento digital, sistemas de control, etc.

En este capítulo se presentan las definiciones y fundamentos requeridos para la comprensión de los conceptos asociados al diseño de los filtros analógicos.

A.1 FILTRO

Es cualquier dispositivo que modifica una señal de un modo determinado al pasar por éste, eliminando componentes de frecuencia indeseadas. Los filtros se pueden clasificar de diferentes maneras. Cuando la señal es de magnitud eléctrica; ya sea corriente o tensión, es un filtro eléctrico. También existen filtros mecánicos; los cuales retienen partículas, filtros químicos; los cuales retienen gases y vapores, etc.

Una clasificación de los filtros eléctricos consiste en, analógicos y digitales, los analógicos son aquellos en los cuales la señal puede tomar cualquier valor en un intervalo de tiempo dado, mientras que en los digitales, las señales sólo toman valores discretos. También pueden clasificarse en filtros lineales y no lineales, según su comportamiento pueda o no modelarse matemáticamente con ecuaciones lineales. Un ejemplo de filtro no lineal es un comparador de tensión.

Finalmente estos también pueden clasificarse en filtros activos o pasivos, según empleen o no elementos activos tales como transistores, amplificadores operacionales o los mismos tubos de vacío, ya poco usados. Los filtros pasivos son contruidos con inductores, capacitores y resistores, pero para ciertas frecuencias el valor de la inductancia puede presentar limitaciones de tamaño y desempeño que son indeseables. En consecuencia en los últimos años la tendencia es, reemplazar los inductores por dispositivos activos los cuales simulan el efecto de estos. Esta tendencia tuvo mayor crecimiento, gracias a los avances de la microelectrónica la cual hizo posible contar con dispositivos activos a un precio competitivo e incluso en muchos casos más económicos que los mismos inductores.

Este trabajo de grado se enfoca en el diseño de filtros eléctricos, analógicos, lineales y activos.

A.2 COMPONENTES DE FILTROS ACTIVOS

A.2.1 EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

El elemento básico que se usa en la construcción de los filtros activos es el amplificador operacional (op-amp), el símbolo para este se muestra en la Fig.A 1. Solamente se exponen tres terminales en esta figura, los terminales de entrada inversora (-) y no inversora (+); y el terminal de salida. Sin embargo un op-amp real es un dispositivo que posee varios terminales. El propósito de los demás terminales, son especificados de acuerdo a su construcción e incluyen en general conexiones para alimentación, terminales para compensación de frecuencia y terminales para anular el voltaje de offset.

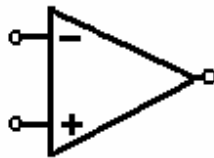


Figura A 1. Op-amp diferencial.

Las ecuaciones que se derivan en los siguientes capítulos son obtenidas asumiendo voltaje cero entre los dos terminales de entrada del op-amp y las corrientes de polarización cero en los dos terminales de entrada, estas condiciones se asumen para el caso de los op-amp ideales con realimentación negativa.

A.2.2 RESISTORES Y CAPACITORES

Hay tres tipos de resistores comúnmente usados. Los resistores de composición de carbón son los más ampliamente utilizados, y su comportamiento es bastante aceptable en la mayoría de aplicaciones de filtros no críticas, lo cual es particularmente cierto si el filtro funciona a temperatura ambiente. Este tipo de resistores son los más económicos y los de mayor disponibilidad en el mercado.

Para aplicaciones de alto desempeño y en instancias donde la temperatura es un factor importante se podrían usar otro tipo de resistores como los de película de metal.

En el caso de los capacitores, los de disco cerámico es el tipo más común y económico, sin embargo estos podrían ser usados en aplicaciones no tan críticas. Otro tipo de capacitor usual y de mayor aceptación, es el capacitor de poliéster¹⁶ el cual es construido con placas de hoja metálica.

En aplicaciones donde se requiere alto desempeño, los capacitores de poliestireno¹⁷ y teflón¹⁸ son una buena elección.

A.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA Y ATENUACIÓN

Los filtros analizados en este trabajo de grado son circuitos lineales que se pueden representar por la red general de dos puertos mostrada en la figura A 2. La función de transferencia del filtro $T(s)$ es el cociente entre el voltaje de salida $V_o(s)$ y el voltaje de entrada $V_i(s)$.

$$T(s) \equiv \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \quad \text{Ec. A 1}$$

También se suele emplear la función de atenuación:

$$A(s) = \frac{1}{T(s)} \quad \text{Ec. A 2}$$

Ésta es una terminología que ha resultado conveniente para el análisis de filtros y fue heredada de la teoría de redes de transmisión.

¹⁶ Polímero de un éster que se obtiene por condensación de diácidos orgánicos con poli-alcoholes.

¹⁷ Plástico de excelentes características eléctricas, que lo hacen independiente de la frecuencia.

¹⁸ Resina resistente al calor y a los agentes químicos.

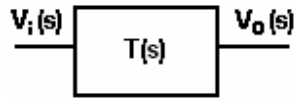


Figura A 2. Red de dos puertos

A.3.1 MÓDULO, FASE Y RETARDO DE GRUPO.

El filtro se encuentra evaluando $T(s)$ para frecuencias físicas, $s = j\omega$ y se expresa en función de su magnitud y su fase de la forma:

$$T(j\omega) = |T(j\omega)|e^{j\phi(\omega)} \quad \text{Ec. A 3}$$

Generalmente la magnitud se expresa en decibeles en términos de la función de ganancia o de la atenuación, ecuación A 4 y A 5 respectivamente.

$$G(\omega) \equiv 20\log|T(j\omega)| \quad \text{Ec. A 4}$$

$$A(\omega) \equiv -20\log|T(j\omega)| \quad \text{Ec. A 5}$$

El término retardo de grupo expresa el retraso de fase visto por el grupo de frecuencias que son transmitidas a través del filtro. Matemáticamente se define como la derivada negativa de la fase en función de la frecuencia.

$$\tau(\omega) = -\frac{d\phi(j\omega)}{d\omega} \quad \text{Ec. A 6}$$

Para sistemas de transmisión ideales, la magnitud de la función de transferencia es constante para todas las frecuencias, mientras la fase es una función lineal de ω lo que equivale a un retardo de grupo constante.

A.4 TIPOS DE FILTROS

A continuación se describen diferentes tipos de filtros de acuerdo con el análisis de su desempeño en frecuencia.

A.4.1 FILTROS IDEALES

Los filtros ideales son aquellos que poseen uno o más intervalos de frecuencia con ganancia unitaria y otros intervalos de frecuencia para los cuales la ganancia es nula. Los filtros ideales no son físicamente realizables, pero se pueden llegar a diseñar y construir filtros reales tan cercanos a los ideales como se desee, cuanto éste más se aproxime al filtro ideal, mayor va a ser la complejidad del circuito a implementar. Para obtener una función de transferencia cercana a la del filtro ideal, se hace necesario un incremento en el orden del filtro.

A.4.1.1 PASA BAJO

Permite el paso de frecuencias menores a un valor específico W_c , denominado frecuencia de corte (o frecuencia superior de corte) y atenúa las frecuencias mayores a ésta. En la Fig.A 3., se muestra la respuesta para este filtro.

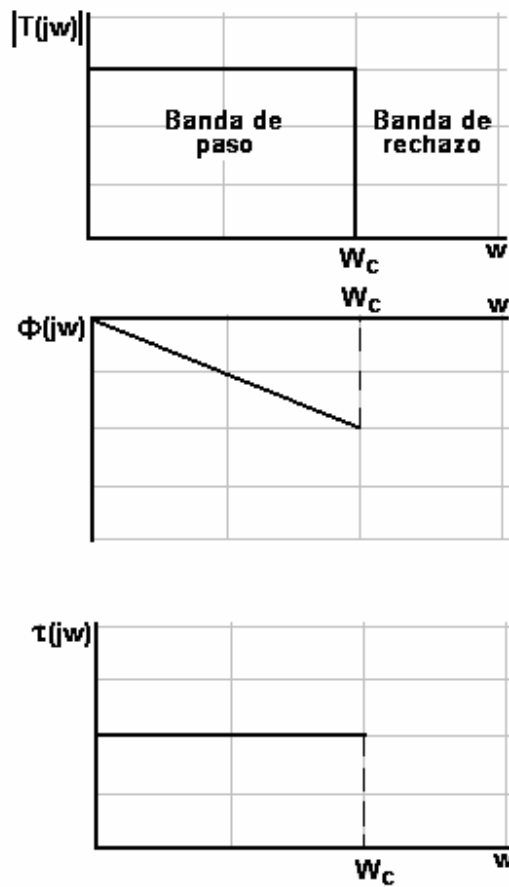


Figura A 3. Amplitud, fase y retardo para un filtro pasa bajo ideal.

A.4.1.2 PASA ALTO

Permite el paso de frecuencias mayores a la frecuencia de corte ω_c (o frecuencia inferior de corte) y elimina las frecuencias menores a ésta. La respuesta para este filtro se muestra en la Fig.A 4.

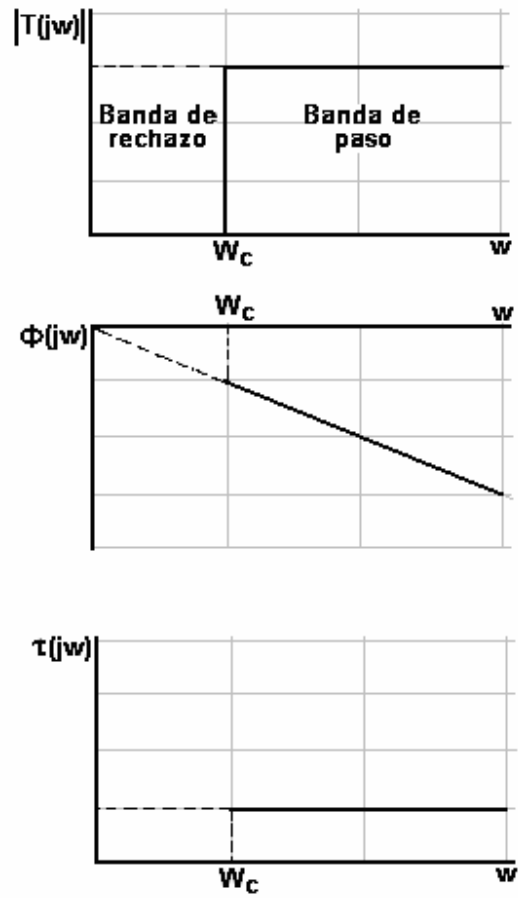


Figura A 4. Amplitud, fase y retardo para un filtro pasa alto ideal.

A.4.1.3 PASABANDA

Permite el paso de frecuencias contenidas en un intervalo acotado por W_1 y W_2 , denominadas frecuencia inferior de corte y frecuencia superior de corte, y excluye las frecuencias restantes, como se muestra en la Fig.A 5.

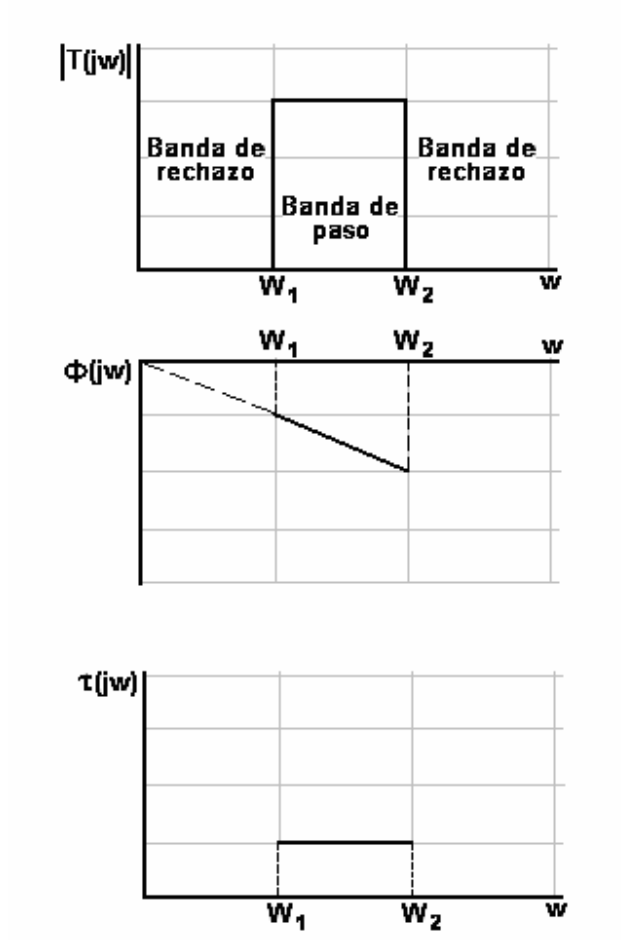


Figura A 5. Amplitud, fase y retardo para un filtro pasa banda ideal.

A.4.1.4 RECHAZABANDA

Elimina las frecuencias contenidas en el intervalo acotado por W_1 y W_2 , y deja pasar las demás frecuencias. La respuesta para este filtro se muestra en la Fig.A 6.

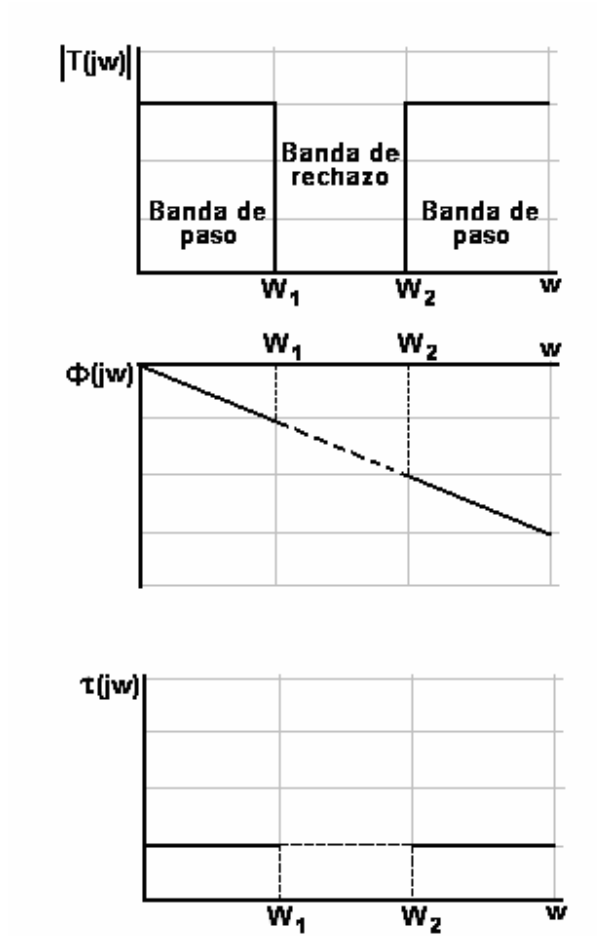


Figura A 6. Amplitud, fase y retardo para un filtro rechaza banda ideal.

A.4.2 FILTROS REALES

Las respuestas ideales indicadas anteriormente, no se pueden obtener con una cantidad finita de elementos. Los filtros reales sólo pueden aproximarse en mayor o menor grado a los filtros ideales. En la Fig.A 7., se muestra la respuesta de un filtro pasa banda real.

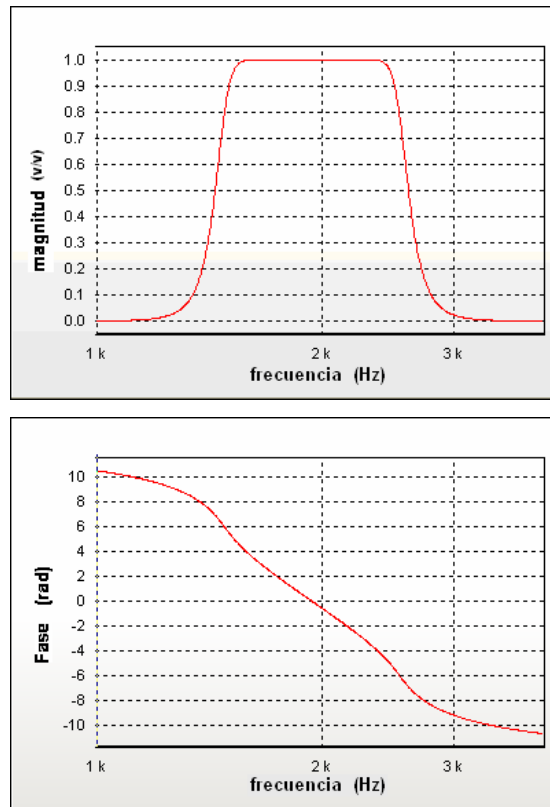


Figura A 7. Amplitud y fase de un filtro pasa banda real.

ANEXO B

A continuación se presentan algunas de las aproximaciones para la función de transferencia de los filtros, comúnmente usadas. Todas, corresponden a filtros pasa bajo. Estas aproximaciones se pueden generalizar a los otros tipos de filtrado empleando las transformaciones de frecuencia.

B.1 APROXIMACIÓN DE BUTTERWORTH

Esta aproximación fue descrita por primera vez por el británico S. Butterworth. La magnitud de esta función es monótona y máximamente plana alrededor de $\frac{w}{w_p} = 0$. Los ceros de la función de Butterworth se localizan en el infinito y sus polos se encuentran ubicados sobre una circunferencia en el plano complejo. Las características mencionadas anteriormente proporcionan la condición máximamente plana para una gama de frecuencias, además de la disminución de magnitud para frecuencias altas. Lo anterior se ve reflejado en la ecuación de magnitud dada por:

$$|T(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{w}{w_p}\right)^{2n}}}$$

Ec. B 1

Donde w_p es la frecuencia extrema de la banda de paso, n es el orden de la función de aproximación y ε es el parámetro que determina el rizado de la banda de paso. Dicha ecuación se conoce como función de Butterworth normalizada y sus características son las siguientes:

1. La función $|T(jw)|$ es una función monótona.
2. La banda de paso está comprendida entre $\frac{w}{w_p} = 0$ y $\frac{w}{w_p} = 1$.

3. En el rango de frecuencias $\frac{w}{w_p} > 1$ se encuentran ubicadas las bandas de transición y rechazo.
4. $|T(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}}$ para $\frac{w}{w_p} = 1$ es independiente de n .

Partiendo de la definición para la atenuación máxima (Ec. B 2)

$$A_{\max} = 20 \log|T(j0)| - 20 \log|(j1)|$$

$$A_{\max} = 20 \log \sqrt{1 + \varepsilon^2}$$

Ec. B 2

Se obtiene el valor de ε , dado por:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{A_{\max}}{20}} - 1}$$

Ec. B 3

La función de atenuación para una frecuencia determinada se puede obtener de:

$$A(w) = 20 \log|T(j0)| - 20 \log|(jw)|$$

$$A(w) = 20 \log \sqrt{1 + \varepsilon^2 w^{2n}}$$

Ec. B 4

De la misma ecuación se puede determinar la frecuencia a la que se presenta una atenuación especificada.

$$w = \sqrt[2n]{\frac{10^{\frac{A(w)}{20}} - 1}{\varepsilon^2}}$$

Ec. B 5

De manera similar, partiendo de la función de Butterworth normalizada se obtienen los polos:

$$p_k = \sigma_k + j\omega_k$$

Donde

$$\sigma_k = -\frac{1}{\sqrt[n]{\varepsilon}} \operatorname{sen} \frac{2k-1}{2n} \pi$$

Y,

$$\omega_k = -\frac{1}{\sqrt[n]{\varepsilon}} \cos \frac{2k-1}{2n} \pi$$

Para $k = 1, 2, 3, \dots, n$

Ec. B 6

El valor de la frecuencia ω_0 y del factor de calidad Q están dados por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt[n]{\varepsilon}}$$

Ec. B 7

Y,

$$Q_k = \frac{1}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{2k-1}{2n} \pi\right)}$$

Ec. B 8

Por último partiendo de la función de atenuación, la atenuación mínima está dada por:

$$A_{\min} = 20 \log|T(j\omega)| - 20 \log|(j\omega_s)|$$

Ec. B 9

Y el orden de la función de aproximación por:

$$n \geq \frac{\log \left(\sqrt[2]{\frac{10^{\frac{A_{\min}}{10}} - 1}{\varepsilon^2}} \right)}{2 * \log \left(\frac{\omega_s}{\omega_p} \right)}$$

Ec. B 10

En la gráfica de la Fig.B 1., se muestra la magnitud de la función de transferencia para la aproximación de Butterworth de 4° orden:

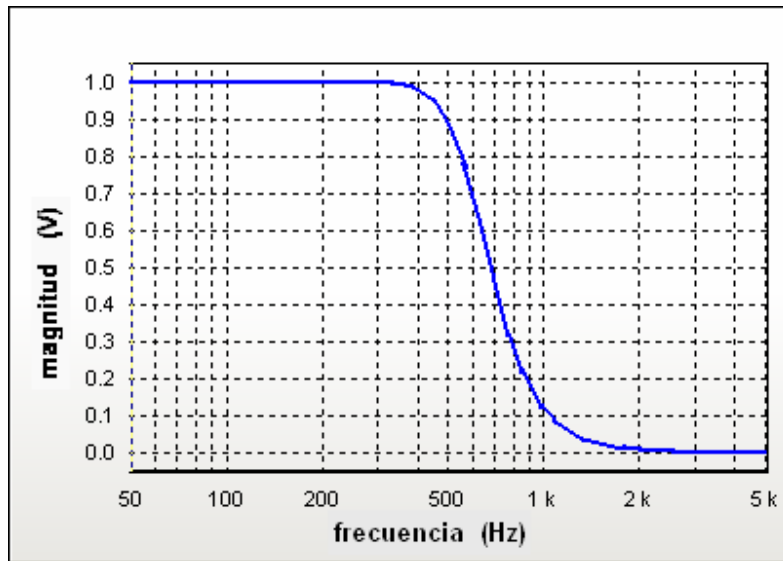


Figura B 1. Aproximación de Butterworth pasa bajo.

B.2 APROXIMACIÓN DE CHEBYSHEV

Se le conoce así, en honor al matemático Pafnuty Chebyshev. Ya que sus características se derivan del uso de los polinomios de Chebyshev. La magnitud de la función de transferencia posee máximos y mínimos en la banda de paso, los cuales originan una disminución de orden en comparación con la función de Butterworth. El número de rizados en la banda de paso es dependiente del valor del filtro, para la banda de rechazo la magnitud es una función monótona.

Los polos de Chebyshev se encuentran localizados sobre una elipse en el plano complejo y se encuentran más cercanos al eje imaginario que los polos de Butterworth.

La magnitud de Chebyshev se obtiene modificando la función de Butterworth de la siguiente forma:

$$|T(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(w)}} \quad \text{Ec. B 11}$$

Donde C_n es un polinomio de Chebyshev el cual se puede encontrar a partir de:

$$C_n(w) = \frac{n}{2} \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} (-1)^m \frac{(n-m-1)!(2w)^{n-2m}}{m!(n-2m)!} \quad \text{Ec. B 12}$$

Dichos polinomios poseen las siguientes características:

1. Son polinomios pares o impares de w dependiendo de si el grado del polinomio es par o impar, respectivamente.
2. para $w < 1$, el polinomio de Chebyshev toma valores de $+1$ y -1 alternadamente.
3. para $w = 0$, el polinomio de Chebyshev es cero si n es impar y su valor absoluto es 1 si n es par.

La representación trigonométrica de los polinomios de Chebyshev está dada por:

$$C_n(w) = \begin{cases} \cos(n \cos^{-1}(w)) & 0 \leq w \leq 1 \\ \cosh(n \cosh^{-1}(w)) & w > 1 \end{cases} \quad \text{Ec. B 13}$$

El significado de ε es el mismo que para la aproximación de Butterworth:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{A_{\max}}{10}} - 1} \quad \text{Ec. B 14}$$

El valor de la magnitud para la frecuencia de 3 dB está dada por:

$$|T(jw_{3dB})| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(w_{3dB})}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{Ec. B 15}$$

Los valores de magnitud para $w = 0$ están dados por:

$$|T(j0)| = 1 \quad \text{para } n \text{ impar}$$

$$|T(j0)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \quad \text{para } n \text{ par}$$

Y para $w = 1$

$$|T(j1)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \quad \text{para toda } n$$

Igualmente, es posible determinar el orden de la aproximación de Chebyshev observando la gráfica de magnitud, el cual se obtiene sumando el número de máximos y mínimos presentes en la banda de paso. Analíticamente se obtienen por:

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{\frac{A_{\min}}{10}} - 1}{\varepsilon^2}}}{\cosh^{-1} \left(\frac{w_s}{w_p} \right)} \quad \text{Ec. B 16}$$

Donde,

$$A_{\min} = 20 \log \sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(w_s)} \quad \text{Ec. B 17}$$

O de forma trigonométrica:

$$A_{\min} = 20 \log \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cosh^2(n \cosh^{-1}(w_s))} \quad \text{Ec. B 18}$$

Los polos de la función de transferencia de Chebyshev quedan determinados por:

$$p_k = \sigma_k + j\omega_k$$

$$\sigma_k = -\text{sen} \frac{2k-1}{2n} \pi * \text{senh} \left(\frac{1}{n} \text{senh}^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \right) \quad \text{Ec. B 19}$$

Y,

$$\omega_k = -\cos \frac{2k-1}{2n} \pi * \cosh\left(\frac{1}{n} \operatorname{senh}^{-1} \frac{1}{\varepsilon}\right) \quad \text{Ec. B 20}$$

Para $k = 1, 2, \dots, n$

Por último, el valor de la frecuencia ω_0 y el factor de calidad Q para cada polo están dados por:

$$\omega_0 = \sqrt{\operatorname{sen}^2 d_k \operatorname{senh}^2 e + \cos^2 d_k \cosh^2 e}$$

$$Q_k = \frac{1}{2 \operatorname{sen} d_k} \sqrt{\operatorname{sen}^2 d_k \operatorname{senh}^2 e + \cos^2 d_k \cosh^2 e} \quad \text{Ec. B 21}$$

Donde,

$$d_k = \pi \frac{2k-1}{2n}$$

Y,

$$e = \frac{\operatorname{senh}^{-1} \frac{1}{\varepsilon}}{n} \quad \text{Ec. B 22}$$

En la Fig. B 2., se muestra la respuesta en magnitud para un filtro Chebyshev de orden 4:

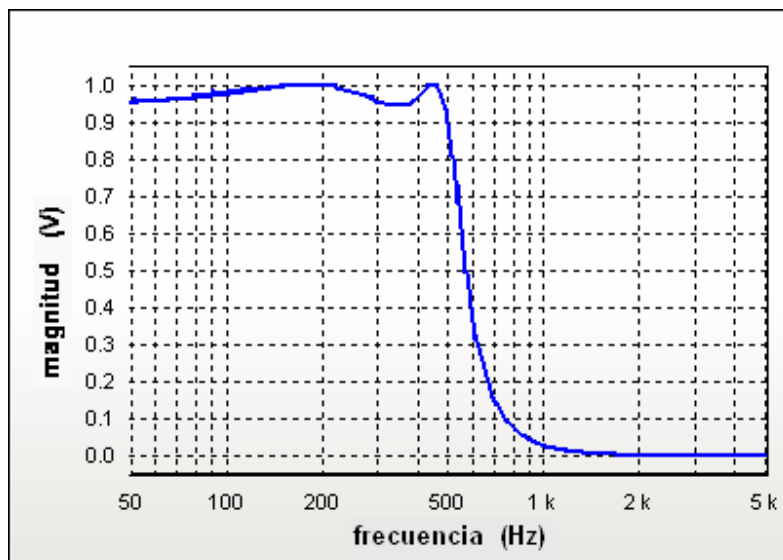


Figura B 2. Aproximación Chebyshev pasa bajo.

B.3 APROXIMACIÓN DE CHEBYSHEV INVERSA

La aproximación de Chebyshev inversa difiere de la de Chebyshev en que en la banda de paso la magnitud es una función monótona decreciente y presenta rizado en la banda de rechazo. Debido a esto es que se le conoce de esta manera. Las características de fase para esta aproximación son mejores que las de Chebyshev, pero ya que posee ceros finitos ubicados sobre el eje imaginario, la implementación del filtro es más compleja, ya que requiere de un mayor número de componentes. La aproximación para este tipo de aproximación está dada por:

$$|T(jw)| = \frac{\sqrt{\varepsilon^2 C_n^2\left(\frac{1}{w}\right)}}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2\left(\frac{1}{w}\right)}} \quad \text{Ec. B 23}$$

El orden para la aproximación de Chebyshev inversa está dado por:

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{A_{\min}}{10^{\frac{10}{10}} - 1}}}{\cosh^{-1}\left(\frac{1}{w_p}\right)} \quad \text{Ec. B 24}$$

Donde,

$$A_{\min} = 10 \log \left[1 + \frac{1}{\varepsilon^2} \right]$$

Y,

$$A_{\max} = 10 \log \left[1 + \frac{1}{\varepsilon^2 + C_n^2\left(\frac{1}{w_p}\right)} \right] \quad \text{Ec. B 25}$$

Los polos y ceros de la aproximación de Chebyshev inversa son hallados por:

$$p_k = \frac{1}{\sigma_k + j\omega_k}$$

Donde,

$$\sigma_k = -\text{sen} \frac{2k-1}{2n} \pi * \text{senh} \left(\frac{1}{n} \text{senh}^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

Y,

$$\omega_k = \cos \frac{2k-1}{2n} \pi * \text{cosh} \left(\frac{1}{n} \text{senh}^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

Para $k = 1, 2, \dots, 2n$

Ec. B 26

Por último, el valor de la frecuencia w_0 y el factor de calidad Q para cada polo están dados por:

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}}$$

Ec. B 27

$$Q_k = \frac{1}{2 \cos \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{\omega_k}{\sigma_k} \right) \right]}$$

Ec. B 28

En la Fig.B 3., se puede observar la respuesta en magnitud para un filtro Chebyshev inverso de 4° orden:

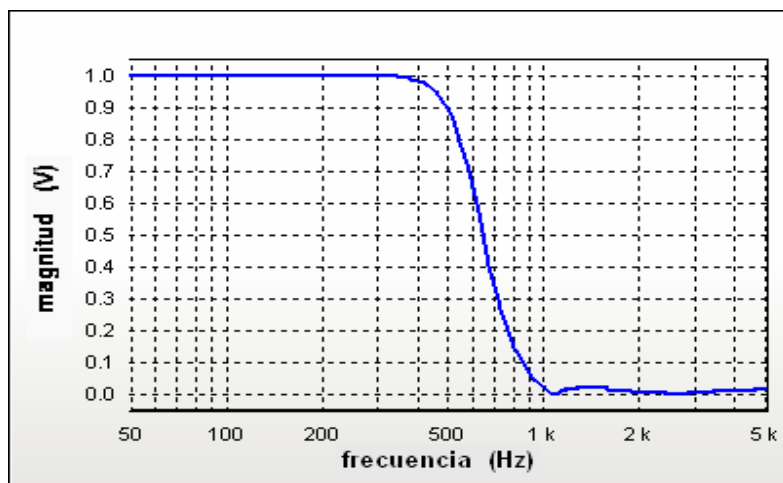


Figura B 3. Aproximación de Chebyshev inverso

B.4 APROXIMACIÓN ELÍPTICA

Su nombre se debe al matemático alemán Wilhelm Cauer, y su teoría fue desarrollada en la década de los 30's. Esta aproximación presenta rizado tanto para la banda de paso como para la de rechazo. Los filtros diseñados con la aproximación elíptica tienen mejor selectividad que los aproximados por Butterworth y Chebyshev para un orden dado. Para poder calcular los parámetros de estos filtros es necesario hacer uso de las funciones elípticas. Aunque la deducción de la función de transferencia es un poco compleja, su cálculo se puede obtener por medio del siguiente algoritmo:

$$T(s) = \frac{T_0}{F_0(s)} \prod_{i=1}^r \frac{s^2 + A_{0i}}{s^2 + B_{1i}s + B_{0i}} \quad \text{Ec. B 29}$$

Donde:

$$r = \frac{n-1}{2} \quad \text{para } n \text{ impar}$$

$$r = \frac{n}{2} \quad \text{para } n \text{ par}$$

Y,

$$F_0(s) = s + \sigma_0 \quad \text{para } n \text{ impar}$$

$$F_0(s) = 1 \quad \text{para } n \text{ par}$$

Primero se determina el valor de n , que depende de los valores de k, q de la siguiente forma:

$$k = \sqrt{1 - \left[\frac{w_p}{w_s} \right]^2}$$

$$q_0 = \frac{1 - \sqrt{k}}{2(1 + \sqrt{k})}$$

$$q = q_0 + 2q_0^5 + 15q_0^9 + 150q_0^{13}$$

$$n \geq \frac{\log \left[16 \frac{10^{\frac{A_{\min}}{10}} - 1}{10^{\frac{A_{\max}}{10}} - 1} \right]}{\log\left(\frac{1}{q}\right)} \quad \text{Ec. B 30}$$

Continuando con el algoritmo se determinan los valores de:

$$B = \frac{\ln \left[\frac{10^{\frac{A_{\max}}{20}} + 1}{10^{\frac{A_{\max}}{20}} - 1} \right]}{2n}$$

$$\sigma_0 = \left| \frac{2q^{1/4} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m q^{m(m+1)} \sinh[(2m+1)B]}{1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m q^{m^2} \cosh(2mB)} \right|$$

$$C = \sqrt{\left[1 + \frac{w_p}{w_s} \sigma_0^2 \right] \left[1 + \frac{w_s}{w_p} \sigma_0^2 \right]}$$

$$\Omega_i = \frac{2q^{1/4} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m q^{m(m+1)} \operatorname{sen} \left[(2m+1) \pi \frac{\mu}{n} \right]}{1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m q^{m^2} \cos(2m\pi \frac{\mu}{n})} \quad \text{Ec. B 31}$$

Donde,

$$\mu = i \quad \text{para } n \text{ impar}$$

$$1 \leq i \leq r$$

$$\mu = i - \frac{1}{2} \quad \text{para } n \text{ par}$$

$$D_i = \sqrt{\left[1 - \frac{w_p}{w_s} \Omega_i^2\right] \left[1 - \frac{w_s}{w_p} \Omega_i^2\right]} \quad \text{Ec. B 32}$$

Basta con tomar cuatro términos para obtener una convergencia para las expresiones σ_0 y Ω_i . Finalmente, los coeficientes de la magnitud elíptica están dados por:

$$A_{0i} = \frac{1}{\Omega_i^2}$$

$$B_{0i} = \frac{(\sigma_0 D_i)^2 + (\Omega_i C)^2}{(1 + (\sigma_0 \Omega_i)^2)^2}$$

$$B_{1i} = \frac{2\sigma_0 D_i}{1 + (\sigma_0 \Omega_i)^2}$$

$$T_0 = 1 \quad \text{para } n \text{ impar}$$

$$T_0 = 10^{-\frac{A_{\max}}{20}} \quad \text{para } n \text{ par}$$

Ec. B 33

En la gráfica de la Fig.B 4., se presenta la magnitud de la respuesta de un filtro elíptico de orden 4:

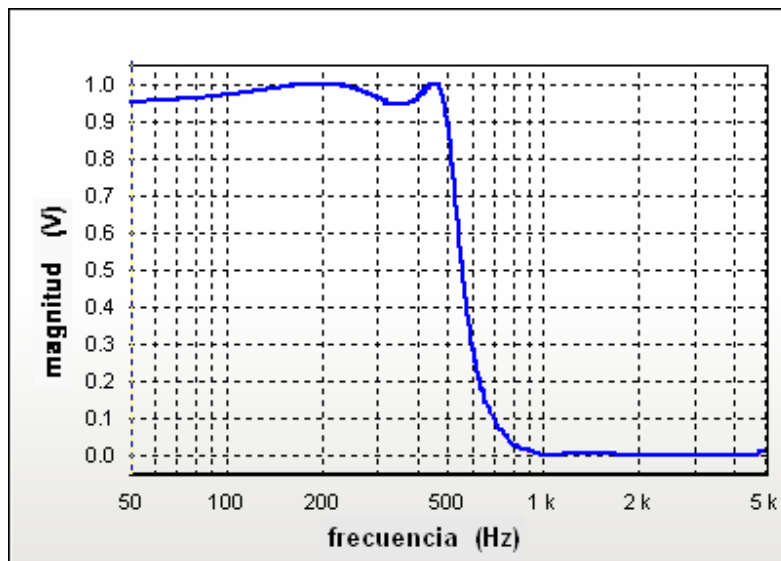


Figura B 4. Aproximación elíptica pasa bajo

B.5 APROXIMACIÓN DE BESSEL

Todas las aproximaciones vistas anteriormente son de magnitud y en ninguna de ellas se tuvo en cuenta la fase. En aplicaciones que requieren de retardo de grupo constante, como por ejemplo video o comunicaciones digitales se hace necesario el uso de la aproximación de Bessel. Dicha aproximación busca obtener las fases lo más lineal posibles, para que de esta manera las señales tarden lo mismo en ser procesadas sin importar su espectro.

La función $T(s)$ está dada por:

$$T(S) = \frac{a_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad \text{Ec. B 34}$$

Los polinomios de Bessel sirven para encontrar los coeficientes de la ecuación anterior y se pueden evaluar de la siguiente manera:

$$a_k = \frac{(2n - k)!}{2^{n-k} k!(n - k)!} \quad k = 0,1,2,3,\dots,n - 1$$

Los polinomios de Bessel se denotan por $B(s)$ y se generan a partir de la expresión recurrente:

$$B_n(s) = (2n - 1)B_{n-1}(s) + s^2B_{n-2}(s) \quad \text{Ec. B 35}$$

Con los valores iniciales:

$$B_{-1} = \frac{1}{s}$$
$$B_0 = 1$$

Dicha función es real, positiva e impar. En la Tabla B 1 se muestra la localización de los polos de la respuesta de Bessel normalizada.

Los parámetros para el diseño del filtro de Bessel son: el retardo de grupo, el porcentaje de error máximo permitido, la frecuencia de paso y la atenuación mínima deseada. El diseño se realiza por ensayo y error, primero buscando que el polinomio cumpla con las especificaciones de porcentaje de error y luego se irá incrementando el orden del polinomio hasta lograr la atenuación requerida.

En la Fig.B 5., Fig.B 6. y Fig.B 7 se muestran las gráficas de las respuestas de la aproximación de Bessel para diferentes órdenes. Estas gráficas ayudan a encontrar un diseño apropiado para las especificaciones exigidas con este tipo de aproximación de la función de transferencia.

N	
1	-1
2	-1.5±j0.8660254
3	-2.3221854; -1.8389073±j1.7543810
4	-2.8962106±j0.8672341; -2.1037894±j2.6574180
5	-3.6467386; -3.3519564±j1.7426614;-2.3246743±3.5710229
6	-4.2483594±j0.8675097;-3.7357084±j2.6262723; -2.5159322±j4.4926730
7	-4.9717869; -4.7582905±j1.7392861; -4.0701329±j3.5171740; -2.6856769±j5.4206941
8	-5.5878860±j0.8676144;-2.8389840±j6.3539113;-4.3682892±j4.4144425; -5.2048408±j2.6161751

Tabla B 1 Polos de los polinomios de Bessel

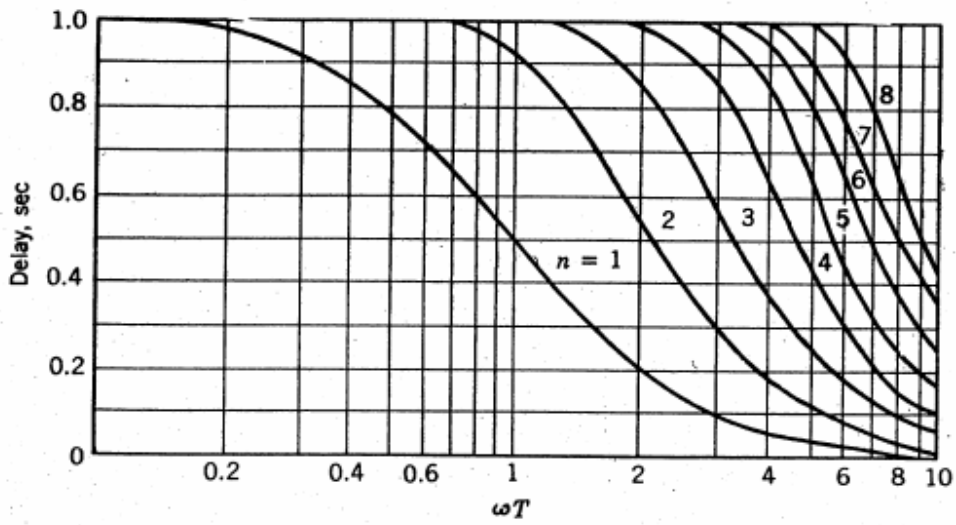


Figura B 5. Retardo de grupo para diferentes ordenes de los polinomios de Bessel

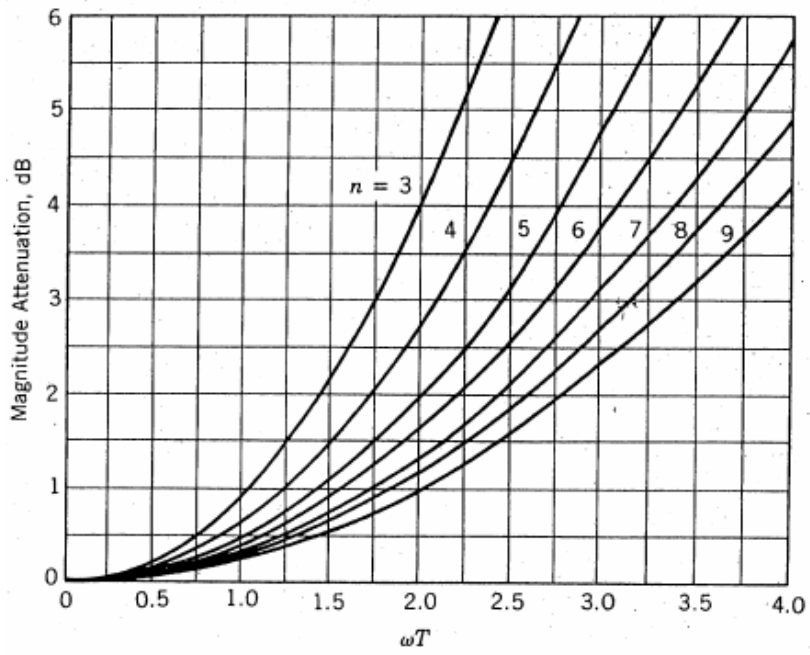


Figura B 6. Respuesta en magnitud de diferentes ordenes de la aproximación de Bessel

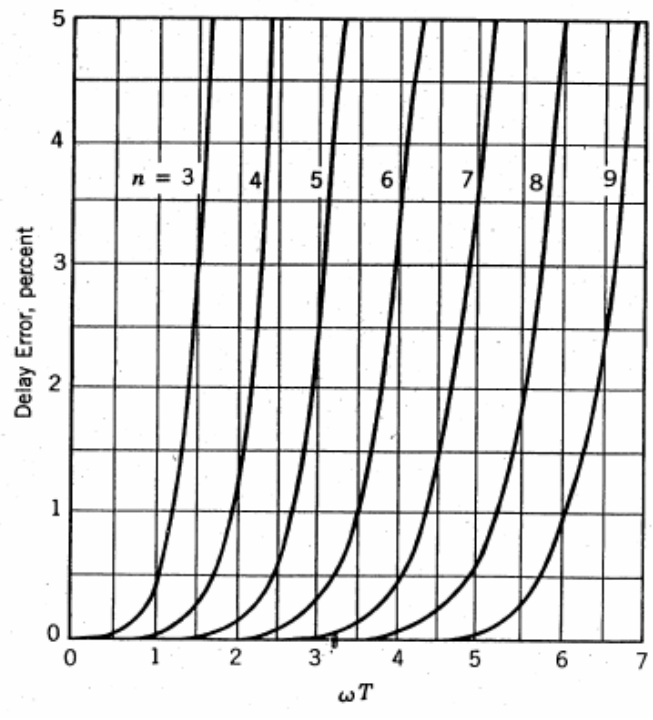


Figura B 7 Error en el retardo de grupo de la aproximación de Bessel

ANEXO C

PRESENTACIÓN Y EJECUCIÓN DEL SOFTWARE

El software **SoDFiAc UIS 1.0** requiere para su instalación, tener o instalar antes el kit de desarrollo Microsoft .NET Framework. El .NET Framework incluye recursos que se desarrollan con el elemento redistribuible de .NET Compact Framework. Además, .NET Compact Framework permite el desarrollo de aplicaciones seguras que se pueden descargar en dispositivos como asistentes digitales personales (PDA), teléfonos móviles y terminales de conexión. El .NET Framework es un kit ofrecido por Microsoft de uso libre.

El software **SoDFiAc UIS 1.0**, fue diseñado con el propósito de que el usuario encontrara una presentación organizada, amigable, de fácil manejo y ejecución simple.

C.1 PRESENTACIÓN DE LA INTERFAZ DE ENTRADA



Figura C 1 Pantalla de bienvenida

Al ejecutar **SoDFiAc UIS 1.0**, el usuario inicialmente se encuentra con una pantalla de bienvenida como la mostrada en la Fig.C 1., donde se puede visualizar el nombre del software, la versión y los derechos de autor, (Copyright).

Inmediatamente después se carga la interfaz de entrada la cual está dividida en 6 secciones específicamente definidas, básicamente esta pantalla permite recoger los datos de diseño del filtro. Las secciones que componen esta pantalla se identifican en la Fig.C 2.

Sección A: está compuesta por dos barras de herramientas:

1. Botones que proporcionan la ayuda del software (**botón Ayuda**), información general de la herramienta (Nombre, versión, derechos de autor y autores, **botón Acerca de...**) y una herramienta que permite hacer conversiones de unidades de dB a V/V y viceversa (**botón Conversor**). Cada uno abre un nuevo formulario presentados en las Figs.C 1 a, b y c respectivamente.
2. Serie de botones que permiten hacer un barrido durante el proceso de diseño (**Especificaciones, Aproximación, Selección de circuito, Valores componentes y Componentes calculados**).

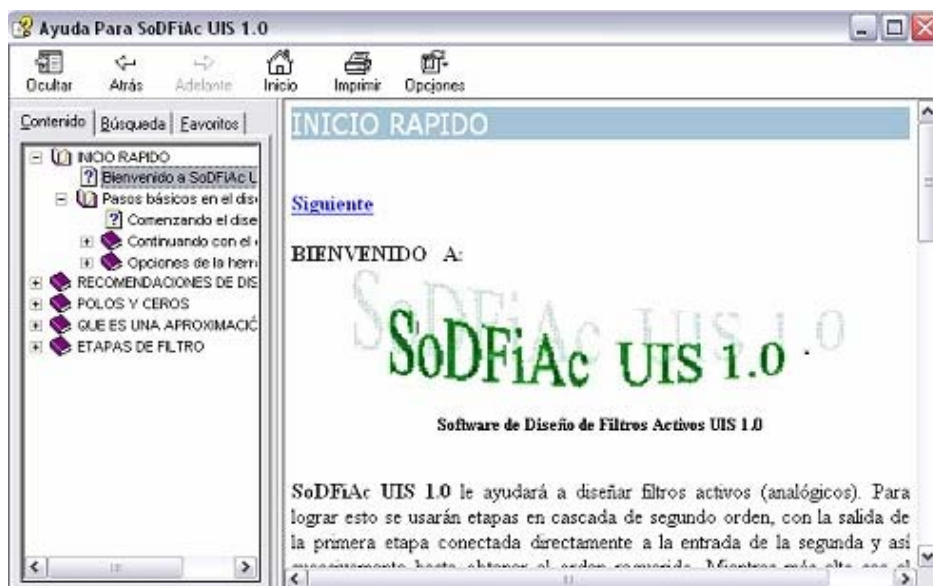


Figura C1 a. Interfaz de la ayuda de SoDFiAc UIS 1.0

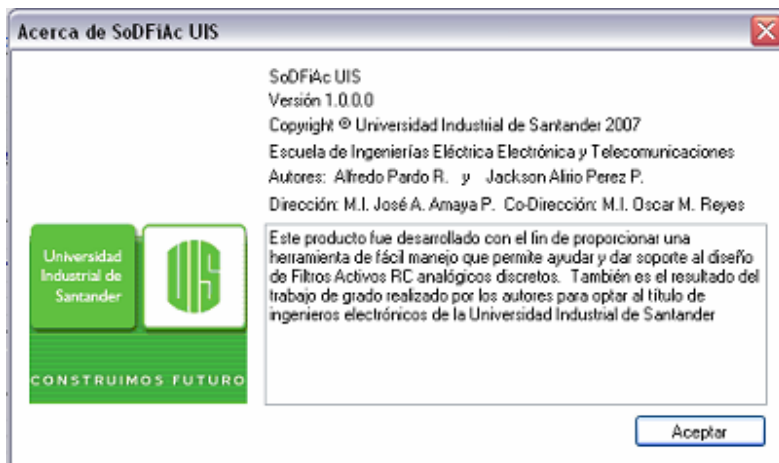


Figura C1 b. Interfaz del Acerca de de la herramienta

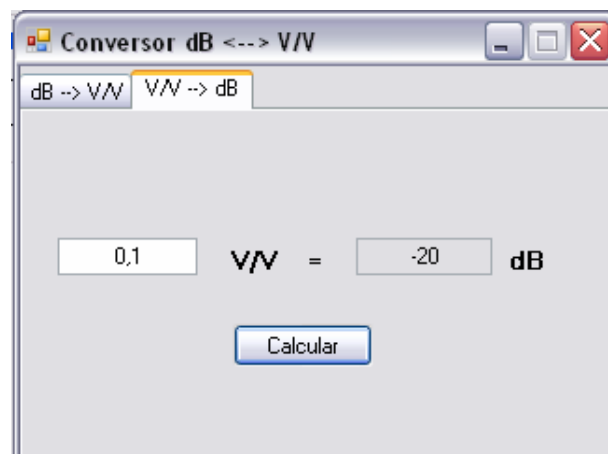


Figura C1 c. Interfaz de la herramienta de conversión

Sección B: Menú compuesto por cuatro botones de selección mutuamente excluyentes, los cuales permiten elegir el tipo de filtrado que se desea diseñar. Los botones son **Pasa-Bajo**, **Pasa-Alto**, **Pasa-Banda** y **Rechaza-Banda**.

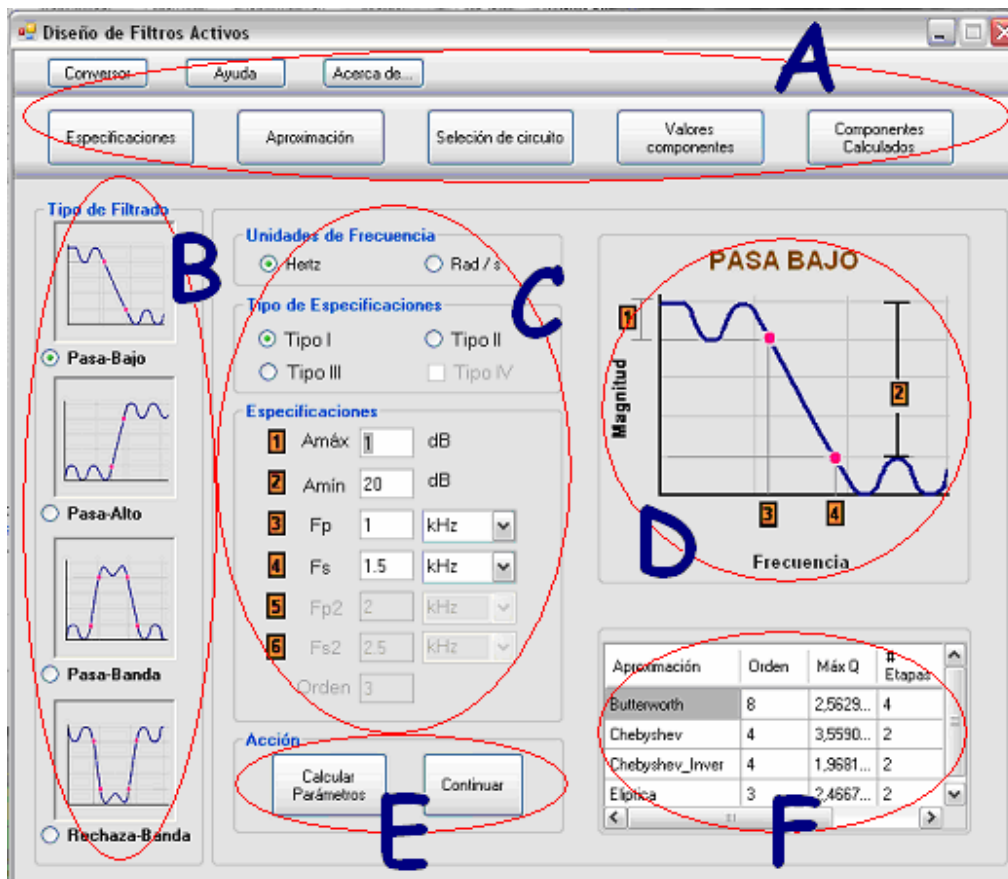


Figura C 2. Pantalla de Inicio

Sección C: Esta sección está compuesta por tres partes principales.

1. **Unidades de Frecuencia:** el usuario puede elegir entre dos opciones (**Hertz** ó **Rad/s**) para las unidades de frecuencia de las especificaciones del filtro.
2. **Tipo de Especificaciones:** al igual que la anterior puede optar por cualquiera de las cuatro opciones allí presentes teniendo en cuenta que:
 - **Tipo I:** se especifica la amplitud máxima en la banda de paso (**Amáx**), la amplitud mínima de la banda de rechazo (**Amin**), límite superior de la banda de paso (**Fp**) y límite inferior de la banda de

rechazo (**F_s**). Este tipo de especificaciones está disponible para los cuatro tipos de filtrado mencionados en la sección B.

- **Tipo II:** se describen especificaciones como, amplitud máxima en la banda de paso (**$A_{máx}$**), la amplitud mínima de la banda de rechazo (**$A_{mín}$**), la frecuencia de corte o de 3 dB y el orden del filtro (máximo 10). Sólo presente para tipo de filtrado pasa-bajo y pasa-alto.
- **Tipo III:** especificaciones relacionadas con la respuesta de fase (aproximación de Bessel), retardo de grupo deseado (**RDG**), máximo error en la desviación del retardo de grupo (**$\% Err$**), límite máximo de la banda de paso (**F_p**) y máxima desviación de la magnitud de la respuesta en frecuencia en la banda de paso (**$A_{máx}$**). Al igual que el Tipo II, este sólo se encuentra disponible para los tipos de filtrado pasa-bajo y pasa-alto.
- **Tipo IV:** especificaciones para diseñar filtros tipo muesca en la cual se elimina o rechaza una componente de la respuesta en frecuencia, sólo habilitada cuando se elige el tipo de filtrado rechaza banda. Allí se pide al usuario detallar la componente de frecuencia que desea eliminar (**F_o**).

3. **Especificaciones:** colección de etiquetas y cajas de texto en las cuales el usuario digita los valores correspondientes a las especificaciones del filtro que desea diseñar. Las etiquetas cambian adecuadamente y cajas de texto se activan o desactivan automáticamente de acuerdo a las elecciones que se realicen en las secciones **B** y **C**.

Sección D: aquí el usuario puede visualizar gráficamente el tipo de filtrado seleccionado y sus respectivas especificaciones.

Sección E: Acción: conjunto formado por dos botones, que indican al usuario la acción inmediata. Así:

- Botón **Calcular Parámetros:** al pulsar este botón el usuario visualiza en una tabla (*sección F*), el resultado del cálculo de los parámetros para cada una de las aproximaciones permitidas en el filtro especificado.

Internamente el software realiza las siguientes acciones:

- i. Verifica que no existan errores en las especificaciones, tales como:
 - a). Los valores digitados deben ser sólo de tipo numérico.
 - b). Deben existir valores en cada una de las cajas de texto, es decir que no queden campos vacíos.
 - c). Los datos deben ser congruentes, por ejemplo que la atenuación máxima en la banda de paso (*Amáx*) sea menor que la atenuación mínima en la banda de rechazo (*Amín*).

Cada vez que exista un error de este tipo se genera un mensaje donde se le informa al usuario del mismo y se indica donde se está presentando.

- ii. De no existir errores, realiza una normalización en frecuencia y luego, llama a cada una de las subrutinas donde se calculan, dependiendo del tipo de filtrado los parámetros de cada una de las aproximaciones posibles. En cada subrutina se verifica cual es el tipo de filtrado seleccionado, luego se procede a calcular el orden del filtro, la ubicación de los polos y ceros (si existen), y con ellos se calcula el factor de calidad y frecuencia de corte de cada una de las etapas. Si el tipo de filtrado no es pasa-bajo se realiza la respectiva transformación de frecuencia lo cual acarrea el cálculo de la nueva ubicación de los polos y ceros, luego busca el factor de calidad de cada una de las etapas.

- iii. Organiza y llena la tabla donde se presentan los resultados, en esta organización se calcula el mayor factor de calidad, el número total de etapas y en general la información que allí se presenta.
 - iv. Por último habilita el botón **Continuar**
- Botón **Continuar**: permite al usuario seguir al siguiente paso en el diseño del filtro especificado. Cuando se oprime se genera la pantalla mostrada en la figura C 3.

Las acciones de este botón son las siguientes:

- i). Oculta C, D, E, F de la figura C 2.
- ii). Después el programa llama una subrutina que realiza las gráficas de las funciones de aproximación.

Sección F: En esta sección se presenta un conjunto de información referente a algunos parámetros de las diferentes aproximaciones del tipo de filtrado elegido y calculados anteriormente.

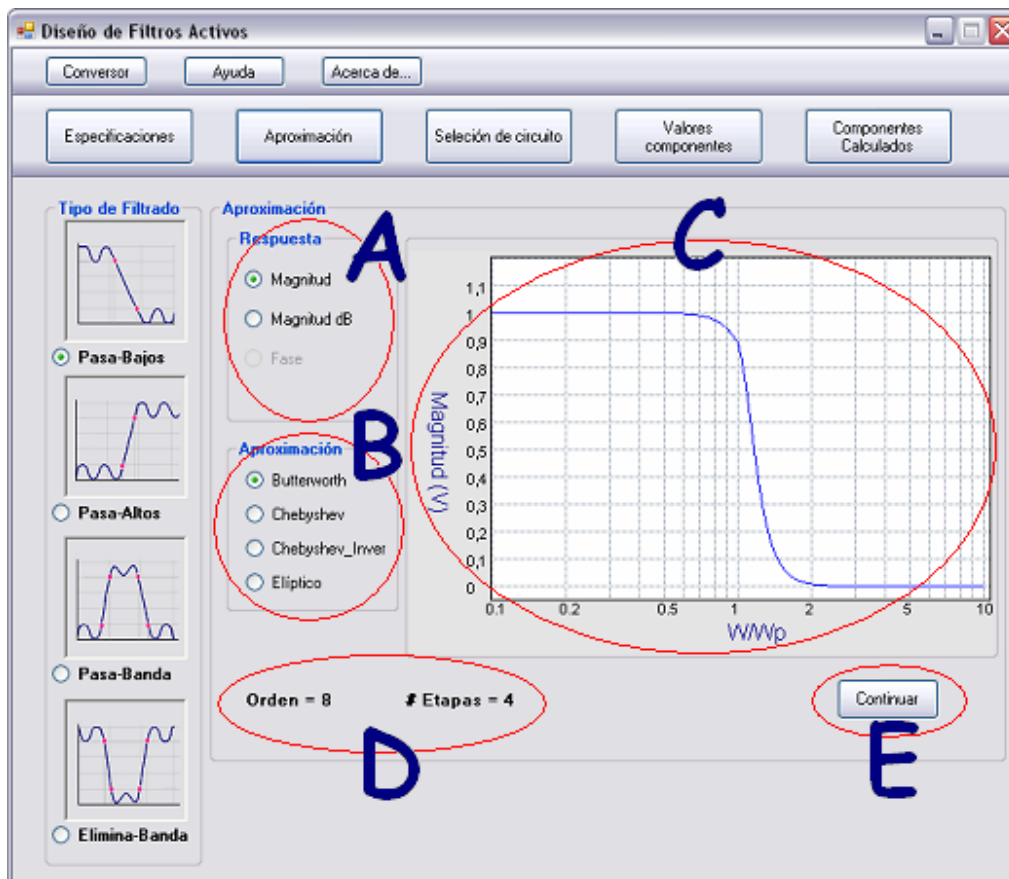


Figura C 3. Pantalla para la selección de la aproximación

Sección A: compuesta por dos botones de selección, en los cuales el usuario puede elegir el tipo de respuesta que quiere visualizar en **C**. cada uno de estos botones llama a una subrutina que permite graficar las funciones correspondientes.

Esta subrutina se encarga de realizar la gráfica de acuerdo al tipo de respuesta elegida en **A**, tipo de aproximación seleccionada en **B** y de acuerdo al tipo de filtrado especificado inicialmente.

El proceso de graficar es el siguiente:

- i) Calcula y almacena los puntos correspondientes a las abscisas y ordenadas de la función a generar. (cada punto corresponde a la ubicación de un píxel en la pantalla)

- ii) Crea el lienzo con características de ancho, color de fondo, entre otros, en el cual se van a graficar los puntos calculados anteriormente.
- iii) Luego ubica la grilla tanto horizontal como vertical en el lienzo.
- iv) Seguidamente ubica cada uno a uno los puntos de la función calculados anteriormente.
- v) Por último sitúa las coordenadas de los ejes y las unidades de estos.

Sección B: menú de selección formado por 4 botones en los cuales se elige el tipo de aproximación con el cual se desea continuar el diseño del filtro.

Sección C: sección en la cual se presenta la gráfica de la función elegida.

Sección D: en la cual se presentan el orden y número de etapas del filtro correspondiente a la selección de la aproximación.

Sección E: botón **Continuar:** permite seguir al siguiente paso en el diseño del filtro. La acción que ejecuta es la de ocultar las secciones **A, B, C, D, E** de la figura anterior y permitir la visualización de la pantalla presentada en la Fig.C 4.

La Fig.C 4, muestra una interfaz en la cual el usuario debe seleccionar una topología de circuito para el diseño del filtro. La descripción de esta interfaz se presenta a continuación:

Sección A: objeto que permite ver cada una de las topologías de circuito para el filtro que se está diseñando.

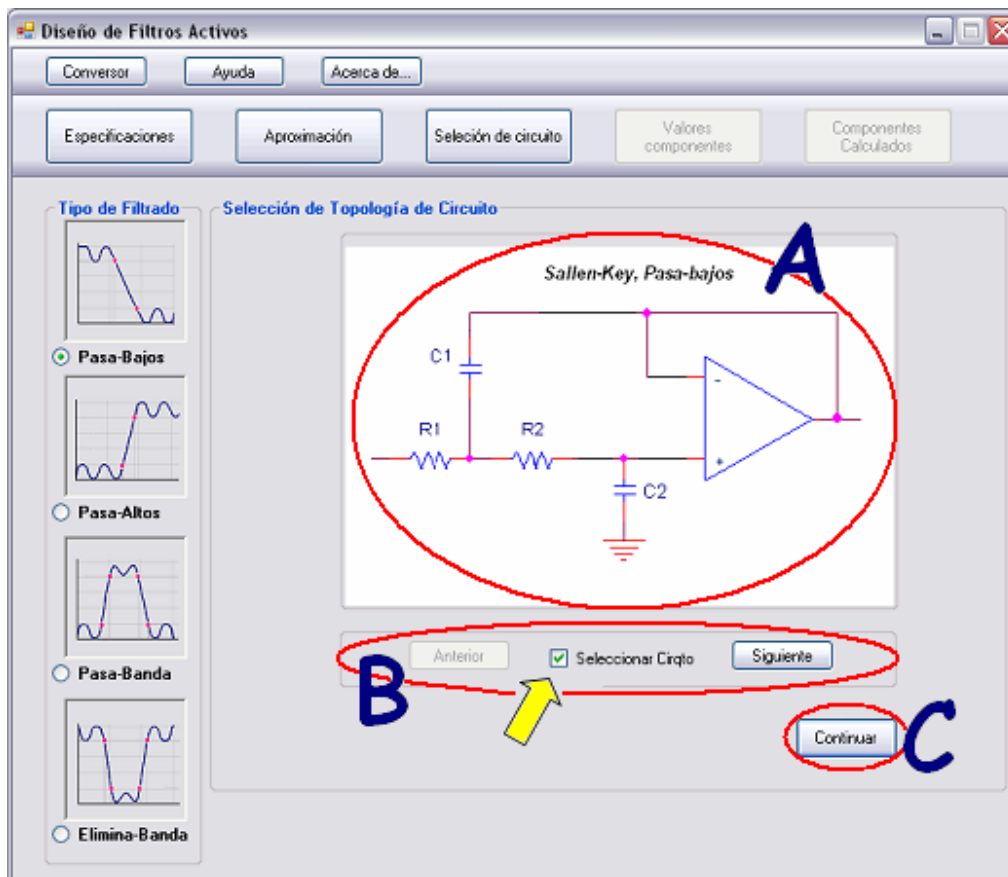


Figura C 4. Interfaz para la selección de la topología de circuito

Sección B: conformado por tres botones, uno de ellos de selección, con el cual se elige la topología de diseño. Los botones restantes permiten hacer un barrido de cada una de las topologías disponibles. Entre sus principales acciones se encuentran:

- i) Carga en **A** una topología de circuito dependiendo de el tipo de filtrado, de la aproximación seleccionada, de la topología disponible para cada aproximación de la función de transferencia.
- ii) Habilitarse o deshabilitarse mutuamente cuando existan o no más topologías de diseño.
- iii) Habilitar el botón **Continuar** de la sección **C** cuando se ha elegido una topología.

Sección C: botón **Continuar:** oculta todas las secciones descritas anteriormente y permite avanzar en el proceso de diseño. Al oprimir este botón se genera la pantalla de la Fig.C 5.

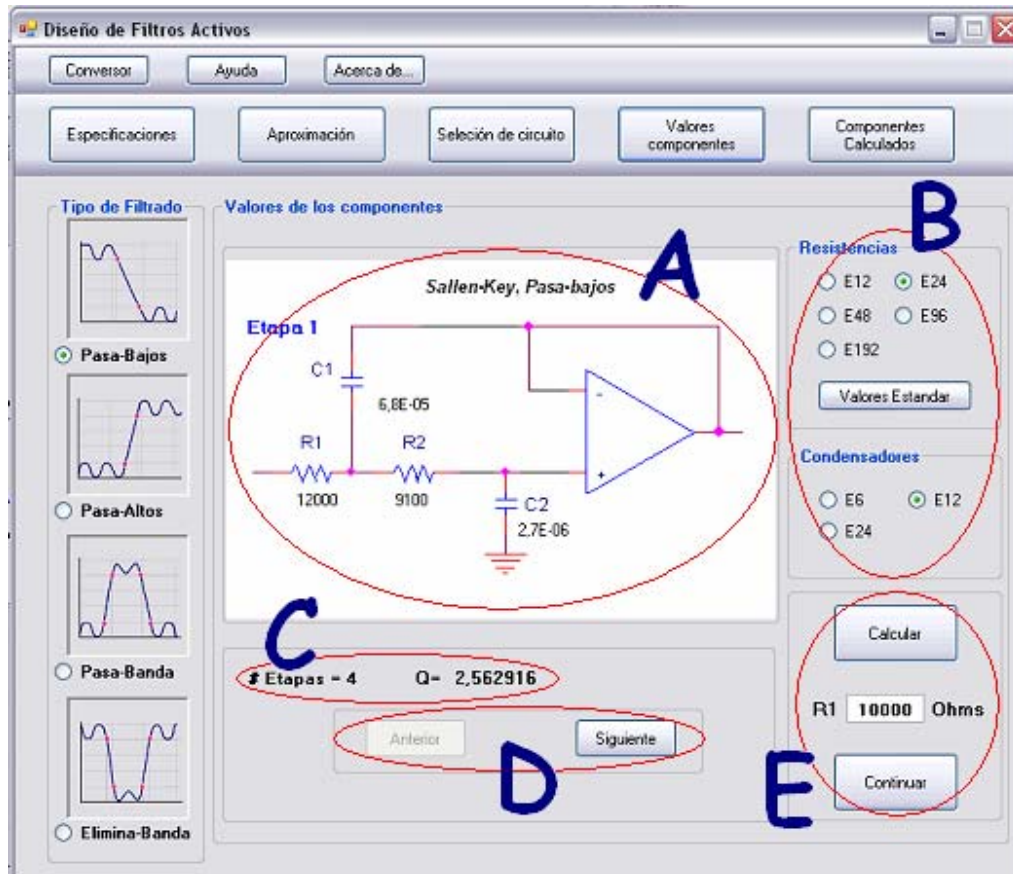
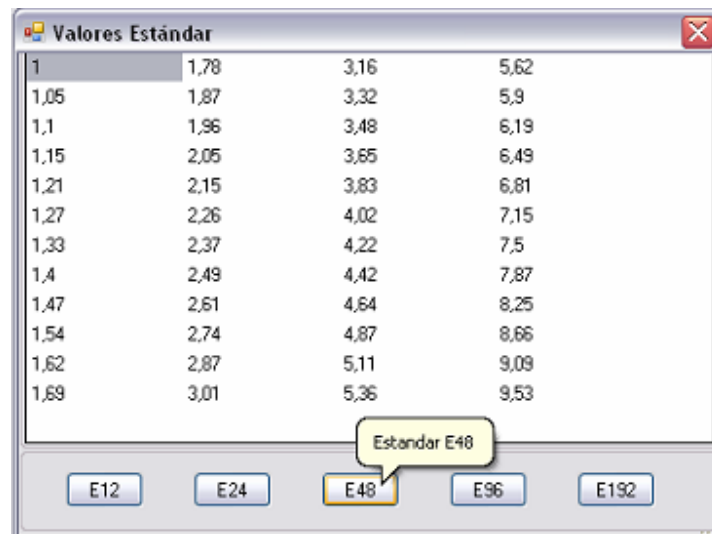


Figura C 5. Pantalla de visualización de resultados

Ésta es la última etapa de diseño del filtro y permite al usuario elegir los estándares de los elementos pasivos así como visualizar los resultados del cálculo de los valores de estos en la topología de circuito etapa por etapa. Esta interfaz se encuentra conformada por:

Sección A: objeto en el cual se presenta cada una de las etapas, tanto de primer y segundo orden de la topología seleccionada por el usuario con los respectivos valores de los componentes calculados. Así como el número de la etapa actual.

Sección B: sección compuesta por una serie de botones de selección, los cuales permiten al usuario escoger entre los diferentes estándares de los elementos pasivos. Así mismo se encuentra el botón **Valores Estándar**, que al oprimirse permite ver el formulario de la Fig.C 6., el cual presenta los valores correspondientes a cada uno de los estándares según la **IEC (Comisión Eléctrica Internacional)**.



	E12	E24	E48	E96	E192
1	1,78	3,16	5,62		
1,05	1,87	3,32	5,9		
1,1	1,96	3,48	6,19		
1,15	2,05	3,65	6,49		
1,21	2,15	3,83	6,81		
1,27	2,26	4,02	7,15		
1,33	2,37	4,22	7,5		
1,4	2,49	4,42	7,87		
1,47	2,61	4,64	8,25		
1,54	2,74	4,87	8,66		
1,62	2,87	5,11	9,09		
1,69	3,01	5,36	9,53		

Figura C 6. Pantalla de visualización de los estándares.

El formulario **valores estándar** presenta una serie de botones los cuales permiten ver los valores de cada estándar.

Sección C: presenta al usuario la información del número total de etapas y del factor de calidad de cada una de ellas.

Sección D: compuestos por dos botones (**Anterior y Siguiente**) que permite realizar un barrido por cada una de las etapas del filtro con el fin de observarlas en la sección **A**. Estos botones se habilitan y deshabilitan convenientemente.

Sección E: es la sección más importante de esta etapa, compuesta por dos botones (**Calcular** y **Continuar**) y una caja de texto en la que se pide al usuario ingresar el valor de la resistencia inicial. Por defecto éste se encuentra en 10000.

Las funciones que realizan estos dos botones son:

Botón Calcular:

- i) Identifica cuales son los estándares seleccionados en la parte **B**.
- ii) Toma el valor de la caja de texto digitado y encuentra el valor de resistencia más cercano a éste en el estándar indicado.
- iii) Dependiendo de la topología de circuito seleccionada se llama a la subrutina correspondiente para calcular los valores de los componentes restantes. En esta subrutina inicialmente se verifica cual es el tipo de filtrado seleccionado, posteriormente se calculan los valores nominales de los componentes utilizando el valor del factor de calidad y frecuencia de corte de cada una de las etapas, calculados en la fase inicial del diseño. una vez calculados estos, se buscan los valores más cercanos al valor del estándar seleccionado. Esta tarea se realiza básicamente en tres pasos:
 - Inicialmente se busca un multiplicador para el estándar, por ejemplo, si el valor obtenido es 5345,34 el multiplicador corresponde a 1000, ya que el valor nominal se encuentra entre 1000 y 10000.
 - Se crea un vector del estándar, multiplicando cada uno de los valores por el multiplicador. Obteniendo así un vector que contiene valores de resistencia comprendidos entre 1000 y 10000.
 - Luego se encuentra el valor más cercano al nominal, comparando éste con cada uno de los valores del vector mencionado. Para el mismo ejemplo si el estándar elegido fuera el **E48** el valor encontrado más cercano al nominal sería **5360**.
- iv) Una vez calculado los valores se guardan para poder desplegarse en la sección **A**. y se habilita el botón **Continuar** para ser usado.

El Botón **Continuar:** inicialmente oculta las secciones descritas anteriormente y permite visualizar la pantalla con la Fig.C 7.

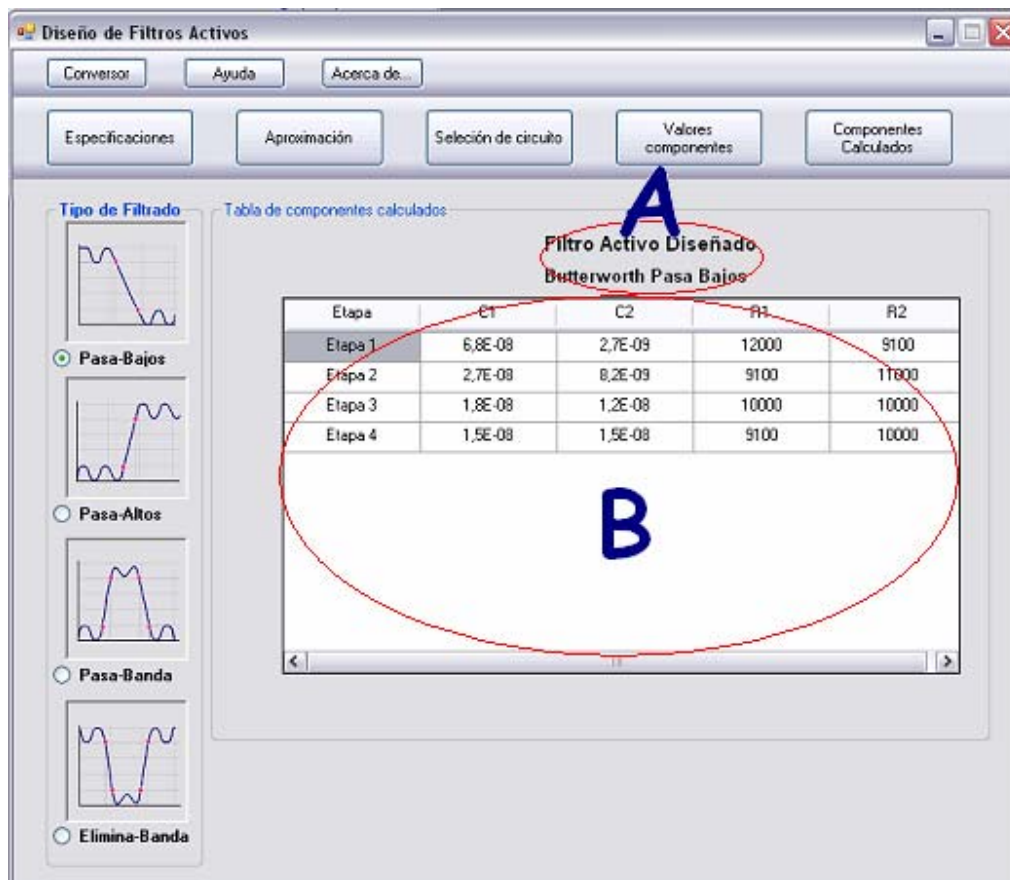


Figura C 7. Interfaz de presentación de resultados.

Por último se presenta la pantalla de la Fig.C 7., la cual consta de dos secciones:

Sección A: conformada por etiquetas en las cuales se muestra información acerca de el tipo de filtrado y la aproximación elegida por el usuario para el filtro diseñado.

Sección B: objeto que presenta en resumen, todos los valores de los componentes pasivos calculados para el filtro, y la respectiva etapa.

ANEXO D

D.1 TRANSFORMACIÓN EN LA FRECUENCIA

De los cuatro tipos de filtrado básicos, el filtro pasa bajo es aquel que permite obtener aproximaciones más sencillas al no tener en su función de transferencia ceros de transmisión finitos. Por tal motivo se introducen las transformaciones de frecuencia que al aplicarse a aproximaciones pasa bajo, permiten obtener aproximaciones correspondientes a los tipos de filtrado restantes (pasa alto, pasa banda, rechaza banda).

Dichas transformaciones de frecuencia se eligen de tal modo que factores como la selectividad, la atenuación máxima y mínima del filtro pasa bajo original se conserven. En todos los tipos de filtrado básicos, se parte de un pasa bajo normalizado, por comodidad dicha función normalizada, en el caso de un pasa bajo o un pasa alto, se obtiene cuando $w_p = 1$ y en el pasa banda ó rechaza banda cuando $w_o = 1$.

Una misma función normalizada $A(s)$, puede dar origen a través de cambios de escala de la variable “s” a los diferentes tipos de filtrado. De la ecuación D 1 se puede obtener la función normalizada de un filtro pasa bajo ó pasa alto. Del mismo modo de la ecuación D 2 se obtiene un filtro pasa banda ó rechaza banda normalizado, en ambos casos $A_n(s)$ es la función de atenuación normalizada.

$$A(s) = A_n\left(\frac{s}{w_p}\right) \quad \text{Ec. D 1}$$

$$A(s) = A_n\left(\frac{s}{w_o}\right) \quad \text{Ec. D 2}$$

D.1.1 TRANSFORMACIÓN A PASA ALTO

Para obtener un filtro pasa alto con frecuencia de paso w_p , se considera la transformación (ecuación D 3) en la cual, las frecuencias altas se transformen en bajas y viceversa.

$$s \rightarrow \frac{w_p}{s} \quad \text{Ec. D 3}$$

D.1.2 TRANSFORMACIÓN A PASA BANDA

Para obtener un filtro pasa banda con frecuencia central w_0 y ancho de banda W se procede de manera similar, usando la siguiente transformación.

$$s \rightarrow \frac{1}{W} \left[\frac{s}{w_0} + \frac{w_0}{s} \right] \quad \text{donde,} \quad W = \frac{w_{p2} - w_{p1}}{w_0} \quad \text{Ec. D 4}$$

D.1.3 TRANSFORMACIÓN A RECHAZA BANDA

Un filtro rechaza banda con frecuencia central w_0 y ancho de banda W (ecuación D 6) se obtiene, sustituyendo en la ecuación D 5

$$A(s) = A_n \left(\frac{s}{w_0} \right) \quad \text{Ec. D 5}$$

La transformación de la ecuación D 7

$$A(s) = A_n \left(\frac{W}{\frac{s}{w_0} + \frac{w_0}{s}} \right) \quad \text{Ec. D 6}$$

$$s \rightarrow \frac{W}{\frac{s}{w_0} + \frac{w_0}{s}} \quad \text{donde,} \quad W = \frac{w_{s2} - w_{s1}}{w_0} \quad \text{Ec. D 7}$$

D.2 METODOLOGÍA DE TRANSFORMACIÓN EN LA FRECUENCIA

En esta sección se explica la forma en que se obtiene la normalización de las funciones de los tipos de filtrado comúnmente usados. Este procedimiento consta de tres pasos básicos (Fig.D 1.).

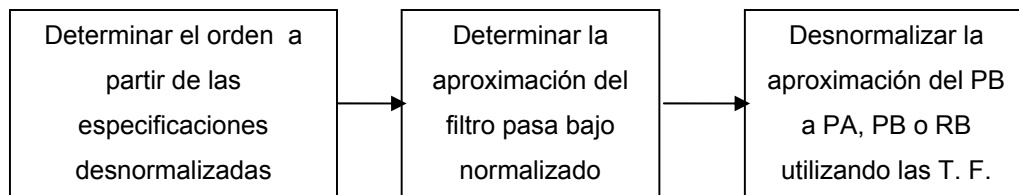


Figura D 1. Pasos en el proceso de transformación de frecuencias

El proceso de transformación de frecuencia se realiza de manera similar en todos los tipos de filtrado (pasa bajo, pasa alto, pasa banda y rechaza banda). En la siguiente sección se hace un estudio detallado de la transformación de frecuencia para el tipo de filtrado pasa banda.

D.2 APROXIMACIÓN DE LAS FUNCIONES DESNORMALIZADAS PARA EL PASA BANDA

Inicialmente para poder encontrar los parámetros del filtro pasa banda se hace una normalización de las especificaciones y con éstas se encuentra su respectiva función de transferencia. El propósito de la normalización es encontrar las especificaciones que satisfacen el filtro pasa bajo a partir del filtro pasa banda.

Se debe recordar que las especificaciones de frecuencia para el filtrado pasa Banda son:

- Las frecuencias de rechazo F_{s1} y F_{s2}
- Las frecuencias de paso F_{p1} y F_{p2}

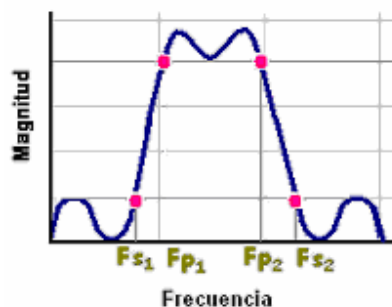


Figura D 2. Especificaciones de frecuencia Pasa Banda

La normalización de las especificaciones de frecuencia se hace de la siguiente manera:

- La frecuencia de paso toma el valor de la unidad.
- La frecuencia de rechazo se calcula (para el pasa banda) así:

$$W_S = \frac{w_{s2} - w_{s1}}{w_{p2} - w_{p1}} = \frac{f_{s2} - f_{s1}}{f_{p2} - f_{p1}} \quad \text{Ec. D 8}$$

Una vez encontradas estas frecuencias se encuentra el orden y los demás parámetros del filtro pasa bajo para cada una de las aproximaciones de la función de transferencia. Por último, se procede a desnormalizar de la función del filtro pasa bajo la respectiva función pasa banda. Para lograr este último paso, se utiliza la siguiente sustitución, en la función de transferencia.

$$S = \frac{s^2 + w_o^2}{BW * s} \quad \text{Ec. D 9}$$

Donde:

$$w_o = \sqrt{w_{p1} * w_{p2}} \quad \text{y} \quad BW = w_{p2} - w_{p1} \quad \text{Ec. D 10}$$

Para todas las aproximaciones excepto para Chebyshev Inverso en la cual:

$$w_o = \sqrt{w_{s1} * w_{s2}} \quad \text{y} \quad BW = w_{s2} - w_{s1} \quad \text{Ec. D 11}$$

Una de las restricciones para las especificaciones de frecuencia del filtro pasa banda, consiste en que tanto la banda de paso ($F_{p2} - F_{p1}$) y la banda de rechazo ($F_{s2} - F_{s1}$) deben ser simétricas a la frecuencia central W_o . Un método simple para que esto se cumpla, es observar la siguiente relación:

$$\frac{W_{s1}}{W_{p1}} = \frac{W_{s2}}{W_{p2}} \quad \text{Ec. D12}$$

Si esta relación no se cumple se debe incrementar w_{s1} ó disminuir w_{s2} hasta obtener la igualdad. En este caso la herramienta desarrollada, siempre calcula estos valores, obteniendo las especificaciones simétricas necesarias.

Siempre, en todas las aproximaciones se calculan funciones de transferencia de primer o segundo orden que al ser ubicadas en cascada, se logra el filtro con el orden deseado. Para hacer la transformación de frecuencia se toma cada una de estas funciones y se hace su respectiva sustitución.

Las funciones de primer orden se sustituyen así:

$$H(s) = \frac{A1 * s + A2}{B1 * s + B2} \quad \text{Ec. D 13}$$

Reemplazando “**S**” por

$$S = \frac{s^2 + w_o^2}{BW * s} \quad \text{Ec. D 14}$$

Llegando a:

$$H(s) = \frac{A1 * s^2 + A2 * BW * s + A1 * w_o^2}{B1 * s^2 + B2 * BW * s + B1 * w_o^2} = \frac{a_0 * s^2 + a_1 * s + a_2}{b_0 * s^2 + b_1 * s + b_2} \quad \text{Ec. D 15}$$

Una función de segundo orden donde se identifican los parámetros necesarios para el cálculo de los componentes de la topología con la cual se desea diseñar. En el caso en que las funciones sean de segundo orden en el filtro pasa bajo, la sustitución se hace de manera similar, obteniéndose para cada una, una función de transferencia de cuarto orden. Lo cual implica que se deben encontrar las raíces, tanto del numerador como del denominador (polos y ceros), para construir las funciones de transferencia de segundo orden del filtro pasa banda. Para poder

encontrar los polos y ceros de la función de transferencia se deben usar algoritmos numéricos que en ocasiones pueden no tener convergencia dependiendo de la región o punto inicial para iniciar su búsqueda.

Dada esta dificultad, en la herramienta se optó por una segunda opción para poder encontrar las funciones de segundo orden la cual consiste en:

Una vez obtenida la función de segundo orden del filtro pasa bajo por ejemplo

$$H(s) = \frac{2}{s^2 + 2*s + 2} = \frac{2}{(s+1+j1)*(s+1-j1)} \quad \text{Ec. D 16}$$

Se hace la sustitución, Asumiendo $w_o=1$ y $BW=1$,

$$S = \frac{s^2 + 1}{s} \quad \text{Ec. D 17}$$

Y la función de transferencia resultante es:

$$H(s) = \frac{2*s^2}{[s^2 + (1+j1)*s + 1]*[s^2 + (1-j1)*s + 1]} \quad \text{Ec. D 18}$$

Se separa en dos funciones de segundo orden, y se calculan las raíces para cada una de ellas. Las raíces para el primer término cuadrático pueden ser determinadas así:

$$s_{1,2} = \frac{-(1-j1) \pm (0.486 + j2.058)}{2} = (-0.257 + j0.529), (-0.743 - j1.53) \quad \text{Ec. D 19}$$

Y las raíces del segundo término cuadrático quedan como:

$$s_{3,4} = (-0.257 - j0.529), (-0.743 + j1.53) \quad \text{Ec. D 20}$$

Como resultado la función de transferencia puede ser escrita combinando las raíces complejas conjugadas de cada término cuadrático así:

$$H(s) = \frac{2 * s^2}{[s^2 + 0.514 * s + 0.346] * [s^2 + 1.486 * s + 2.89]} \quad \text{Ec. D 21}$$

De forma general este procedimiento se describe a continuación:

$$H(s) = \frac{A2}{s^2 + B1 * s + B2} = \frac{A2}{(s + p_1)(s + p_1^*)} \quad \text{Ec. D 22}$$

Sustituyendo **S** por:

$$S = \frac{s^2 + w_o^2}{BW * s} \quad \text{Ec. D 23}$$

La función de transferencia luego de la transformación se escribe así:

$$H(s) = \frac{A2 * BW * s^2}{(s^2 + BW * p_1 * s + w_o^2) * (s^2 + BW * p_1^* * s + w_o^2)} \quad \text{Ec. D 24}$$

$$H(s) = \frac{A2 * BW * s^2}{(s^2 + b_1 * s + b_2) * (s^2 + b_4 * s + b_5)} \quad \text{Ec. D 25}$$

Para los demás tipos de filtrado, como se mencionó antes, existen procedimientos similares, cada uno caracterizado por su respectiva sustitución. En la herramienta fueron programados cada uno de estos procedimientos para las funciones de aproximación propuestas, presentándose las mayores dificultades en el manejo de los cálculos de la matemática compleja, propios de estas sustituciones, debido a las limitaciones de las librerías matemáticas del software de desarrollo.

D.2.1 EJEMPLO DE LA TRANSFORMACIÓN EN LA FRECUENCIA PARA EL PASA BANDA

Se desea obtener señales con frecuencia entre 300 y 3000 Hz, para cumplir estos requisitos se plantean las siguientes especificaciones:

$f_{p1}=300$ Hz, $A_{\max}=1$ dB, $f_{s1}= 100$ Hz, $A_{\min}= 21$ dB. $f_{p2}=3$ kHz, $f_{s2}= 9$ kHz

Se realiza la normalización de Las especificaciones, con el fin de obtener éstas para el filtro pasa bajo, con lo cual:

$$f_p = 1 \quad \text{y} \quad f_s = \frac{f_{s2} - f_{s1}}{f_{p2} - f_{p1}} = \frac{9000 - 100}{3000 - 300} = 3.2963$$

Continuando con el diseño, se calculan los parámetros para un filtro pasa bajo Butterworth, donde:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{A_{\max}}{10}} - 1} = \sqrt{10^{\frac{1}{10}} - 1} = 0.5088$$

$$n \geq \frac{\log \left[\left(10^{\frac{A_{\min}}{10}} - 1 \right) / \left(10^{\frac{A_{\max}}{10}} - 1 \right) \right]}{2 * \log \left(\frac{f_s}{f_p} \right)} \geq 2.5899 \quad (3 \text{ orden})$$

Los polos de la aproximación de Butterworth se obtienen de las ecuaciones D26 y D27.

$$p_k = \sigma_k + j\omega_k \quad \text{Ec. D 26}$$

$$\sigma_k = -\frac{1}{\sqrt[n]{\varepsilon}} \operatorname{sen} \frac{2k-1}{2n} \pi \quad \omega_k = -\frac{1}{\sqrt[n]{\varepsilon}} \cos \frac{2k-1}{2n} \pi \quad \text{Ec. D 27}$$

$$\begin{aligned} p_1 &= -1.25258 \\ p_2 &= 0.6262 - j1.0848 \\ p_3 &= 0.6262 + j1.0848 \end{aligned}$$

Con los cuales se puede determinar la función de transferencia pasa bajo dada por:

$$H(s) = \frac{1.9652}{(s+1.2526)(s+0.6262 \pm j1.0848)^2} \quad \text{Ec. D 28}$$

Posteriormente se realiza la transformación en la frecuencia, sustituyendo la ecuación D 30 en la ecuación D28.

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{\omega_{p1} * \omega_{p2}} & \text{y} & \quad BW = \omega_{p2} - \omega_{p1} \\ \omega_0 &= 5960.75 \text{rad/s} & & \quad BW = 16964.6 \text{rad/s} \end{aligned}$$

$$s = \frac{s^2 + \omega_0^2}{BW * s} \quad \text{Ec. D 29}$$

$$s = \frac{s^2 + 5960.75^2}{16964.6s} \quad \text{Ec. D 30}$$

Con lo cual se obtiene la función de transferencia pasa banda (ecuación D 31), la cual cumple con las especificaciones de diseño iniciales. Con esta función se realiza la síntesis en cascada, por medio de la comparación de la función bicuadrática con la función de transferencia del circuito, para obtener los valores de resistencia y condensadores de la topología seleccionada.

$$H(s) = \frac{9.5949s^3}{(s^2 + 21249.9s + 3.5330 \cdot 10^7)(s^4 + 21246.5s^3 + 5.2259 \cdot 10^8 s^2 + 1.2524s + 1.5389)}$$

Ec. D 31

ANEXO E

ESTÁNDAR DE LOS RESISTORES Y CAPACITORES

Los valores para los elementos pasivos de circuito proporcionados por la herramienta de diseño SoDFiAc UIS 1.0 se rigen de acuerdo a estándares internacionales.

Aunque existen varias series de resistencias E6, E12, E24, E48, E96 y E192 cuyas tolerancias son 20%, 10%, 5%, 2%, 1% y 0.5% respectivamente, las más utilizadas son las de la serie E24 (5% de tolerancia), ya que son las que se consiguen comercialmente con mayor facilidad en el entorno local.

En el caso de los condensadores sólo existen los estándares E6, E12 y E24, el valor de las tolerancias depende del material que lo compone.

A continuación se presenta las series para las resistencias y condensadores y cada uno de los valores que los componen, según clasificación de la norma **IEC (Comisión Eléctrica Internacional)**. Los resistores discretos sólo están disponibles en valores estándar con sus respectivos multiplicadores. Los resistores cuya composición es carbón, tienen valores comprendidos desde 1Ω hasta 100 MΩ.

E6	E12	E24	E48	E96	E192
100	100	100	100	100	100
				101	
				102	102
					104

E6	E12	E24	E48	E96	E192
150	150	150	147	147	147
				149	
				150	150
					152

120	110	105	105	105	154	
				106	154	
			107	107	158	
		109		160		
		110	110	110	110	162
					111	164
				113	113	165
			114		167	
			115		115	115
	117			172		
	118	118		174		
	120	120	121	121	178	
				123	180	
				124	124	182
			126		184	
			127		127	187
				129	189	
		130		130	191	
			132	193		
			130	133	133	196
		135			198	
137		200				
140		138		203		
	140	205				
	142	208				
140	143	143	210			
		145	213			

E6	E12	E24	E48	E96	E192	E6	E12	E24	E48	E96	E192				
220	220	220	215	215	215	330	330	330	316	316	316				
				218	218					320					
				221	221					324					
			226	226	226				226	328					
					229				229	332					
					232				232	336					
		240	237	237	237			237	340						
					240			240	344						
					243			243	348						
			249	249	249			249	352						
					252			252	357						
					255			255	361						
		270	270	270	261			261	261	390	390	360	348	348	348
								264	264					357	
								267	267					365	
					274			274	274				274	370	
									277				277	374	
									280				280	379	
	300			287	287	287	287	383							
						291	291	388							
						294	294	392							
				301	301	298	298	397							
						301	301	402							
						305	305	407							
	309			309	301	301	301	412							
						309	309	417							
						312	312	422							
					309	309	309	309	427						
							442	442	432						
							453	453	437						

E6	E12	E24	E48	E96	E192	
470	470	470	464	464	464	
				470	470	
				475	475	
			487	481	481	
				487	487	
				493	493	
		510	511	499	499	
				505	505	
				511	511	
			536	517	517	
				523	523	
				530	530	
		560	560	562	536	536
					542	542
					549	549
				590	556	556
					562	562
					569	569
	620		590	576	576	
				583	583	
				590	590	
			649	597	597	
				604	604	
				612	612	
	649		619	619	619	
				626	626	
				634	634	
			649	642	642	
				649	649	
				657	657	
	665	649	665	665		
			673	673		
			665	665		
		665	665	665		
			673	673		
			673	673		

E6	E12	E24	E48	E96	E192	
680	680	680	681	681	681	
				690	690	
				698	698	
			715	706	706	
				715	715	
				723	723	
		750	750	732	732	
				741	741	
				750	750	
			787	759	759	
				768	768	
				777	777	
		820	820	825	787	787
					796	796
					806	806
				866	816	816
					825	825
					835	835
	910		866	845	845	
				856	856	
				866	866	
			953	876	876	
				887	887	
				898	898	
	953		909	909	909	
				920	920	
				931	931	
			953	942	942	
				953	953	
				965	965	
	976	953	976	976		
			988	988		
			976	976		
		976	976	976		
			988	988		
			988	988		