

**DISEÑO ÓPTIMO DE FILTROS ELECTRÓNICOS (CHEBYSHEV) MEDIANTE EL
ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL (FIREFLY)**

ANDRÉS LEONARDO RODRÍGUEZ PEÑA

KILDAR GAONA PIAMONTE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

**DISEÑO ÓPTIMO DE FILTROS ELECTRÓNICOS (CHEBYSHEV) MEDIANTE EL
ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL (FIREFLY)**

ANDRÉS LEONARDO RODRÍGUEZ PEÑA

KILDAR GAONA PIAMONTE

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero electrónico**

CARLOS RODRIGO CORREA CELY, Ph.D.

DIRECTOR TRABAJO DE GRADO

IVÁN AMAYA, Ph.D. (c)

CODIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS

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

BUCARAMANGA

2014

DEDICATORIA

Gracias a Dios por nunca dejarme decaer, a mis padres por un apoyo incondicional ya que gracias a sus consejos y motivación me dieron la fuerza para lograr este objetivo, a mi hermano, a mi tía Zoraida que siempre ha estado para mí, a mis tías, tíos y primos que aportaron su granito de arena siempre, y a todas aquellas personas y amigos con los cuales compartí durante estos años e hicieron parte de este logro.

Andrés Leonardo Rodríguez Peña

A mis padres y a mi tía que siempre me han apoyado incondicionalmente en el transcurso de esta vida, a todos mis compañeros que aportaron en parte en mi crecimiento en la universidad, también a todos los personas que en parte aportaron a cumplir esta gran meta.

Kildar Gaona Piamonte

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a todas aquellas personas que durante estos años de estudios universitario contribuyeron a nuestro aprendizaje, a todos los profesores aportaron sus conocimientos a nuestra enseñanza.

Especial agradecimiento a los profesores Carlos Rodrigo Correa e Iván Mauricio Amaya por recomendación y ayuda durante la realización del presente proyecto, ya que esto permitió concluir este trabajo adecuadamente.

Al grupo CEMOS y a la Universidad Industrial de Santander, por habernos permitido realizar el proyecto dentro de sus instalaciones.

Los Autores

Tabla de contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN -----	16
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO -----	18
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA -----	18
1.2. OBJETIVOS -----	19
1.2.1. OBJETIVO GENERAL -----	19
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS -----	19
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS -----	20
2.1. TERMINOLOGÍA -----	20
2.2. ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL “FIREFLY” -----	21
2.3. FILTROS ANALÓGICOS -----	26
2.4. FILTRO CHEBYSHEV -----	28
2.5. DISEÑO COMPUTACIONAL DE FILTROS ELECTRÓNICOS -----	30
3. METODOLOGÍA PARA EL USO DEL ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA “FIREFLY” -----	32
3.1. CRITERIOS DE PARADA -----	32
3.3. DISEÑO DEL ESQUEMA DE TOLERANCIA -----	34
3.4. PARÁMETROS DE PESO -----	35
3.5. TRANSFORMACIÓN DE FILTROS -----	36
4. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL -----	37
4.1. FUNCIONES DE PRUEBA -----	37
4.2. FUNCIÓN ACKLEY -----	38
4.3. FUNCIÓN MICHALEWICZ -----	41
4.4. FUNCIÓN RASTRIGIN -----	43
4.5. FUNCIÓN SCHAFFER -----	47

4.6.	COMPARACIÓN CON RESULTADOS ENCONTRADOS EN LA LITERATURA-----	50
5.	SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA EL ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL “FIREFLY” EN EL DISEÑO DE FILTROS ELECTRÓNICOS-----	51
6.	APLICACIONES Y RESULTADOS DEL ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL “FIREFLY” EN EL DISEÑO ÓPTIMO DE FILTROS -----	54
7.	DISEÑO DE FILTROS ELECTRÓNICOS CHEBYSHEV -----	61
8.	OTROS TIPOS DE FILTROS -----	65
8.1.	TRANSFORMACIÓN A FILTRO PASA ALTAS -----	65
8.2.	TRANSFORMACIÓN A FILTRO PASABANDA -----	68
9.	CONCLUSIONES-----	70
10.	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS -----	72
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS -----	73
	BIBLIOGRAFÍA -----	74

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de bloques “ <i>FIREFLY ALGORITHM</i> ” parte 1.	24
Figura 2. Diagrama de bloques “ <i>FIREFLY ALGORITHM</i> ” parte 2	25
Figura 3. Filtro pasa bajas con sus características.....	27
Figura 4. Características de respuesta de las topologías de filtros.	28
Figura 5. Ubicación de los polos en un filtro Chebyshev	28
Figura 6. Respuesta de un filtro Chebyshev tipo I.....	29
Figura 7. Restricciones de diseño del filtro.....	31
Figura 8. Esquema de tolerancia.	33
Figura 9. Función de Ackley con $d=2$	39
Figura 10. Contorno de la función de Ackley.	39
Figura 11. Convergencia luciérnagas.....	40
Figura 12. Función Michalewicz con $d=2$	41
Figura 13. Contorno de la función de Michalewicz.	42
Figura 14. Convergencia luciérnagas.....	42
Figura 15. Función Rastrigin con $d=2$	44
Figura 16. Contorno de la función Rastrigin.	44
Figura 17. Función de De Jong con $d=2$	46
Figura 18. Contorno de la función de De Jong.....	46
Figura 19. Función Schaffer con $d=2$	48
Figura 20. Contorno de la función de Schaffer.....	48
Figura 21. Convergencia luciérnagas.....	49
Figura 22. Filtro pasa bajas RC- activo, extensión de la estructura Sallen Key de quinto orden.	54
Figura 23. Mejor solución vs. número de iteraciones (Filtro 1)	55
Figura 24. Mejor solución vs. número de iteraciones (Filtro 2)	56
Figura 25. Mejor solución vs. número de iteraciones (Filtro 3)	56
Figura 26. Comparación de filtros.....	58
Figura 27. Ganancia de los filtros.	58
Figura 28. Banda de transición	59
Figura 29. Filtro banda supresión.....	59
Figura 30. Respuesta al escalón.	60
Figura 31. Sobre pico.	60
Figura 32. Filtro Chebyshev de segundo orden, respuesta en frecuencia.	61
Figura 33. Filtro Chebyshev de segundo orden, respuesta en tiempo.	62
Figura 34. Filtro Chebyshev de quinto orden, respuesta en frecuencia.	62
Figura 35. Filtro Chebyshev de quinto orden, respuesta en tiempo.	63
Figura 36. Filtro Chebyshev de séptimo orden, respuesta en frecuencia.	63
Figura 37. Filtro Chebyshev de séptimo orden, respuesta en tiempo.	64

Figura 38. Respuesta en magnitud del filtro pasa altas de segundo orden y frecuencia 10kHz	65
Figura 39. Respuesta al escalón del filtro pasa altas de segundo orden.	66
Figura 40. Respuesta en magnitud del filtro pasa altas de quinto orden y frecuencia 5Hz.....	66
Figura 41. Respuesta al escalón del filtro pasa altas de quinto orden.	67
Figura 42. Respuesta en magnitud del filtro pasa bandas de segundo orden y frecuencia 10kHz	68
Figura 43. Respuesta al escalón del filtro transformado pasa bandas de segundo orden.	68
Figura 44. Respuesta en magnitud del filtro pasa bandas de quinto orden y frecuencia 5Hz.....	69
Figura 45. Respuesta al escalón del filtro transformado pasa bandas de quinto orden.	69

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Terminología del algoritmo.....	20
Tabla 2. Valores estándar usados para las pruebas.	37
Tabla 3. Características del equipo de cómputo.	37
Tabla 4. Parámetros usados para la toma de datos.....	38
Tabla 5. Resultados para Ackley	40
Tabla 6. Resultados para Michalewicz.....	43
Tabla 7. Resultados para Rastrigin.....	45
Tabla 8. Resultados para De Jong	47
Tabla 9. Resultados para Schaffer	49
Tabla 10. Resultados de la comparación entre algoritmo original y propuesto.	50
Tabla 11. Límites para los parámetros y su paso.....	51
Tabla 12. Resultados para $\beta_{min} = 0.2$ y $\gamma = 0.97$ variando α de 0.1 a 0.5.	52
Tabla 13. Resultados para $\beta_{min} = 0.2$ y $\alpha = 0.1$ variando γ de 0.8 a 1.	52
Tabla 14. Resultados para $\gamma = 0.8$ y $\alpha = 0.1$ variando β_{min} de 0.1 a 0.5.....	53
Tabla 15. Número de iteración y mejor solución de cada filtro	57
Tabla 16. Resultados de los componentes electrónicos de los cuatro filtros.	57
Tabla 17. Resultado de polos para el filtro de segundo orden.	62
Tabla 18. Resultado de polos para el filtro de quinto orden.	63
Tabla 19. Resultado de polos para el filtro de séptimo orden.....	64

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO OPTIMO DE FILTROS ELECTRÓNICOS (CHEBYSHEV) MEDIANTE EL ALGORITMO DE LA LUCIERNAGA VIRTUAL (FIREFLY).¹

AUTORES: Andrés Leonardo Rodríguez Peña y Kildar Gaona Piamonte.²

PALABRAS CLAVE: FIREFLY ALGORITHM, algoritmo, optimización, función objetivo, filtros Chebyshev.

CONTENIDO:

En el presente trabajo de investigación se hizo uso del algoritmo metaheurístico, conocido como algoritmo de la luciérnaga "FIREFLY", con el fin de realizar un diseño óptimo de filtros electrónicos chebyshev que cumpla con las especificaciones dadas por el diseñador, lo cual nos permite encontrar la función de transferencia con sus respectivos polos que mejor se acoplan a estas exigencias.

Inicialmente se presentan los resultados al comparar diferentes funciones de prueba con el algoritmo de la luciérnaga "FIREFLY", con el fin de verificar la eficacia del algoritmo en número de iteraciones y precisión. Los resultados fueron contrastados con publicaciones de otros algoritmos de optimización ya conocidos.

Se muestran los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de las luciérnagas FIREFLY en el diseño óptimo de filtros electrónicos chebyshev, al contrastarlo con un ejemplo de aplicación, se hacen diferentes comparaciones graficas con los resultados arrojados.

Luego se muestra el uso de este algoritmo en el diseño de filtros pasa bajos chebyshev haciendo comparaciones para mostrar el buen desempeño de este algoritmo.

Finalmente a partir de cambios de variables se transformaron filtros pasa bajos a filtros pasa altos y pasa banda para así corroborar el uso del algoritmo en cualquier tipo de filtros.

¹ Trabajo de grado

² Facultad: Fisicomecánicas Escuela: Ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones Director: Carlos Rodrigo Correa Cely Codirector: Iván Mauricio Amaya.

ABSTRACT

TITLE: OPTIMAL DESIGN OF ELECTRONIC FILTERS (CHEBYSHEV) BY THE VIRTUAL FIREFLY ALGORITHM.³

AUTHORS: Andrés Leonardo Rodríguez Peña and Kildar Gaona Piamonte.⁴

KEY WORDS: FIREFLY ALGORITHM, algorithm, optimization, objective function, Chebyshev filters.

CONTENT:

For the current research, we made use of the metaheuristic algorithm, known as the firefly algorithm, in order to make an optimal design of the Chebyshev electronic filters so it meets the qualifications given by the designer, which allows us to find transfer function with their respective poles that better engage to these requirements.

Initially, the results of the comparisons between different test functions with the firefly algorithm are presented, in order to verify the effectiveness of the algorithm in accuracy and in its number of interactions. The results were contrasted with the publications of other optimizations of algorithm known.

The results of applying the firefly algorithm for optimize the design of Chebyshev electronic filters are shown, and contrasted with an example of application, different graphic comparisons are made with the results exposed.

Subsequently, the use of this algorithm in the design of low pass Chebyshev filters is exposed, giving comparisons of the good performance of this algorithm.

Finally, by variable changes, low pass filters are converted into high pass filters and band filters, corroborating the use of this algorithm in any type of filters.

³ Bachelor thesis

⁴ Faculty: Physicomechanics. School: Electric, Electronic and the Telecommunications Engineering. Advisor: Carlos Rodrigo Correa Cely. Coadvisor: Iván Mauricio Amaya.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos físicos están presentes en nuestra vida cotidiana, y se modelan con la ayuda de ecuaciones diferenciales. Entre las múltiples aplicaciones de estos fenómenos se encuentra la de restringir el paso de señales en un rango de frecuencias determinado, y su importancia es tal que se observa en prácticamente todos los dispositivos electrónicos actuales.

De acuerdo a su respuesta en frecuencia, los filtros se clasifican en pasa bajas, pasa altas, pasa banda y rechaza banda, y cada uno tiene una función de transferencia característica que incluye polos (denominador) y ceros (numerador). Adicionalmente, los filtros se pueden clasificar de acuerdo a su topología, donde destacan los de tipo Chebyshev por brindar una mejor caída en frecuencia a cambio de un rizado en alguna de sus bandas.

Por su parte, y debido a múltiples razones, actualmente existen diversos métodos de optimización, muchos de ellos basados en modelos de sistemas biológicos o del comportamiento de especies animales. Algunos ejemplos incluyen el algoritmo de colonia de hormigas, el algoritmo del murciélago, y el algoritmo de la luciérnaga, entre otros.

Las exigencias de nuestro entorno requieren de diseños óptimos en múltiples campos de ingeniería, y este caso no es la excepción. Por tanto, el presente trabajo de grado muestra el diseño óptimo de filtros analógicos pasa bajas, de tipo Chebyshev. Se incluyen restricciones para cumplir especificaciones de diseño dadas, y además se muestra que este algoritmo puede ser usado para el diseño de otros tipos de filtro (pasa altas y pasa bandas). Este informe muestra la aplicación particular del algoritmo de la luciérnaga virtual (FIREFLY), propuesto en el año 2008 por Xin.-She Yang [1], y empieza por describir el trabajo de grado (sección 2), para pasar a los fundamentos teóricos (sección 3), luego a la metodología usada (sección 4), después a la validación de las funciones de

prueba con el algoritmo (sección 5), y a la identificación de parámetros de ejecución adecuados (sección 6). En la sección 7 inician los resultados, tomando un ejemplo de la literatura para fines comparativos. Posteriormente, se diseñan filtros Chebyshev de distinto orden, que se comparan con filtros diseñados utilizando la función cheby1 de Matlab (sección 8). En la sección 9 se muestran filtros pasa altas y pasa banda a partir de los resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo. Finalmente, las secciones 10 y 11 muestran las conclusiones y las recomendaciones para trabajos futuros.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO⁵

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los filtros son una componente muy importante en la electrónica actual, y se utilizan en áreas como las comunicaciones, el control automático y el procesamiento digital de imágenes [2]. Su adecuado diseño es crucial, tanto así que distintos software comerciales han implementado opciones para su diseño. MATLAB®, por ejemplo, incluye el diseño de filtros tanto digitales como analógicos, lo que permite al usuario ahorrar tiempo y esfuerzo al tener una forma cómoda y eficaz de diseñar un filtro.

Con el desarrollo de nuevas metodologías y algoritmos de cómputo, como lo son los algoritmos metaheurísticos, se ha logrado demostrar que éstos realizan una mejora en la parte computacional. El presente trabajo de grado aborda la implementación del algoritmo de la luciérnaga “FIREFLY”, para encontrar la función de transferencia que modela un filtro, dando al usuario la libertad de tener sus propias especificaciones en el diseño.

⁵ Corresponde a una contribución intelectual consensuada entre los estudiantes Andrés Rodríguez y Kildar Gaona, con el profesor Rodrigo Correa y el ingeniero Iván Amaya.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la viabilidad de implementar el algoritmo metaheurístico de la luciérnaga virtual (FIREFLY) para el diseño óptimo de filtros electrónicos (Chebyshev).

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Implementar el algoritmo de optimización de la luciérnaga virtual “FIREFLY” en una plataforma comercial.(ver cap. 3)
2. Aplicar el algoritmo en funciones de prueba que ya se hayan solucionado por otros métodos. (ver cap. 4)
3. Diseñar un filtro electrónico Chebyshev con la ayuda del algoritmo y como ejemplo ilustrativo de aplicación. (ver cap. 6)

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. TERMINOLOGÍA

En esta sección se establecen las variables con su respectivo significado (Tabla 1), lo cual permite comprender el desarrollo del proyecto.

Tabla 1. Terminología del algoritmo.

N	Número de luciérnagas
β	Coefficiente de atracción entre las luciérnagas
γ	Coefficiente de absorción de la luz
α	Coefficiente de números al azar, define el paso en el movimiento de las luciérnagas
Δ	Coefficiente de reducción, disminuye la intensidad de la atracción a medida que las luciérnagas se acercan a la solución.
Iteración	Número de iteraciones o veces que se evalúa la función

2.2. ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL “FIREFLY”

El algoritmo de la luciérnaga virtual “FIREFLY” fue propuesto en el año 2008 por Xin-She Yang, y está inspirado en el comportamiento de la atracción entre luciérnagas. Xin-She Yang [1] formuló este algoritmo asumiendo los siguientes puntos:

1. Todas las luciérnagas son unisex, de modo que una luciérnaga se sentirá atraída por todas las demás luciérnagas.
2. El atractivo es proporcional a su brillo, y para cualquier par de luciérnagas, la menos brillante será atraída por la más brillante, sin embargo, el brillo disminuye si aumenta la distancia.
3. Si no hay luciérnaga más brillante que una determinada luciérnaga, ésta se moverá al azar.

En la formulación del algoritmo existen dos temas importantes: la variación de la intensidad de luz y la atractividad; se podría decir que para un problema de optimización máxima, el brillo de la luciérnaga es proporcional a la función objetivo.

El algoritmo inicialmente genera una población de luciérnagas dispersas al azar en un espacio definido, cada una de ellas presenta una luminosidad definida de acuerdo a la función objetivo, de tal forma que la luciérnaga con una mayor luminosidad atrae a las demás luciérnagas convergiendo a la solución.

Para el desarrollo del algoritmo se parte de parámetros recomendados por la literatura [1].

$$\Delta = 0.97; \alpha = 0.2; \gamma = 1; \quad (1)$$

Se definen las posiciones $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ al azar de las respectivas luciérnagas en el espacio definido por Lb y Ub . Inicialmente, tienen luminosidad de acuerdo a la función objetivo:

$$Lightn(i) = funobjeti4(ns(i,:), d); \quad (2)$$

Después de definir los valores correspondientes a la luminosidad se emplea la ayuda de un vector auxiliar para poder ordenar las luciérnagas:

$$Lightn(i) = Lighto(i), \quad (3)$$

Para definir su nueva posición se crea un vector el cual corresponde a la atracción. Para ello se hace un ciclo comparativo entre la luminosidad de cada luciérnaga.

En (4) se define la distancia desde la luciérnaga a comparar y las demás.

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_1^d (x_i(i) - x_i(j))^2} \quad (4)$$

Tomando como base [1] se define β_0 , γ y Δ como constantes, las cuales caracterizan el comportamiento entre luciérnagas.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma * r_{ij}^2} \quad (5)$$

$$x_i = x_i + \beta(x_i - x_j) + \alpha \left(rand - \frac{1}{2} \right), \quad (6)$$

Donde i es la posición de la luciérnaga a comparar y j corresponde a las demás posiciones de las luciérnagas. Para poder reducir la movilidad se reduce α en un factor de Δ (7).

$$\alpha_{k+1} = \Delta \alpha_k \quad (7)$$

Donde k corresponde a la iteración presente. Para mejorar la convergencia del algoritmo se modifican las ecuaciones (5) y (7), definiendo nuevos parámetros (8).

$$\beta_{min} = 0.2; \alpha = 0.2; \gamma = 0.97; \quad (8)$$

Se define un nuevo Δ , variable dependiente del número de iteraciones (9).

$$\Delta = 1 - \left(\frac{10^{-4}}{0.9} \right)^{\frac{1}{iteración}} \quad (9)$$

Se definen nuevamente α y β de la siguiente forma:

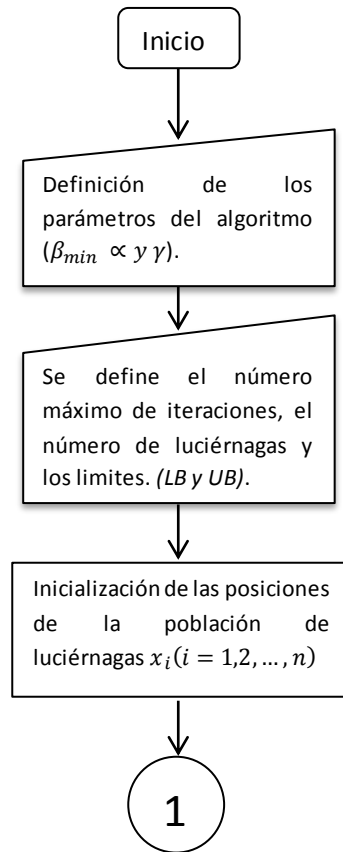
$$\alpha_{k+1} = (1 - \Delta) \alpha_k \quad (k = 1, 2, \dots, iteración) \quad (10)$$

$$\beta_0 = 1 \quad (11)$$

$$\beta = (\beta_0 - \beta_{min}) e^{-\gamma * r^2} + \beta_{min} \quad (12)$$

Para luego obtener la ecuación del movimiento de las luciérnagas (6), las nuevas posiciones de las luciérnagas se delimitan en el espacio definido inicialmente y vuelve a empezar el ciclo. El siguiente diagrama de bloques da una explicación del comportamiento del algoritmo de la luciérnaga virtual "FIREFLY".

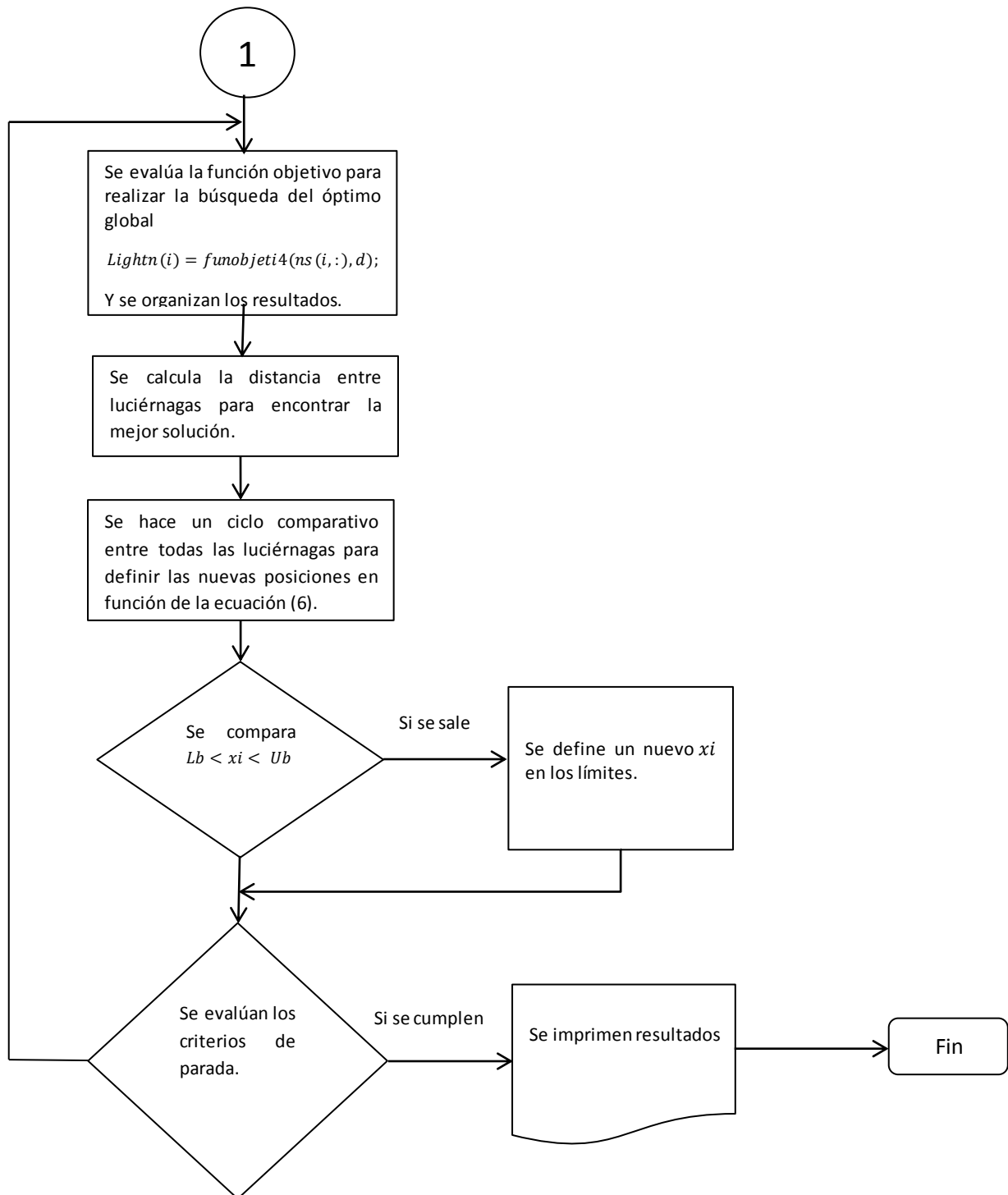
Figura 1. Diagrama de bloques “*FIREFLY ALGORITHM*” parte 1.



En la parte 1 del diagrama de bloques se definen los parámetros con los cuales empieza el movimiento de la luciérnaga (Ver Figura 1).

A continuación en la parte 2 del diagrama de bloques se explica el comportamiento del algoritmo y sus criterios para encontrar la solución (Ver Figura 2).

Figura 2. Diagrama de bloques "FIREFLY ALGORITHM" parte 2



2.3. FILTROS ANALÓGICOS

Los filtros son muy importantes en aplicaciones electrónicas, y su propósito fundamental es restringir el paso de las señales en un rango de frecuencias determinado. Los filtros se representan mediante su función de transferencia $H(s)$, la cual se expresa en términos de ganancia o atenuación como se observa en la ecuación (13), donde $V_i(s)$ es la entrada del filtro y $V_o(s)$ es la salida.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \quad (13)$$

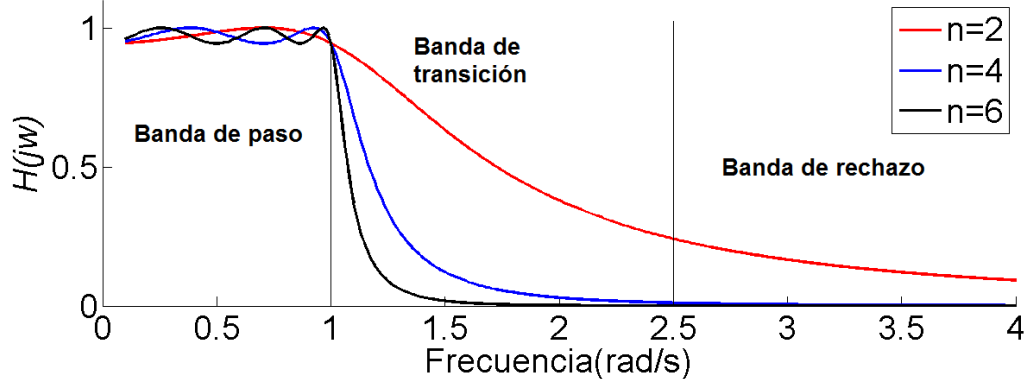
En cuanto a restricción en frecuencia, existen cuatro tipos de filtros: pasa bajas, pasa altas, pasa banda, y rechaza banda. Es de vital importancia tener en cuenta que a partir de un filtro pasa bajas se pueden obtener los otros tres tipos de filtros. Éstos, son aquellos que dejan pasar señales con una ganancia a frecuencias menores que la frecuencia de corte W_C , y están caracterizados por cinco parámetros:

- Máxima atenuación en la banda de paso (A_{PB})
- Rizado de la banda de paso o ancho de rizado (RW)
- Mínima atenuación en la banda de rechazo (A_{SB})
- Frecuencia de esquina de la banda de paso (W_{PB})
- Frecuencia de esquina de la banda de rechazo (W_{SB})

La banda de paso de frecuencias está dada hasta la frecuencia de corte W_C , y corresponde a la frecuencia en la cual la señal posee una ganancia de $\sqrt{2}$ ($-3dB$) (para ganancia unitaria). Existe una banda entre la banda de paso y la banda de rechazo conocida como la banda de transición, la cual es producida debido a que en la práctica, la respuesta ideal de un filtro no existe. Cada polo de la función de transferencia introduce en la banda de transición una caída de 20 dB/Década o 6 dB/Octava; por lo tanto si la función de transferencia posee dos polos tendrá una

caída de 40 dB/Década en la región de transición. En la Figura 3 se muestra el ejemplo de un filtro pasa bajas con todas sus características.

Figura 3. Filtro pasa bajas con sus características

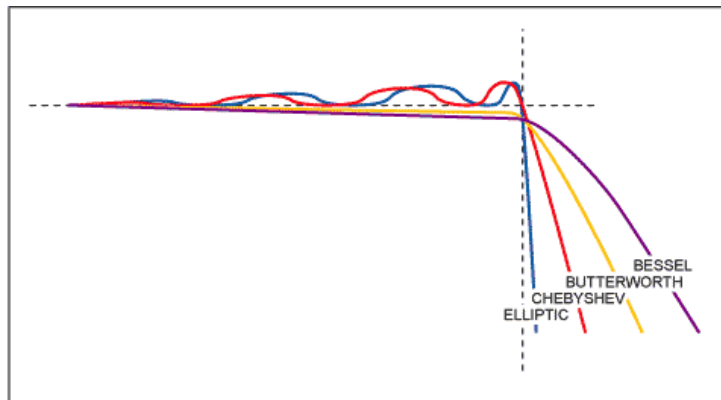


Para que la función de transferencia sea estable debe poseer todos sus polos en el lado izquierdo del plano complejo. En el presente proyecto de grado se tratarán funciones de transferencia de filtros conformados únicamente por polos. El diseño de filtros se caracteriza por tener algunas topologías habituales como:

- Filtro Butterworth
- Filtro Chebyshev
- Filtro Bessel
- Filtro Elíptico

Cada topología de filtro posee distintas características, como el rizado en la banda de paso o banda de supresión, la caída en la banda de transición, entre otros. Estas características hacen que alguna topología sea mejor respecto a otra dependiendo de la aplicación a realizar, en la Figura 4 se muestran las respuestas típicas para cada topología. En el presente proyecto se realiza el diseño óptimo de filtros electrónicos Chebyshev con la ayuda del algoritmo de la luciérnaga virtual “FIREFLY”.

Figura 4. Características de respuesta de las topologías de filtros.

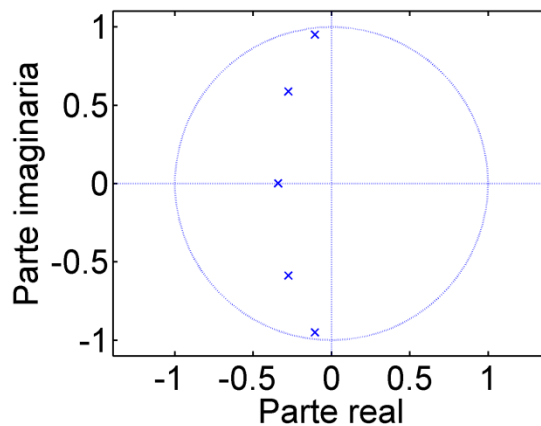


Fuente: [3]

2.4. FILTRO CHEBYSHEV

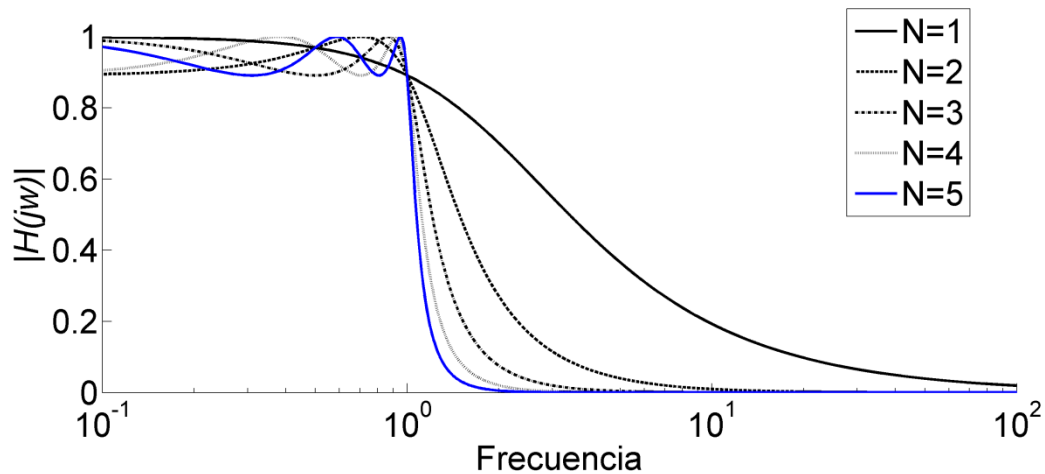
Los filtros Chebyshev son nombrados en honor a Pafnuti Chebyshev debido a que la función matemática para calcular los polos utiliza los denominados polinomios de Chebyshev, con este tipo de filtros se obtiene una caída más pronunciada en su respuesta en frecuencia, pero genera un rizado en su banda de paso o rechazo dependiendo del filtro Chebyshev que se diseñe (tipo I o tipo II). Los polos de la función de transferencia para este filtro se distribuyen sobre una elipse y el número de ondulaciones está definido como la mitad de estos polos (Figura 5).

Figura 5. Ubicación de los polos en un filtro Chebyshev



Los filtros tipo II presentan polos y ceros, tienen una caída constante en la banda de transición y un rizado en su banda de rechazo. Los filtros tipo I únicamente tienen polos, presentan un rizado constante en la banda de paso y una caída constante en la banda de transición. En el presente proyecto se diseñan filtros Chebyshev tipo I como el que se observa en la Figura 6.

Figura 6. Respuesta de un filtro Chebyshev tipo I



La función de transferencia de un filtro Chebyshev está dada por (14).

$$|H(jw)| = \frac{K_{pb}}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(W/W_c)}} \quad (14)$$

Dónde:

K_{pb} = Ganancia del filtro en DC

W_c = Frecuencia de corte

ε = Constante que determina la amplitud del rizado

C_n = Polinomio de Chebyshev el cual está dado por (15)

$$C_n(w) = \cos(n \arccos(w)) \quad (15)$$

Los polos del filtro Chebyshev están dados por (16).

$$1 + \varepsilon^2 \cos^2 \left[n \arccos \left(\frac{Sk}{j} \right) \right] = 0, \quad (16)$$

donde n es el orden del filtro.

2.5. DISEÑO COMPUTACIONAL DE FILTROS ELECTRÓNICOS

Para realizar el diseño del filtro Chebyshev de manera computacional, se debe transformar la ecuación de la función de transferencia de un filtro (17) en una función adecuada la cual pueda ser utilizada como función objetivo, y además debe estar sujeta a restricciones en el diseño, que en este caso son los límites en las bandas de paso y de rechazo, en la frecuencia de corte, en el rizado que presenta el filtro y además en el esquema de tolerancia de la Figura 7.

$$H(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (17)$$

Debido a que los filtros que vamos a manejar no presentan ceros, se toma la función de transferencia dada en (17) y se transforma en una función de transferencia adecuada como la dada en (18), la cual está expresada en función de una ganancia en DC y sus respectivos polos que definen el orden del filtro pasa bajas.

$$H(s) = \frac{A_{dc}}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n)} \quad (18)$$

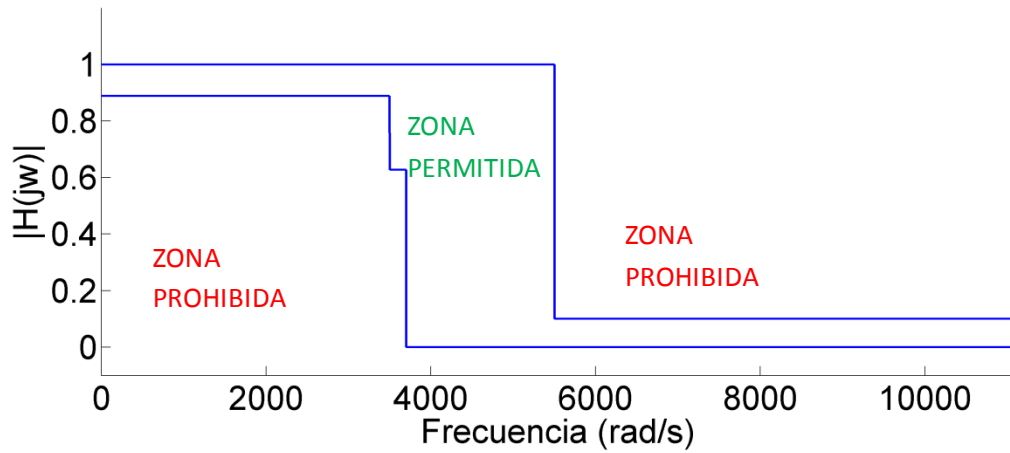
Para cumplir con las restricciones se evalúa la magnitud de la función de transferencia en la frecuencia de corte W_c dada por (19), se debe garantizar una

atenuación de -3dB; así se obtienen unos polos que cumplen las restricciones en frecuencia. Para garantizar que los polos encontrados son los polos que permiten una respuesta de filtro Chebyshev, se evalúan en la ecuación (20).

$$|H(\omega c)|^2 = \left| \frac{A d c}{(j\omega c - p_1)(j\omega c - p_2) \dots (j\omega c - p_n)} \right|^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad (19)$$

$$1 + \varepsilon^2 \cos^2 \left[n \cos^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \right] = 0 \quad (20)$$

Figura 7. Restricciones de diseño del filtro



3. METODOLOGÍA PARA EL USO DEL ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA “FIREFLY”

En esta sección abordaremos las pautas utilizadas para el uso del algoritmo de la luciérnaga virtual “FIREFLY”.

3.1. CRITERIOS DE PARADA

Los criterios de parada son una parte muy importante cuando se desea que el algoritmo pueda converger hacia una solución óptima; ya que cuando estos se cumplan el algoritmo se detiene. Se utilizaron dos criterios de parada los cuales son inclusivos [4], lo que quiere decir que se deben cumplir ambos para que se detenga el algoritmo. Los criterios de parada son los siguientes:

- Primer criterio: Se compara la mejor solución encontrada en la presente iteración con la mejor solución de la iteración anterior por medio de una diferencia. Si luego de N iteraciones esta diferencia es menor a un valor de referencia ε (error); se pasa a validar el segundo criterio de parada.
- Segundo criterio: Este criterio define que si el 25% de las luciérnagas usadas en el algoritmo se encuentran a una distancia ε_2 (error2) de la luciérnaga de más brillo, la cual equivale a la solución más óptima, se detiene el algoritmo.

3.2. FUNCIÓN OBJETIVO

Para implementar un algoritmo, sin importar sus características, siempre es necesario diseñar una función objetivo que modele apropiadamente el problema. En nuestro caso, es necesario definir ciertas características y limitaciones que van a afectar en gran proporción las posibles soluciones. En primera instancia se debe garantizar la frecuencia de corte W_{3dB} , se usa la magnitud de la función de transferencia del filtro (19) debido a que en W_{3dB} la magnitud máxima se reduce en $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

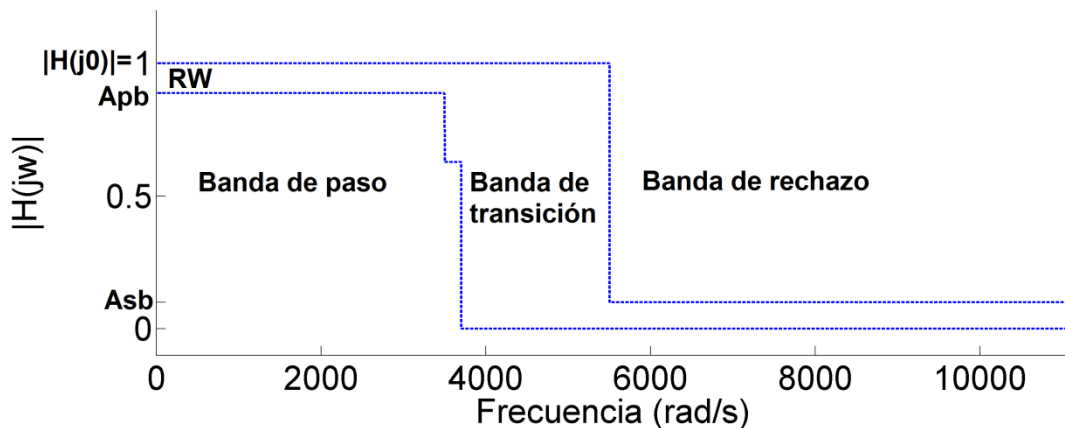
$$|H(j\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}} |H(0)| \quad (21)$$

Haciendo uso de la expresión (21) se caracterizó la función objetivo [6], donde generalmente la ganancia $|H(j0)|$ es igual a 1.

$$f(x) = ||H(j\omega_c)|^2 - 0.5|H(j0)|^2|^2 \quad (22)$$

Adicionalmente se incluyeron las restricciones de la Figura 8, dando como resultado un esquema de tolerancia que permite controlar la banda de paso, la banda de transición y la banda de supresión.

Figura 8. Esquema de tolerancia.



3.3. DISEÑO DEL ESQUEMA DE TOLERANCIA

Para el diseño del esquema de tolerancia se definieron los límites y ganancias para cada banda. La banda de paso está delimitada por la ganancia máxima $|H(j0)|$ y por A_{pb} , donde $A_{pb} = |H(j0)| - RW$, para garantizar que el rizado máximo sea igual a RW . Se implementaron dos funciones para representar el error con respecto a cada límite y se hace un barrido en frecuencia de 0 a W_s .

$$Error_{bp_{sup}} = (|H(jw)| - |H(j0)|) \leq 0 \quad (23)$$

$$Error_{bp_{inf}} = (A_{pb} - |H(jw)|) \leq 0 \quad (24)$$

En la banda de transición se mantienen el límite superior pero el inferior varia, de w_n a w_c igual a $\frac{1}{\sqrt{2}}$ y de w_c a w_n igual a 0.

$$Error_{bt_{sup}} = (|H(jw)| - |H(j0)|) \leq 0 \quad (25)$$

$$Error_{bt_{inf}} = \frac{|H(j0)|}{\sqrt{2}} - |H(jw)| \leq 0 \quad w_n < w < w_c \quad (26)$$

$$Error_{bt_{inf}} = 0 \quad w_c < w < w_s \quad (27)$$

La banda de supresión está delimitada por A_{sb} en el límite superior.

$$Error_{bs_{sup}} = (|H(jw)| - A_{sb}) \leq 0 \quad (28)$$

Para la implementación del esquema de tolerancia se tuvo en cuenta la frecuencia de paso que muestrea la señal, con el objetivo de restringirla adecuadamente, equilibrando tiempo de cómputo y resultados.

3.4. PARÁMETROS DE PESO

En el diseño de filtros es difícil cumplir exactamente todos los criterios del diseñador y por lo tanto se adecuaron parámetros de peso para cumplir principalmente unas restricciones.

$$\begin{aligned}
 f(x) = & (W_0||H(j\omega_c)|^2 - 0.5|H(j0)|^2|)^2 + (W_1Error_{bp_{sup}})^n \\
 & + (W_2Error_{bp_{inf}})^n + (W_3Error_{bt_{sup}})^n + (W_4Error_{bt_{inf}})^n \\
 & + (W_5Error_{bs_{sup}})^n
 \end{aligned} \tag{29}$$

Para restringir la función se utiliza una potencia n ($n = 2$), que cambia el error exponencialmente y lo condiciona, de tal forma que:

$$\text{si } Error < 0 \text{ entonces } Error = 0. \tag{30}$$

En la ecuación (29) se denota la función objetivo completa teniendo en cuenta las restricciones.

3.5. TRANSFORMACIÓN DE FILTROS

Para la transformación del filtro pasa bajas a filtro pasa altas, se efectuó el cambio de la variable compleja original s por la variable compleja p ; de la forma mostrada en las ecuaciones (31) y (32).

$$s = \sigma + jw \quad (31)$$

$$p = u + jv \quad (32)$$

La transformación, entonces, queda definida por la ecuación (33).

$$s = \frac{1}{p} \quad (33)$$

Para efectuar este cambio es necesario tener una función de transferencia normalizada a 1 rad/s. Si se desea tener el filtro para otra frecuencia, luego de realizar la transformación con la función de transferencia normalizada, se des-normaliza el filtro a la frecuencia deseada.

La transformación de filtros pasa bajas a pasa bandas, usa el mismo principio pero en esta ocasión el cambio a realizar está dado por la ecuación (34).

$$s = \frac{1}{p} + p \quad (34)$$

4. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL

En esta sección se mostrará la validación de este algoritmo con funciones de prueba unimodales y multimodales.

4.1. FUNCIONES DE PRUEBA

Se realizó una serie de pruebas las cuales permitieron verificar la validez del algoritmo de la luciérnaga virtual "FIREFLY". En la Tabla 3 se muestran las características del equipo de cómputo usado para cada una de las pruebas. Se utilizaron los valores estándar, fueron tomados de la literatura [1], y son presentados en la Tabla 2. En la Tabla 4 se listan los parámetros usados de referencia para la toma de datos.

Tabla 2. Valores estándar usados para las pruebas.

β_{min}	0.2
γ	0.97
α	0.2
Número de veces que se corrió el algoritmo	100
Número de luciérnagas	20

Tabla 3. Características del equipo de cómputo.

PROCESADOR	Intel core i5 - 2.5[GHZ]
MEMORIA RAM	4[GB]
ALIMENTACIÓN	120[V] - 60[Hz]
SISTEMA OPERATIVO	Windows seven - 64 bits

Tabla 4. Parámetros usados para la toma de datos.

Función prueba	Dimensiones
Tiempo promedio	Tiempo promedio para encontrar la solución más optima
Mínimo promedio	Promedio del valor mínimo
Tiempo total	Tiempo total para encontrar las 100 posibles soluciones optimas
Número de evaluaciones	Número de evaluaciones promedio
Desviación estándar	Desviación estándar del número de evaluaciones
Distancia promedio (error)	Error promedio con respecto a la posición del mínimo global.

4.2. FUNCIÓN ACKLEY

La función Ackley está determinada por la ecuación (35), es multimodal, presenta muchos mínimos locales pero un mínimo global en $F(0) = 0$. Esta función está restringida de $-20 \leq x_i \leq 20$.

$$f(x) = 20 - 20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}\right) + e - \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos(2\pi x_i)\right) \quad (35)$$

En la Figura 9 se muestra la gráfica de esta función para $d = 2$. La Figura 10 muestra la gráfica de contorno de la función con las luciérnagas alrededor del mínimo global. En la Figura 11, se muestra una gráfica de contorno más detallada la cual permite observar la convergencia.

Figura 9. Función de Ackley con $d=2$.

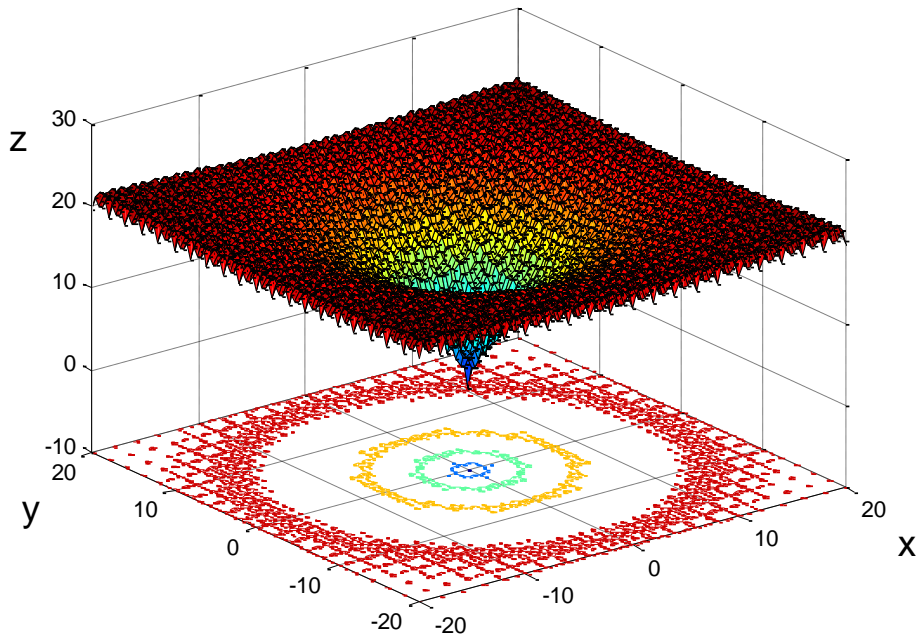


Figura 10. Contorno de la función de Ackley.

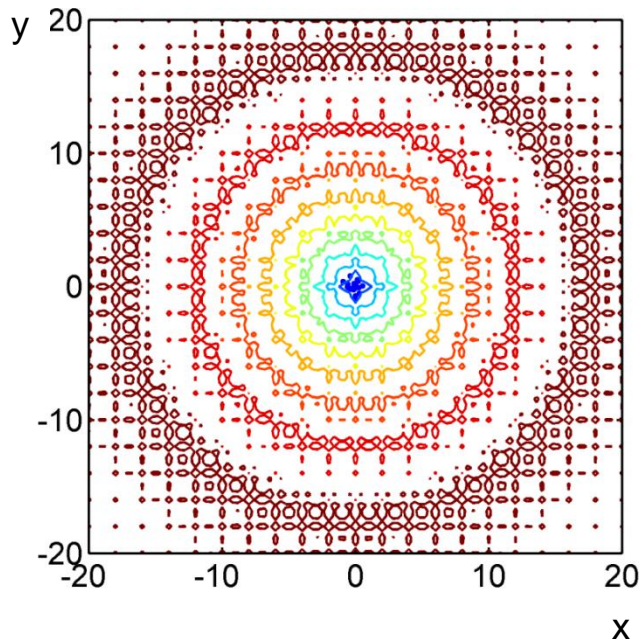
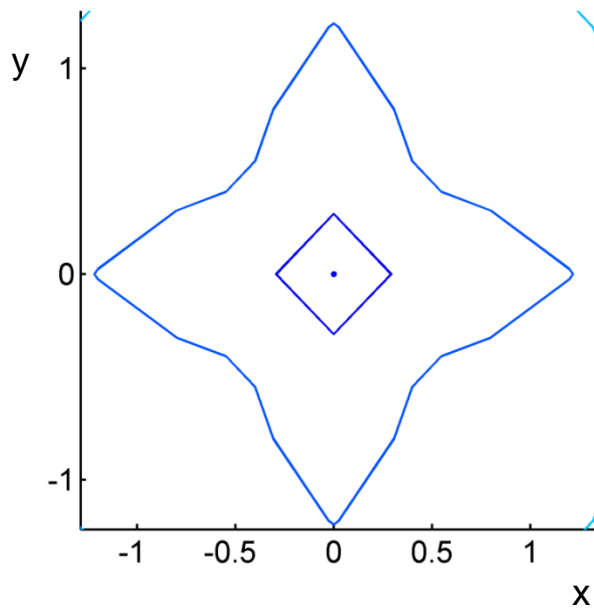


Figura 11. Convergencia luciérnagas.



En la Tabla 5 se muestran los resultados al evaluar la función Ackley para $d=2$ y $d=20$.

Tabla 5. Resultados para Ackley

Ackley	$d=2$	$d=20$
Tiempo promedio	3.97 [s]	4.82 [s]
Mínimo promedio	0.002	0.0115
Tiempo total	397.6 [s]	482.34 [s]
Número de evaluaciones	14910	17743
Desviación estándar	± 2908	± 2281
Distancia promedio (error)	$9.89e-6$	$7.83e-5$

De la Tabla 5 se destaca que el aumento de dimensiones dificulta la convergencia lo cual se ve reflejado en el aumento del error.

4.3. FUNCIÓN MICHALEWICZ

La función Michalewicz está determinada por la ecuación (36), es multimodal, la cantidad de mínimos locales depende de $d!$, y un parámetro m el cual define la precipitación de los valles y crestas; dependiendo de los valores de los parámetros se puede hacer más pronunciado un mínimo local.

Para nuestro caso $m = 10$ y dimensiones 2 y 20, hace que la función presente un mínimo local más pronunciado, el que se desea encontrar. Esta función está restringida de $-0 \leq x_i \leq \pi$.

$$f(x) = - \sum_{i=1}^d \sin(x_i) \sin^{2m} \left(\frac{ix_i^2}{\pi} \right) \quad (36)$$

En la Figura 12 se muestra la gráfica de esta función para $d = 2$. La Figura 13 muestra la gráfica de contorno de la función con las luciérnagas acercándose al mínimo local más pronunciado. En la Figura 14, se muestra una gráfica de contorno más detallada la cual permite observar la convergencia.

Figura 12. Función Michalewicz con $d=2$.

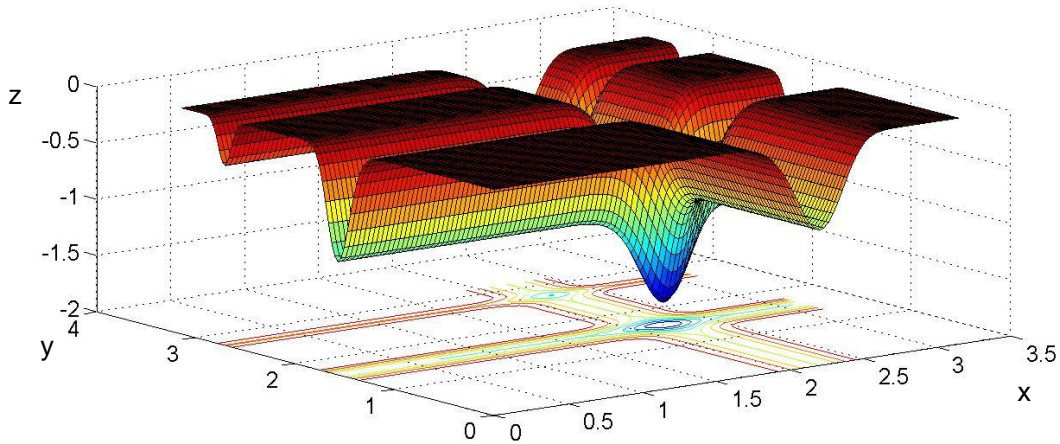


Figura 13. Contorno de la función de Michalewicz.

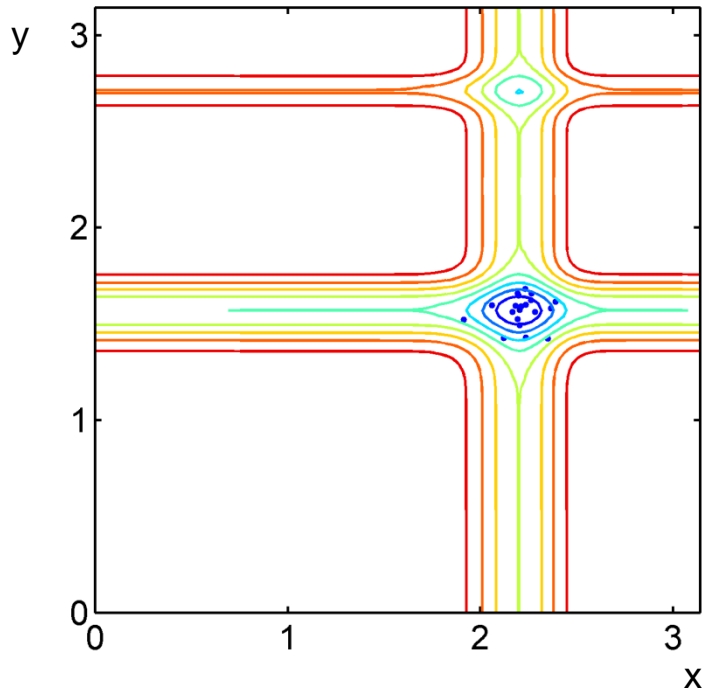
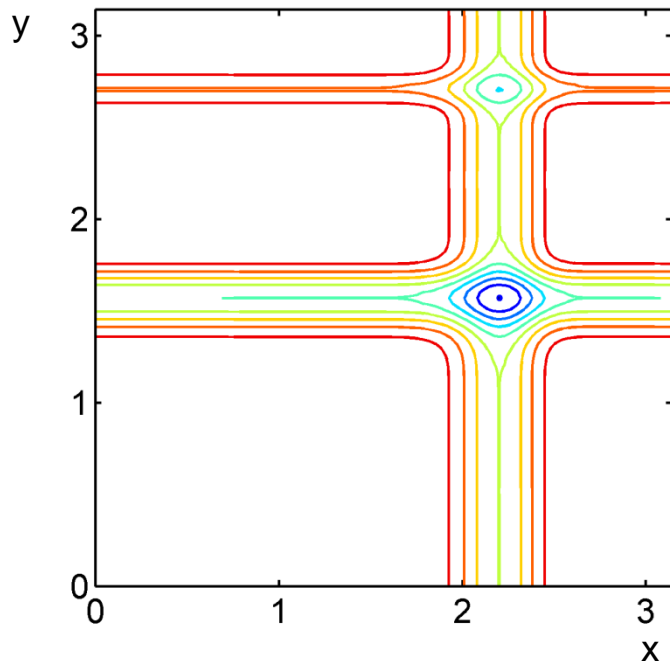


Figura 14. Convergencia luciérnagas.



En la Tabla 6 se muestran los resultados al evaluar la función Michalewicz para $d = 2$ y $d = 20$.

Tabla 6. Resultados para Michalewicz

Michalewicz	d=2	d=20
Tiempo promedio	2.89 [s]	3.998 [s]
Mínimo promedio	-1.8	-14.98
Tiempo total	289.69 [s]	399.8 [s]
Número de evaluaciones	14325	16712
Desviación estándar	±2688	±2302
Distancia promedio (error)	3.69e-5	0.029

En los resultados de la Tabla 6 se destacan el aumento del error y el número de evaluaciones debido al aumento de las dimensiones. En la Figura 13 y Figura 14 se observa la convergencia de los datos para diferente número de evaluaciones.

4.4. FUNCIÓN RASTRIGIN

La función Rastrigin está determinada por la ecuación (37), es multimodal y además es compleja ya que presenta muchos mínimos locales y un mínimo global en $x_i = [0,0,0]$. Está restringida de $-10 \leq x_i \leq 10$.

$$f(x) = 10d + \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)] \quad (37)$$

En la Figura 15 se muestra la gráfica de esta función para $d = 2$. La Figura 16 muestra la gráfica de contorno de la función con las luciérnagas en el mínimo global.

Figura 15. Función Rastrigin con $d=2$.

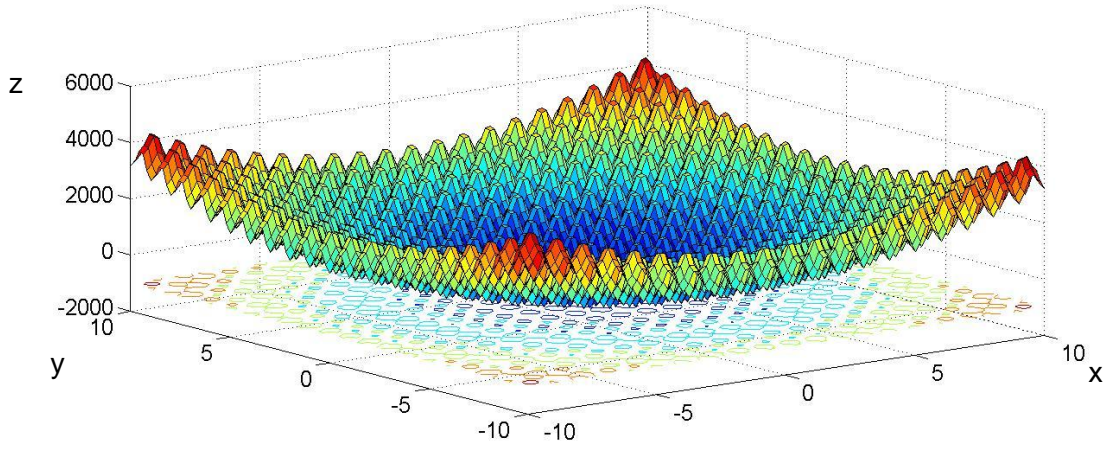
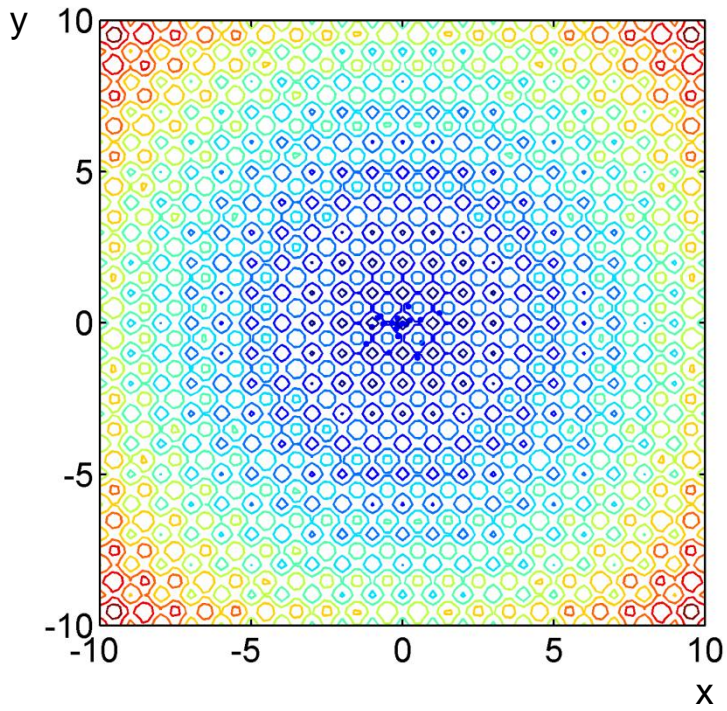


Figura 16. Contorno de la función Rastrigin.



En la Tabla 7 se muestran los resultados al evaluar la función Rastrigin para $d = 2$ y $d = 20$.

Tabla 7. Resultados para Rastrigin

Rastrigin	d=2	d=20
Tiempo promedio	5.025 [s]	6.85 [s]
Mínimo promedio	-399.8575	-3.46e4
Tiempo total	502.52 [s]	685.4 [s]
Número de evaluaciones	25146	33290
Desviación estándar	±5965	±5291
Distancia promedio (error)	2.07e-6	0.1194

En la Tabla 7 se destaca el gran aumento en el número de evaluaciones para encontrar las soluciones que se acoplen a las restricciones de parada. Esto es debido a la presencia de muchos mínimos locales que dificultan la rapidez para alcanzar los resultados óptimos.

FUNCIÓN DE JONG

La función De Jong está determinada por la ecuación (38), es monótona y tiene un mínimo global en $x_i = [0,0, \dots, 0]$; esta función es muy utilizada en la validación de algoritmos y está restringida desde $-10 \leq x_i \leq 10$.

$$f(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2 \quad (38)$$

En la Figura 17 se muestra la gráfica de esta función para $d=2$. La Figura 18 muestra la gráfica de contorno de la función con las luciérnagas en el mínimo global.

Figura 17. Función de De Jong con $d=2$.

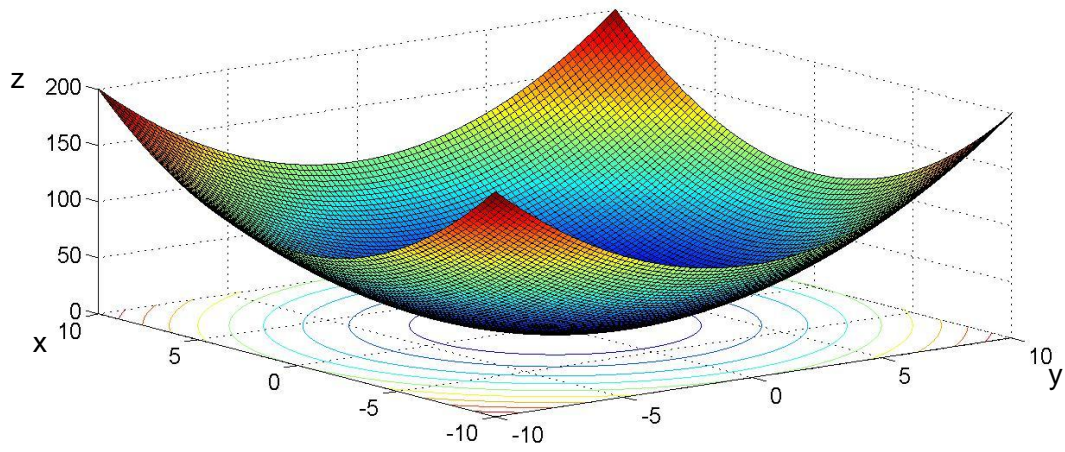
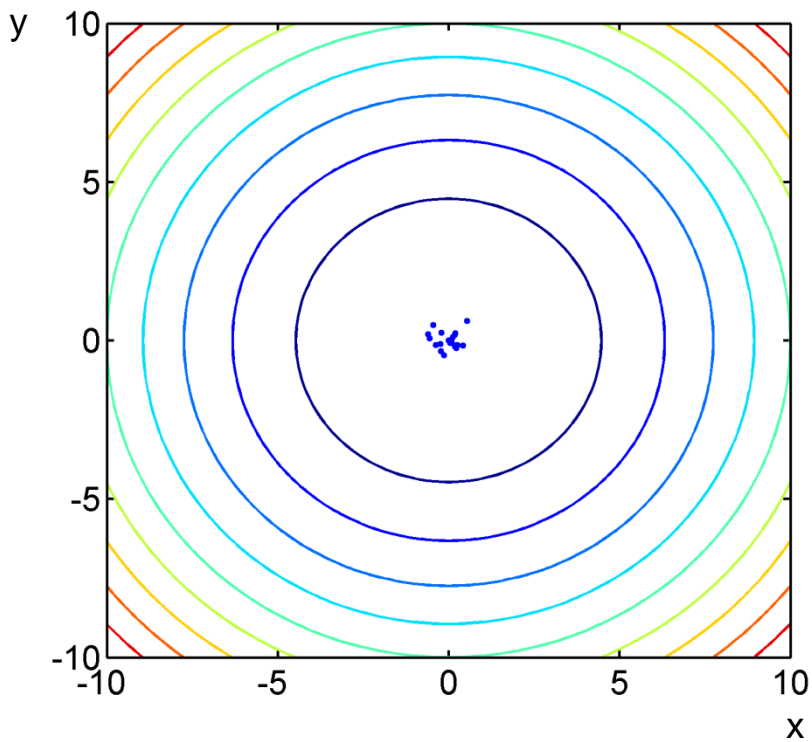


Figura 18. Contorno de la función de De Jong.



En la Tabla 8 se muestran los resultados al evaluar la función De Jong para $d = 2$ y $d = 20$.

Tabla 8. Resultados para De Jong

De Jong	d=2	d=20
Tiempo promedio	5.3889 [s]	7.2393 [s]
Mínimo promedio	4.8032e-5	4.523e-4
Tiempo total	538.89 [s]	723.93 [s]
Número de evaluaciones	25979	32016
Desviación estándar	±6522	±5136.1
Distancia promedio (error)	4.9652e-7	2.3741e-6

Debido al comportamiento de la función se puede denotar la poca variación del error al momento de aumentar las dimensiones.

4.5. FUNCIÓN SCHAFFER

La función Schaffer está determinada por la ecuación (39), es unimodal y presenta un mínimo global en $x_i = [0,0 \dots, 0]$; está restringida de $-20 \leq x_i \leq 20$.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{d-1} (x_i^2 + x_{i+1}^2)^{0.25} [\sin^2(50(x_i^2 + x_{i+1}^2)^{0.10}) + 1.0] \quad (39)$$

En la Figura 19 se muestra la gráfica de esta función para d=2. La Figura 20 muestra la gráfica de contorno de la función con las luciérnagas alrededor del mínimo global. En la Figura 21, se muestra una gráfica de contorno más detallada la cual me permite observar la convergencia.

Figura 19. Función Schaffer con $d=2$.

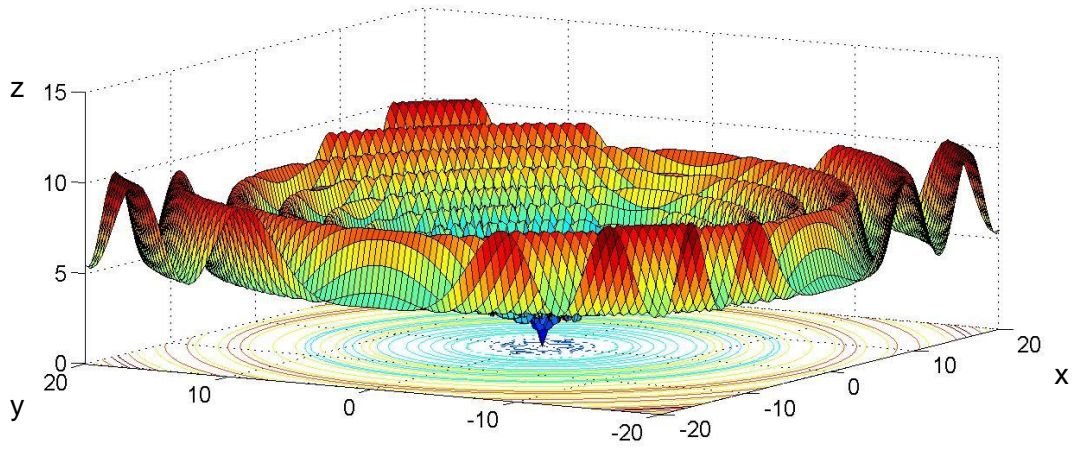


Figura 20. Contorno de la función de Schaffer.

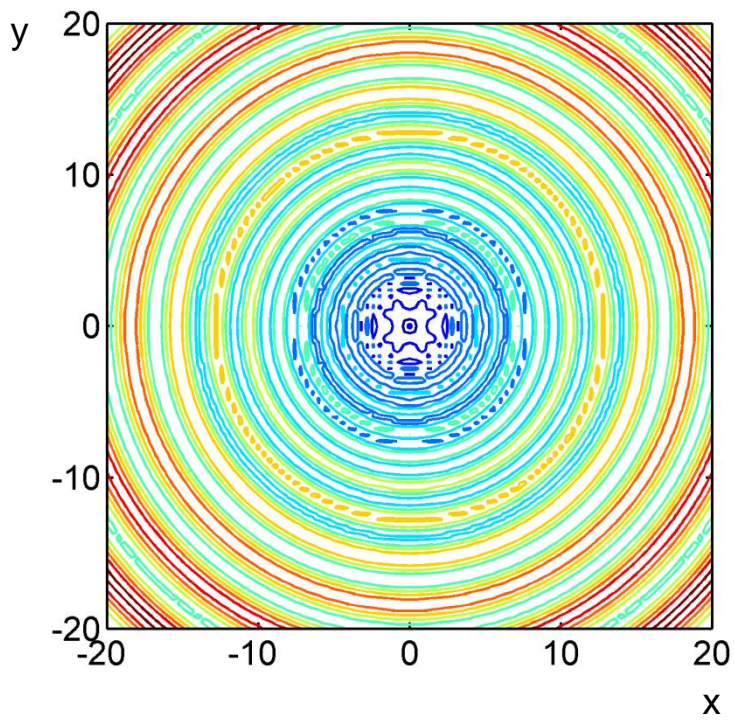
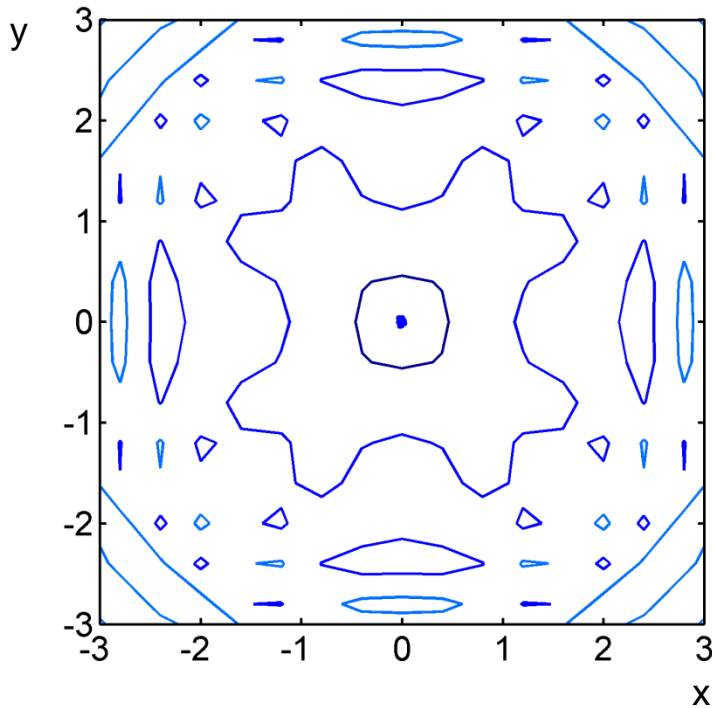


Figura 21. Convergencia luciérnagas.



En la Tabla 9 se muestran los resultados al evaluar la función Schaffer para $d=2$ y $d=20$.

Tabla 9. Resultados para Schaffer

Schaffer	$d=2$	$d=20$
Tiempo promedio	26.62 [s]	37.7802[s]
Mínimo promedio	2.53e-2	3.989
Tiempo total	2662 [s]	3778 [s]
Número de evaluaciones	54949	69352
Desviación estándar	± 12489	± 11043
Distancia promedio (error)	2.5857e-6	1.9e-3

De los resultados de la Tabla 9 se destaca una desviación estándar alta debido a sus regiones con mínimos locales, que afecta la convergencia por cada iteración y el tiempo pero, manteniendo un error aceptable.

4.6. COMPARACIÓN CON RESULTADOS ENCONTRADOS EN LA LITERATURA

En la sección anterior se validó el algoritmo con funciones de prueba y en esta sección se comparan los resultados con los reportados en la literatura para otros algoritmos. Para ser más específico, se compararon contra el algoritmo de enjambre de partículas (PSO), algoritmos genéticos (GA) y contra el algoritmo de la luciérnaga “FIREFLY” original (FA) propuesto por Xin-She Yang [5]. Se realizaron 100 simulaciones del algoritmo, y además se usaron los valores estándares mencionados anteriormente en la Tabla 2. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10, en la cual se puede observar el número de dimensiones usado para la prueba, el promedio del número de evaluaciones de la función y la desviación estándar.

Tabla 10. Resultados de la comparación entre algoritmo original y propuesto.

FUNCIÓN	ALGORITMO				
	GA [4]	PSO [4]	FA Yang [4]	ESTE TRABAJO	
Michalewicz	(d=16) 89325± 7914	(d=16) 6922 ± 537	(d=16) 3752 ± 725	(d=20) 16712 ± 2302	(d=2) 14325 ± 2688
Rastrigin	110523 ± 5199	79491 ± 3715	15573 ± 4399	(d=20) 33290 ± 5291	(d=2) 25146 ± 5965
De Jong	(d=256) 25412 ± 1237	(d=256) 17040 ± 1123	(d=256) 7217 ± 730	(d=20) 32016 ± 6522	(d=2) 25979 ± 5136
Ackley	(d=128) 32720 ± 3327	(d=128) 23407 ± 4325	(d=128) 5293 ± 4920	(d=20) 17743± 2908	(d=2) 14910 ± 2281

Fuente: [5] y autores

Cabe resaltar que en el momento de hacer la validación del algoritmo se conocía el valor de la solución, pero para los problemas a implementar en el diseño de filtros y la aplicación que se demuestra en los capítulos siguientes, no se conoce el valor de la solución. También es de gran importancia el número de luciérnagas escogidas y los valores de los parámetros ya que estos permitirán mejorar el desempeño del algoritmo.

Los resultados obtenidos se hicieron bajo los 2 criterios de parada enunciados en el numeral 3.1, se utilizó únicamente una tolerancia de $\varepsilon = 10^{-5}$ en la evaluación de la función de prueba en la Tabla 10 [5].

5. SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA EL ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL “FIREFLY” EN EL DISEÑO DE FILTROS ELECTRÓNICOS

El desempeño de los algoritmos de optimización generalmente depende de sus parámetros, por lo que es necesario realizar un barrido para seleccionar los más adecuados. Para destacar la eficiencia mediante la variación de los parámetros se seleccionaron dos referencias, el número de evaluaciones y la evaluación de la mejor solución. Con esto se pueden elegir los parámetros que ayuden con una convergencia más rápida y además que sea cercana a la mejor solución. Se seleccionaron las siguientes constantes de manera arbitraria de tal forma que el esquema de tolerancia tenga más peso sobre los demás criterios de diseño.

$$W_0 = 1 \quad W_1 = 100 \quad W_2 = 100 \quad W_3 = 100 \quad W_4 = 100 \quad W_5 = 10 \quad n = 2 \quad (40)$$

Se implementó el diseño de un filtro con frecuencia de corte en la banda de paso igual a 1 ($wn = 1$), frecuencia de corte en la banda de rechazo igual a 1.467 ($ws = 1.467$) y un paso de 0.001 en frecuencia, y se varió cada parámetro como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Límites para los parámetros y su paso.

Parámetros	Mínimo	Paso	Máximo
β_{min}	0.1	0.1	0.5
γ	0.8	0.05	1
α	0.1	0.1	0.5

Tabla 12. Resultados para $\beta_{min} = 0.2$ y $\gamma = 0.97$ variando α de 0.1 a 0.5.

Alpha	$f(x)$	Número iteraciones promedio	coeficiente
0.1	246.1999	2127	$523.67 \cdot 10^3$
0.2	384.6194	2814	$1082.3 \cdot 10^3$
0.3	340.6153	2635	$897.52 \cdot 10^3$
0.4	214.8246	2975	$639.10 \cdot 10^3$
0.5	346.3694	3189	$1104.6 \cdot 10^3$

α está relacionado con la movilidad de las luciérnagas, y cabe denotar que si es más pequeño, el número de iteraciones para encontrar la solución es menor. Para poder seleccionar los parámetros más adecuados se utiliza un coeficiente relacionando la solución y el número de iteraciones 41 . Teniendo en cuenta esto se seleccionó $\alpha = 0.1$ ya que este presenta un menor coeficiente de relación.

$$\text{Coeficiente} = f(x) \text{ número de iteraciones}$$

41

Tabla 13. Resultados para $\beta_{min} = 0.2$ y $\alpha = 0.1$ variando γ de 0.8 a 1.

Gamma	$f(x)$	Número iteraciones promedio	coeficiente
0.8	216.8178	2268	$491.83 \cdot 10^3$
0.85	544.0176	2059	$1120.2 \cdot 10^3$
0.9	384.0335	2016	$774.33 \cdot 10^3$
0.95	456.5644	1808	$825.51 \cdot 10^3$
1	331.3385	2155	$714.2 \cdot 10^3$

Tabla 14. Resultados para $\gamma = 0.8$ y $\alpha = 0.1$ variando β_{min} de 0.1 a 0.5

Beta _{min}	$f(x)$	Número iteraciones promedio	Coeficiente
0.1	375.2672	1689	$634.01 \cdot 10^3$
0.2	265.7829	2064	$548.58 \cdot 10^3$
0.3	319.8316	2070	$661.96 \cdot 10^3$
0.4	426.894	2159	$922.01 \cdot 10^3$
0.5	334.4416	1701	$568.99 \cdot 10^3$

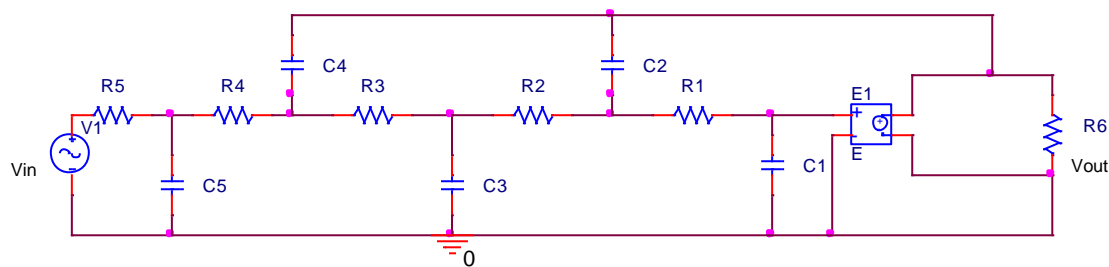
Se seleccionó $\gamma = 0.8$ y $\beta_{min} = 0.2$ teniendo los mismos criterios que en la selección anterior.

6. APLICACIONES Y RESULTADOS DEL ALGORITMO DE LA LUCIÉRNAGA VIRTUAL “FIREFLY” EN EL DISEÑO ÓPTIMO DE FILTROS

Como modelo de comparación se tomó el ejemplo 7.2 de la referencia [7], donde se utiliza la aproximación de mínimos cuadrados para el diseño de un filtro Chebyshev de quinto orden.

Este ejemplo se basa en el diseño de un filtro RC-activo de estructura Sallen Key (Figura 22), con un rizado de 0.5 dB y una frecuencia de paso $f_n = 3.5 \text{ kHz}$ teniendo como base que la ganancia del amplificador es ideal e igual a dos.

Figura 22. Filtro pasa bajas RC- activo, extensión de la estructura Sallen Key de quinto orden.



A partir de la función de transferencia se implementó la función objetivo correspondiente, de tal forma que los componentes electrónicos representen las dimensiones de la función objetivo con el fin de encontrar directamente los valores de las resistencias y capacitores. Para lograr este objetivo se adecuó un espacio de valores para cada componente, es decir, se decidió mantener los componentes electrónicos en un orden correspondiente, en este caso las resistencias en $[\text{k}\Omega]$ y los capacitores en $[\text{nF}]$.

Se seleccionaron arbitrariamente las constantes de peso (42), para así delimitar el ancho de la banda paso, garantizar el ancho en la banda de transición y priorizar la banda de rechazo (W_5). Además, se diseñaron tres filtros, cada uno con criterios

diferentes a optimizar, con el objetivo de poder comparar con los resultados planteados en [7].

$$W_0 = 10 \quad W_1 = 100 \quad W_2 = 100 \quad W_3 = 100 \quad W_4 = 100 \quad W_5 = 100 \quad n = 2 \quad (42)$$

El filtro 1 considera los criterios estándar del problema, es decir, busca cumplir la frecuencia de paso y el esquema de tolerancia. El filtro 2 se optimizó en frecuencia, es decir, se restringió el ancho de la banda de transición mejorando el rechazo de frecuencias no deseadas. En filtro 3 se optimizó en tiempo, aumentando el ancho de la banda transición, lo que generó una respuesta escalón más rápida y con un sobrepico menor. Para hacer un análisis referente a la convergencia de los resultados se graficó la mejor solución contra el número de iteraciones (Figura 23, Figura 24 y Figura 25).

Figura 23. Mejor solución vs. número de iteraciones (Filtro 1)

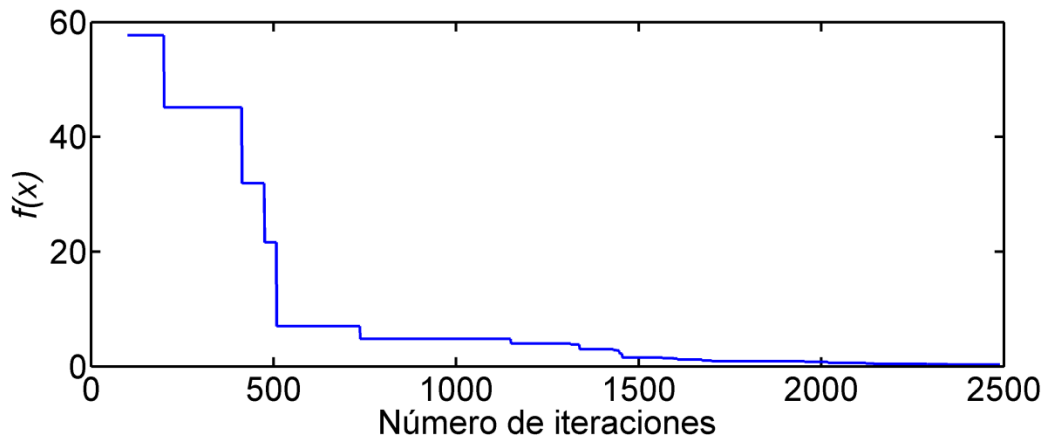


Figura 24. Mejor solución vs. número de iteraciones (Filtro 2)

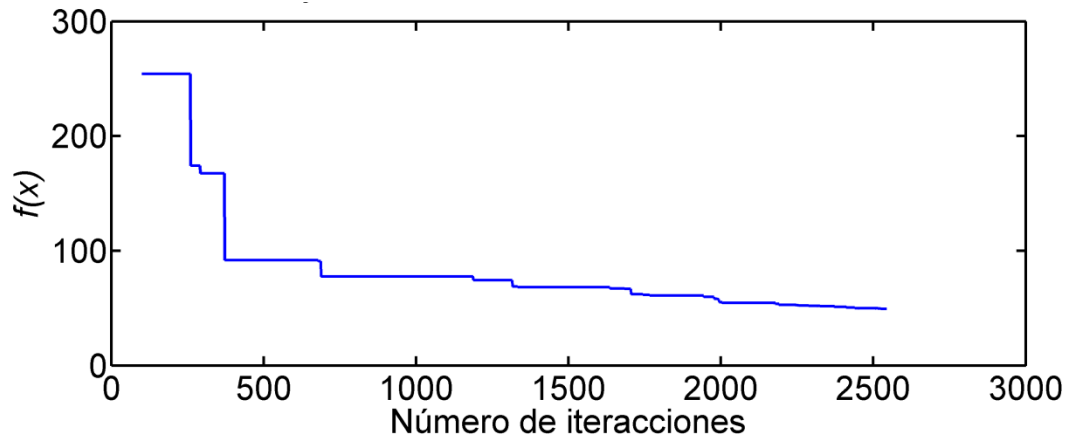
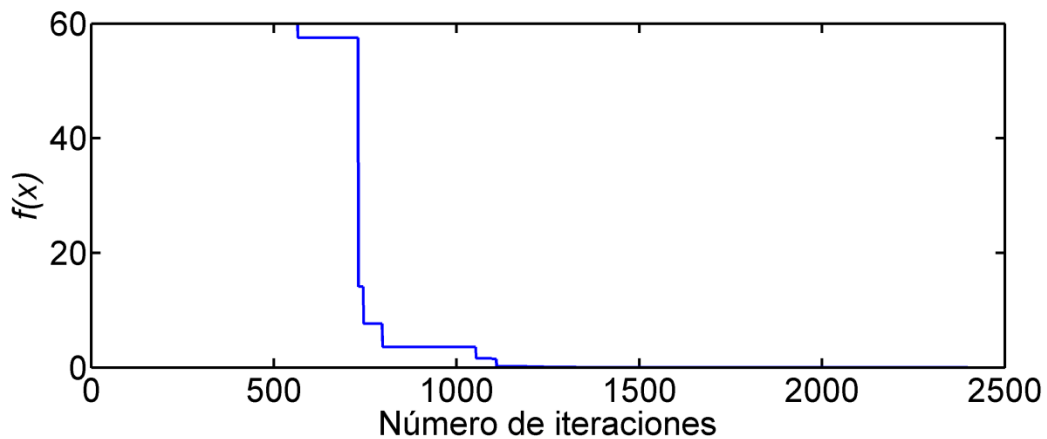


Figura 25. Mejor solución vs. número de iteraciones (Filtro 3)



El filtro 2 presenta una solución con un error mayor respecto al filtro 1 y al filtro 3, porque se diseñó con parámetros más restringidos pero aun así converge a la mejor solución posible. Por su parte, el filtro 3 se acerca más rápido a la posible solución y el filtro 2 por ser el más restringido es el que demora más en converger.

En la Tabla 15 se muestra que el filtro 3 encontró una mejor solución en un menor número de iteraciones que los otros, debido a que este tiene parámetros de restricción más flexibles. En la Tabla 16 se tabulan los resultados de los valores de los componentes electrónicos para los tres filtros y el expuesto en [7].

Tabla 15. Número de iteración y mejor solución de cada filtro

Filtro	Número de iteraciones	solución
1	2813	0.2846
2	2544	49.4605
3	2398	0.0124

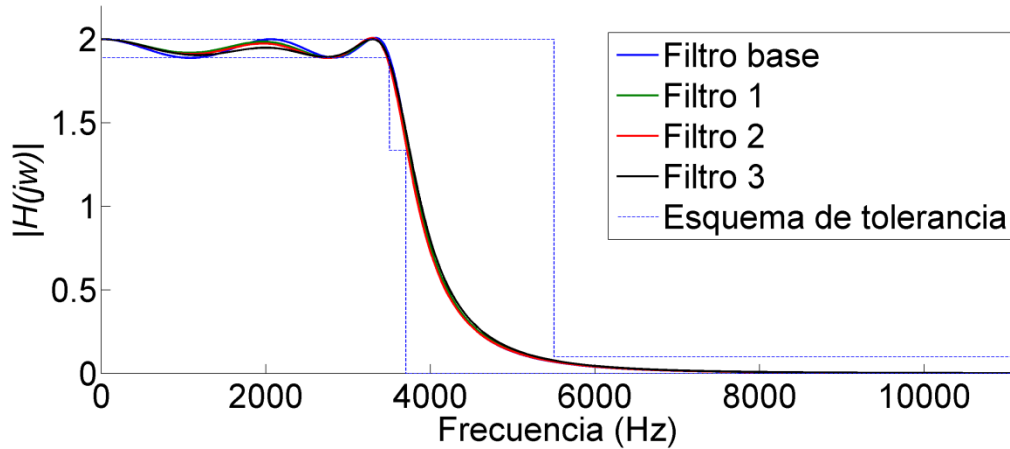
Tabla 16. Resultados de los componentes electrónicos de los cuatro filtros.

Componentes	Resultados libro.	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
R_1	0.7325 [k Ω]	0.7533 [k Ω]	0.7534 [k Ω]	0.7558 [k Ω]
R_2	1.9685 [k Ω]	1.9578 [k Ω]	2 [k Ω]	1.9896 [k Ω]
R_3	1.0312 [k Ω]	1.0491 [k Ω]	1.0671 [k Ω]	1.0693 [k Ω]
R_4	2.4348 [k Ω]	2.2543 [k Ω]	2.2507 [k Ω]	2.0569 [k Ω]
R_5	1 [k Ω]	0.9401 [k Ω]	0.9677 [k Ω]	0.9512 [k Ω]
C_1	14.824 [nF]	14.8843 [nF]	14.8772 [nF]	14.8793 [nF]
C_2	27.67 [nF]	27.7972 [nF]	27.5566 [nF]	27.4185 [nF]
C_3	75.99 [nF]	76.3983 [nF]	75.5302 [nF]	75.2839 [nF]
C_4	65.213 [nF]	65.2598 [nF]	64.9556 [nF]	65.4836[nF]
C_5	147.664 [nF]	148.5443 [nF]	146.9987 [nF]	145.8438[nF]

Fuente:[7] y Autores

Se puede ver que cumpliendo las características del problema, hay poca variación por parte de los componentes electrónicos, debido a que se restringió el espacio solución.

Figura 26. Comparación de filtros



En la Figura 26 se comprueba que los cuatro filtros cumplen lo mejor posible las restricciones y el esquema de tolerancia al igual que las características pedidas en el problema.

En la Figura 27 se puede ver que el filtro base [7] incumple el esquema de tolerancia, al igual que el filtro 2, que está restringido en frecuencia; se puede destacar que el filtro 1 y 3 son mejores en ese aspecto.

Figura 27. Ganancia de los filtros.

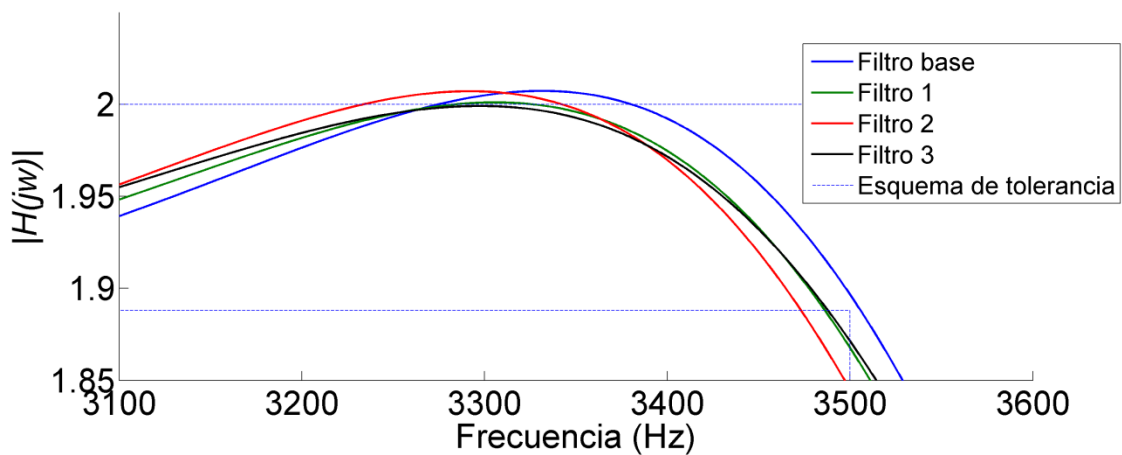
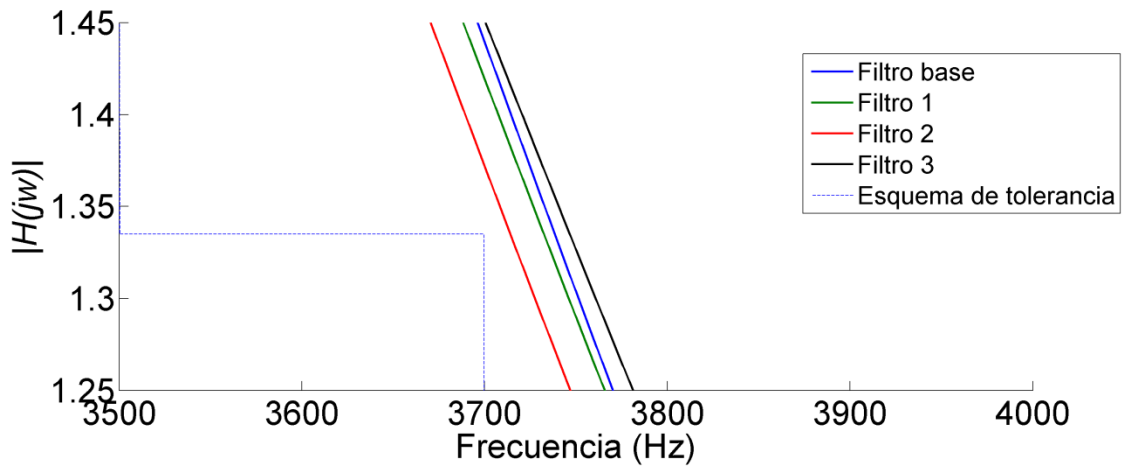
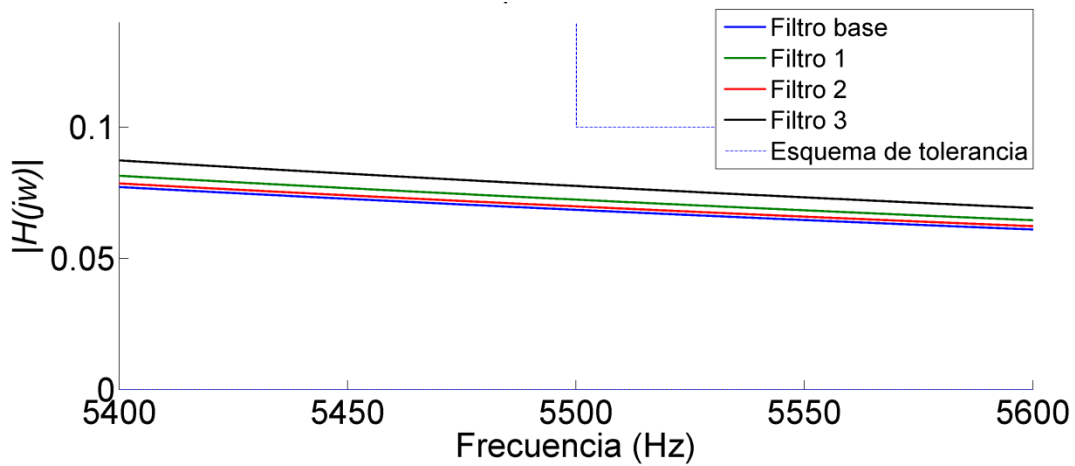


Figura 28. Banda de transición



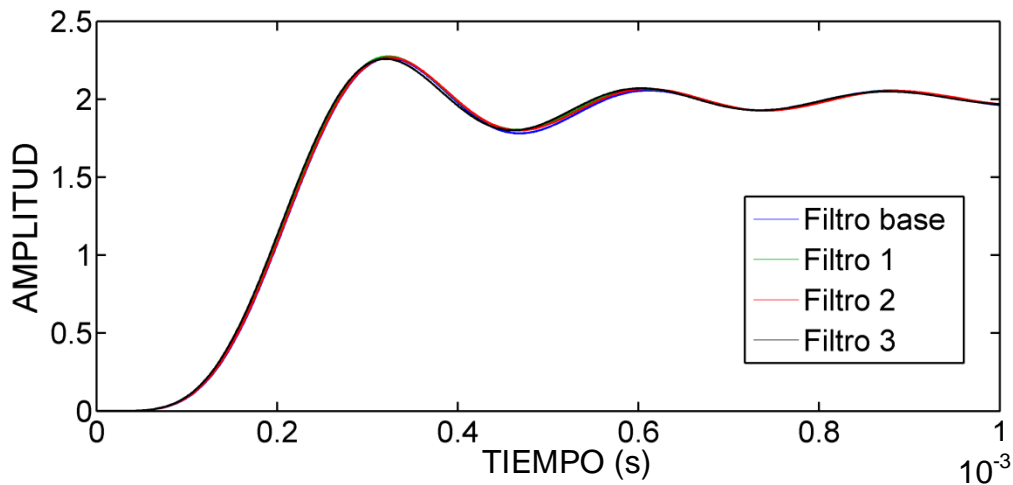
Sin embargo, en la Figura 28 se puede ver que el filtro 2 es mejor que el filtro 3, en términos de frecuencia, ya que presenta una caída más certera en la banda de transición comparado con los otros filtros

Figura 29. Filtro banda supresión



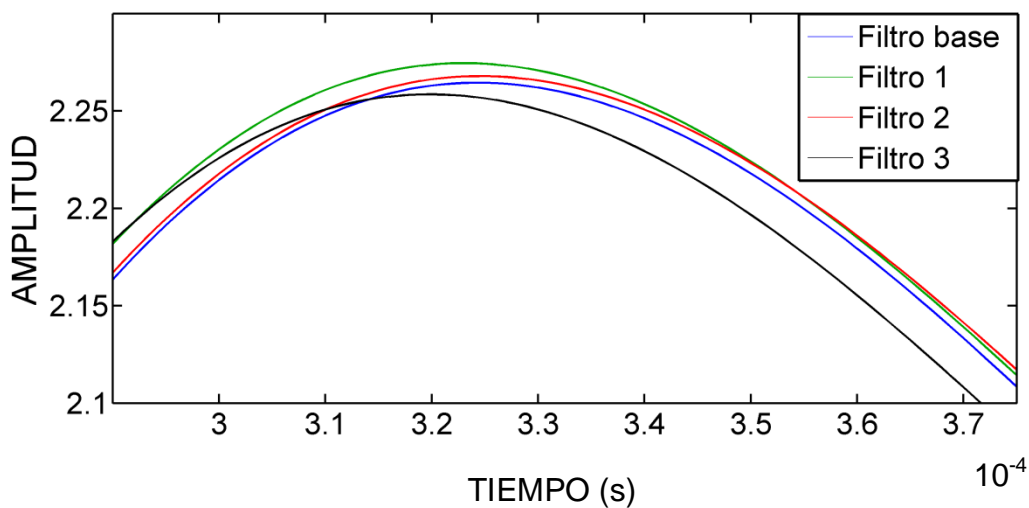
Analizando la respuesta al escalón (Figura 31) se puede destacar el filtro 3 ya que este presenta un tiempo de respuesta más rápido y un sobrepico menor, es decir, es el filtro más óptimo en tiempo de respuesta y sobrepico.

Figura 30. Respuesta al escalón.



El filtro 1 presenta un tiempo de respuesta menor que el filtro 2 y el filtro base (Figura 31), pero presenta un sobrepico mayor que el resto. El filtro 2 tiene un comportamiento bastante similar al filtro base ya que éste se hizo con más criterios de restricción.

Figura 31. Sobre pico.



7. DISEÑO DE FILTROS ELECTRÓNICOS CHEBYSHEV

En esta sección se diseñaron varias clases de filtros Chebyshev, teniendo como base una frecuencia de banda de paso igual a 1 ($w_n = 1$), un rizado de 1dB, y $N = 2, N = 5$ y $N = 7$. Se implementó el uso del comando *cheby1* en Matlab con el fin de comparar y comprobar la efectividad en el diseño de filtros con el algoritmo de la luciérnaga “FIREFLY”. Para el diseño de los filtros Chebyshev se utilizó la ecuación dada en (20), la cual se puede resolver de manera analítica, esto quiere decir que no se obtendrá mejor solución.

Se diseñaron filtros Chebyshev de distinto orden, en las Figura 32 Figura 37) se puede destacar que el algoritmo de la luciérnaga virtual “FIREFLY” sigue las especificaciones de diseño, además se acerca a la respuesta obtenida analíticamente validando así su utilización.

Figura 32. Filtro Chebyshev de segundo orden, respuesta en frecuencia.

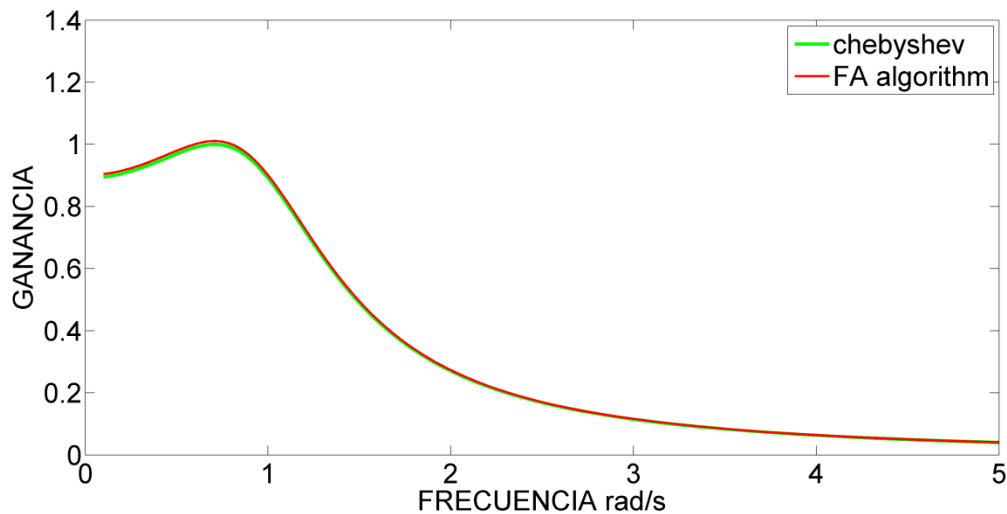


Figura 33. Filtro Chebyshev de segundo orden, respuesta en tiempo.

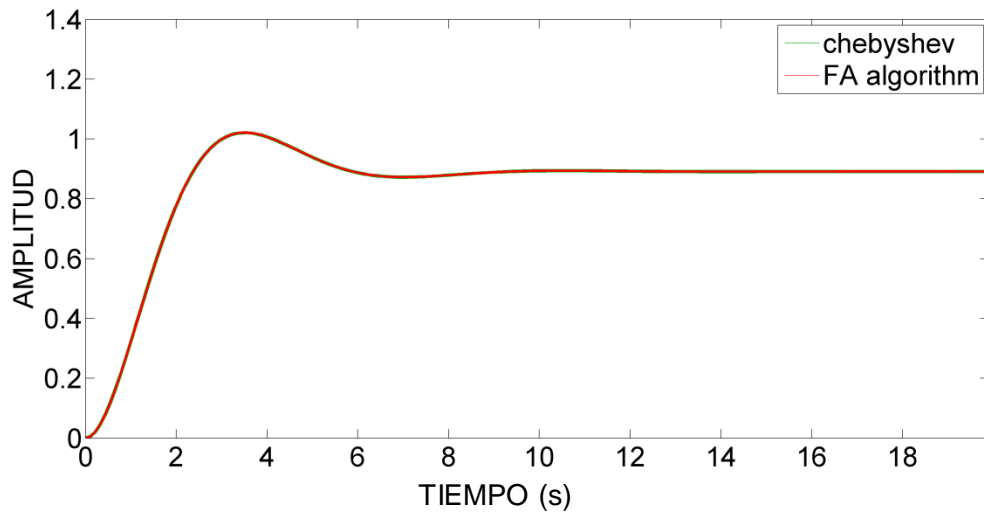


Tabla 17. Resultado de polos para el filtro de segundo orden.

Coeficientes de cheby1 en Matlab	Coeficientes del algoritmo de la luciérnaga "FIREFLY"	% Error
$0.548 \pm 0.8951i$	$0.5489 \pm 0.8950i$	0.0381%

Figura 34. Filtro Chebyshev de quinto orden, respuesta en frecuencia.

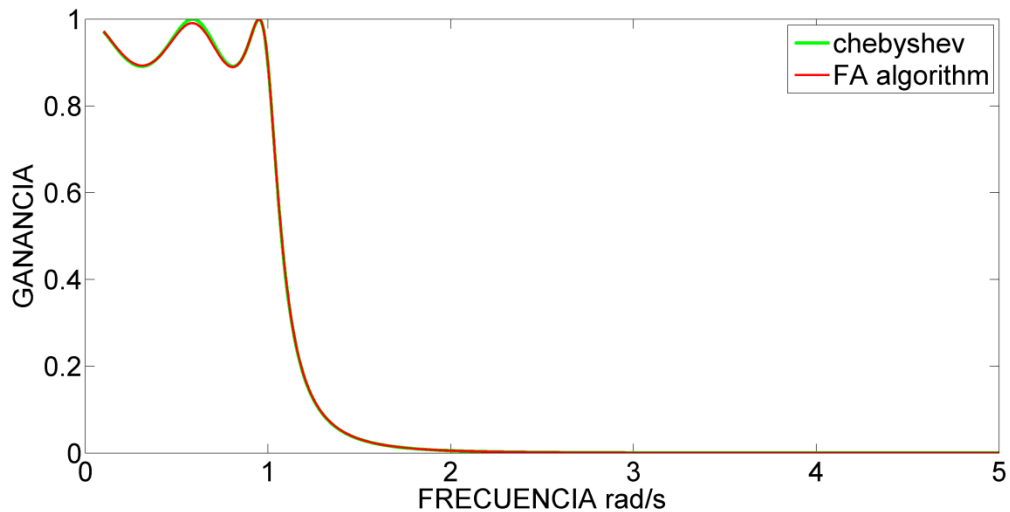


Figura 35. Filtro Chebyshev de quinto orden, respuesta en tiempo.

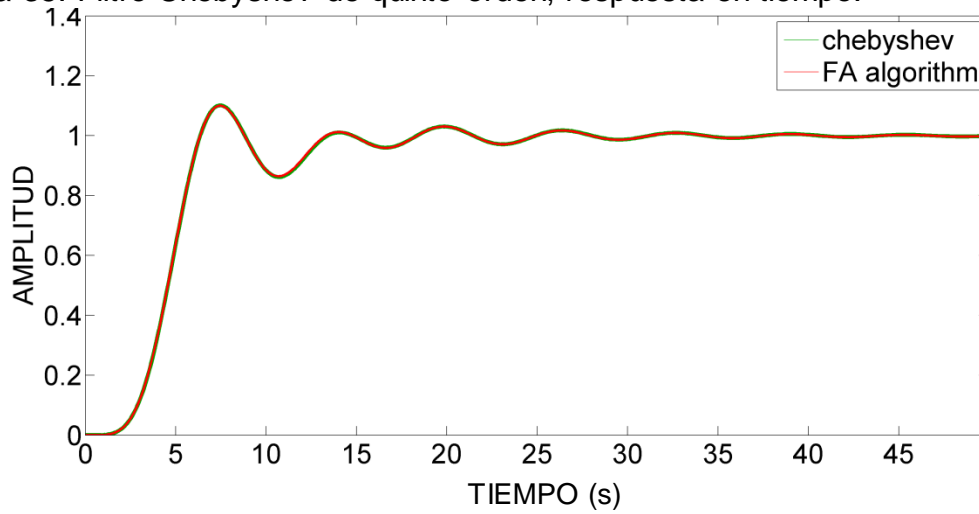


Tabla 18. Resultado de polos para el filtro de quinto orden.

Coeficientes de cheby1 en Matlab	Coeficientes del algoritmo de la luciérnaga "FIREFLY"	% Error
0.2895	0.29	0.17%
$0.0895 \pm 0.9901i$	$0.0897 \pm 0.9897i$	0.04%
$0.2342 \pm 0.6119i$	$0.2349 \pm 0.6120i$	0.03%

Figura 36. Filtro Chebyshev de séptimo orden, respuesta en frecuencia.

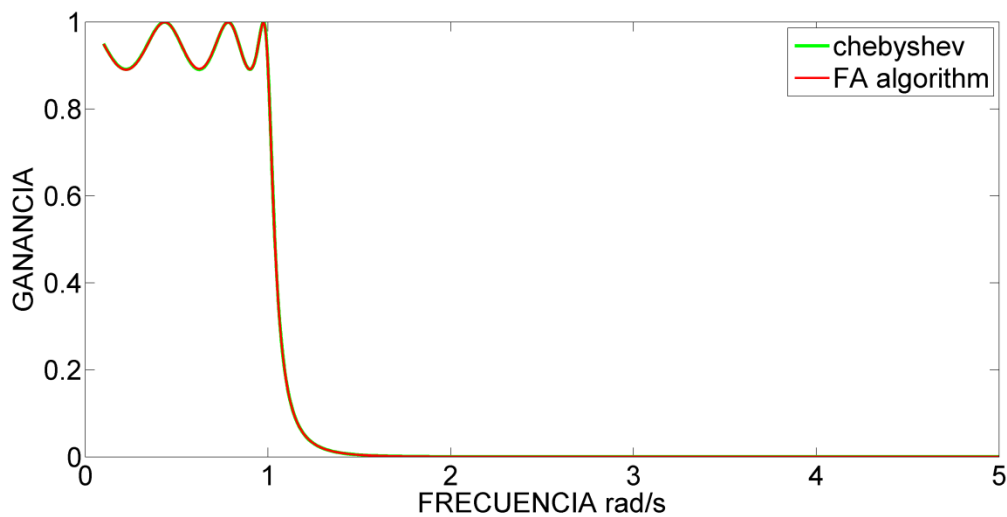


Figura 37. Filtro Chebyshev de séptimo orden, respuesta en tiempo.

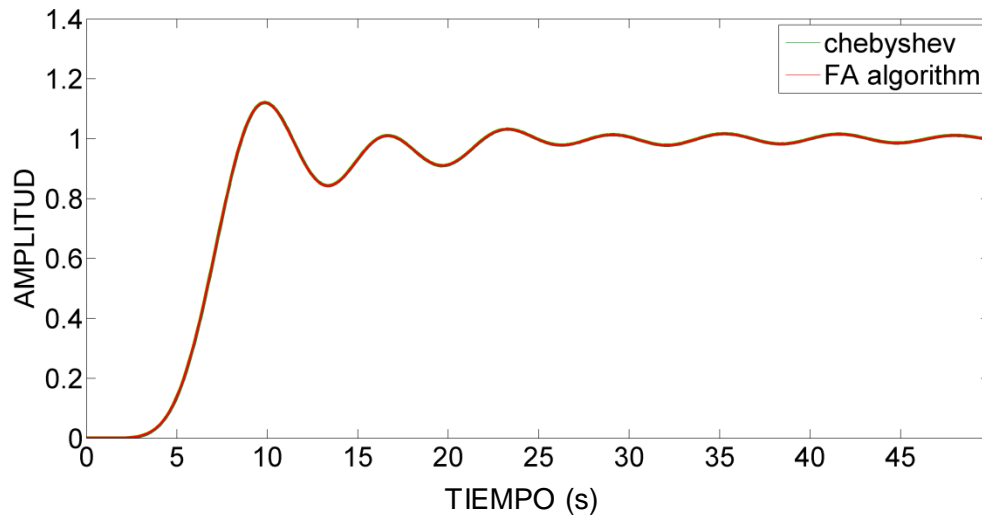


Tabla 19. Resultado de polos para el filtro de séptimo orden.

Coeficientes de cheby1 en Matlab	Coeficientes del algoritmo de la luciérnaga "FIREFLY"	% Error
0.2054	0.2054	0%
0.1281±0.7982i	0.1285±0.7979i	0.037%
0.1851±0.4429i	0.1853±0.4434i	1e-3%
0.0457±0.9953i	0.0459±0.9949i	0.040%

8. OTROS TIPOS DE FILTROS

En el siguiente ejemplo se realizó la transformación de los filtros pasa bajas diseñados anteriormente a filtros de tipo pasa altas y pasa banda, utilizando transformaciones de la variable compleja s , para corroborar que es posible implementar otros tipos de filtros a través de un filtro pasa bajas. En esta sección se consideran tanto los filtros diseñados a través de la función `cheby1` de Matlab, como los obtenidos con el algoritmo de la luciérnaga virtual “FIREFLY” [8].

8.1. TRANSFORMACIÓN A FILTRO PASA ALTAS

Para analizar la transformación del filtro pasa bajas a pasa altas, se utilizaron dos ejemplos, el primero consiste en un filtro pasa bajas de segundo orden con un rizado de 1dB y una frecuencia de 10kHz, y el segundo ejemplo es un filtro de quinto orden con un rizado de 1dB y una frecuencia de 5Hz.

Figura 38. Respuesta en magnitud del filtro pasa altas de segundo orden y frecuencia 10kHz

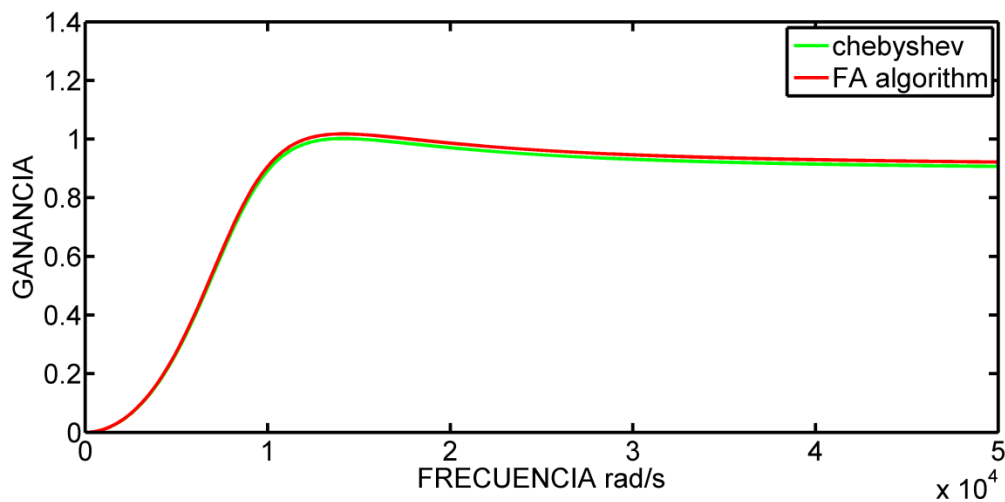


Figura 39. Respuesta al escalón del filtro pasa altas de segundo orden.

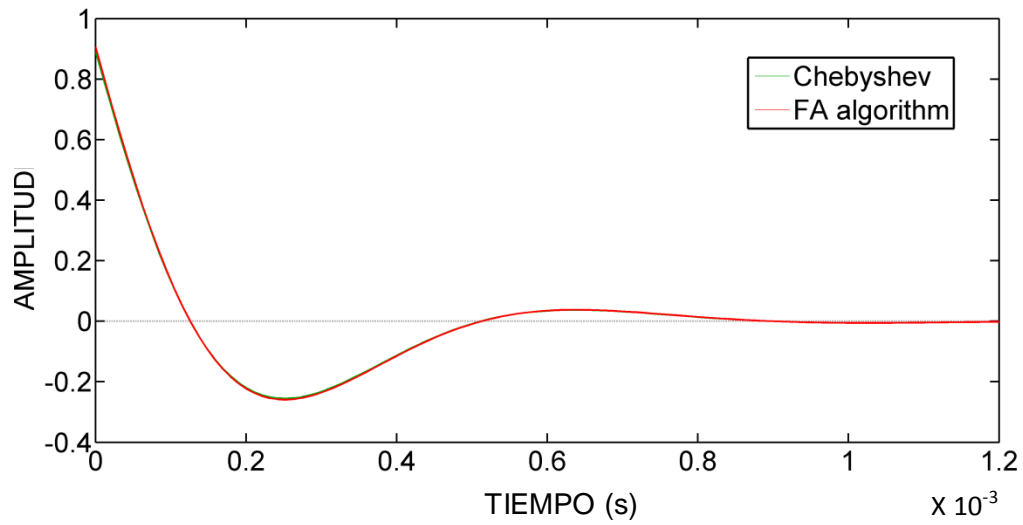


Figura 40. Respuesta en magnitud del filtro pasa altas de quinto orden y frecuencia 5Hz

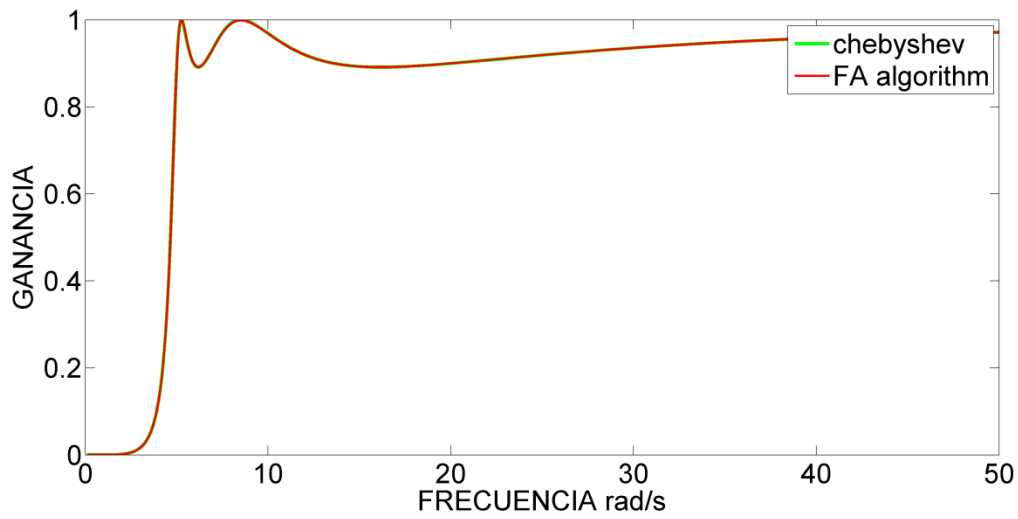
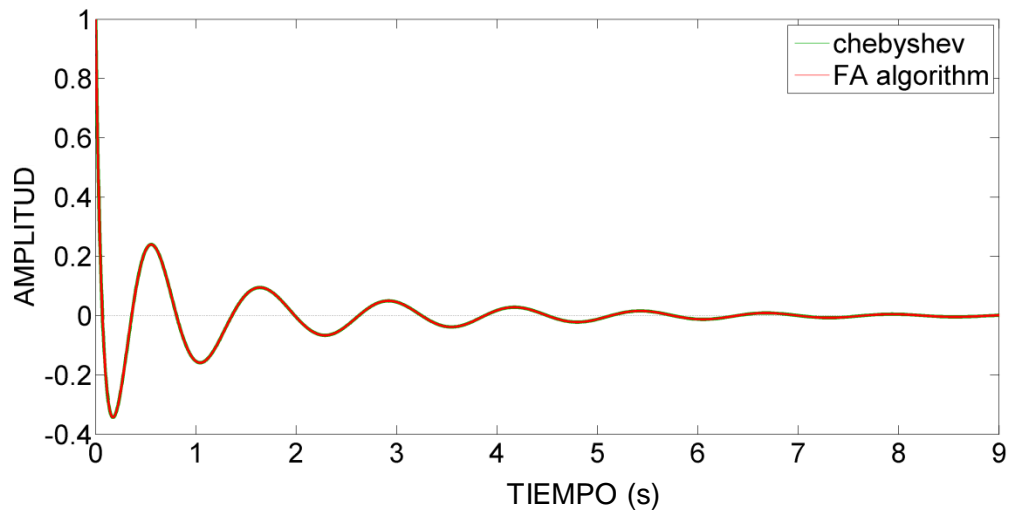


Figura 41. Respuesta al escalón del filtro pasa altas de quinto orden.



En las Figura 38 y Figura 40 los filtros conservan sus propiedades óptimas después de ser transformados, en las Figura 39 y Figura 41 se observa la respuesta en tiempo y se corroboró la utilización del algoritmo para filtros pasa altas a partir de filtros pasa bajas con las mismas características.

8.2. TRANSFORMACIÓN A FILTRO PASABANDA

Se utilizaron un filtro de segundo orden de 10kHz y un filtro de quinto orden de 5Hz, ambos con un rizado de 1dB.

Figura 42. Respuesta en magnitud del filtro pasa bandas de segundo orden y frecuencia 10kHz

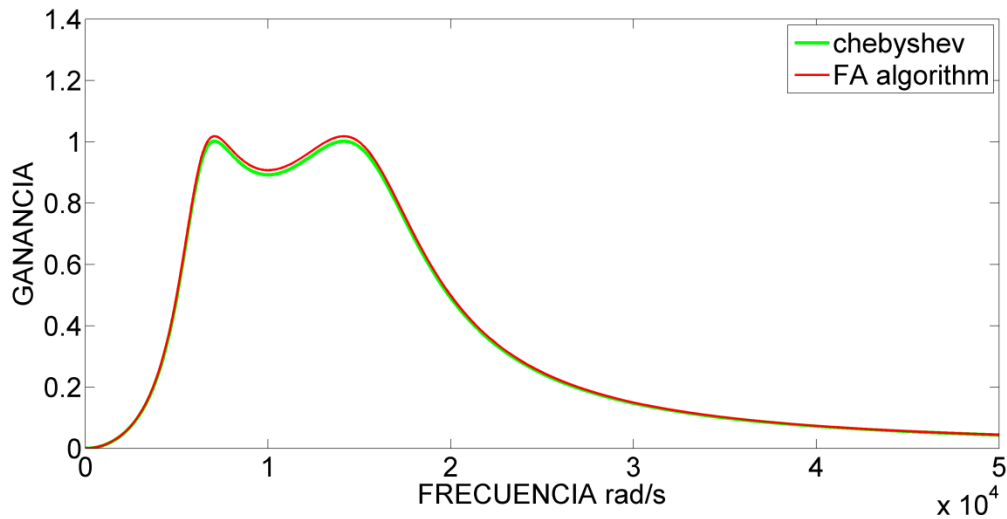


Figura 43. Respuesta al escalón del filtro transformado pasa bandas de segundo orden.

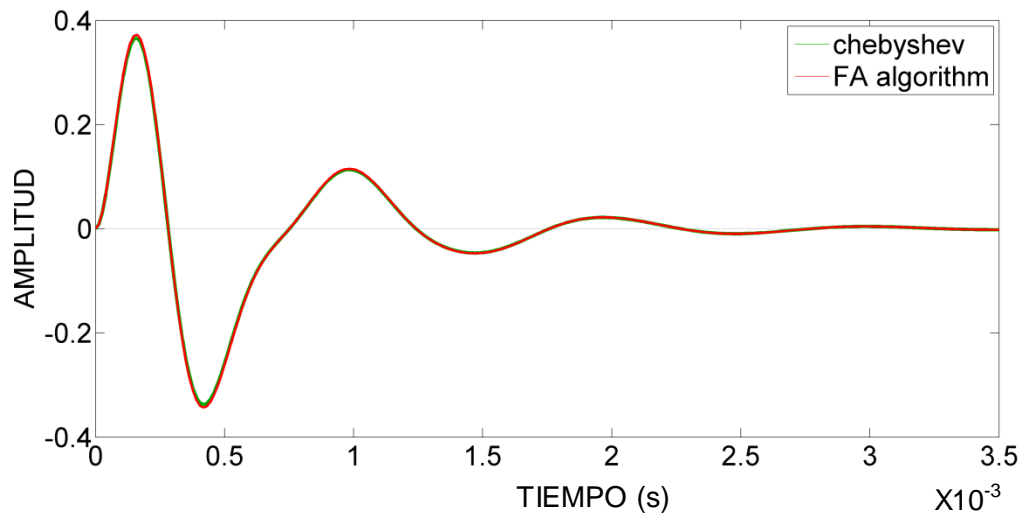


Figura 44. Respuesta en magnitud del filtro pasa bandas de quinto orden y frecuencia 5Hz

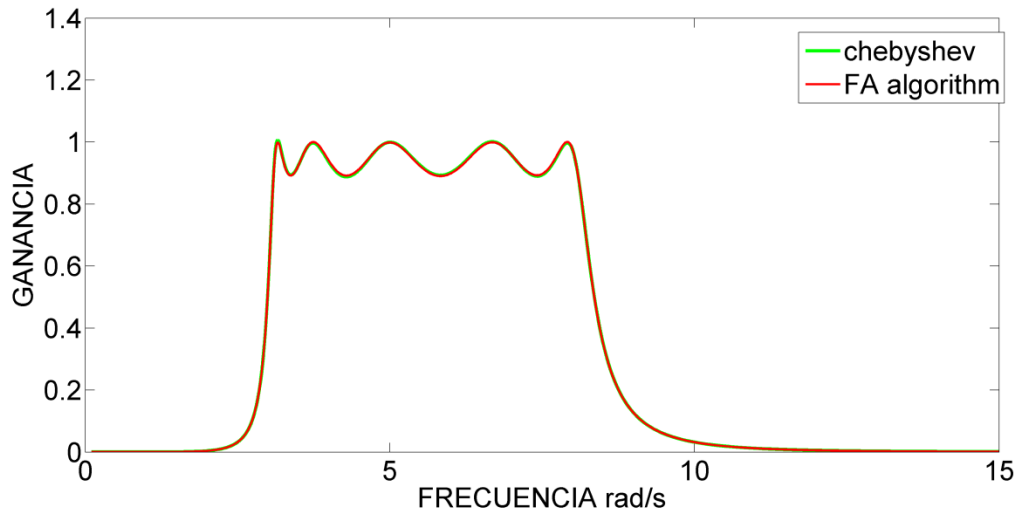
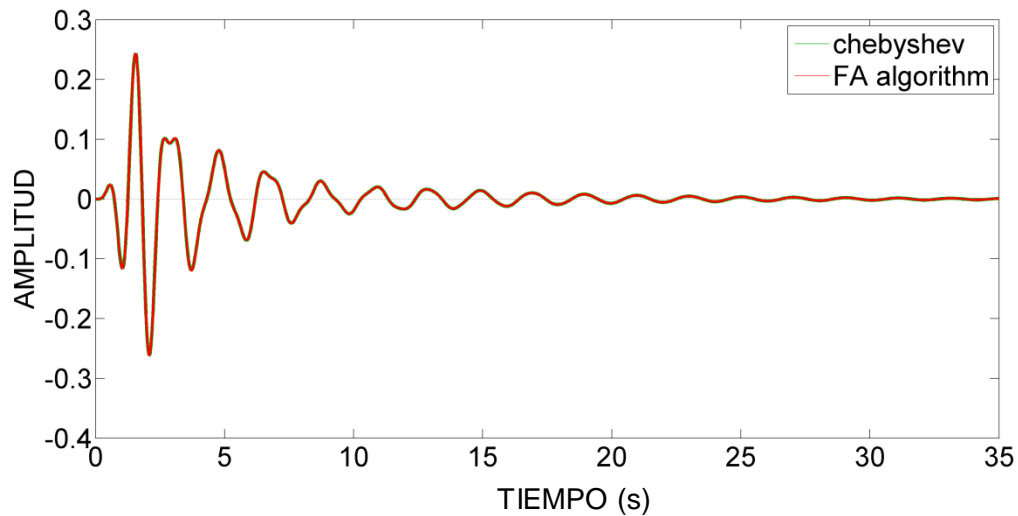


Figura 45. Respuesta al escalón del filtro transformado pasa bandas de quinto orden.



En las figuras anteriores se observa que la respuesta en magnitud del filtro transformado y el diseñado con la función cheby1 de Matlab, sigue manteniendo la constancia en el diseño óptimo. Una vez más, los resultados comprueban la efectividad del uso del algoritmo para el diseño de otro tipo de filtros.

9. CONCLUSIONES

1. Se cumplieron todos los objetivos académicos aprobados para el presente trabajo de investigación.
2. El uso del algoritmo de la luciérnaga virtual “firefly” en el diseño de filtros tiene una gran ventaja frente a métodos convencionales de diseño, debido a su facilidad en el manejo de los diferentes criterios, es decir, se puede establecer cuáles son los parámetros de mayor importancia y darles mayor peso, y así poder encontrar la solución que se adecúe más al problema.
3. Para un manejo satisfactorio de las características a optimizar del filtro que se desea diseñar, es necesario saber restringir los parámetros, como lo es la frecuencia de rechazo, la frecuencia de paso, la frecuencia de corte y el esquema de tolerancia.
4. Si desea un buen manejo del esquema de tolerancia es necesario seleccionar adecuadamente el valor de paso para tener un equilibrio entre costo computacional y restricción en el esquema de tolerancia, de tal forma que esto no afecte en gran medida el tiempo de cómputo y pueda encontrar la solución más adecuada al problema.
5. Al momento de seleccionar los diferentes parámetros propios del algoritmo de la luciérnaga virtual “FIREFLY” es necesario hacer un barrido de tales parámetros, para encontrar cuales se adecuan más favorablemente a la función objetivo; esto se realizó en la sección 6 donde se seleccionaron los valores adecuados para resolver el ejemplo de aplicación.
6. Otra ventaja de este algoritmo es la adecuación de las dimensiones para obtener soluciones en base a la función de transferencia, es decir, se puede seleccionar cada polo como una dimensión, o cada componente electrónico para representar cada dimensión o simplemente seleccionar los coeficientes directamente.
7. Para poder obtener las soluciones con el mínimo error y poder tener un criterio sobre el número de evaluaciones y el costo computacionales necesario implementar debidamente los criterios de parada.

8. Se demostró la validez de este algoritmo para implementar cualquier otro tipo de filtro pasa altas o pasa bandas como se vio en la sección 9 y además se verificó que el diseño de filtros con este algoritmo sigue conservando las mismas características.
9. Se realizó una aplicación en electrónica del algoritmo de optimización de la luciérnaga virtual "FIREFLY", lo cual permite proyectar trabajos futuros al interior del grupo de investigación CEMOS, para ser implementado en soluciones de otro tipo de ecuaciones tanto lineales como no lineales.

10.RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

1. En la realización del diseño de un filtro es necesario siempre implementar un esquema de tolerancia al igual que criterios de restricción adicional, como lo pueden ser el sobrepico, retardo en fase y demás criterios que en el presente trabajo no se tuvieron en cuenta debido a la topología del filtro diseñado.
2. Es posible mejorar los valores de las constantes de peso, de manera que en el diseño del filtro este sea más estricto con los esquemas de tolerancia.
3. Es recomendable optimizar los rangos de búsqueda dependiendo del tipo de filtro que se quiera diseñar, lo cual permitirá una convergencia más rápida de las luciérnagas hacia la solución.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Yang, X. S.: "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms", Luniver Press,(2008).
- [2] J. I. Huircán, Filtros activos, conceptos basicos y diseño, Universidad de La frontera, 2012
- [3] Delta-Sigma Data Converters Theory, Design, and Simulation, Edited by Norsworthy, Schreier and Temes, IEEE Press, ISBN 0-7803-1045-4.Application note 4422, "Integrated Solutions Make Analog Filter Design Easy"
- [4] D. Roche, D. Gil, and J. Giraldo, "Study on Evolutionary Computation Stopping Criteria," 2010.
- [5] Yang, X. S.: "Firefly Algorithms for Multimodal Optimmmization", University of cambridge, 2010.
- [6] O. Koca, H. Karl, and R. Weigel, "A Novel Method Based Upon Nonlinear Optimization for Analog Filter Design with Mask Constraints," *Signals, Syst. Electron.*, vol. 0, no. 2, pp. 9–12, 2007.
- [7] R. E. Massara, "Optimization methods in electronic circuit design", Longman scientific & Technical, 1991, p 154, 156, 161
- [8] Sedra S. Sedra, K. C. Smith, " Microelectronic Circuits", MCGRAW-HILL, 1989

BIBLIOGRAFÍA

- D. Roche, D. Gil, and J. Giraldo, "Study on Evolutionary Computation Stopping Criteria," 2010.
- Delta-Sigma Data Converters Theory, Design, and Simulation, Edited by Norsworthy, Schreier and Temes, IEEE Press, ISBN 0-7803-1045-4. Application note 4422, "Integrated Solutions Make Analog Filter Design Easy"
- J. I. Huircán, Filtros activos, conceptos basicos y diseño, Universidad de La frontera, 2012.
- O. Koca, H. Karl, and R. Weigel, "A Novel Method Based Upon Nonlinear Optimization for Analog Filter Design with Mask Constraints," Signals, Syst. Electron. ..., vol. 0, no. 2, pp. 9-12, 2007.
- R. E. Massara, "Optimization methods in electronic circuit design", Longman scientific & Technical, 1991, p 154, 156, 161
- Sedra S. Sedra, K. C. Smith, " Microelectronic Circuits", MCGRAW-HILL, 1989
- Yang, X. S.: "Firefly Algorithms for Multimodal Optimmmization", University of cambridge, 2010.
- Yang, X. S.: "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms", Luniver Press,(2008).