



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

TESIS

COMPARACIÓN DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS PARA EL DISEÑO
AUTOMÁTICO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

PRESENTA

Ing. Braulio Jesús Montoya Padilla

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON OPCIÓN A
LA COMPUTACIÓN

TUTORES

Dra. Aurora Torres Soto
Dra. María Dolores Torres Soto

INTEGRANTE DEL COMITÉ TUTORAL

Dr. Rogelio Salinas Gutiérrez

Aguascalientes, Ags, 21 de julio del 2025

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

MTRO. EN C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTORA** designado del estudiante **BRAULIO JESÚS MONTOYA PADILLA** con ID 188428 quien realizó la tesis titulado: **COMPARACIÓN DE TÉCNIAS MEATAHEURÍSTICAS PARA EL DISEÑO AUTOMÁTICO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que el pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 27 de junio de 2025



Dra. Aurora Torres Soto
Tutora de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

MTRO. EN C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como **COTUTORA** designado del estudiante **BRAULIO JESÚS MONTOYA PADILLA** con ID 188428 quien realizó la tesis titulado: **COMPARACIÓN DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS PARA EL DISEÑO AUTOMÁTICO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que el pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags. a 27 de junio de 2025



Dra. María Dolores Torres Soto
Cotutora de tesis

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

MTRO. EN C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como **ASEOSOR** designado del estudiante **BRAULIO JESÚS MONTOYA PADILLA** con ID 188428 quien realizó la tesis titulado: **COMPARACIÓN DE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS PARA EL DISEÑO AUTOMÁTICO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que el pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 27 de junio de 2025



Dr. Rogelio Salinas Gutiérrez
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 21/07/2025

NOMBRE: Braulio Jesús Montoya Padilla **ID** 188428

PROGRAMA: Maestría en Ciencias con opciones a la Computación, Matemáticas Aplicadas **LGAC (del posgrado):** Computación - Inteligencia Artificial

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: Comparación de Técnicas Metaheurísticas para el Diseño Automático de Circuitos Eléctricos

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): La investigación llevó al desarrollo de un software de diseño automático de filtros analógicos; lo que es una clara aportación hacia la democratización del diseño electrónico; además de visibilizar el potencial de las metaheurísticas en la solución de problemas reales de ingeniería.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado: Sí No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. Rogelio Salinas Gutiérrez

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dra. Mariana Alfaro Gómez

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Alejandro Padilla Díaz

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M. en C. Jorge Martín Alfárez Chávez

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las instituciones y personas que hicieron posible la realización de esta tesis de maestría.

A la Secretaría en Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo financiero otorgado a través de una beca, que hizo posible mi dedicación completa a esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por brindarme la oportunidad de formar parte de su programa de maestría y por proveer los recursos necesarios para mi formación académica y desarrollo profesional.

A mis tutoras de tesis, Dra. Aurora Torres Soto y Dra. María Dolores Torres Soto y a mi asesor Dr. Rogelio Salina Gutiérrez, por su invaluable guía, paciencia y conocimiento compartido a lo largo de este proceso. Sus aportes y revisiones críticas fueron fundamentales para dar forma a esta investigación.

A los miembros del comité evaluador, por dedicar su tiempo y experiencia a la revisión de este trabajo, así como por sus valiosas observaciones que permitieron enriquecerlo.

Finalmente, pero no menos importante, a mi familia, por su comprensión, aliento constante y apoyo incondicional durante estos años de estudio. Su presencia ha sido mi mayor fortaleza.

Dedicatoria

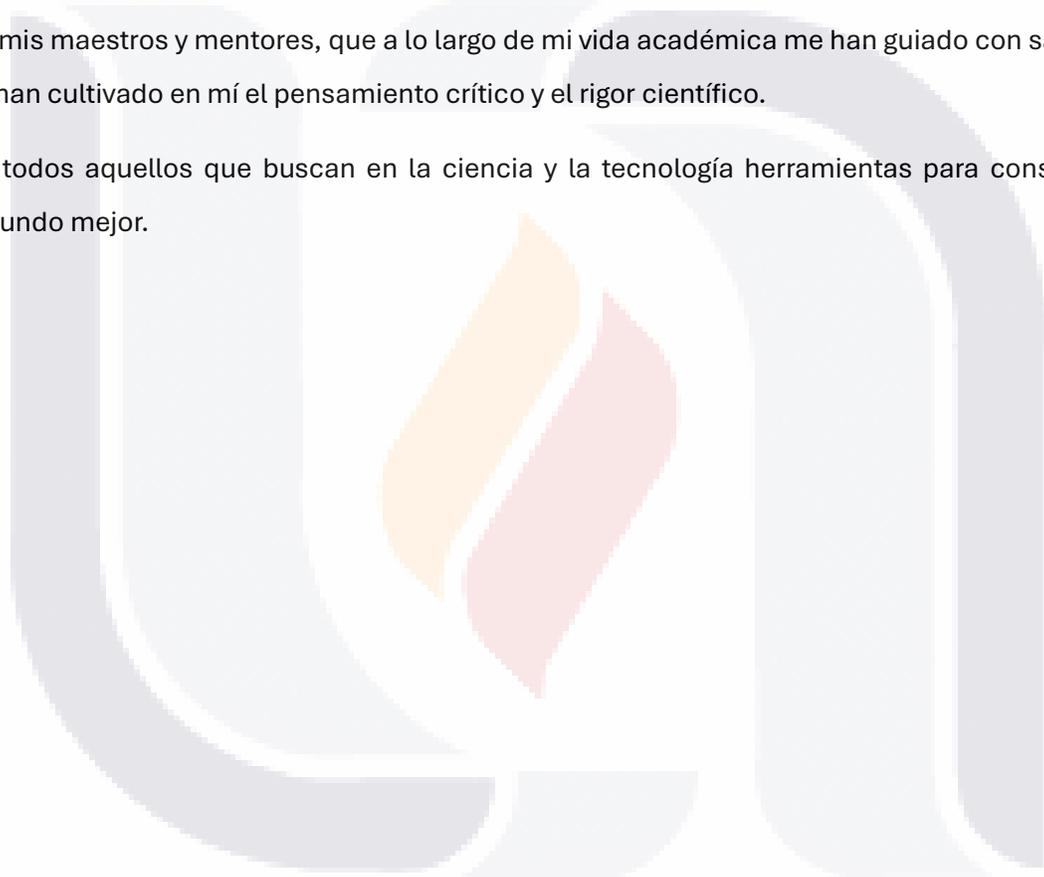
Dedico este trabajo:

A mis padres, quienes sembraron en mí la curiosidad y el amor por el conocimiento. Su ejemplo de perseverancia y dedicación ha sido mi mayor inspiración.

A mis hermanos, por su paciencia infinita durante las largas horas de estudio y trabajo, por ser mi refugio y mi motivación diaria.

A mis maestros y mentores, que a lo largo de mi vida académica me han guiado con sabiduría y han cultivado en mí el pensamiento crítico y el rigor científico.

A todos aquellos que buscan en la ciencia y la tecnología herramientas para construir un mundo mejor.



índice general

1	Introducción.....	9
2	Planteamiento del problema	10
3	Justificación	12
4	Objetivos.....	14
4.1	Objetivo general.....	14
4.2	Objetivos particulares	14
5	Marco teórico	15
5.1	Circuito eléctrico	15
5.2	Filtro analógico pasivo	17
5.2.1	Clasificación de los filtros	17
5.2.2	Filtro ideal y aproximaciones	19
5.2.3	Aplicaciones.....	20
5.3	Metaheurística.....	21
5.3.1	Propiedades deseables de una metaheurística	21
5.4	Algoritmos genéticos	22
5.4.1	Estructura.....	22
5.4.2	Aplicaciones y ventajas	24
5.5	Algoritmos de colonia de hormigas	25
5.5.1	Estructura.....	25
5.5.2	Variantes y aplicaciones.....	26
5.6	Codificación de soluciones	27
5.7	Simulación de circuitos en WSpice.....	28
5.7.1	Estructura del archivo de entrada	28
5.7.2	Archivo de salida.....	29
6	Trabajos relacionados.....	30
7	Metodología	31
8	Desarrollo	33
8.1	Mecanismo de generación de soluciones iniciales	33
8.1.1	Mecanismo de generación aleatorio	34
8.1.2	Mecanismo de generación pseudoaleatorio	34

8.2	Mecanismo de evaluación.....	37
8.3	Algoritmo genético propuesto	38
8.3.1	Mecanismo de cruzamiento.....	40
8.4	Algoritmo de colonia de hormigas propuesto	42
8.4.1	Selección de magnitudes	44
8.4.2	Actualización de la matriz de feromona.....	44
8.4.3	Actualización de costos	45
8.5	Aplicación para visualizar los resultados.....	45
9	Experimentación y resultados	47
9.1	Mejores resultados	55
10	Conclusión y discusión.....	58
11	Trabajo a futuro	60
12	Referencias.....	61

Índice de tablas

Tabla 1. Codificación de la magnitud para cada tipo de elemento.....	27
Tabla 2. Series de valores comerciales.	28
Tabla 3. Ejemplo de archivo de entrada de WSpice.....	29
Tabla 4. Ejemplo de archivo de salida de WSpice.	29
Tabla 5. Trabajos relacionados y sus principales aportaciones.	30
Tabla 6. Disposición de elementos para circuitos con dos elementos.....	36
Tabla 7. Disposición de elementos para circuitos con tres elementos.....	37
Tabla 8. Parámetros utilizados en la experimentación del algoritmo genético.....	47
Tabla 9. Parámetros utilizados en la experimentación del algoritmo colonia de hormigas.	47
Tabla 10. Pruebas realizadas en los algoritmos para cada tipo de filtro.	48
Tabla 11. Prueba de hipótesis de la distribución de la aptitud de la mejor solución obtenida.	49
Tabla 12. Prueba de hipótesis de la distribución del tiempo de ejecución del algoritmo.....	49
Tabla 13. Prueba de hipótesis de la distribución del promedio de elementos del circuito del conjunto de soluciones.	50
Tabla 14. Prueba de hipótesis de la distribución del promedio del orden de filtros del conjunto de soluciones.....	50
Tabla 15. Parámetros sugeridos para el algoritmo genético.	51
Tabla 16. Parámetros sugeridos para el algoritmo de colonia de hormigas.	51
Tabla 17. Mecanismo de generación sugerido para cada algoritmo según el tipo de filtro a generar.....	52

Índice de figuras

Figura 1. Diferentes filtros ideales.	19
Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo genético.	23
Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo de colonia de hormigas.	25
Figura 4. Codificación de un circuito mediante una lista.	27
Figura 5. Codificación de un elemento del circuito.	27
Figura 6. Diagrama de la metodología de esta investigación.	31
Figura 7. Esquema para generar y simular los circuitos.	33
Figura 8. Topologías base para circuitos con dos elementos.	35
Figura 9. Topologías base para circuitos con tres elementos.	36
Figura 10. Parámetros del filtro objetivo.	37
Figura 11. Representación del error entre el filtro objetivo y el generado.	38
Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo genético propuesto.	39
Figura 13. Padres para generar nuevos circuitos.	40
Figura 14. Hijo producto de la cruce de los padres de la Figura 13.	40
Figura 15. Diagrama de flujo de los mecanismos de cruzamiento y de mutación.	41
Figura 16. Diagrama de flujo del algoritmo de colonia de hormigas propuesto.	42
Figura 17. Representación de las matrices de feromona y de costo, para cada tipo de elemento.	43
Figura 18. Representación final de las matrices de feromona y de costo, para cada tipo de elemento.	43
Figura 19. Diagrama del flujo del programa.	46
Figura 20. Proceso de comparación de los algoritmos.	52
Figura 21. Comparación de variables entre el algoritmo genético y de colonia de hormigas para filtros pasa bajas.	53
Figura 22. Comparación de variables entre el algoritmo genético y de colonia de hormigas para filtros pasa altas.	54
Figura 23. Comparación de variables entre el algoritmo genético y de colonia de hormigas para filtros pasa banda.	54
Figura 24. Comparación de variables entre el algoritmo genético y de colonia de hormigas para filtros rechaza banda.	55

Figura 25. Mejores filtros pasa bajas generados en la experimentación de los algoritmos. 56
Figura 26. Mejores filtros pasa altas generados en la experimentación de los algoritmos. 56
Figura 27. Mejores filtros pasa banda generados en la experimentación de los algoritmos. 56
Figura 28. Mejores filtros rechaza banda generados en la experimentación de los algoritmos.
..... 57



Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Función de evaluación.....	38
Ecuación 2. Probabilidad de seleccionar una magnitud.....	44
Ecuación 3. Actualización de feromona.....	44
Ecuación 4. Incremento de la feromona.....	44
Ecuación 5. Actualización de costo.....	45



Resumen

En este trabajo de investigación se exploran algoritmos que permitan automatizar la tarea de diseño de circuitos eléctricos, específicamente se propone la implementación de un algoritmo genético y de colonia de hormigas. Adicionalmente, se proponen dos mecanismos de generación de soluciones iniciales, los cuales se utilizaron en ambos algoritmos para comprobar que tanto influye el mecanismo en el rendimiento de los algoritmos.

Los algoritmos se pusieron a prueba para generar filtros analógicos pasivos, considerando que diseñarán filtros pasa bajas, pasa altas, pasa bandas y rechaza banda. Los mecanismos de generación propuestos también están diseñados para construir este tipo de circuitos, sin embargo, (así como los algoritmos) pueden adaptarse para generar otro tipo de circuitos e implementarse para generar soluciones iniciales para otro tipo de algoritmos.

Los algoritmos se compararon con cada uno de los mecanismos de generación, para finalmente compararlos con el mecanismo de generación al que mejor se adaptaron. Principalmente se observó que los mecanismos influyen en tiempo de ejecución y en la orden de los filtros generados.

Así mismo, se desarrolló una aplicación para visualizar los resultados los algoritmos, está muestra un gráfico de voltaje contra frecuencia del voltaje de salida esperado y el del filtro generado, junto con el diagrama eléctrico del circuito generado. En donde el circuito generado es la mejor solución dada por el algoritmo ejecutado.

Abstract

This research explores algorithms that enable the automation of electrical circuit design tasks, specifically proposing the implementation of a genetic algorithm and an ant colony algorithm. Additionally, two initial solution generation mechanisms are suggested, which were used in both algorithms to verify how much the mechanism influences algorithm performance.

The algorithms were evaluated to generate passive analog filters, considering the design of low-pass, high-pass, band-pass, and band-reject filters. The proposed generation mechanisms are also designed to construct this type of circuit; however, (like the algorithms), they can be adapted to generate other types of circuits and implemented to generate initial solutions for other types of algorithms.

The algorithms were compared with each of the generation mechanisms and finally compared with the generation mechanism to which they best adapted. It was primarily observed that the mechanisms influence execution time and the order of the generated filters.

Furthermore, an application was developed to visualize the algorithm results, which displays a voltage versus frequency graph of the expected output voltage and that of the generated filter, along with the electrical diagram of the generated circuit. The generated circuit represents the best solution provided by the executed algorithm.

1 Introducción

El diseño de circuitos eléctricos es una tarea que se realiza partiendo de circuitos simples a los que posteriormente se les añaden ciertas características, se encuentran fallas y se corrigen errores hasta encontrar el funcionamiento deseado. Por esto, los diseñadores de circuitos necesitan de experiencia, conocimiento y habilidad para diseñar circuitos que cumplan con un funcionamiento deseado (Brito Saldarriaga & Giraldo Betancourt, 2011).

Claramente, esta tarea llega a consumir mucho tiempo, dinero y recursos, por lo que, se ha invertido gran esfuerzo para automatizar el diseño de circuitos eléctricos para, entre otras cosas, disminuir los costos de producción. Pero esta también es una tarea que requiere de muchos esfuerzos, ya que los algoritmos deben contener la experiencia y los conocimientos de los diseñadores (Torres, 1998).

Para desarrollar una herramienta de diseño automático de circuitos eléctricos, es conveniente iniciar con el diseño de circuitos simples, como lo son los filtros analógicos. Estos son circuitos, se construyen con conductancias, resistencias e inductancias, los cuales cuentan con una variedad de topologías y magnitudes para cada tipo de componente (Torres Soto et al., 2020). Además, es importante considerar las siguientes fases de diseño de un circuito eléctrico:

- Establecer las especificaciones del circuito.
- Determinar la topología del circuito.
- Optimizar y establecer los valores de los parámetros.

Para lo cual, es importante definir la metaheurística que se encargará de obtener un diseño óptimo (o cercano al óptimo). Es decir, se tendrá que definir un mecanismo de inicialización, evaluación, selección y recombinación; los cuales dependerán de la representación computacional de los circuitos.

Una vez definida la metaheurística, se espera que sea capaz de mostrar un circuito bien diseñado, en el menor tiempo y con la mejor evaluación posible, según los parámetros especificados por el diseñador.

2 Planteamiento del problema

En la actualidad, el diseño de circuitos eléctricos comienza con la creación de circuitos simples. A medida que se avanza, se añaden características adicionales y se identifican y corrigen fallas hasta alcanzar el funcionamiento deseado. Los diseñadores de circuitos eléctricos logran solucionar estos problemas gracias a su experiencia, conocimiento y habilidad, lo cual les permite crear sistemas eficientes y funcionales (Brito Saldarriaga & Giraldo Betancourt, 2011).

Claramente el diseño óptimo de estos circuitos presenta un desafío significativo debido al vasto espacio de búsqueda que surge de las numerosas combinaciones posibles de componentes electrónicos, como resistencias, capacitancias e inductancias. Este espacio de búsqueda crece exponencialmente con el número de componentes y la diversidad de topologías posibles, lo que hace inviable la aplicación de métodos de diseño tradicionales, basados en la intuición y la experiencia del diseñador (Chouza et al., 2008).

En la actualidad, las técnicas de optimización metaheurísticas han surgido como una solución prometedora para enfrentar estos desafíos. Los algoritmos genéticos y la optimización por colonia de hormigas son dos enfoques que han demostrado ser particularmente eficaces para encontrar soluciones aproximadas al óptimo en espacios de búsqueda complejos y de gran tamaño. Sin embargo, a pesar de su potencial, existe una falta de consenso sobre qué técnica es más efectiva en el contexto específico del diseño automático de circuitos eléctricos. Además, la investigación actual proporciona un análisis comparativo exhaustivo que considere tanto el rendimiento de los algoritmos como su aplicabilidad práctica en el diseño de filtros analógicos pasivos, tomando en cuenta las restricciones de implementación en el mundo real, como el uso de componentes comerciales (Alonso et al., 2004; Castejón Lapeyra & Carmona Suárez, 2020).

El problema central que aborda esta investigación es diseñar y comparar la efectividad del algoritmo genético y el algoritmo de colonia de hormigas en el diseño automático de filtros analógicos pasivos. Se busca determinar cuál de estas técnicas es más adecuada para encontrar soluciones que no solo cumplan con las especificaciones técnicas deseadas, sino que también sean realizables en la práctica, utilizando componentes disponibles comercialmente. A partir de esta comparación, se pretende desarrollar un marco de trabajo

que optimice el proceso de diseño automático de estos circuitos eléctricos, ofreciendo una herramienta útil tanto para investigadores como para profesionales de la industria.



3 Justificación

El diseño automático de circuitos eléctricos es un campo de estudio que ha ganado relevancia en las últimas décadas, debido a la complejidad y el tiempo que requieren los métodos tradicionales de diseño manual. En particular, los filtros analógicos pasivos, utilizados en una amplia variedad de aplicaciones electrónicas, representan un desafío considerable en términos de diseño óptimo. Esto se debe a la necesidad de encontrar configuraciones de circuitos que cumplan con criterios específicos de rendimiento, como la frecuencia de corte, la selectividad y la atenuación en bandas de frecuencia no deseadas. Este proceso se complica aún más cuando se considera la enorme cantidad de posibles configuraciones y combinaciones de componentes que se pueden utilizar, lo que resulta en un espacio de búsqueda extremadamente grande y difícil de explorar de manera exhaustiva mediante métodos convencionales (López Marín, 2003).

En este contexto, las técnicas metaheurísticas como los algoritmos genéticos y de colonia de hormigas han demostrado ser herramientas poderosas para abordar problemas de optimización complejos. Estas técnicas son capaces de aproximarse a soluciones óptimas en espacios de búsqueda de gran tamaño, lo que las hace especialmente adecuadas para el diseño automático de circuitos eléctricos. Los algoritmos genéticos, inspirados en los procesos de evolución natural, utilizan operaciones como la selección, cruce y mutación para explorar el espacio de soluciones. Por otro lado, la optimización por colonia de hormigas se basa en el comportamiento colectivo de las hormigas para encontrar caminos óptimos, lo que permite una exploración eficiente de posibles soluciones al problema de diseño (Torres Soto et al., 2022; Wang et al., 2012).

La decisión de utilizar los filtros analógicos pasivos, específicamente los de tipo pasa bajas, pasa altas, pasa banda y rechaza banda, responde a la importancia de estos circuitos en diversas aplicaciones eléctricas, así como a la naturaleza de los componentes que los constituyen. Los filtros pasivos se componen de elementos como resistencias, capacitancias e inductancias, cuya combinación y configuración determinan las características de filtrado del circuito. La elección de comenzar con estos tipos de filtros se debe a la representación bien establecida de estos circuitos, que se basa en la codificación de los elementos del circuito en forma de lista enlazada. En esta representación, cada nodo de la lista corresponde a un

componente del circuito, considerando tanto su topología como su magnitud. Esta metodología de representación, que se detalla en el artículo titulado "Mecanismo de Representación para la Evolución Automática de Circuitos Analógicos", proporciona una base sólida para el diseño automático de filtros, facilitando la codificación y la manipulación de los elementos del circuito durante el proceso de optimización (Torres Soto et al., 2020).



4 Objetivos

En esta sección se describe el objetivo general y los objetivos particulares de la investigación. Estos incluyen el mecanismo que necesarios para implementar las metaheurísticas, así como las técnicas que se van a desarrollar para automatizar el diseño de circuitos eléctricos.

4.1 Objetivo general

Desarrollar, implementar y comparar técnicas metaheurísticas, con soluciones iniciales aleatorias y conducidas, para el diseño automático de filtros analógicos.

4.2 Objetivos particulares

Desarrollar, implementar, probar y comparar un mecanismo de generación de soluciones iniciales aleatorias y conducidas.

Desarrollar, implementar y probar un mecanismo de evaluación que considere la aproximación de la simulación del circuito generado con la del filtro ideal objetivo.

Desarrollar, implementar y mejorar un algoritmo genético y un algoritmo de colonia de hormigas para el diseño automático de filtros analógicos pasivos, en el que los filtros generados se aproximen más del 70% al filtro objetivo.

Comparar los resultados obtenidos y el tiempo de ejecución de cada una de las técnicas propuestas.

5 Marco teórico

El diseño automático de circuitos eléctricos ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido a la necesidad de desarrollar dispositivos electrónicos más eficientes y optimizados. En este contexto, los filtros analógicos pasivos juegan un papel crucial en aplicaciones de procesamiento de señales, telecomunicaciones y control de sistemas. Sin embargo, el proceso de diseñar estos circuitos de manera óptima implica la exploración de un vasto espacio de posibles configuraciones, lo que dificulta la aplicación de métodos tradicionales (López Marín, 2003).

Para abordar este desafío, diversas técnicas de optimización han sido desarrolladas, destacando las metaheurísticas como una alternativa prometedora. En este marco teórico, se explorarán los fundamentos del diseño de filtros analógicos pasivos, las características de los algoritmos genéticos y la optimización por colonia de hormigas, así como la representación estructural de circuitos mediante listas enlazadas (Torres, 1998; Torres Soto et al., 2020). Estos conceptos servirán de base para la implementación y comparación de los algoritmos en el diseño automatizado de circuitos, estableciendo los principios que sustentan la investigación.

5.1 Circuito eléctrico

Un circuito electrónico es un conjunto de dispositivos electrónicos que forman redes complejas para transmitir información eléctrica con el objetivo de transformarla en sonido, datos digitales o imágenes. En la actualidad, la fabricación de estos circuitos busca mejorar la calidad de los componentes conductores mediante la implementación de dispositivos más duraderos y de mayor calidad, con el fin de reducir los posibles errores que puedan surgir durante su funcionamiento externo (Toala Calderón & Murillo Quimiz, 2021).

Los circuitos están formados por:

- Componente eléctrico: es un dispositivo que permite el flujo de energía eléctrica.
- Nodo: es el punto donde se encuentran dos o más conductores.
- Rama: es una parte del circuito comprendida entre dos nodos.
- Malla: es un camino cerrado en circuito.
- Fuente: componente que entrega la energía eléctrica.
- Conductor: es el material que permite el libre flujo de energía eléctrica.

Los circuitos eléctricos se pueden clasificar de distintas formas, ya sea por su topología, por como controlan la energía eléctrica o bien por los componentes que usan (Estévez-Fernández, 2017; Miyara, 2004). Para cada caso, la clasificación es la siguiente:

- Por su topología:
 - Serie: en un circuito en serie la energía eléctrica se mueve a través de un solo camino lo que significa que ésta pasa por todos los componentes del circuito, entre las características de este sistema se tiene que es necesario una fuente de energía, un material conductor y por último un receptor que absorbe y transforma la energía eléctrica en otro tipo de energía.
 - Paralelo: en un circuito en paralelo la energía eléctrica se mueve a través de diferentes caminos. Su principal característica es que los bornes de entrada de los dispositivos en conjunto que se conectan coinciden entre ellos de igual forma que sus terminales de salida.
- Por los componentes que usan:
 - Circuito analógico: es un conjunto de componentes eléctricos básicos interconectados, que sufren cambios de corriente, tensión y potencia de manera continua en el tiempo. Los principales componentes de estos circuitos son resistencias, conductancias, fuentes de energía, etc. Este tipo de circuitos proporcionan operaciones de análisis y transformación de señales traducidas con diferentes perturbaciones en ruido que es consecuencia de las variaciones de la señal que transmite. Su implementación es en consecuencia un proceso de prueba que debe ser diseñado con experiencia a base de simuladores con el fin de descartar errores.
 - Circuito digital: es un conjunto de componentes eléctricos que ofrecen procesos de análisis en forma digital en sus entradas y salidas, mediante información binaria dando códigos de unos y ceros que se presentan como valores de voltaje. En consecuencia, la señal digital junto con los diferentes procesos que debe cumplir este circuito debe funcionar adecuadamente ya que el tipo de información que en general se procesa no debe ser alterada.

- Circuito mixto: un circuito mixto posee la capacidad de un circuito analógico con medios de capacidad en semiconducción, añadiendo las funciones y las propiedades del circuito digital en cuanto a transferir señales y ser integradas en el almacenamiento de búfer digital. Trabajar con un circuito mixto suele ser de alto costo debido a las prestaciones automatizadas que toman los sistemas metodológicos en el diseño, Un circuito integrado tiene en su estructura amplificadores, transistores y condensadores, así como osciladores lineales y digitales.

5.2 Filtro analógico pasivo

En general un filtro se describe como un dispositivo que de un modo específico puede modificar una señal. En otras palabras, estos dispositivos permiten el paso de una señal en ciertas bandas de frecuencia y la bloquean en otras (Haver Solórzano & Ortíz Mosquera, 2018).

La función de un filtro analógico pasivo consiste en alterar una señal de entrada para obtener sus propiedades aprovechables en ciertas circunstancias, eliminando las propiedades que se quieren ignorar. Estos filtros se utilizan para seleccionar un conjunto determinado de frecuencias de una señal y amplificarlas, al tiempo que atenúan el conjunto excluido. Son especialmente útiles en el mundo del audio y las comunicaciones (Álvarez Álvarez, 1984).

El principio de funcionamiento de un filtro pasivo se basa en que la impedancia de algunos elementos es variable con la frecuencia. Cuando se disponen de manera apropiada, algunas frecuencias permanecen inalteradas, mientras que otras sufren distintos grados de atenuación. Los elementos de impedancia variable son la capacitancia y la inductancia. Estos pueden emplearse junto con una resistencia para formar filtros de primer orden.

5.2.1 Clasificación de los filtros

Los filtros se pueden clasificar de diferentes maneras (Vodanovic et al., 2019). Según el tipo de señal que procesan:

- Analógicos: los filtros analógicos son diseñados para tratar señales analógicas, y durante el procesamiento de la señal esta puede tomar cualquier valor en un intervalo de tiempo.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Digitales: los filtros digitales son diseñados para tratar señales digitales, y durante el procesamiento de la señal esta solo puede tomar valores discretos en un intervalo de tiempo.

O bien, pueden clasificarse según su ganancia:

- Activos: un filtro activo tiene el mismo propósito que un filtro pasivo, con la diferencia de que en su construcción se suelen usar tantos elementos pasivos como elementos activos, por eso estos filtros suelen contar con amplificadores operacionales, lo que hace que sean de mayor factor de calidad.
- Pasivos: un filtro pasivo está conformado por componentes pasivos, como lo son las resistencias, conductancias e inductancias; estos dos últimos son los elementos reactivos del filtro, es decir, son elementos que hacen que cambie la fase de la corriente que pasa por ellos. El número de componentes reactivos determina el orden del filtro.

De igual forma pueden clasificarse por el tipo de componentes que tienen:

- Filtros RC: compuestos por resistencias y capacitores, son económicos y compactos, pero limitados en selectividad.
- Filtros RL: formados por resistencias e inductores, menos comunes debido a las limitaciones prácticas de los inductores.
- Filtros LC: utilizan inductores y capacitores, ofrecen mejor selectividad y menor atenuación en la banda de paso.
- Filtros RLC: combinan los tres elementos pasivos, permitiendo diseños más complejos y versátiles.

Usualmente los filtros se categorizan según la frecuencia en que se encuentra la banda de paso, teniendo los siguientes filtros:

- Filtro pasa bajas: deja pasar las frecuencias bajas hasta una frecuencia paso y atenúa las frecuencias mayores a ella.
- Filtro pasa altas: deja pasar la frecuencias altas o mayores a la frecuencia paso y atenúa las menores.

- Filtro pasa banda: deja pasar las frecuencias comprendidas en entre dos puntos de frecuencia y atenúa el resto de las frecuencias.
- Filtro rechaza banda: atenúa las frecuencias entre dos puntos de frecuencia mientras que el resto de las frecuencias pasan sin atenuación.

5.2.2 Filtro ideal y aproximaciones

Los filtros ideales se caracterizan por tener una ganancia constante en la banda de paso y de cero en la banda de atenuación mientras que su transición entre ellas es instantánea, es decir, la señal está representada por líneas rectas. En la Figura 1 se pueden apreciar ejemplos de la respuesta en frecuencias de filtro ideales. En base a los gráficos de los filtros ideales, se puede destacar lo siguiente:

- Contempla una señal de salida sin ruido.
- En la banda de atenuación, la señal es atenuada totalmente.
- La banda de transición es prácticamente nula.

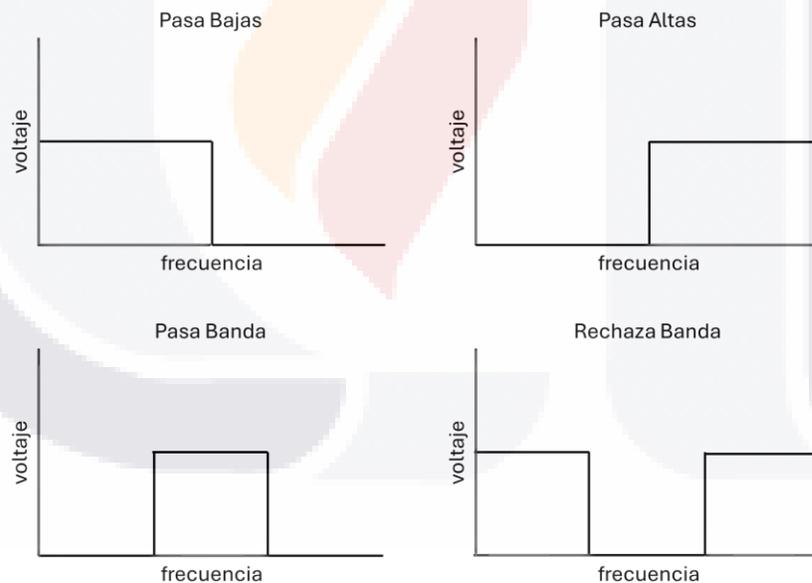


Figura 1. Diferentes filtros ideales.

Pero obtener un filtro de esta naturaleza, es una tarea prácticamente imposible. Ya que en la práctica la señal presenta ruido, la señal no se atenúa totalmente y el cambio entre las bandas de paso y atenuación no se da instantáneamente (Asmae et al., 2020; Kritele et al., 2019). Según cuanto se aproxime el filtro real al ideal, se destacan tres tipos de aproximaciones:

- Butterworth: se obtiene al imponer que la respuesta en magnitud del filtro sea máximamente plana en la banda de paso y en la banda de atenuación.
- Chebyshev: se obtiene una pendiente más abrupta en la banda de transición que en un filtro de tipo Butterworth, a costa de permitir cierto rizado en alguna de sus bandas. Se subdividen en:
 - Chebyshev I: presenta rizado constante en la banda de paso, caída monotónica en la banda de atenuación.
 - Chebyshev II: presenta caída monotónica en la banda de paso y un rizado constante en la banda de atenuación.
- Cauer (elíptico): se obtiene una banda de transición muy estrecha a costa de permitir rizado en las bandas de paso y de atenuación.

5.2.3 Aplicaciones

Los filtros analógicos siguen teniendo en la actualidad un amplio espectro de aplicaciones, a pesar del gran crecimiento en la utilización de filtros digitales ocurrido en las últimas décadas. Debido a la gran cantidad de dispositivos en los que se realiza alguna tarea de procesamiento de señales, es difícil enumerar exhaustivamente las aplicaciones de los filtros analógicos (Calvo Martínez, 2008; Mota Rodríguez, 2012). Algunos ejemplos específicos donde se utilizan son:

- Procesamiento de señales de audio para mejorar la inteligibilidad de la voz humana.
- Separación de canales de audio en la recepción de radio estéreo.
- Decodificación de los tonos del sistema DTMF o Dual-Tone Multi-Frequency (Multifrecuencia de Doble Tono), correspondientes al marcado telefónico.
- Separación del tráfico de voz y datos en una conexión ADSL o Asymmetric Digital Subscriber Line (Línea de Abandono Digital Asimétrica).

5.3 Metaheurística

Una metaheurística es un método heurístico para resolver un tipo de problema computacional general, usando los parámetros dados por el usuario sobre unos procedimientos genéricos y abstractos de una manera que se espera eficiente (Moreno Pérez, 2004), en otras palabras, una metaheurística es un conjunto de conceptos que pueden ser usados para definir métodos heurísticos que pueden ser aplicados en un conjunto amplio de problemas diferentes (Blum & Roli, 2003). Una heurística es un método que intenta esquivar la búsqueda exhaustiva del espacio, utilizando herramientas que aseguren la exploración de las zonas más promisorias y obtener así soluciones cercanas al óptimo (Reeves, 1993).

Las metaheurísticas generalmente se aplican a problemas que no tienen un algoritmo específico que dé una solución satisfactoria o bien cuando no es posible implementar ese método óptimo. La mayoría de las metaheurísticas tienen como objetivo los problemas de optimización combinatoria, pero por supuesto, se pueden aplicar a cualquier problema que se pueda reformular en términos heurísticos.

Las metaheurísticas combinan ideas que provienen de cuatro campos de investigación diferentes: de las técnicas de diseño de algoritmos que resuelven una colección de problemas, de los algoritmos específicos dependientes del problema a resolver, de fuentes de inspiración del mundo real, y de métodos estadísticos.

5.3.1 *Propiedades deseables de una metaheurística*

Cuando se va a desarrollar una metaheurística se espera que esta cuente con ciertas propiedades, tales como el rendimiento, la aplicabilidad y la utilidad ((Moreno Pérez, 2004)). Cada una de estas propiedades se desglosan a continuación:

- Comprensión:
 - Simple: debe estar basada en un principio claro y sencillo.
 - Precisa: los pasos y las fases deben estar formulados en términos concretos.
 - Coherente: los elementos deben deducirse naturalmente de sus principios.
 - Rendimiento:
 - Efectiva: debe proporcionar soluciones optimas o muy cercanas a las óptimas.

- Eficaz: la probabilidad de alcanzar soluciones optimas de casos realistas debe ser alta.
- Eficiente: debe realizar un buen aprovechamiento de recursos computacionales (tiempo de ejecución y espacio en memoria).
- Aplicabilidad:
 - General: debe ser utilizable con buen rendimiento en una amplia variedad de problemas.
 - Adaptable: debe ser capaz de adaptarse a diferentes contextos de aplicación o modificaciones importantes del modelo.
 - Robusta: el comportamiento debe ser poco sensible a pequeñas alteraciones del modelo o contexto de aplicación.
- Utilidad:
 - Interactiva: debe permitir que el usuario puede aplicar sus conocimientos para mejorar el rendimiento del procedimiento.
 - Múltiple: debe suministrar diferentes soluciones alternativas de alta calidad entre las que el usuario pueda elegir.
 - Autonomía: debe permitir un funcionamiento autónomo, libre de parámetros o que se puedan establecer automáticamente.

5.4 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos constituyen una técnica de búsqueda y optimización basada en los principios de la selección natural y la genética. Propuestos inicialmente por John Holland en la década de 1970, estos algoritmos emulan el proceso evolutivo biológico para encontrar soluciones óptimas o cercanas al óptimo en espacios de búsqueda complejos (Arranz de la Peña & Parra Truyol, 2007).

5.4.1 Estructura

El funcionamiento de un algoritmo genético se apoya en la representación de soluciones potenciales como estructuras similares a cromosomas (Gestal Pose, 2000). Estas estructuras, denominadas individuos, conforman una población que evoluciona a través de generaciones sucesivas. Cada individuo codifica una solución candidata al problema en cuestión, típicamente mediante cadenas binarias, aunque también pueden emplearse

representaciones de números reales, permutaciones u otras estructuras de datos según la naturaleza del problema (véase Figura 2).

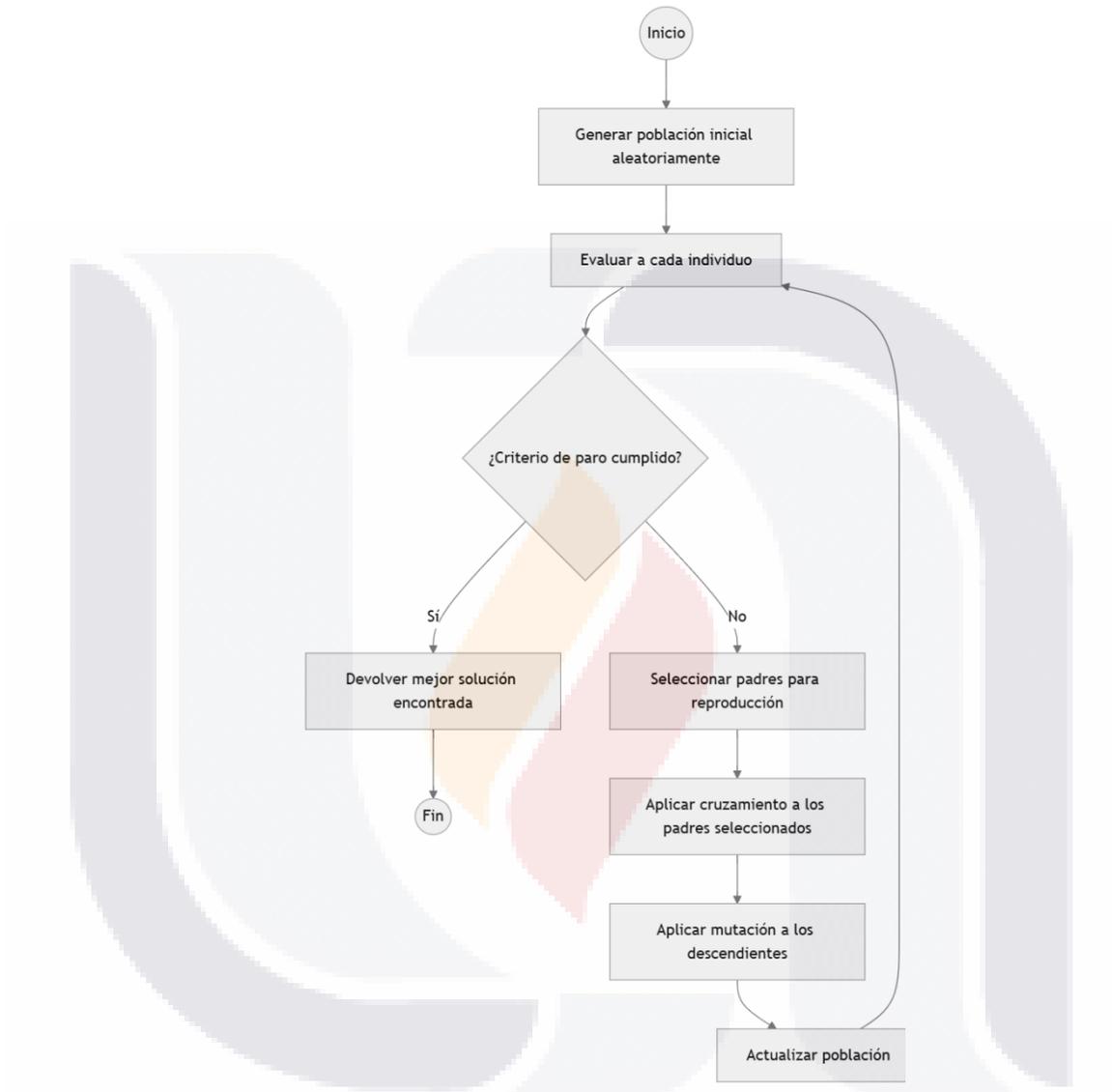


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo genético.

El proceso evolutivo se desarrolla a través de los siguientes componentes esenciales:

- Función de aptitud: evalúa la calidad de cada solución con respecto al problema abordado. Esta función determina la probabilidad de que un individuo sea seleccionado para reproducirse.
- Selección: mecanismo que favorece a los individuos con mayor aptitud, concediéndoles mayor probabilidad de participar en la creación de la siguiente

generación. Entre los métodos de selección más utilizados se encuentran la selección por ruleta, la selección por torneo y la selección elitista.

- Operadores genéticos:
 - Cruzamiento: combina información genética de dos progenitores para generar descendientes que heredan características de ambos.
 - Mutación: introduce cambios aleatorios en los individuos para mantener la diversidad genética y explorar nuevas regiones del espacio de búsqueda.
 - Reemplazo: determina qué individuos conformarán la siguiente generación, considerando tanto a los progenitores como a los descendientes.
 - Criterio de paro: el algoritmo concluye cuando se alcanza un número predefinido de generaciones o cuando las soluciones convergen.

5.4.2 Aplicaciones y ventajas

Los algoritmos genéticos han demostrado su eficacia en numerosos contextos (Gestal Pose, 2000), entre los que destacan:

- Optimización de funciones matemáticas complejas.
- Problemas de planificación y asignación de recursos.
- Diseño de circuitos eléctricos.
- Entrenamiento de redes neuronales.
- Optimización de rutas logísticas.

Las principales ventajas de los algoritmos genéticos radican en su capacidad para:

- Explorar espacios de búsqueda extensos y complejos.
- Trabajar con funciones objetivo no diferenciables o discontinuas.
- Mantener un equilibrio entre exploración y explotación.
- Adaptarse a diversos tipos de problemas mediante ajustes en la representación y los operadores.

5.5 Algoritmos de colonia de hormigas

Los algoritmos de colonia de hormigas pertenecen a la categoría de optimización por enjambre y fueron propuestos por Marco Dorigo en 1992. Estos algoritmos se inspiran en el comportamiento colectivo de las hormigas para encontrar rutas óptimas entre su colonia y las fuentes de alimento (Alonso et al., 2004).

5.5.1 Estructura

En su implementación computacional, los algoritmos de colonia de hormigas utilizan agentes artificiales (hormigas) que construyen soluciones de manera iterativa y depositan feromonas virtuales proporcionales a la calidad de las soluciones encontradas (véase Figura 3).

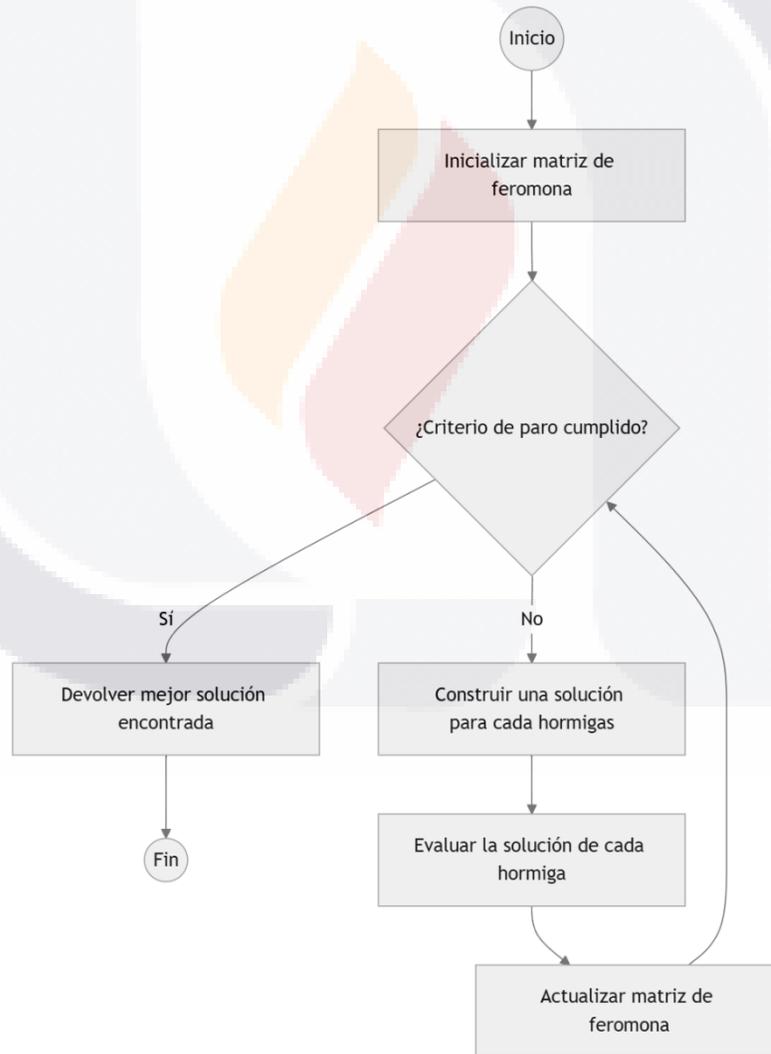


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo de colonia de hormigas.

El proceso general comprende:

- Inicialización: distribución de hormigas artificiales y establecimiento de niveles iniciales de feromona.
- Construcción de soluciones: cada hormiga construye una solución aplicando una política de decisión probabilística que equilibra:
 - Información heurística (conocimiento a priori sobre el problema).
 - Nivel de feromonas (experiencia colectiva acumulada).
- Actualización de feromonas: tras la construcción de soluciones, se ajustan los niveles de feromona mediante:
 - Evaporación: reducción gradual de todos los rastros de feromona.
 - Depósito: incremento de feromonas en componentes de soluciones prometedoras.
- Criterio de paro: el algoritmo concluye cuando se alcanza un número predefinido de iteraciones o cuando las soluciones convergen.

5.5.2 Variantes y aplicaciones

Existen diversas variantes del algoritmo original (Robles Algarín, 2010), entre las que destacan:

- Sistema de hormigas: la implementación original propuesta por Dorigo.
- Sistema de colonia de hormigas: incorpora una regla de transición pseudoaleatoria y actualización local de feromonas.
- Sistema de hormigas MAX-MIN: establece límites superior e inferior para los niveles de feromona.

Los algoritmos de colonia de hormigas han demostrado particular eficacia en:

- Problemas de rutas, como el del viajante de comercio.
- Asignación de tareas y recursos.
- Problemas de enrutamiento en redes de comunicación.
- Planificación de producción.
- Problemas de bioinformática.

5.6 Codificación de soluciones

Existen distintas formas de representar un circuito, pero la mayoría de las representaciones coinciden en que una buena forma de representar un circuito en la computadora es mediante una lista encadenada. El circuito se codifica como una lista de n elementos, es decir, cada componente de la lista contiene la información del n-ésimo elemento, como se muestra en la Figura 4 (Torres Soto et al., 2020).



Figura 4. Codificación de un circuito mediante una lista.

Mientras que cada componente de la lista (o elemento del circuito) se codifica considerando su topología y su magnitud. En donde la topología es la información sobre la conexión del elemento mediante un nodo 1, un nodo 2 y un nodo actual, y la magnitud está compuesta del tipo de elemento, un valor y un multiplicador del valor (véase Figura 5).

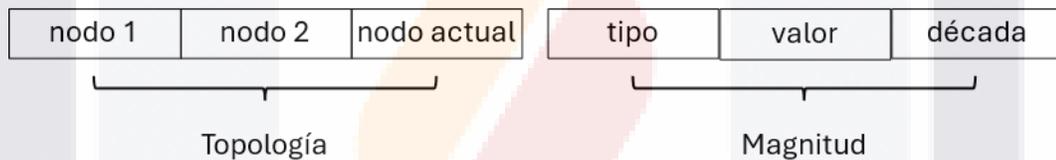


Figura 5. Codificación de un elemento del circuito.

Para codificar la magnitud del elemento, se considera para el valor una serie de valores comerciales (véase Tabla 2) y para la década una serie de valores que determina si se trata de cantidades en el orden nano, micro, mili, kilo, etc. (Pozuelo Muñoz & Cascarosa Salillas, 2022) Según estas consideraciones un elemento se puede codificar en base a la Tabla 1.

Tabla 1. Codificación de la magnitud para cada tipo de elemento.

Elemento	Tipo	Valor	Década
Capacitancia	0	E6 (0 – 5)	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁹ (0 – 4)
Resistencia	1	E12 (0 – 11)	10 ¹ – 10 ⁶ (0 – 5)
Inductancia	2	E12 (0 – 11)	10 ⁻¹ – 10 ⁻⁶ (0 – 5)

Tabla 2. Series de valores comerciales.

Valor	E12	E6	E3
0	10	10	10
1	12	15	22
2	15	22	47
3	18	33	
4	22	47	
5	27	68	
6	33		
7	39		
8	47		
9	56		
10	68		
11	82		

5.7 Simulación de circuitos en WSpice

WSpice (Windows SPICE) es una herramienta de simulación de circuitos electrónicos basada en el simulador SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). Esta herramienta permite el análisis y diseño de circuitos electrónicos mediante la solución numérica de las ecuaciones que describen el comportamiento de los componentes y sus interconexiones. Para el análisis de filtros analógicos pasivos, WSpice ofrece capacidades especializadas en el análisis en frecuencia, permitiendo obtener las características de respuesta en frecuencia (Calvo Martínez, 2008; Montoya Padilla et al., 2024; Torres Soto et al., 2022).

5.7.1 Estructura del archivo de entrada

El archivo de entrada de WSpice, comúnmente con extensión “.cir”, contiene la descripción del circuito y las directivas de simulación. El archivo de entrada está formado por el encabezado, la descripción del circuito, el tipo de análisis y la línea final. La descripción del circuito es una lista de componentes del circuito que contiene el tipo de componente, el nodo 1, el nodo 2 y su dimensión, tal como se muestra a en la Tabla 3.

```

CIRCUITO GENERADO
Vs 1000 0 ac 5V
Rs 1000 1 470ohms
R1 1 2 39e1
R2 2 3 39e1
C1 3 2 33e-9
...
L1 5 6 47e-6
L2 6 1 47e-3
L3 6 1002 10e-6
RL 1002 0 470ohms

.AC DEC 20 1Hz 100kHz
.END
    
```

Encabezado

Descripción del circuito

Tipo de análisis

Línea final

Tabla 3. Ejemplo de archivo de entrada de WSpice.

5.7.2 Archivo de salida.

El archivo de salida está formado por el encabezado, la descripción de las variables y los valores de las variables. La descripción de las variables es un listado de los voltajes y corrientes de cada nodo del circuito y ayuda a identificar su posición en cada punto evaluado, el cual se encuentra en los valores de las variables con su parte real y la imaginaria. Como se muestra en la Tabla 4.

```

Title: CIRCUITO GENERADO
Plotname: AC Analysis
Flags: complex
No. Variables: 13
No. Points: 101

Variables:
  0    frequency    frequency grid=3
  1    v(1)    voltage
  2    v(2)    voltage
  3    v(3)    voltage
  ...

Values:
0    1.0000000000000000e+00,0.0000000000000000e+00
    2.498674454517329e+00,7.391807196136355e-04
    2.498674571125925e+00,7.386768360449142e-04
  ...
    
```

Encabezado

Descripción de las variables

Valores de las variables

Tabla 4. Ejemplo de archivo de salida de WSpice.

6 Trabajos relacionados

A continuación, se presentan algunas de las aportaciones realizadas por diversos autores que utilizan metaheurísticas para automatizar el diseño de circuitos eléctricos (véase Tabla 5).

Tabla 5. Trabajos relacionados y sus principales aportaciones.

Trabajo	Metaheurística (s) utilizada (s)	Tipo de circuito eléctrico	Principales aportaciones
<i>Automatic design of passive analog filters using a genetic algorithm</i> (Torres Soto et al., 2022)	Algoritmo genético	Filtro analógico pasivo pasa bajas	Evolución de la topología y selección de la magnitud los elementos en basa a valores comerciales
<i>Meta-heuristic techniques for optimal design of analog and digital filter</i> (Asmae et al., 2020)	Algoritmo genético y optimización por colonia de hormigas	Filtros analógicos y digitales	Comparación de las metaheurísticas para la optimización y selección de los componentes del filtro
<i>Speciation-based genetic algorithm in analog circuit design</i> (Karci et al., 2016)	Algoritmo genético con especiación	Circuitos analógicos	El uso de un algoritmo genético con especiación mejora la búsqueda local en comparación con algoritmo genético simple
<i>Analog filter design by genetic algorithm</i> (Elkhetali & Aldabiski, 2009)	Algoritmo genético	Filtros analógicos de Butterworth y de Chebyshev	Implementación del algoritmo para optimizar las magnitudes de componentes del filtro

7 Metodología

En la Figura 6 se muestra el diagrama de la metodología para esta investigación.

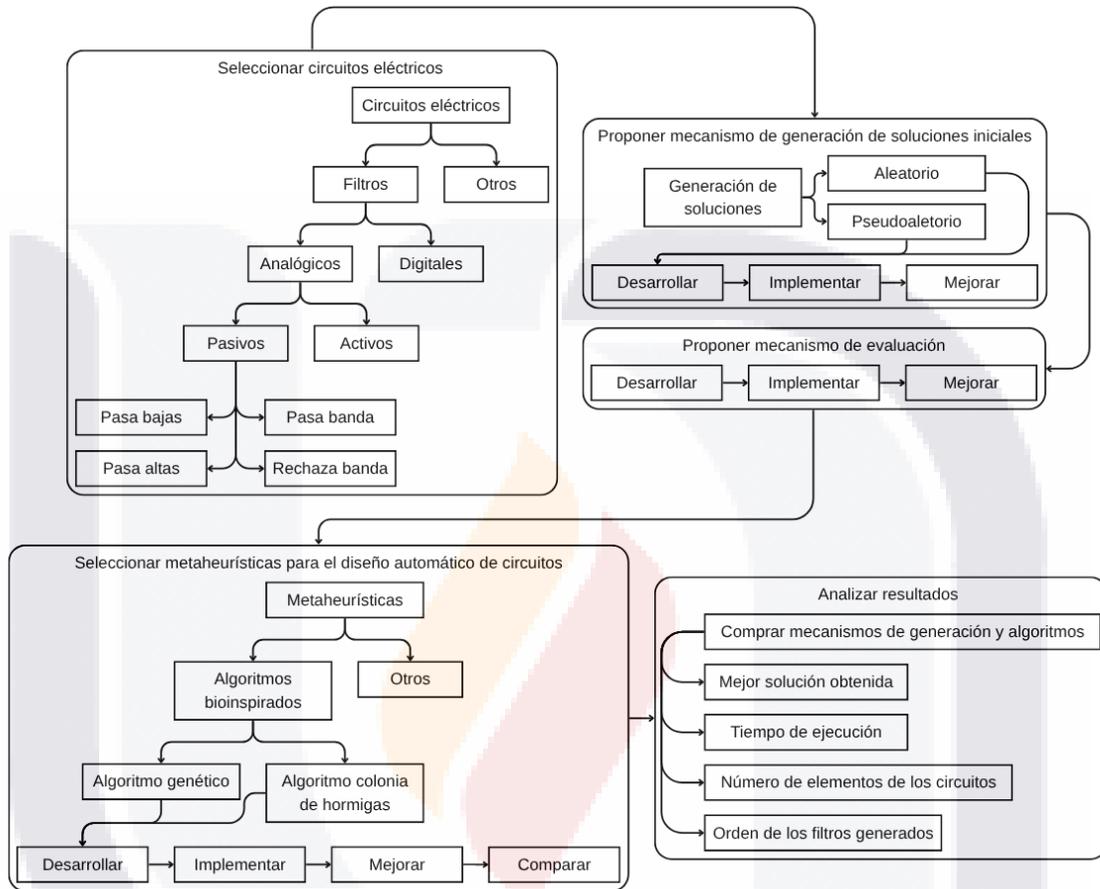


Figura 6. Diagrama de la metodología de esta investigación.

A continuación, se describen cada uno de los pasos de la metodología para esta investigación.

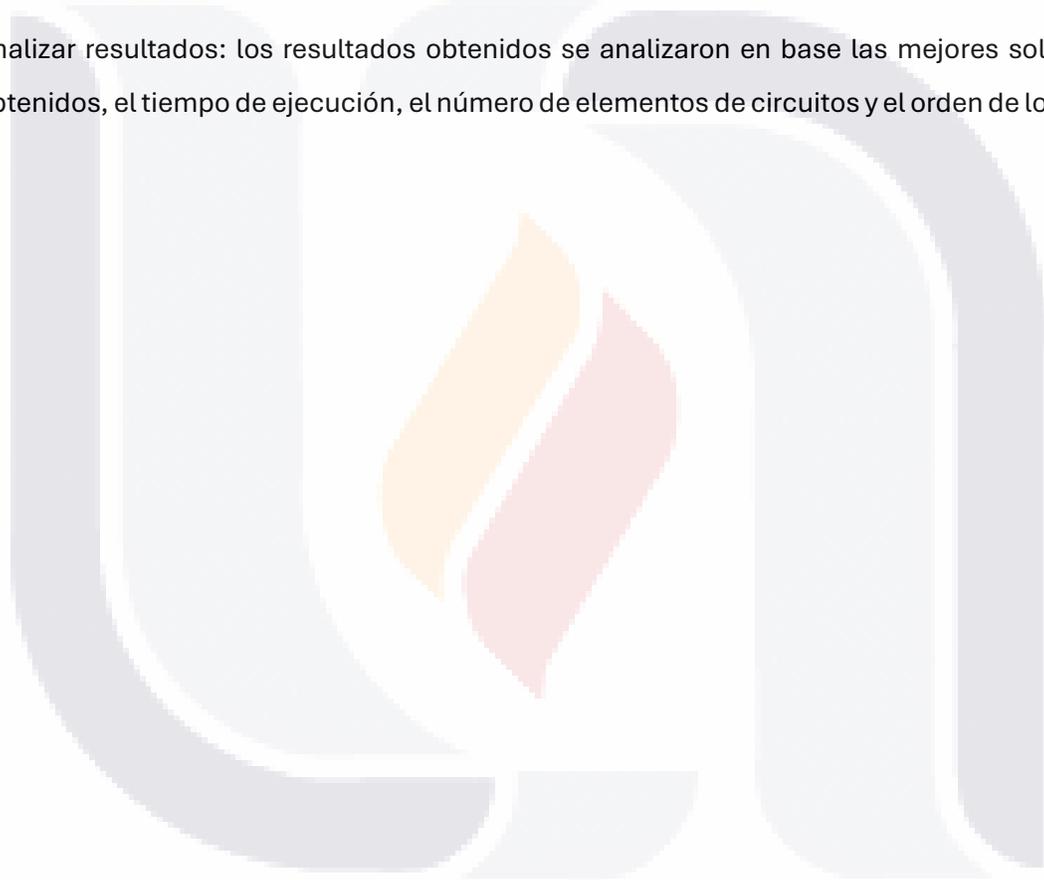
Seleccionar circuitos eléctricos: los circuitos de interés son los filtros analógicos pasivo, de los cuáles se escogieron los cuatros tipos de filtros: pasa bajas, pasa altas, basa banda, rechaza banda.

Proponer mecanismo de generación de soluciones iniciales: es importante definir un buen mecanismo de generación de soluciones iniciales, ya que con estás la metaheurística realizará la exploración y la explotación de las soluciones para encontrar la solución que más se aproxime a una solución óptima. Por lo que se propone un mecanismo aleatorio y uno pseudoaleatorio.

Proponer mecanismo de evaluación: es importante definir un mecanismo de evaluación la cual se asigna según que tanto se aproxima una solución con el objetivo. El mecanismo de evaluación propuesto se adapta a cada uno de los cuatro tipos de filtros.

Seleccionar metaheurísticas para el diseño automático de circuitos: las metaheurísticas de interés son el algoritmo genético y el de colonia de hormigas. Estas metaheurísticas se desarrollaron, implementaron y mejoraron para el diseño automático de circuitos. Finalmente se compararon los resultados obtenidos con cada una de las técnicas.

Analizar resultados: los resultados obtenidos se analizaron en base las mejores soluciones obtenidos, el tiempo de ejecución, el número de elementos de circuitos y el orden de los filtros.



8 Desarrollo

En esta sección se describen los mecanismos para la generación y los mecanismos para implementar el algoritmo genético y de colonia de hormigas, así como el mecanismo para asignar una evaluación a los circuitos generados. Cabe aclarar que todos los mecanismos consideran la codificación de soluciones presentada en la Sección 5.6.

Los circuitos generados por los algoritmos parten de una de un esquema fijo (véase Figura 7), el cual cuenta con una fuente de voltaje alterna y dos resistencias (de la fuente y de carga). Las magnitudes de estos componentes pueden modificarse, para este trabajo se utilizó una fuente con un voltaje de 5 volts con resistencias de 470 ohmios.

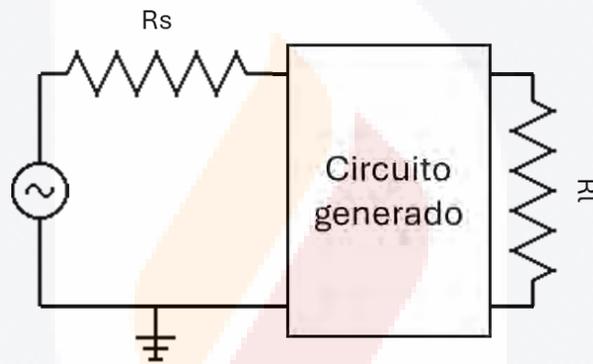


Figura 7. Esquema para generar y simular los circuitos.

8.1 Mecanismo de generación de soluciones iniciales

Cuando se trabaja con metaheurísticas es importante definir cómo se van a generar las soluciones iniciales. Las cuales tienen que ser soluciones factibles y van de la mano con la codificación de las soluciones.

Para este caso se desarrollaron dos mecanismos para generar soluciones iniciales, uno aleatorio y otro pseudoaleatorio. Ambos tienen la cualidad de generar soluciones factibles, evitando generar circuitos abiertos o que alguno de sus elementos esté conectado en corto.

La diferencia es que el primero puede generar circuitos que no se pueden simularse, debido al comportamiento que pueden tener los elementos al estar conectados con otros. Aunque topológicamente no existe ningún error, al momento de ser simulados puede generarse un corto.

8.1.1 Mecanismo de generación aleatorio

Con la codificación de soluciones seleccionada, es fácil construir circuito aleatoriamente, solo se requiere de establecer algunas condiciones de donde se va a colocar un elemento dentro del circuito. Ya que la codificación lleva un control sobre el nodo actual, resulta sencillo establecer las reglas para colocar los elementos.

Dependiendo en que posición (o en que nodo) del circuito se encuentre el primer nodo del elemento a colocar, el segundo nodo puede conectarse a:

- Un nodo a tierra.
- Un nodo siguiente.
- Un nodo anterior.

Todos los elementos pueden colocarse en uno de estos nodos, a excepción del primer elemento a colocar, ya que este no puede ser colocado a un nodo anterior porque no existe nodo anterior a este. De igual forma se establecen reglas para actualizar el nodo actual, según donde se colocó el segundo nodo:

- Si se conectó a tierra, entonces el nodo actual es igual al primer nodo del elemento.
- Si se conectó a un nodo siguiente, entonces el nodo actual es igual al segundo nodo del elemento.
- Si se conectó a un nodo anterior, entonces el nodo actual es igual al primer nodo del elemento.

8.1.2 Mecanismo de generación pseudoaleatorio

Este mecanismo garantiza que los circuitos generados se puedan simular correctamente y, además, no contengan demasiados elementos. Se han estudiado distintas topologías que, sin importar los componentes que contengan, no presentan problemas en la simulación. Como resultado, se obtienen soluciones con un buen desempeño, lo que ayuda a que un algoritmo encuentre buenas soluciones en pocas generaciones (Montoya Padilla et al., 2024).

El mecanismo parte de la idea de que los circuitos están formados por topologías base que se van replicando. De esta forma, se evita generar circuitos abiertos o con elementos que estén conectados en corto.

Una topología base está formada por dos o tres elementos que forman un circuito en serie, en paralelo o mixto. En donde, según el tipo de elementos, se consideran tres tipos de circuitos según su topología base:

- Circuitos con dos tipos de elementos.
- Circuitos con tres tipos de elementos.
- Circuitos con tres elementos y dos tipos de elementos.

Los circuitos con dos tipos de elementos están formados en base a las topologías mostradas en la Figura 8. Mientras que los circuitos con tres tipos de elementos están formados en base a las topologías mostradas en la Figura 9. De forma que la disposición de los elementos para los circuitos con dos tipos elementos se muestra en la Tabla 6 y para los circuitos con tres tipos de elementos se muestran en la Tabla 7.

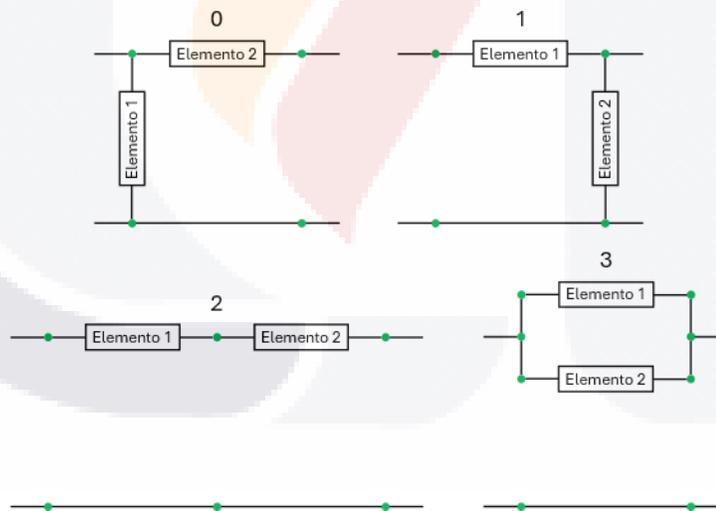


Figura 8. Topologías base para circuitos con dos elementos.

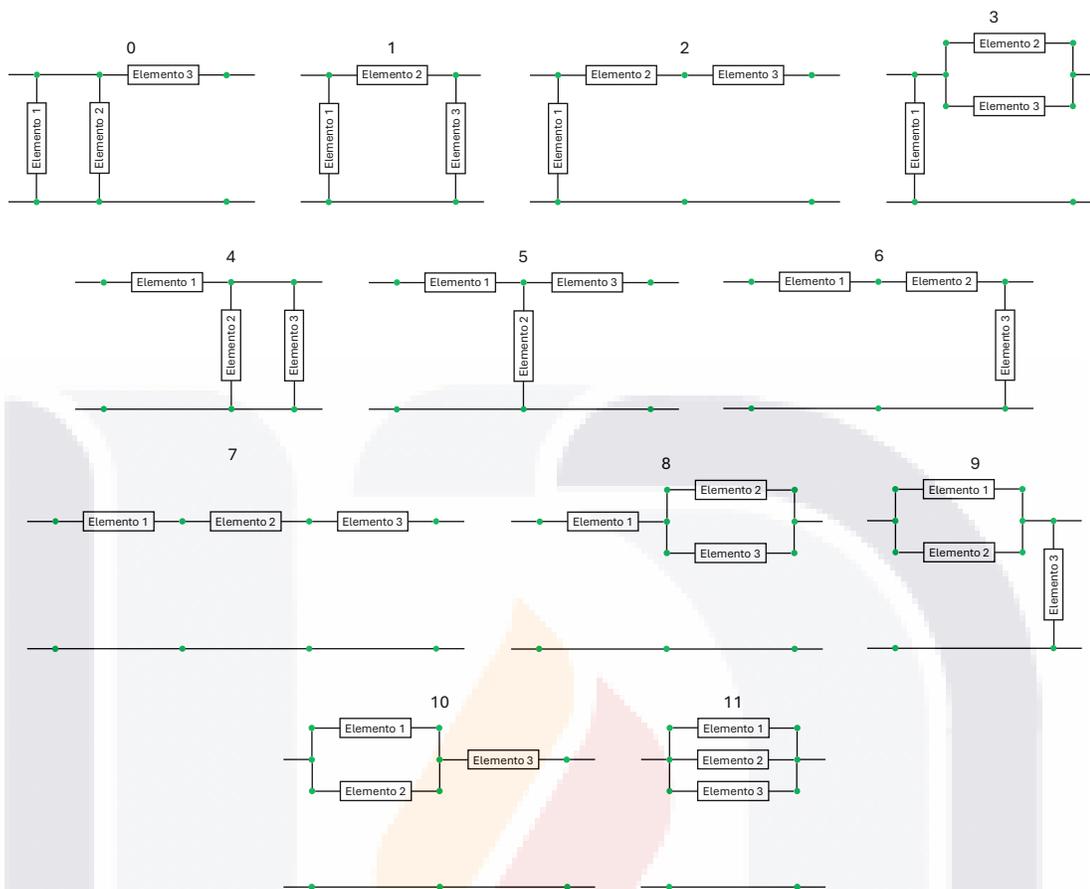


Figura 9. Topologías base para circuitos con tres elementos.

Tabla 6. Disposición de elementos para circuitos con dos elementos.

Disposición	Elemento 1	Elemento 2
0	Capacitancia	Resistencia
1	Capacitancia	Inductancia
2	Resistencia	Capacitancia
3	Resistencia	Inductancia
4	Inductancia	Capacitancia
5	Inductancia	Resistencia

Tabla 7. Disposición de elementos para circuitos con tres elementos.

Circuito	Disposición	Elemento 1	Elemento 2	Elemento 3
Circuitos con tres tipos de elementos	0	Capacitancia	Resistencia	Inductancia
	1	Capacitancia	Inductancia	Resistencia
	2	Resistencia	Capacitancia	Inductancia
	3	Resistencia	Inductancia	Capacitancia
	4	Inductancia	Capacitancia	Resistencia
	5	Inductancia	Resistencia	Capacitancia
Circuitos con tres elementos y dos tipos de elementos	0	Capacitancia	Resistencia	Capacitancia
	1	Capacitancia	Inductancia	Capacitancia
	2	Resistencia	Capacitancia	Resistencia
	3	Resistencia	Inductancia	Resistencia
	4	Inductancia	Capacitancia	Inductancia
	5	Inductancia	Resistencia	Inductancia

8.2 Mecanismo de evaluación

El objetivo de los algoritmos es generar un circuito el cuál su voltaje de salida se aproxime a la respuesta en frecuencia de un filtro ideal. Este estará definido por cuatro parámetros, el voltaje de paso y de atenuación, y la frecuencia de paso y de atenuación, esto en el caso de los filtros que solo cuentan con una sola banda de corte. Si el filtro requiere de más bandas de corte, se requiere añadir una frecuencia de paso y de atenuación por cada banda de corte extra (véase Figura 10).

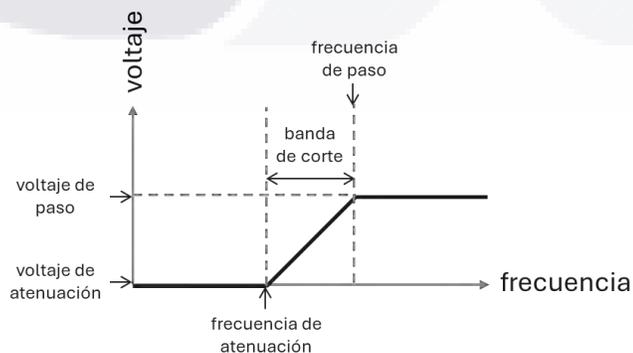


Figura 10. Parámetros del filtro objetivo.

La evaluación de las soluciones se realiza comparando el filtro ideal objetivo con el voltaje de salida del filtro generado, es decir, se considera el error absoluto entre el filtro objetivo y el generado en distintos puntos de frecuencia (véase). El error se ajusta según las siguientes condiciones:

- Si el error se encuentra dentro del rango del error permitido, este se considera como 0.
- Si el error se encuentra dentro del rango del error sin castigar, es el error no se modifica.
- Si el error se encuentra dentro del rango del error castigado, este se castiga con un 10%.

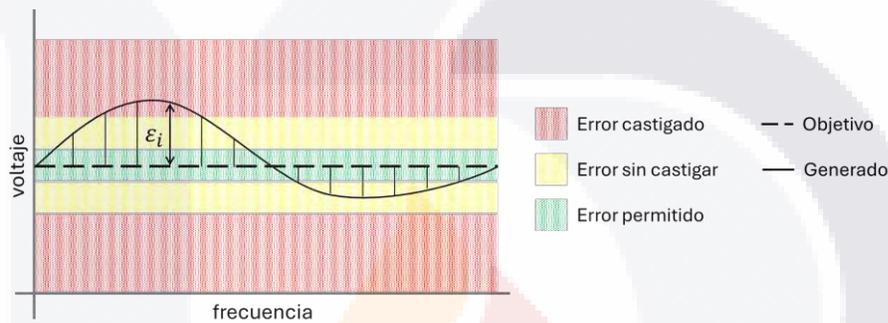


Figura 11. Representación del error entre el filtro objetivo y el generado.

Una vez que se han ajustado los errores (en base a las condiciones mencionadas), se procede a calcular la evaluación de la solución aplicando la Ecuación 1. Es claro que, con esta función de evaluación, los mejores filtros serán aquellos en los que exista una menor diferencia entre el filtro generado y el objetivo.

$$F = \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (\delta_i)^2}{N-1}}}$$

Ecuación 1. Función de evaluación.

donde:

δ_i : es el i -ésimo error ajustado.

N : es el número de puntos de frecuencia evaluados.

8.3 Algoritmo genético propuesto

Los mecanismos del algoritmo genético se desarrollaron con los mismos objetivos de la generación pseudoaleatoria, es decir, que los circuitos tienen que mantener la cualidad de poderse simular una vez que estos pasan por cada uno de los mecanismos. De esta forma, todos los circuitos generados mantienen esta cualidad desde el inicio hasta el final (véase Figura 12).

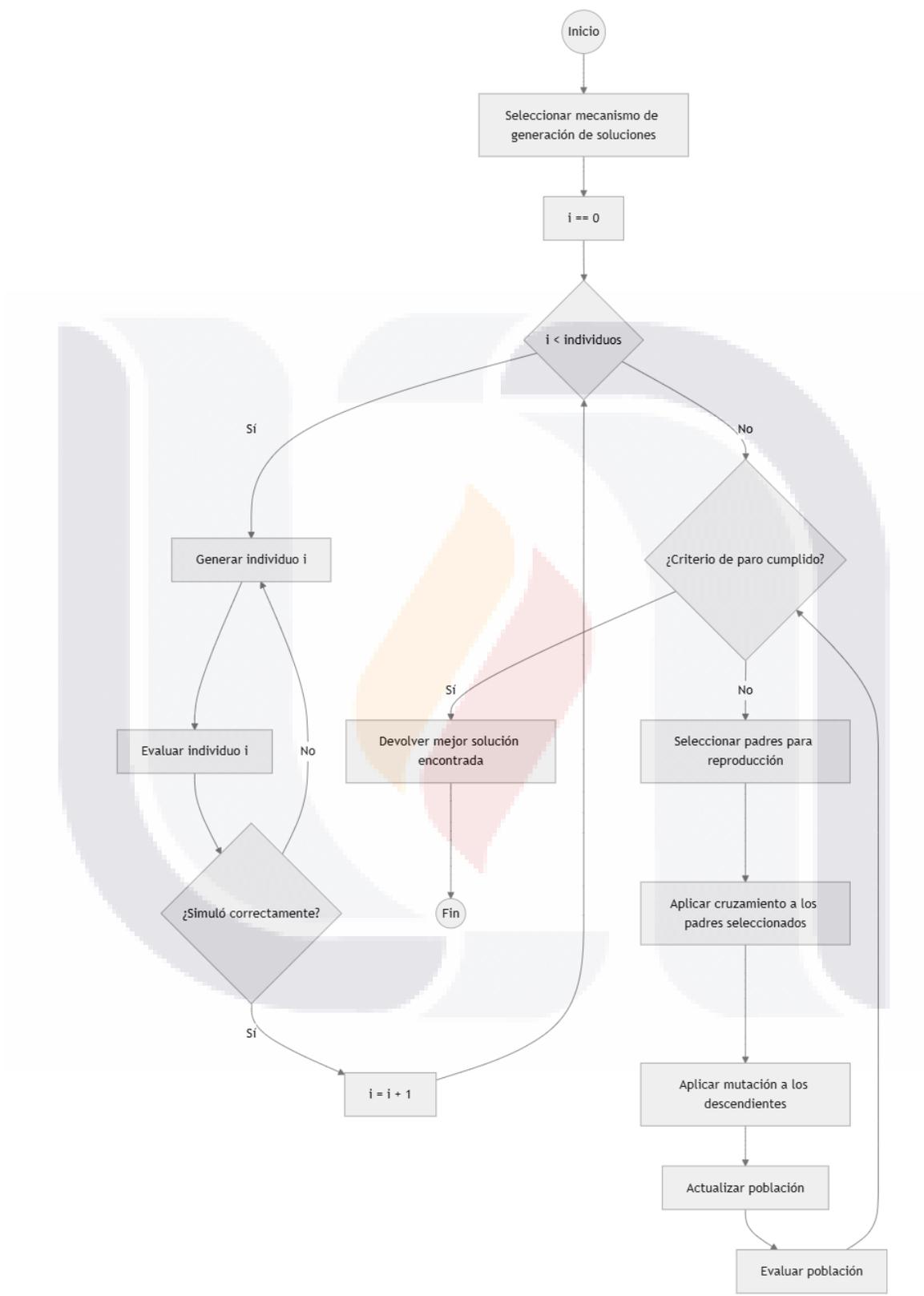


Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo genético propuesto.

8.3.1 Mecanismo de cruzamiento y mutación

El mecanismo de cruzamiento propuesto consiste en intercambiar todos los elementos de un tipo que ambos padres tengan en común, de tal manera que los hijos conserven las topologías de los padres, pero intercambien sus elementos en común. Esto garantiza que los hijos generados puedan simularse al igual que sus padres. Ya que se ha realizado el cruzamiento, los hijos mutan al cambiar la magnitud de uno de sus elementos.

Por ejemplo: se tienen los padres de la Figura 13 los cuales están formados por capacitancias y resistencias, en este caso se decide que se van a intercambiar las capacitancias. Entonces el hijo conserva la topología del primer padre e intercambia la magnitud de las capacitancias del segundo padre dando como resultado el hijo de la Figura 14.

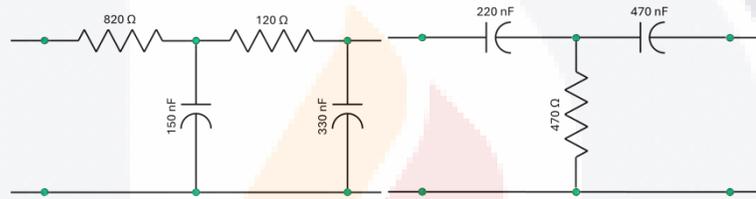


Figura 13. Padres para generar nuevos circuitos.

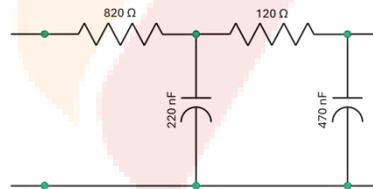


Figura 14. Hijo producto de la cruce de los padres de la Figura 13.

En otras palabras, las magnitudes de las de las capacitancias 150 nF a 220 nF y de 330 nF a 470 nF. Conservando la topología del primer padre, pero con las magnitudes del segundo padre. Ha de recordar que las magnitudes se intercambian seleccionando un tipo de elemento que tengan en común los padres, que para ejemplo anterior son resistencias y capacitancias, y se decidió intercambiar las capacitancias (véase Figura 15).

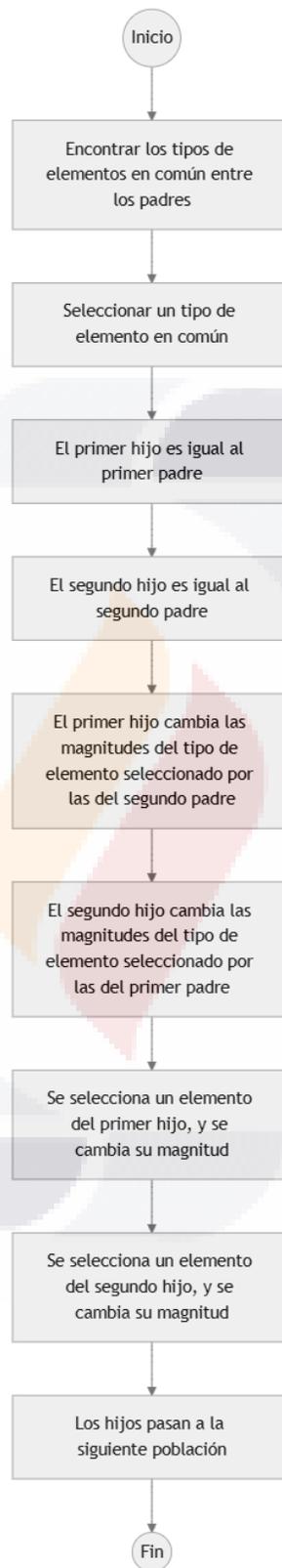


Figura 15. Diagrama de flujo de los mecanismos de cruzamiento y de mutación.

8.4 Algoritmo de colonia de hormigas propuesto

Al igual que el algoritmo genético, el algoritmo de colonia de hormigas se desarrolló pensando en un optimizador de parámetros, es decir, encontrar la mejor combinación de magnitudes para cada uno de los elementos del circuito. Este algoritmo recorre cada uno de los elementos del circuito para asignarles una magnitud (véase Figura 16).

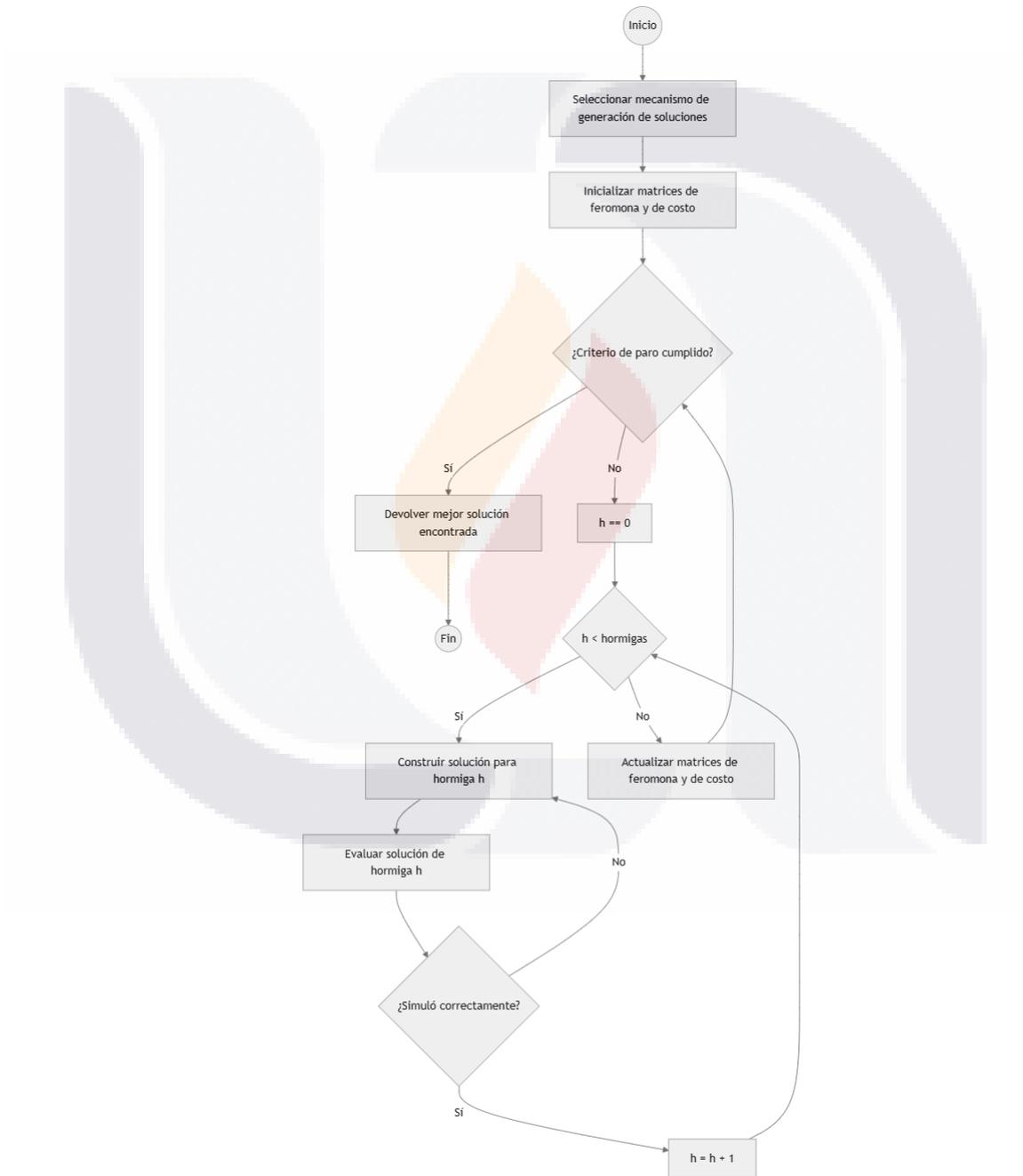


Figura 16. Diagrama de flujo del algoritmo de colonia de hormigas propuesto.

Tomando en cuenta que un filtro analógico está formado por capacitancias, resistencias y/o inductancias. Se consideró tener una matriz de feromona y de costo por cada tipo de elemento, ya que cada tipo de elemento tiene diferentes especificaciones para asignarle una magnitud. En otras palabras, cada tipo de elemento contará con una matriz de feromona y de costo de $n \times m$, donde n representa la década y m el valor (véase Figura 17).



Figura 17. Representación de las matrices de feromona y de costo, para cada tipo de elemento.

Ahora bien, resulta evidente pensar que los circuitos generados pueden contener más de un tipo de elemento. Si solo se cuenta con una matriz por tipo de elemento, se puede caer en soluciones en donde a todos los elementos de un tipo, se les asignará la magnitud. Para evitar caer en este tipo de soluciones, se propuso tener varias matrices por cada tipo de elemento, es decir, que cada tipo de elemento cuenta con varias matrices, según el número de veces que se repite un tipo elemento en el circuito (véase Figura 18).



Figura 18. Representación final de las matrices de feromona y de costo, para cada tipo de elemento.

Para el caso de las matrices de costos, se definen en base a la evaluación asignada a cada solución. Es decir, que el costo de utilizar un elemento en cierta posición con cierta magnitud será igual a la aptitud del circuito o solución. Considerando que pueden existir más de circuito con el mismo tipo de elemento en la misma posición y con la misma magnitud, entonces el costo será igual a la media de la aptitud de los circuitos o soluciones que comparten esta característica. Ya que el costo depende de la aptitud de cada solución, este se actualizar en cada iteración, al igual que la feromona.

8.4.1 Selección de magnitudes

Para generar nuevas soluciones, el algoritmo le asigna una probabilidad a cada una de las posibles magnitudes de cada elemento, esto en base la feromona y al costo (véase Ecuación 2). Se tiene que calcular la probabilidad del l – tipo de elemento en la i – esima posición con el j – esimo valor y la k – esima década.

$$p_{ijk}^l = \frac{\tau_{ijk}^\alpha \cdot \eta_{ijk}^\beta}{\sum \tau_{ijk}^\alpha \cdot \eta_{ijk}^\beta}$$

Ecuación 2. Probabilidad de seleccionar una magnitud.

Donde el denominador es la suma de todas las feromonas y todos los costos de la sub matriz de la posición i del conjunto de matrices del tipo de elemento.

8.4.2 Actualización de la matriz de feromona

Las matrices de feromona se actualizan en base a la magnitud y la posición de los elementos de cada uno de los circuitos generados. Si el circuito contiene cierto elemento con una magnitud y una posición dada, entonces se realiza un aumento de la feromona en base a la Ecuación 3 y Ecuación 4, en caso contrario solo se evapora un porcentaje de la feromona.

$$\tau_{ijk}^{nueva} = (1 - \rho)\tau_{ijk}^{actual} + \sum_l \Delta\tau_{ijk}^l$$

Ecuación 3. Actualización de feromona.

$$\Delta\tau_{ijk}^l = \begin{cases} Q/L_l & \text{si } l \text{ es un elemento } ijk \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

Ecuación 4. Incremento de la feromona.

Adicionalmente se agrega una condición para evitar que alguna de las combinaciones se quede sin feromona, o que la nueva feromona llegue a 0. En este caso cuando se llega a obtener una nueva feromona es 0, esta se considera como 0.001. De este modo no se descarta por completo esta combinación, solo tiene una menor probabilidad de ser seleccionada. Así el algoritmo puede seguir explorando todas las combinaciones posibles.

8.4.3 Actualización de costos

Las matrices de costos se actualizan en base a la media aptitud de los circuitos que contienen cierto tipo de elemento con una magnitud y una posición dada. En caso de que ningún circuito contenga dicho elemento, entonces el costo no cambia, es decir que el costo se mantiene igual (véase Ecuación 5).

$$\eta_{ijk}^{nuevo} = \begin{cases} \bar{F}_{ijk}^l & \text{si } l \text{ es un elemento } ijk \\ \eta_{ijk}^{actual} & \text{otro caso} \end{cases}$$

Ecuación 5. Actualización de costo.

El costo se consideró que, de esta forma, ya que para el caso de los filtros puede ser arbitrario considerar el costo como el número de elementos. Porque la teoría dice que entre más se replique una topología va aumentando el orden del filtro.

8.5 Aplicación para visualizar los resultados

Como parte de este trabajo de investigación, se desarrolló una aplicación para visualizar las mejores soluciones de los algoritmos. Esta fue desarrollada utilizando el lenguaje de programación Java, aprovechando su portabilidad y amplio ecosistema de librerías para el desarrollo de interfaces gráficas. El núcleo de la aplicación integra las implementaciones de los algoritmos desarrollados (algoritmo genético y de colonia de hormigas). El flujo de la aplicación se estructuró en tres secciones principales (véase Figura 19):

- **Entrada de parámetros:** permite al usuario especificar las características del filtro a generar, mediante cuatro parámetros: voltaje de paso, voltaje de atenuación, frecuencia de paso y frecuencia de atenuación. La interfaz incluye validación de datos en tiempo real para asegurar que los valores ingresados sean válidos y consistentes.
- **Selección del algoritmo:** el programa ejecuta un algoritmo para generar el filtro en base a las especificaciones del usuario. El programa permite seleccionar previamente el algoritmo que se pretende ejecutar, esto como parte de la configuración de este.
- **Muestra de resultados:** finalmente, el programa presenta un gráfico de voltaje contra frecuencia para comparar la salida del filtro objetivo contra la del filtro generado, así como el diagrama eléctrico del circuito generado. El diagrama eléctrico del filtro se

genera automáticamente utilizando representaciones estándar de los componentes eléctricos e incluye las magnitudes de los componentes.

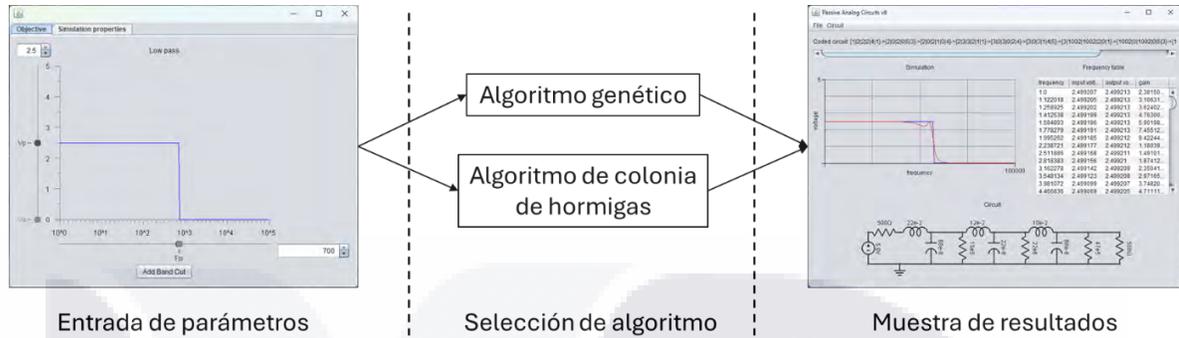


Figura 19. Diagrama del flujo del programa.

Cabe mencionar que tanto el gráfico de voltaje contra frecuencia como el diagrama eléctrico pueden exportarse como imágenes en formato PNG. Además, que la aplicación se diseñó considerando aspectos de usabilidad y de modalidad para futuras actualizaciones o mejoras, como la incorporación de nuevos algoritmos o tipos de filtros.

En esta versión de la aplicación el usuario requiere de ciertos conocimientos para decidir que algoritmo ejecutar, pero se espera desarrollar una nueva versión en la que la decisión del algoritmo a ejecutar dependa del tipo de filtro a ejecutar o mostrar una sugerencia sobre el algoritmo a ejecutar.

9 Experimentación y resultados

La comparación entre el algoritmo genético y el de colonia hormigas, se llevó a cabo tras realizar una serie de experimentos probando los algoritmos con diferentes parámetros (véase Tabla 8 y Tabla 9), diferente mecanismo generación de soluciones iniciales (aleatorio y pseudoaleatorio) y generando filtros pasa bajas, pasa altas, pasa banda y rechaza banda. En el caso del algoritmo genético se probó cambiando el tamaño de la población, número de generaciones, probabilidad de cruzamiento y de mutación, mientras que para el algoritmo de colonia de hormigas se modificó el número de hormigas, el número de iteraciones, el valor de alfa y beta.

Tabla 8. Parámetros utilizados en la experimentación del algoritmo genético.

Tamaño de población	Número de generaciones	Probabilidad de cruzamiento	Probabilidad de mutación
100	15	70	10
150	25	80	15

Tabla 9. Parámetros utilizados en la experimentación del algoritmo colonia de hormigas.

Número de hormigas	Número de iteraciones	Alfa	Beta
100	15	0.5	2
150	25	1	5

Para cada algoritmo con sus diferentes combinaciones de parámetros, para cada mecanismo de generación y para cada tipo de filtro, se realizaron 10 ejecuciones, es decir que en total se realizaron 640 para cada tipo de filtro (véase Tabla 10).

Tabla 10. Pruebas realizadas en los algoritmos para cada tipo de filtro.

Tipo de filtro	Algoritmo genético con generación aleatoria	Algoritmo genético con generación pseudoaleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación aleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación pseudoaleatoria
Pasa bajas	160	160	160	160
Pasa altas	160	160	160	160
Pasa banda	160	160	160	160
Rechaza banda	160	160	160	160

De cada una de las pruebas realizadas se obtuvieron los siguientes datos, como medida de desempeño de los filtros generados:

- La aptitud de la mejor solución obtenida.
- El tiempo de ejecución del algoritmo.
- El promedio de elementos del circuito del conjunto de soluciones.
- El promedio del orden de filtros del conjunto de soluciones.

A todos los datos obtenidos se les realizaron pruebas de normalidad y homogeneidad, para decidir si utilizar pruebas paramétricas (prueba ANOVA) o no paramétricas (prueba Kruskal-Wallis) para encontrar diferencias estadísticas entre los grupos. Inicialmente, estas pruebas se realizaron a los conjuntos de 160 pruebas para encontrar los mejores parámetros (de las combinaciones utilizadas) de cada uno los algoritmos por variables establecidas (véase Tabla 11, Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14).

Tabla 11. Prueba de hipótesis de la distribución de la aptitud de la mejor solución obtenida.

Hipótesis: No hay diferencia significativa entre los grupos para <i>mejor</i>				
Tipo de filtro	Algoritmo genético con generación aleatoria	Algoritmo genético con generación pseudoaleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación aleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación pseudoaleatoria
Pasa bajas	No se rechaza	Se rechaza	No se rechaza	No se rechaza
Pasa altas	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza
Pasa banda	Se rechaza	Se rechaza	No se rechaza	No se rechaza
Rechaza banda	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza

Tabla 12. Prueba de hipótesis de la distribución del tiempo de ejecución del algoritmo.

Hipótesis: No hay diferencia significativa entre los grupos para <i>tiempo</i>				
Tipo de filtro	Algoritmo genético con generación aleatoria	Algoritmo genético con generación pseudoaleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación aleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación pseudoaleatoria
Pasa bajas	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza
Pasa altas	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza
Pasa banda	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza
Rechaza banda	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza

Tabla 13. Prueba de hipótesis de la distribución del promedio de elementos del circuito del conjunto de soluciones.

Hipótesis: No hay diferencia significativa entre los grupos para <i>elementos</i>				
Tipo de filtro	Algoritmo genético con generación aleatoria	Algoritmo genético con generación pseudoaleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación aleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación pseudoaleatoria
Pasa bajas	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza
Pasa altas	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza
Pasa banda	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza
Rechaza banda	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza

Tabla 14. Prueba de hipótesis de la distribución del promedio del orden de filtros del conjunto de soluciones.

Hipótesis: No hay diferencia significativa entre los grupos para <i>orden</i>				
Tipo de filtro	Algoritmo genético con generación aleatoria	Algoritmo genético con generación pseudoaleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación aleatoria	Algoritmo de colonia de hormigas con generación pseudoaleatoria
Pasa bajas	No se rechaza	No se rechaza	Se rechaza	No se rechaza
Pasa altas	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza
Pasa banda	No se rechaza	Se rechaza	No se rechaza	No se rechaza
Rechaza banda	No se rechaza	No se rechaza	Se rechaza	No se rechaza

En base al análisis estadístico realizado, se encontró la mejor combinación de parámetros de los algoritmos para obtener mejores resultados (considerando la aptitud de las soluciones y el tiempo de ejecución; véase Tabla 15 y Tabla 16). En general se puede observar que el algoritmo de colonia de hormigas requiere de menos iteraciones para llegar a resultados semejantes al algoritmo genético, sin embargo, ambos algoritmos se ejecutan en tiempos muy similares.

Tabla 15. Parámetros sugeridos para el algoritmo genético.

Generación	Tipo de filtro	Tamaño de población	Número de generaciones	Probabilidad de cruzamiento	Probabilidad de mutación
Aleatoria	Pasa bajas	100	15	70	10
	Pasa altas	100	15	70	10
	Pasa banda	150	15	70	15
	Rechaza banda	100	25	70	10
Pseudoaleatoria	Pasa bajas	100	25	80	10
	Pasa altas	100	25	70	10
	Pasa banda	150	25	70	10
	Rechaza banda	100	25	70	10

Tabla 16. Parámetros sugeridos para el algoritmo de colonia de hormigas.

Generación	Tipo de filtro	Número de hormigas	Número de iteraciones	Alfa	Beta
Aleatoria	Pasa bajas	100	15	0.5	5
	Pasa altas	100	15	0.5	5
	Pasa banda	100	15	0.5	5
	Rechaza banda	100	15	1	2
Pseudoaleatoria	Pasa bajas	100	15	0.5	2
	Pasa altas	100	25	0.5	2
	Pasa banda	100	15	0.5	2
	Rechaza banda	100	15	0.5	2

Posteriormente, se realizó una comparación de los algoritmos en sus mejores condiciones. Inicialmente se compararon los algoritmos con sus dos funciones de generación para encontrar con cuál se obtienen mejores resultados, para finalmente realizar la comparación de los dos tipos algoritmos y decidir cuál es mejor para generar cierto tipo de filtros (véase Figura 20).

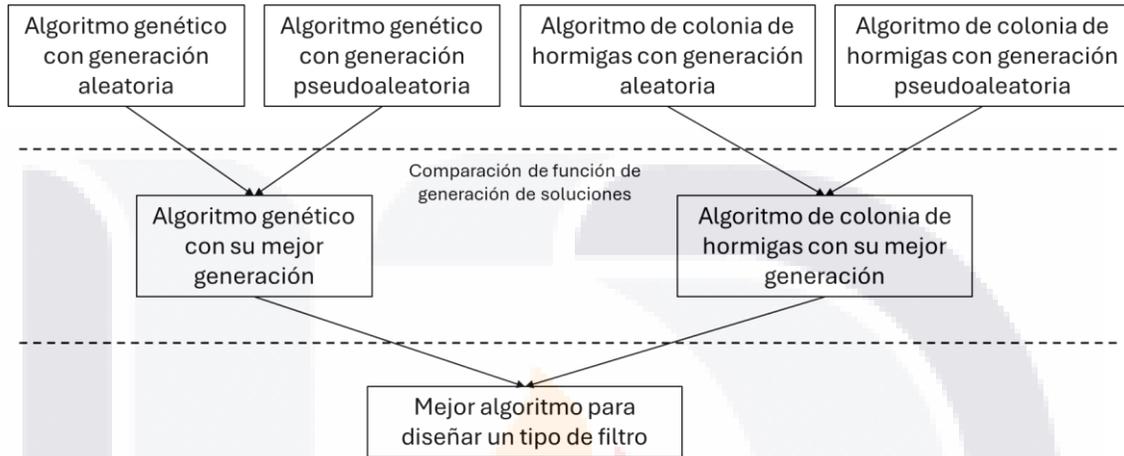


Figura 20. Proceso de comparación de los algoritmos.

Siguiendo con el proceso de comparación de los algoritmos, se encontró cuál es el mejor mecanismo de generación para cada algoritmo, según el tipo de filtro que se pretenda diseñar (véase Tabla 17).

Tabla 17. Mecanismo de generación sugerido para cada algoritmo según el tipo de filtro a generar.

Algoritmo	Tipo de filtro	Mecanismo de Generación
Genético	Pasa bajas	Aleatoria
	Pasa altas	Aleatoria
	Pasa banda	Pseudoaleatoria
	Rechaza banda	Aleatoria
Colonia de hormigas	Pasa bajas	Pseudoaleatoria
	Pasa altas	Pseudoaleatoria
	Pasa banda	Aleatoria
	Rechaza banda	Pseudoaleatoria

Como paso final se compararon los algoritmos para cada tipo de filtro, para encontrar aquel algoritmo que se adapta mejor a un tipo de filtro. En general se observó que los algoritmos con el mecanismo de generación aleatorio requieren de menos tiempo de ejecución, pero con el mecanismo de generación pseudoaleatorio se genera filtro de mayor orden. En las siguientes figuras (véase Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24) se muestra la comparación de las 10 ejecuciones de cada algoritmo para cada tipo de filtro con su mejor generación (véase Tabla 17).

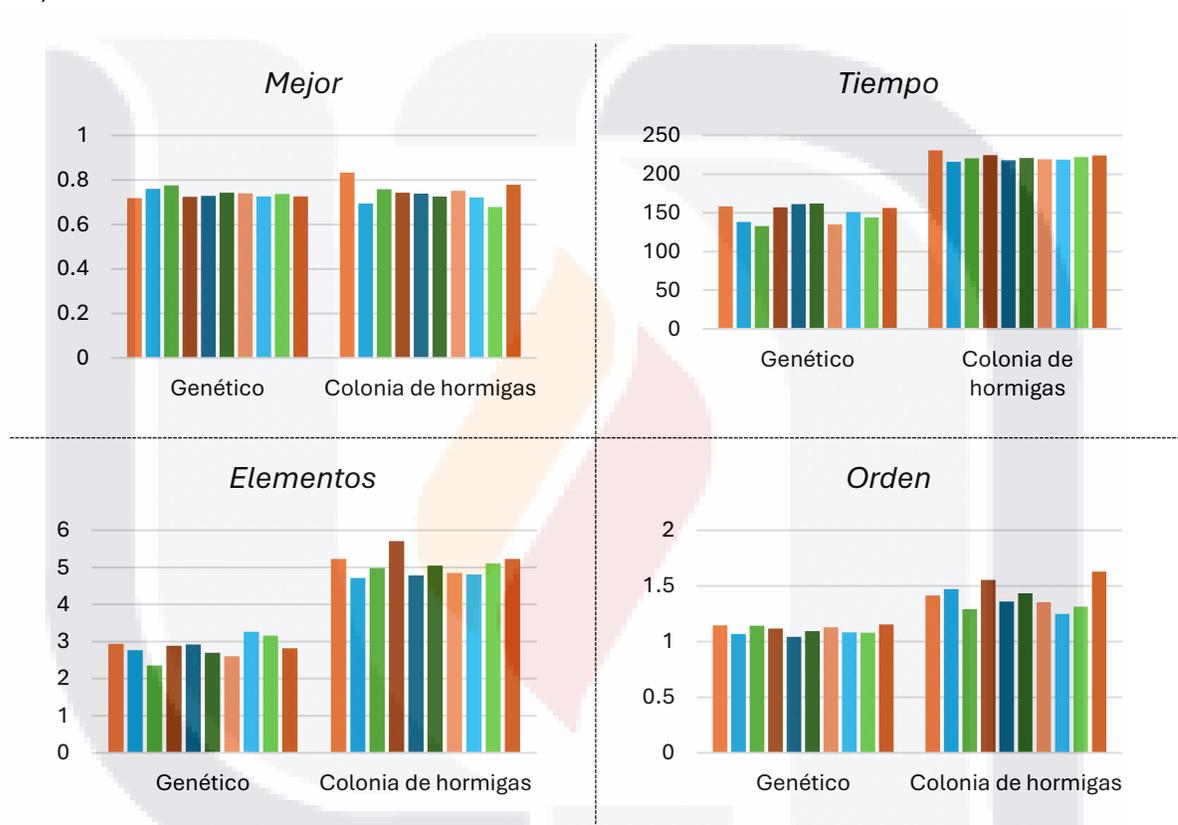


Figura 21. Comparación de variables entre el algoritmo genético y de colonia de hormigas para filtros pasa bajas.

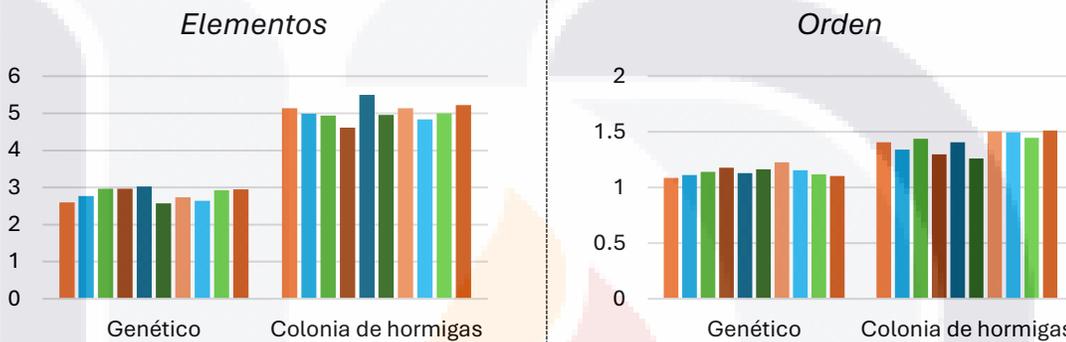
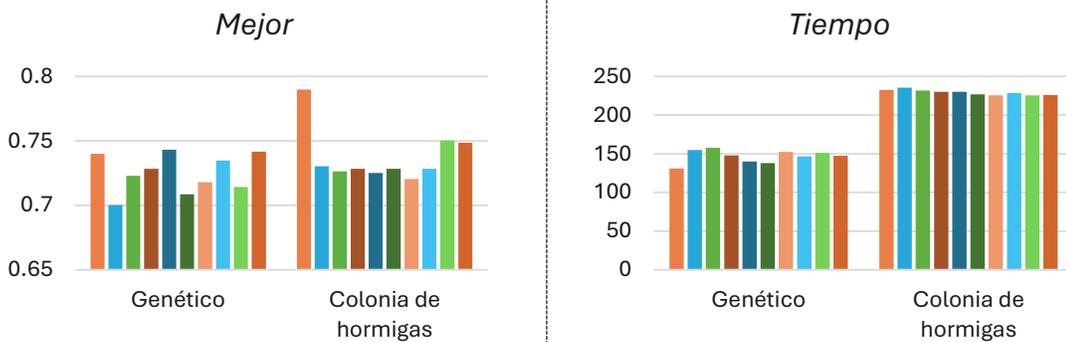


Figura 22. Comparación de variables entre el algoritmo genético y de colonia de hormigas para filtros pasa altas.

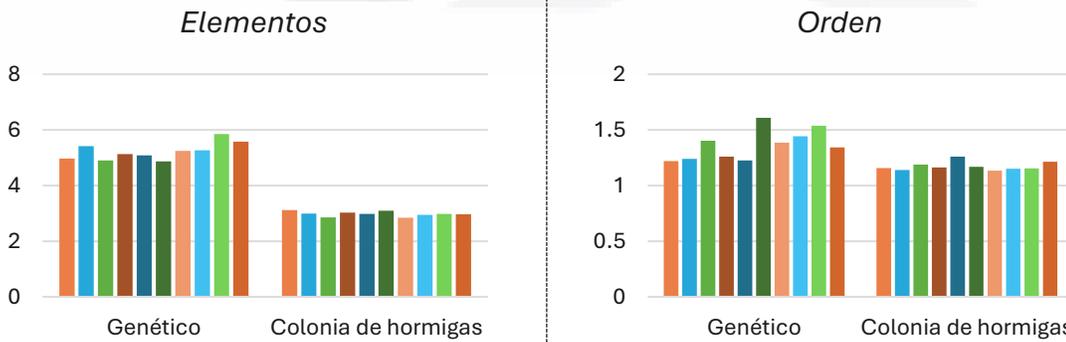
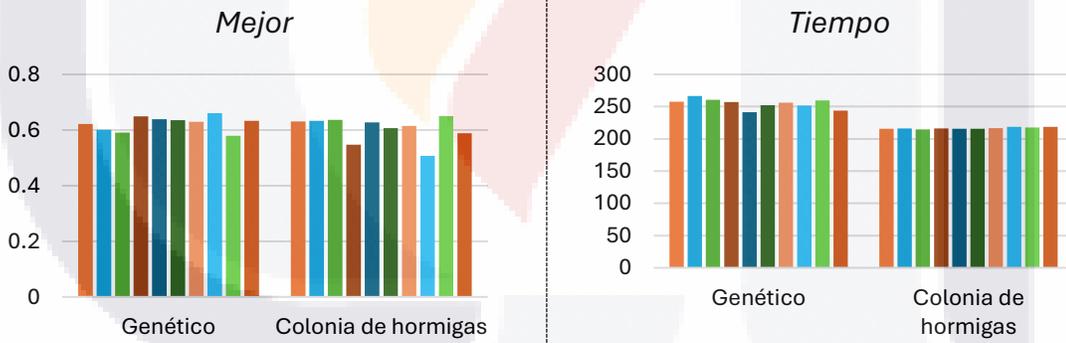


Figura 23. Comparación de variables entre el algoritmo genético y de colonia de hormigas para filtros pasa banda.

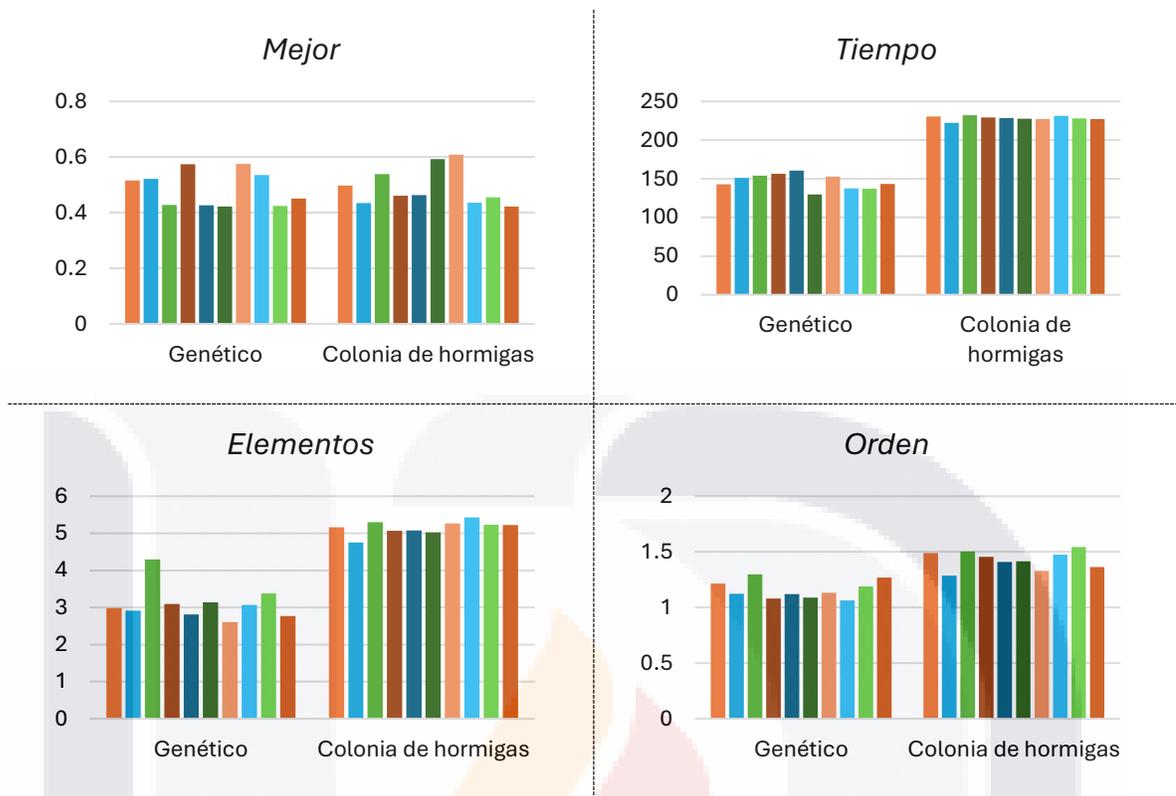


Figura 24. Comparación de variables entre el algoritmo genético y de colonia de hormigas para filtros rechaza banda.

Para cada tipo de filtro se logró identificar que el mejor algoritmo es aquel que tiene el mecanismo de generación de pseudoaleatorio, es decir, el mejor es algoritmo de colonia de hormigas para filtros pasa bajas, pasa altas y rechaza banda, y el algoritmo genético para de filtros pasa banda, ya que estos generan filtros de mayor orden.

Si lo que se pretende es generar filtros en un menor tiempo, se recomendaría utilizar los algoritmos con el mecanismo de generación aleatoria, es decir, para filtros pasa bajas, pasa altas y rechaza banda se recomienda utilizar el algoritmo genético y para filtros pasa banda se recomienda el algoritmo de colonia de hormigas.

9.1 Mejores resultados

A continuación, se presentan los mejores filtros generados por los algoritmos, con su respectivo objetivo. Se observa que las mejores aproximaciones son para los filtros pasa bajas y pasa altas, mientras que para los filtros pasa banda y rechaza banda no se aproximan tanto, pero siguen el comportamiento esperado (véase Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28).

Objetivo:
 Voltaje de paso: 2.5 volts
 Voltaje de atenuación: 0 volts
 Banda de paso: 1 Hz – 700 Hz
 Banda de atenuación: 750 Hz – 100 kHz



Figura 25. Mejores filtros pasa bajas generados en la experimentación de los algoritmos.

Objetivo:
 Voltaje de paso: 2.5 volts
 Voltaje de atenuación: 0 volts
 Banda de paso: 750 Hz – 100 kHz
 Banda de atenuación: 1 Hz – 700 Hz

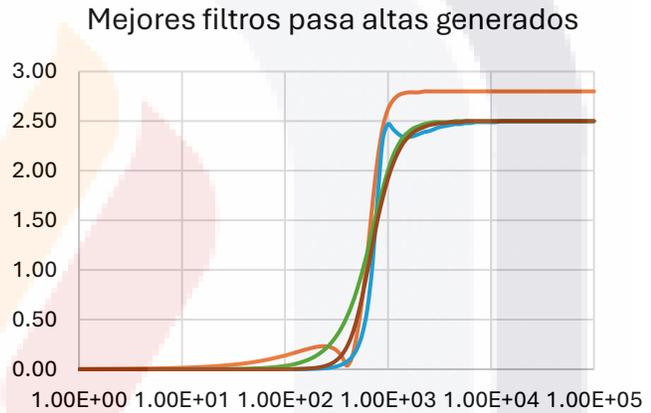


Figura 26. Mejores filtros pasa altas generados en la experimentación de los algoritmos.

Objetivo:
 Voltaje de paso: 2.5 volts
 Voltaje de atenuación: 0 volts
 Banda de paso: 75 Hz – 7 kHz
 Bandas de atenuación: 1 Hz – 70 Hz y 7.5 kHz – 100 kHz

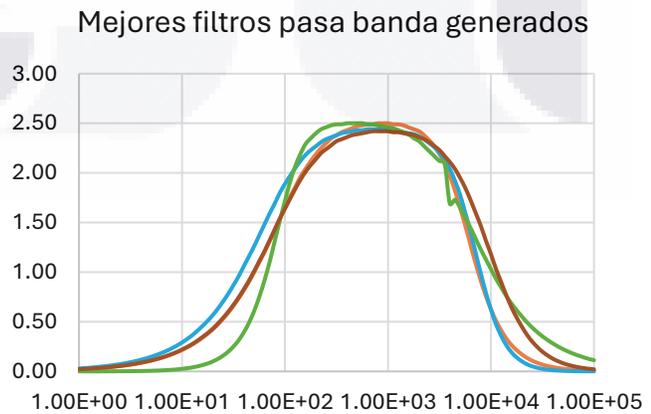


Figura 27. Mejores filtros pasa banda generados en la experimentación de los algoritmos.

Objetivo:

Voltaje de paso: 2.5 volts
Voltaje de atenuación: 0 volts
Bandas de paso: 1 Hz – 70 Hz y 7.5 kHz – 100 kHz
Banda de atenuación: 75 Hz – 7 kHz

Mejores filtros rechaza banda generados

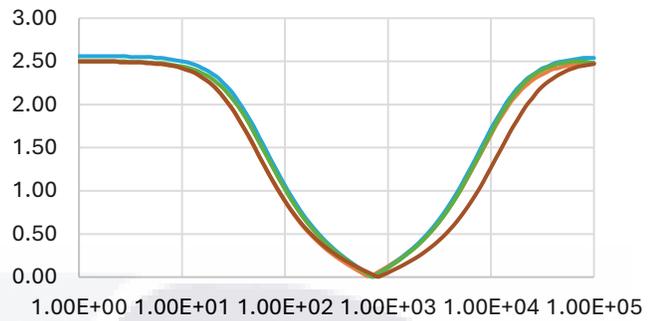


Figura 28. Mejores filtros rechaza banda generados en la experimentación de los algoritmos.

10 Conclusión y discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran la efectividad de las técnicas metaheurísticas para el diseño automático de circuitos eléctricos, específicamente filtros analógicos pasivos. Así mismo se ha logrado observar que el rendimiento de los algoritmos si ve afectado por los mecanismos de generación de soluciones iniciales.

El análisis comparativo entre los dos mecanismos de generación implementados revela que ambos producen resultados satisfactorios en términos de calidad de los filtros generados. Sin embargo, se observa una diferencia significativa en el orden de los filtros obtenidos, el mecanismo pseudoaleatorio tiende a generar filtros de mayor orden comparado con el mecanismo aleatorio.

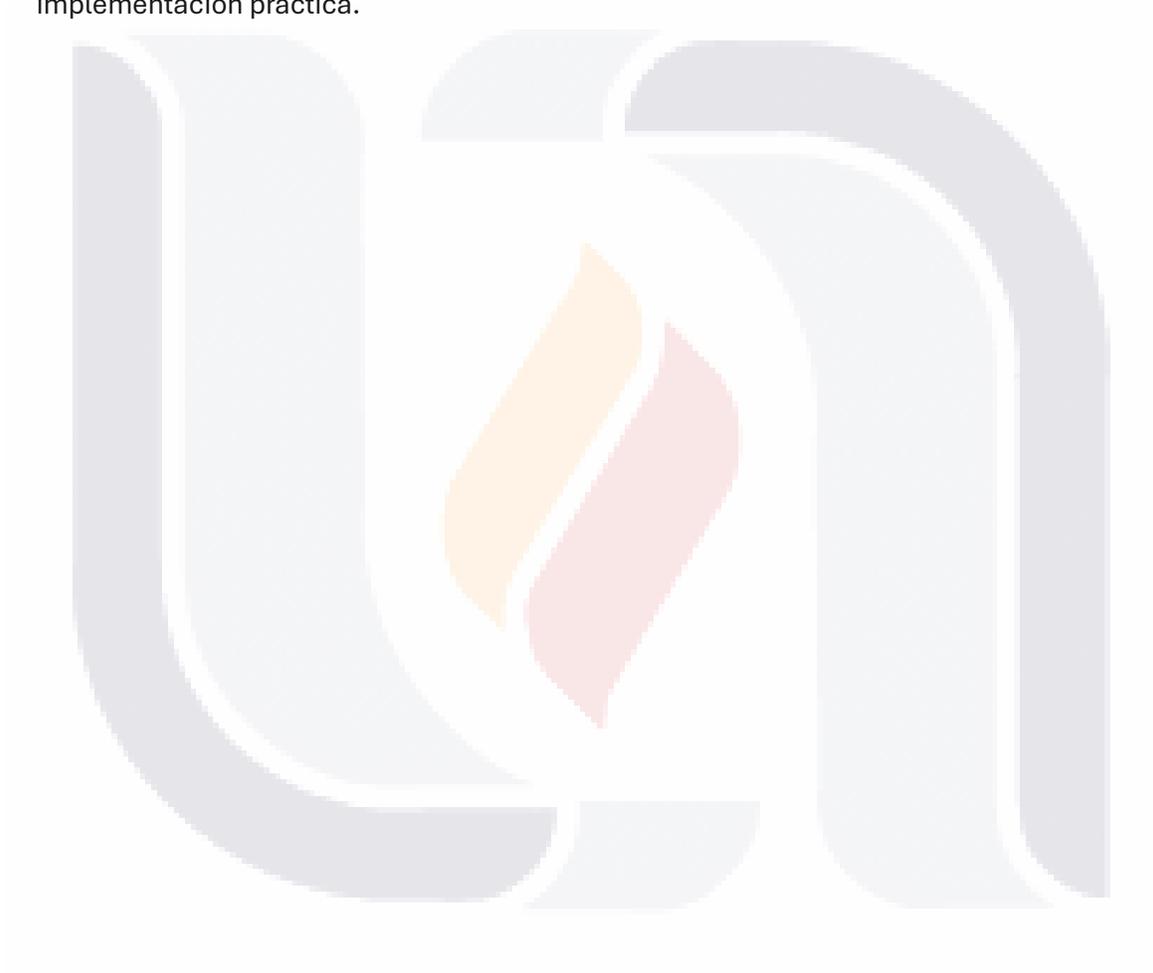
Esta diferencia en el orden de los filtros generados se atribuye a que el mecanismo pseudoaleatorio explora soluciones en base a topologías previamente estudiadas, y que garantizan que todos los circuitos generados se puedan simular, es decir que este mecanismo no explora soluciones no factibles, a diferencia del mecanismo aleatorio que si puede llegar a generar circuitos que no puedan simularse.

Respecto al análisis del rendimiento de los algoritmos según el tipo de filtro a generado, se observa que el algoritmo genético tiene un mejor rendimiento con la generación aleatoria, a excepción con filtros pasa banda, que se sugiere utilizar el mecanismo pseudoaleatorio. Mientras que, en el caso del algoritmo de colonia de hormigas, es lo contrario, se tiene un mejor rendimiento con la generación pseudoaleatoria, a excepción de los filtros pasa banda que se sugiere utilizar la generación aleatoria.

Al comprar ambos algoritmos, se observó que la selección del mejor algoritmo depende del tipo de generación de soluciones. Si se selecciona como mejor algoritmo el que tiene un menor tiempo de ejecución, el mejor algoritmo sería el algoritmo genético para filtros pasa bajas, pasa altas y rechaza banda, y el algoritmo de colonia de hormigas para filtros pasa banda. Mientras que, si la decisión se toma en base a que algoritmo genera filtros de mayor orden, resulta en que el mejor es algoritmo de colonia de hormigas para filtros pasa bajas, pasa altas y rechaza banda, y el algoritmo genético para de filtros pasa banda. Con esto se confirma que el

rendimiento de los algoritmos si se ve afectado según el mecanismo de generación de soluciones.

Por otra parte, el software desarrollado cumple efectivamente su propósito como herramienta de diseño automatizado, proporcionando no solo los parámetros del filtro sino también visualizaciones esenciales como la respuesta en frecuencia y el diagrama eléctrico correspondiente. Esta funcionalidad facilita tanto la validación de los resultados como su implementación práctica.



11 Trabajo a futuro

En investigación futuras se pretende realizar una implementación de los algoritmos utilizando paralelización, esto permitirá manejar conjuntos de soluciones considerablemente más grandes y ejecutar un mayor número de iteraciones en tiempos razonables. Si bien los algoritmos implementados ya se ejecutan en un tiempo razonable, esta implementación permitirá realizar una comparación más justa (en cuanto al tiempo) al utilizar el mecanismo de generación pseudoaleatorio.

La expansión del conjunto de algoritmos metaheurísticos implementados representa otra línea prometedora de investigación. La incorporación de técnicas más recientes como optimización por enjambre de partículas o métodos híbridos podría revelar nuevas ventajas para tipos específicos de filtros o condiciones de diseño particulares.

De igual forma se espera optimizar los mecanismos de generación de soluciones, para que puedan adaptarse para generar otro tipo de circuitos eléctricos. Con las mejoras implementadas, se espera que el mecanismo de generación pseudoaleatorio pueda generar soluciones en un menor tiempo, esto evitará que el tiempo de ejecución de algoritmo no se vea afectado según el tipo de generación que se pretenda utilizar.

Finalmente, se pretende desarrollar una nueva versión del software con un sistema de decisión inteligente que analice automáticamente las especificaciones del filtro requerido y seleccione el algoritmo metaheurístico más apropiado. Esta funcionalidad eliminaría la necesidad de que el usuario tenga conocimiento especializado sobre las fortalezas de cada algoritmo.

12 Referencias

- Alonso, S., Cordón, O., Fernández, I., & Herrera, F. (2004). La metaheurística de optimización basada en colonias de hormigas: modelos y nuevos enfoques. *Optimización inteligente: técnicas de inteligencia computacional para optimización*, 261–314.
- Álvarez Álvarez, F. O. (1984). *Estudio y programas digitales para el diseño de filtros pasivos analógicos*.
- Arranz de la Peña, J., & Parra Truyol, A. (2007). Algoritmos genéticos. *Universidad Carlos III*.
- Asmae, E. B., Loubna, K., Benhala, B., & Zorkani, I. (2020). Meta-heuristic techniques for optimal design of analog and digital filter. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 19(2), 669–679.
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys (CSUR)*, 35(3), 268–308.
- Brito Saldarriaga, M. A., & Giraldo Betancourt, J. S. (2011). *Metodologías para diseño de circuitos ladder con base en sistemas secuenciales y combinacionales*. <https://hdl.handle.net/11059/1718>
- Calvo Martínez, J. (2008). Diseño de filtros muesca a partir de filtros de capacitor conmutado, de filtros analógicos monolíticos y de amplificadores operacionales. En *Universidad de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- Castejón Lapeyra, F., & Carmona Suárez, E. J. (2020). *Diseño automático de circuitos electrónicos analógicos mediante algoritmos evolutivos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Chouza, M., Rancan, C., Clúa, O., & García Martínez, R. (2008, octubre). Diseño de filtros analógicos pasivos basados en programación genética. *XIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.
- Elkhetali, S. I., & Aldabiski, I. Y. (2009). Analog Filter Design by Genetic Algorithm. *Proc. 11th WSEAS International Conf. on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering*, 7–9.

- Estévez-Fernández, J. (2017). *Laboratorio de Electricidad y Magnetismo III: Filtros RC y circuito RLC resonante*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27105.10082>
- Gestal Pose, M. (2000). Introducción a los algoritmos genéticos. *Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones Universidad de Coruña*.
- Haver Solórzano, J. J., & Ortíz Mosquera, N. S. (2018). *Análisis comparativo de filtros activos y filtros pasivos en sistemas de comunicación analógica*.
- Karci, H., Tohumoglu, G., & Nacaroglu, A. (2016). Speciation-based genetic algorithm in analog circuit design. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24, 1022–1033. <https://doi.org/10.3906/elk-1311-259>
- Kritele, L., Benhala, B., & Zorkani, I. (2019). Ant Colony Optimization for Optimal Low-Pass Filter Sizing. *Bioinspired Heuristics for Optimization*, 283–299.
- López Marín, D. A. (2003). *Historia, definición, descripción, tipos y aplicaciones de filtros electrónicos*.
- Miyara, F. (2004). Filtros activos. *Universidad Nacional de Rosario*. <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/filtros-t.pdf>
- Montoya Padilla, B. J., Torres Soto, A., & Torres Soto, M. D. (2024). Mecanismo de generación pseudoaleatorio para el diseño automático de filtros analógicos pasivos. *Research in Computing Science*, 153(8), 187–197.
- Moreno Pérez, J. A. (2004). Metaheurísticas: Concepto y Propiedades. *Departamento de Estadística, I.O. y Computación. Universidad de La Laguna*.
- Mota Rodríguez, A. L. (2012). *Diseño de filtros pasa bajas con parámetros variantes en el tiempo basados en OTAs y capacitores*.
- Pozuelo Muñoz, J., & Cascarosa Salillas, E. (2022). Intensidad, Resistencia, Circuitos en Serie y en Paralelo. *ReiDocrea*, 11(44), 527–530. <https://doi.org/10.30827/Digibug.77272>
- Reeves, C. (1993). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. John Wiley & Sons, Inc.

- Robles Algarín, C. A. (2010). Optimización por colonia de hormigas: aplicaciones y tendencias. *Ingeniería solidaria*, 6(10–11), 83–89.
- Toala Calderón, D. J., & Murillo Quimiz, L. (2021). *Diseño de circuitos electrónicos analógicos para fortalecer el aprendizaje de los estudiantes en el laboratorio de electrónica de la carrera de ingeniería en computación y redes*. Universidad Estatal del Sur de Manabí.
- Torres, J. C. (1998). Diseño asistido por ordenador. *Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad de Granada*, 20.
- Torres Soto, A., Torres Soto, M. D., & Ponce de León Sentí, E. E. (2020). Mecanismo de representación para la evolución automática de circuitos analógicos. *Research in Computing Science*, 149(8), 253–265.
- Torres Soto, A., Torres Soto, M. D., Ponce de León Sentí, E. E., & Montoya Padilla, B. J. (2022). Automatic Design of Passive Analog Filters Using a Genetic Algorithm. *Research in Computing Science*, 151(5), 75–90.
- Vodanovic, G. T., Romero, E., & Peretti, G. (2019). Diseño de filtros analógicos de capacidades conmutadas con Optimización por Enjambre de partículas. *AJEA*, 4.
- Wang, W., Ling, Y., Zhang, J., & Wang, Y. (2012). Ant colony optimization algorithm for design of analog filters. *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 1–6.