

**ESTRATEGIA NUMÉRICA PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO CIRCUITAL DE
UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR TOTALMENTE LLENA CON UN
DIELÉCTRICO**

JHON WILMER ANGEL DELGADO

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

2017

**ESTRATEGIA NUMÉRICA PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO CIRCUITAL DE
UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR TOTALMENTE LLENA CON UN
DIELÉCTRICO**

JHON WILMER ANGEL DELGADO

**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de
Ingeniero Electrónico.**

Director:

IVÁN MAURICIO AMAYA CONTRERAS

Ph.D. en Ingeniería

**Investigador Postdoctoral – Grupo de Investigación con Enfoque Estratégico
en Sistemas Inteligentes**

**Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey – Campus
Monterrey**

Codirector:

CARLOS RODRIGO CORREA CELY

Ph.D. en Polímeros

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

2017

Dedicado a mi familia, a mi novia, amigos y amigas, por todo el apoyo brindado incondicionalmente.

Agradecer primeramente a Dios, a Él le debo todo lo que he alcanzado.

Infinito agradecimiento a mi padre, Luis Enrique Angel, quien desde arriba me acompañó durante todo este largo proceso, para poderlo culminar con éxito.

A mi madre, Elsa Delgado, por estar siempre a mi lado, brindándome cariño, apoyo y fortaleza para lograr salir adelante.

A mis hermanas, Diana, Sandra y Julieth, quienes siempre se preocuparon por mí y me ayudaron en los momentos difíciles.

A mi novia, Marisol, quien siempre estuvo a mi lado, apoyándome en los momentos buenos y malos, dándome su cariño, amor y comprensión, te amo.

Especial agradecimiento a mi director de proyecto Iván Amaya, quien confió en mí y guío en los momentos difíciles.

A mi familia y amigos, quienes siempre me apoyaron y brindaron sus buenos deseos, especialmente a Pedro Martín, Emmanuel Robles, Yenny Pineda, Diana Pérez, Laura Romero, Alexandra Almeida, Darly Garzon, Diego Duran, Leidy Calvete, Carolina Diaz, Miller Ortiz, Liliana Ramirez, Jenny Pimiento, Yolanda Ramirez, Joana Mercado, Leidy Hernández, Leidy Pineda, Diana García y Sergio Fuentes, muchas gracias. Presento sinceras disculpas a los que faltó por nombrar, de verdad muchas gracias a todos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	16
1.1 GUÍA DE ONDA.....	16
1.1.1 Modos de Propagación en Guías de Onda Circulares.....	19
1.2 ALGORITMO EMO	20
1.2.1 Etapas del Algoritmo	21
1.2.2 Modificaciones y Mejoras.....	24
1.2.3 Pruebas y Resultados Preliminares	27
1.2.4 Comparación Resultados del Algoritmo Con la Literatura	30
2. DESARROLLO DEL TRABAJO	32
2.1 METODOLOGÍA	32
2.2 MODELO CIRCUITAL.....	33
2.2.1 Cilindro Dividido en Dos Partes	34
2.2.2 Cilindro Dividido en Tres Partes.....	36
2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO EMO	42
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
3.1 COMPARACIÓN DE LA ESTRATEGÍA IMPLEMENTADA CON LA LITERATURA.....	49
4 CONCLUSIONES	51
REFERENCIAS	53

BIBLIOGRAFÍA.....54

ANEXOS.....56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Guía de onda circular.....	16
Figura 2. Algoritmo EMO.	21
Figura 3. Interfaz gráfica del algoritmo en la plataforma.	26
Figura 4. Diagrama de la metodología utilizada.....	33
Figura 5. Cilindro dividido en dos, caso básico.	34
Figura 6. Cilindro dividido en tres partes.....	37
Figura 7. Frecuencias de resonancia para los modos TM_{011}	44
Figura 8. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de dos particiones.	45
Figura 9. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de tres particiones.	46
Figura 10. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de cuatro particiones. ...	47
Figura 11. Resultados promedio del tiempo en cada uno de los casos.	47
Figura 12. Número de iteraciones promedio para todos los casos.	48
Figura 13. Comparación del número de iteraciones.	50
Figura 14. Comparación del tiempo de ejecución.	50
Figura 15. Estructura del algoritmo con las modificaciones.	59
Figura 16. Cilindro dividido en cuatro partes.....	60
Figura 17. Tiempo promedio LSITER=5 Cilindro de 2 particiones.	63
Figura 18. Tiempo promedio LSITER=10 Cilindro de 2 particiones.	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Funciones de prueba.	27
Tabla 2. Datos de las funciones de prueba.....	28
Tabla 3. Resultados prueba algoritmo sin modificar.	28
Tabla 4. Resultados prueba algoritmo con las modificaciones propuestas.....	29
Tabla 5. Comparación con otros algoritmos.	30
Tabla 6. Comparación con el algoritmo original.....	31
Tabla 7. Valores de los parámetros principales del algoritmo.....	43
Tabla 8. Comparación resultados con la literatura.....	49
Tabla 9. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de dos particiones.	62
Tabla 10. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de tres particiones.	62
Tabla 11. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de cuatro particiones. ...	62
Tabla 12. Resultados frecuencias para cilindro de dos particiones.	64
Tabla 13. Resultados frecuencias para cilindros de tres particiones.	64
Tabla 14. Resultados frecuencias para cilindros de cuatro particiones.	65
Tabla 15. Iteraciones promedio para un cilindro de dos particiones.	65
Tabla 16. Iteraciones promedio para un cilindro de tres particiones.	65
Tabla 17. Iteraciones promedio para un cilindro de cuatro particiones.	65

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Modificaciones al algoritmo de optimización	56
Anexo B. Desarrollo del cilindro dividido en cuatro partes	59
Anexo C. Simulaciones y resultados.....	62

RESUMEN

TÍTULO: ESTRATEGIA NUMÉRICA PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO CIRCUITAL DE UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR TOTALMENTE LLENA CON UN DIELECTRICO¹

AUTOR: JHON WILMER ANGEL DELGADO²

PALABRAS CLAVE: GUIA DE ONDA, ANÁLISIS CIRCUITAL, ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

DESCRIPCIÓN:

En el siguiente trabajo de investigación, se realizó el desarrollo de una estrategia numérica con la cual, se dé solución al modelo circuital de una guía de onda circular totalmente llena con un dieléctrico. Utilizamos la teoría de análisis circuital y la conexión de redes, para la obtención de la matriz de dispersión de un cilindro con propiedades electromagnéticas ya definidas.

Para la comprobación de esta teoría, se dividió el cilindro en dos, tres y cuatro partes, en cada caso se obtuvo la ecuación del modelo circuital, y se procedió a dar solución utilizando el algoritmo de optimización electromagnética EMO. Este algoritmo se basa en el principio de atracción-repulsión electromagnética de partículas cargadas, en donde la carga representa la relación de cada partícula con la solución.

El algoritmo de optimización EMO fue modificado para obtener unos mejores resultados y para verificar su correcto funcionamiento, se hacen varias pruebas variando algunos parámetros como la población y el número de iteraciones de búsqueda local.

Finalmente se presenta los resultados obtenidos y su posterior validación, demostrando que la metodología utilizada es precisa para dar solución a este tipo de problemas. Cabe resaltar que esta técnica puede ser usada para más de cuatro particiones y para estructuras geométricas distintas.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones (E3T). Director: Iván Mauricio Amaya Contreras. Codirector: Carlos Rodrigo Correa Cely.

ABSTRACT

TITLE: NUMERICAL STRATEGY FOR THE SOLUTION OF THE CIRCUITAL MODEL OF A FULLY FILLED CIRCULAR WAVEGUIDE WITH A DIELECTRIC³

AUTHOR: JHON WILMER ANGEL DELGADO⁴

KEY WORDS: WAVEGUIDE, CIRCUITAL ANALYSIS, OPTIMIZATION ALGORITHM

DESCRIPTION: This research work presents the application of a numerical strategy for solving the circuitual model of a circular resonator completely filled with a dielectric. We use the theory of circuitual analysis and the connection of networks, to obtain the dispersion matrix of a cylinder with overall electromagnetic properties.

For the verification of this theory, the cylinder was divided into two, three and four elements. Building blocks of networks with one and two ports were analyzed and, in each case, their circuitual model was derived. The resulting model was then solved by a modern optimization algorithm. The Electromagnetism-like Optimization (EMO) method, is an approach based on the electromagnetic principle of attraction-repulsion that was presented by Birbil and Cherng in 2003. Within this approach, the charge of a particle relates to the quality of a solution. Throughout this work, the EMO algorithm was modified and adapted for the task at hand. Striving to verify its correct operation, several tests are done varying some parameters like the population and the number of iterations of local search, and using standard test functions.

Finally, the results obtained and their subsequent validation are presented, demonstrating that the methodology used is accurate to solve all type of problems. It should be noted that this technique can be used for more than four partitions and for different geometric structures.

³ Degree Work

⁴ Faculty of Physic-Mechanical Engineering. School of Electric, Electronic and Telecommunications Engineering. Project Director: Iván Mauricio Amaya Contreras. Project Codirector: Carlos Rodrigo Correa Cely

INTRODUCCIÓN

Desde que Maxwell formuló la teoría que unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos, se ha despertado en el mundo científico un gran interés por la solución de los problemas relacionados con esta rama de la física. Las ecuaciones de Maxwell son el punto de partida para abordar cualquier problema electromagnético, siendo así, la base de este trabajo de grado.

A lo largo de los años han aparecido trabajos y teorías útiles para el análisis del electromagnetismo. Entre ellos se destacan los aportes hechos por R. F. Harrington [1] y C. A. Balanis [2], en los que se enuncian una gran variedad de métodos y técnicas numéricas que atacan directamente al problema y le dan solución de forma rápida.

Aunque estos procedimientos son efectivos para analizar los campos electromagnéticos, existen problemas que tienen una región muy grande y/o que pueden tener múltiples materiales, por lo que abordarlos directamente es complicado. La técnica enunciada en la tesis doctoral de F. Peñaranda [3] sugiere segmentar el problema y posteriormente aplicar la teoría circuital, caracterizando y facilitando su análisis. Todo esto tiene una gran variedad de aplicaciones, y entre ellas destacan las guías de onda.

Según la información contenida en la tesis de Y. A. Loranca [4], las guías de onda circulares son útiles para propagar ondas polarizadas tanto vertical como horizontalmente en la misma guía. Además, son de fácil manejo y de fabricación más sencilla, y esto las hace especiales para aplicaciones en radares y microondas terrestres, entre otras. Por ello, se centrará en el análisis de los campos magnéticos y eléctricos que se propagan en su interior, utilizando la técnica circuital ya enunciada. Adicionalmente, se utilizará la técnica de

optimización moderna propuesta por Birbil [5] para dar solución al modelo resultante.

OBJETIVO GENERAL

Implementar una estrategia numérica para la solución del modelo circuital de una guía de onda circular totalmente llena con un dieléctrico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Desarrollar el modelo circuital que represente el comportamiento electromagnético de una guía de onda circular totalmente llena con un dieléctrico. (Ver sección 2.2.: 2.2 MODELO **CIRCUITAL**).
- Implementar el algoritmo “*Electromagnetism Optimization*” para encontrar la solución del modelo circuital obtenido anteriormente. (Ver sección 2.3.:
▪
▪ 2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL **ALGORITMO EMO**).
- Validar los resultados obtenidos frente a los reportados en la literatura. (Ver sección 1.2.4: 1.2.4 Comparación Resultados del Algoritmo Con la **Literatura**, y sección 3.1: 3.1 COMPARACIÓN DE LA ESTRATEGÍA IMPLEMENTADA CON LA **LITERATURA**).

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

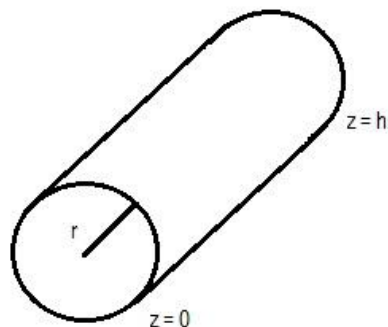
1.1 GUÍA DE ONDA

La transmisión de señales por guías de onda supone una gran alternativa para el transporte de información en algunos sistemas de comunicaciones, donde se hace necesario tener un bajo consumo de potencia, reducir la disipación de energía y que se pueda utilizar para aplicaciones de microondas.

Como su nombre lo indica es una estructura utilizada como guía, ésta es de un gran desarrollo longitudinal y una sección transversal uniforme, la cual puede ser rectangular, circular o elíptica. El material por el cual se conduce la energía electromagnética es un dieléctrico y ésta es limitada en sus fronteras por paredes conductoras de la guía, que encierran la onda en el interior por reflexión en la superficie. El aire suele ser el material más utilizado como relleno, ya que garantiza unas pérdidas muy bajas.

Se trabajará en la guía de onda circular como la mostrada en la Figura 1, rellena de un dieléctrico.

Figura 1. Guía de onda circular.



Para esta guía de ondas se resuelve la ecuación de ondas con las condiciones de contorno que correspondan según el modo en el que se esté trabajando, ya sea TM o TE. A continuación, se presentan estas ecuaciones, para variaciones en la componente radial.

$$E_z(\rho = a) = 0 \text{ Para modos TM} \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} = 0 \text{ Para modos TE} \quad (2)$$

La ecuación de Helmholtz para la guía de onda circular en forma escalar es:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k^2 \psi = 0 \quad (3)$$

Utilizando el método de separación de variables:

$$\psi = R(\rho)\Phi(\phi)Z(z) \quad (4)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (3) y dividiendo entre ψ se obtiene:

$$\frac{1}{\rho R} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dR}{d\rho} \right) + \frac{1}{\rho^2 \Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} + k^2 = 0 \quad (5)$$

Como el tercer término es independiente de ρ y ϕ :

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -k_z^2 \quad k_z: \text{ constante} \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) y multiplicando por ρ^2 :

$$\frac{\rho}{R} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dR}{d\rho} \right) + \frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + (k^2 - k_z^2) \rho^2 = 0 \quad (7)$$

En la ecuación (7) el segundo término es independiente de ρ y z , entonces:

$$\frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} = -n^2 \quad n: \text{ constante} \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7) se llega a:

$$\frac{\rho}{R} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dR}{d\rho} \right) - n^2 + (k^2 - k_z^2) \rho^2 = 0 \quad (9)$$

La ecuación (9) ahora sólo depende de ρ y se puede introducir el siguiente término:

$$k_\rho^2 + k_z^2 = k^2 \quad (10)$$

De esta manera se separa la ecuación de ondas como:

$$\rho \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dR}{d\rho} \right) + [(k_\rho \rho)^2 - n^2] R = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + n^2 \Phi = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + k_z^2 Z = 0 \quad (13)$$

Las dos últimas son ecuaciones armónicas y sus soluciones generalmente se denotan como $h(n\phi)$ y $h(k_z z)$ respectivamente. La solución para este tipo de ecuaciones es la misma. Para la ecuación (12) es:

$$\Phi(\phi) = A \cos(n\phi) + B \sin(n\phi) \quad (14)$$

Donde A y B son dos constantes indeterminadas.

La solución para la ecuación (11) es la combinación lineal de cualquiera de las funciones de Bessel:

$$B_n(k_\rho \rho) \sim J_n(k_\rho \rho), N_n(k_\rho \rho), H_n^{(1)}(k_\rho \rho), H_n^{(2)}(k_\rho \rho) \quad (15)$$

Por ejemplo:

$$R(k_\rho \rho) = C J_n(k_\rho \rho) + D N_n(k_\rho \rho) \quad (16)$$

De acuerdo a la ecuación (4), se puede formar soluciones a la ecuación de onda como:

$$\psi_{k_\rho, n, k_z} = B_n(k_\rho \rho) h(n\phi) h(k_z z) \quad (17)$$

1.1.1 Modos de Propagación en Guías de Onda Circulares. Los modos son las posibles configuraciones de propagación, en los que los campos eléctrico y magnético deben cumplir ciertas condiciones para que se pueda propagar la onda. Según las direcciones que estos campos tomen con respecto a la dirección de propagación de la onda, se sabrá en qué modo se está trabajando. De esta manera, se tienen los modos *transversales magnéticos* o TM donde el campo magnético es perpendicular a la dirección de propagación. También están los modos *transversales eléctricos* o TE donde el campo eléctrico es perpendicular a la dirección de propagación, y por último los modos *transversales electromagnéticos* o TEM donde tanto el campo eléctrico y el magnético son perpendiculares a la dirección de propagación.

Así pues, se puede expresar el campo electromagnético en términos de la función de onda ψ , y posteriormente descomponerlo en suma de un modo TE y otro TM transversales a \hat{z} , ya que en cilíndricas esta componente es invariante con la posición.

Teniendo en cuenta que las expresiones generales de los campos en función de los potenciales \mathbf{A} y \mathbf{F} , llamadas potencial vector magnético y eléctrico respectivamente, son [6]:

$$\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}) - \frac{1}{\epsilon}\nabla\chi\mathbf{F} \quad (18)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu}\nabla\chi\mathbf{A} - j\omega\mathbf{F} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{F}) \quad (19)$$

Ahora, haciendo $\mathbf{A} = \hat{z}\psi^a$ y $\mathbf{F} = 0$, se sustituye en las ecuaciones (18) y (19) y se obtiene las componentes de campo eléctrico y magnético del modo TM_z :

$$\begin{aligned}
E_\rho &= \frac{1}{j\omega\mu\varepsilon} \frac{\partial^2 \psi^a}{\partial \rho \partial z} & H_\rho &= \frac{1}{\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi^a}{\partial \phi} \\
E_\phi &= \frac{1}{j\omega\mu\varepsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \psi^a}{\partial \phi \partial z} & H_\phi &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial \psi^a}{\partial \rho} \\
E_z &= \frac{1}{j\omega\mu\varepsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \psi^a & H_z &= 0
\end{aligned} \tag{20}$$

Análogamente, haciendo $\mathbf{A} = 0$ y $\mathbf{F} = \hat{z}\psi^f$ se obtiene las componentes de campo eléctrico y magnético del modo TE_z :

$$\begin{aligned}
E_\rho &= -\frac{1}{\varepsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi^f}{\partial \phi} & H_\rho &= \frac{1}{j\omega\mu\varepsilon} \frac{\partial^2 \psi^f}{\partial \rho \partial z} \\
E_\phi &= \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \psi^f}{\partial \phi} & H_\phi &= \frac{1}{j\omega\mu\varepsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \psi^f}{\partial \rho \partial z} \\
E_z &= 0 & H_z &= \frac{1}{j\omega\mu\varepsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \psi^f
\end{aligned} \tag{21}$$

1.2 ALGORITMO EMO

El algoritmo EMO (Electromagnetism-Like Optimization) es un algoritmo inspirado en principios físicos de la naturaleza, exactamente en el principio electromagnético de atracción-repulsión [5]. Este algoritmo permite resolver problemas de optimización global de funciones que están definidas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\min f(x), \\
x \in [l, u],
\end{aligned} \tag{22}$$

Donde $[l, u] = \{x \in R^n \mid l_d \leq x_d \leq u_d, d = 1, 2, \dots, n\}$ y n es la dimensión de la variable x .

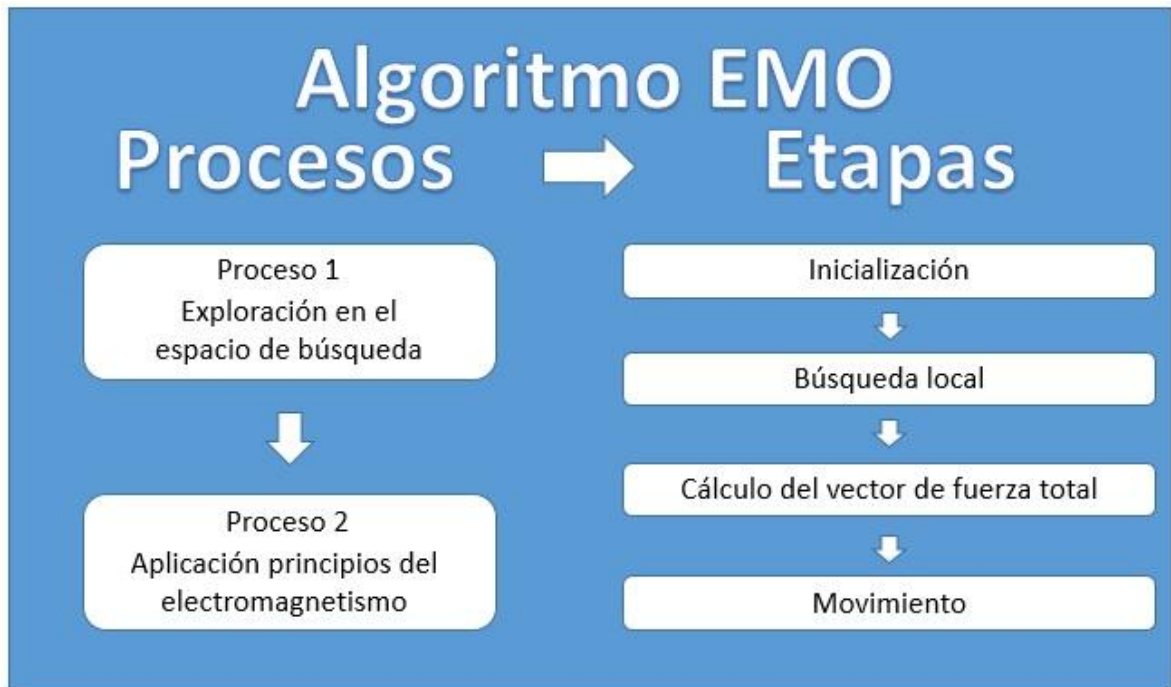
Además $[l, u] \subset R^n$, un subconjunto no vacío y $f(x)$ una función de valor real.

El funcionamiento básico del algoritmo se muestra en la

Figura 2, el cual consta de dos procesos, el primero consiste en la exploración de forma aleatoria del espacio de búsqueda, el segundo proceso aprovecha la

información que nos puede brindar cada uno de los puntos seleccionados utilizando el principio electromagnético de atracción-repulsión ya mencionado. De esta manera el algoritmo lleva a la función a converger a sus puntos mínimos, los cuales son altamente atractivos, y aleja los puntos máximos [6].

Figura 2. Algoritmo EMO.



1.2.1 Etapas del Algoritmo. En la

Figura 2 también se nombran las cuatro etapas propuestas por Birbil y Fang en [5], para que el algoritmo logre la optimización global. A continuación, se detalla los aspectos más importantes de cada una de ellas:

1.1.1.1. Inicialización. En la primera etapa se crea una población de m soluciones iniciales de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme, las cuales constituyen el punto de partida. Cada solución es evaluada utilizando la función objetivo, y al final se escoge la mejor solución para dar paso a la siguiente etapa.

1.1.1.2. *Búsqueda local* El objetivo de la búsqueda local es tratar de encontrar una mejor solución que la anterior. Ésta etapa, como se menciona en [6] puede llegar a ser innecesaria, según el tipo de problema que se aborde. Existen dos formas de aplicar la búsqueda local, la primera es con la mejor solución actual y la segunda es con todas las soluciones. En este trabajo se aplica la primera forma para dar solución al problema, y así lograr enfocarse en la mejor solución. El procedimiento en ésta etapa es muy simple, el algoritmo realiza un número *LSITER* de iteraciones, en las cuales, por medio de un parámetro δ crea una vecindad alrededor de la mejor solución, en la cual se hará otra búsqueda de forma aleatoria con el fin de cumplir con el objetivo de ésta etapa.

1.1.1.3. *Cálculo del vector de fuerza total.* En esta etapa se calcula el vector de fuerza total de acuerdo a la Ley de Coulomb, el cual utiliza la fuerza producida entre las soluciones, dicha fuerza resultante depende de la carga de cada una de ellas.

La carga q^i de cada solución i se define de la siguiente manera [5]:

$$q^i = \exp\left(-n \frac{f(x^i) - f(x^{best})}{\sum_{k=1}^m (f(x^k) - f(x^{best}))}\right), \forall i. \quad (23)$$

Siendo n la dimensión y m el tamaño de la población. x^{best} corresponde al punto de la mejor solución y x^i es la i -ésima solución de la población.

La fuerza resultante existente entre las soluciones determina la modificación del valor de las soluciones en el proceso de optimización [6]. A continuación, se muestra la forma de calcular la fuerza total F^i para un punto i :

$$F^i = \sum_{j \neq i}^m \left\{ \begin{array}{ll} (x^j - x^i) \frac{q^i q^j}{\|x^j - x^i\|^2} & \text{si } f(x^j) < f(x^i) \\ (x^i - x^j) \frac{q^i q^j}{\|x^j - x^i\|^2} & \text{si } f(x^j) \geq f(x^i) \end{array} \right\}, \forall i \quad (24)$$

Donde $f(x^j) < f(x^i)$ representa la atracción y $f(x^j) \geq f(x^i)$ representa la repulsión. Para que el anterior proceso sea numéricamente consistente, la fuerza total debe ser normalizada.

1.1.1.4. *Movimiento.* La siguiente ecuación muestra el desplazamiento de cada solución, según la fuerza resultante en la anterior etapa:

$$x^i = \begin{cases} x^i + \lambda \cdot F^i \cdot (u_d - x_d^i) & \text{si } F^i > 0 \\ x^i + \lambda \cdot F^i \cdot (x_d^i - l_d) & \text{si } F^i \leq 0 \end{cases}, \forall i \neq \text{mejor solución} \quad (25)$$

En la ecuación (25), λ es un paso de búsqueda aleatorio que toma valores entre 0 y 1 y es distribuido de forma uniforme, u_d y l_d son los límites superior e inferior de la dimensión d respectivamente. Según el valor de la fuerza, el punto de la solución se desplaza hacia el límite superior si ésta es positiva, y hacia el límite inferior si ésta es negativa [5].

El algoritmo acaba cuando cumple con el número total de iteraciones, o cuando el valor de la mejor solución cumple la condición deseada. A continuación, se muestra el algoritmo de forma resumida [5]:

EMO($m, MAXITER, LSITER, \delta$)

m : población

$MAXITER$: número máximo de iteraciones

$LSITER$: número máximo de iteraciones de búsqueda local

δ : parámetro de búsqueda local, $\delta \in [0, 1]$

Initialize()

Iteration \leftarrow 1

while iteration < $MAXITER$ **do**

 Local($LSITER, \delta$)

F \leftarrow CalcF()

 Move(**F**)

```
iteration ← iteration + 1
end while
```

1.2.2 Modificaciones y Mejoras. El estudio del algoritmo EMO propuesto por Birbil y Fang en [5] se realizó en la plataforma Matlab®. Inicialmente se trabajó con cinco funciones, cuatro de las cuales corresponden a cada una de las etapas mencionadas anteriormente, y una última llamada EMO, siendo ésta la función principal que maneja la estructura y llama a cada una de las otras funciones, además de contener los parámetros principales.

El algoritmo de esta manera cumple con su objetivo, pero posee varios problemas que imposibilitan trabajar con mayor rapidez y fluidez en la plataforma. A continuación, se enuncian algunas de estas falencias y la forma en que se abordaron para poder trabajar con más comodidad y mejorar los resultados.

1.1.1.5. *Primera modificación*

- Problema 1: el algoritmo llega al punto óptimo antes de cumplir con el número máximo de iteraciones, pero éste no muestra la respuesta hasta cumplir con esta condición, lo cual aumenta el tiempo en cada prueba.
- Problema 2: cada vez que se va a evaluar una función distinta, toca realizar varios cambios en los parámetros del algoritmo, esto consume mucho tiempo y conlleva a errores, teniendo en cuenta que se deben hacer muchas pruebas.
- Problema 3: el parámetro δ que se utiliza en la función de búsqueda local, algunas veces crea una vecindad muy grande o muy pequeña, entorpeciendo de esta manera el objetivo de la función. Este parámetro se fija por el usuario y debe estar sujeto a otros parámetros propios del espacio de búsqueda.

Soluciones y complementos:

- Se crea un contador con la función de determinar el momento en el cual el algoritmo llega al punto óptimo, teniendo como condición de parada la repetición de este resultado durante 50 iteraciones, además de arrojar el dato del número de iteraciones necesarias, también detiene el algoritmo, permitiendo conocer el tiempo que gastó en llegar al punto óptimo, todo esto sin tener que esperar a que se cumpla el máximo de iteraciones.
- Se añaden varios complementos que ayudan a trabajar con mayor fluidez, entre ellos está la creación de otras dos funciones, la primera contiene las distintas funciones de prueba y la segunda sus respectivos parámetros, con esto se ahorra mucho tiempo al momento de cambiar de función de prueba y disminuye la probabilidad de cometer algún error en este procedimiento.
- Para ayudar a que el algoritmo trabaje más rápido, se coloca una opción en la función principal que permite seleccionar el número de cifras significativas con las cuales se quiere trabajar.
- Se añade al algoritmo principal una forma de calcular el parámetro δ teniendo en cuenta los límites del espacio, la dimensión y población. De esta manera se logra crear una vecindad adecuada para mejorar la exactitud de la mejor solución en menos tiempo.
- Para tener una mejor comprensión de cómo trabaja el algoritmo, se añade una gráfica que muestra en tiempo real los valores que va tomando la función en cada iteración.

1.1.1.6. *Segunda modificación.* En esta modificación se añaden dos complementos que ayudan a mejorar sustancialmente la interacción del usuario con el algoritmo. El primero de ellos es la introducción de una interfaz gráfica (Ver

Figura 3), en la cual se puede dar los valores a los parámetros principales, además de escoger la función de prueba con la que se va a trabajar, también muestra el resultado de la función, el tiempo y el número de iteraciones realizadas durante la prueba.

Figura 3. Interfaz gráfica del algoritmo en la plataforma.

Algoritmo EMO

PARÁMETROS

N° Máx. de iter. :

N° de iter. locales:

Población:

Delta inicial:

Cifras Significativas:

Criterio de parada:

Resultados

Fmin:

N° de iter. :

Tiempo: [S]

Xbest:

$f6 = -\cos(x_1) \cos(x_2) e^{-(x_1-\pi)^2 - (x_2-\pi)^2}$

Ecuación:

Dimensión: Lim. Inferior: Lim. Superior:

Ecuación:

- Función de Himmelblau
- Función de Bohachevsky
- sum(V.^2)
- 20*exp(-.2*sqrt(sum(V.^2)/n))-exp(sum(cos(2*pi.*V))/n)+20+exp(1)
- Función de Branin
- Función de Easom**
- Función de Beale

Panel

El segundo complemento es uno de los más importantes, este consiste en hacer que el parámetro *delta* disminuya en una décima parte, según el número de iteraciones en las que se repita el valor de la mejor solución. Con ello se mejora sustancialmente el tiempo en que el algoritmo llega a la solución óptima.

1.2.3 Pruebas y Resultados Preliminares. A continuación, se presenta dos pruebas distintas, en las cuales se evidencia la mejoría que tuvo el algoritmo al momento de aplicar las modificaciones propuestas anteriormente.

1.1.1.7. *Primera prueba.* Se toma el algoritmo original sin ninguna modificación sobre el parámetro delta.

Teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

Máximo número de iteraciones (MAXITER) = 10000

Número de iteraciones de búsqueda local (LSITER) = 10

Población (m) = 50

Delta o parámetro de búsqueda local (delta) = 0,000005

Criterio de parada = 50 iteraciones

Cifras significativas (vs)= 17

Se hacen 40 pruebas a las siguientes 8 funciones mostradas en la Tabla 1:

Tabla 1. Funciones de prueba.

Funciones de prueba	Espacio
$f1 = \frac{2186 - (x_1^2 + x_2 - 11)^2 - (x_1 + x_2^2 - 7)^2}{2186}$	$[-6, 6]^2$
$f2 = -(x_1^2 + 2x_2^2 - 0,3\cos(3\pi x_1) - 0,4\cos(3\pi x_2) + 0,7)$	$[-1, 1]^2$
$f3 = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100, 100]^n$
$f4 = -20\exp\left(-0,2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	$[-32, 32]^n$
$f5 = \left(x_2 - \frac{5}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5x_1}{\pi} - 6\right)^2 + 10\left(1 - \frac{1}{8\pi}\right)\cos x_1 + 10$	$[-15, 15]^2$
$f6 = -\cos(x_1)\cos(x_2)e^{-(x_1-\pi)^2-(x_2-\pi)^2}$	$[-100, 100]^2$
$f7 = (1,5 - x_1 + x_1x_2)^2 + (2,25 - x_1 + x_1x_2^2)^2 + (2,625 - x_1 + x_1x_2^3)^2$	$[-4,5, 4,5]^2$
$f8 = \sin^2(3\pi x_1) + (x_1 - 1)^2(1 + \sin^2(3\pi x_2)) + (x_2 - 1)^2(1 + \sin^2(2\pi x_2))$	$[-10, 10]^2$

Para las funciones F3 y F4, el delta se aumentó a 0,005, debido a que el espacio es más grande y se maneja un número de dimensiones $n=30$, el cual es relativamente mayor al de las otras funciones de prueba.

En la Tabla 2, se muestra los datos más relevantes de cada una de estas funciones.

Tabla 2. Datos de las funciones de prueba.

Función	Puntos mínimos	Valor del mínimo	Espacio
F1	$P_1(3,0000, 2,0000)$ $P_2(-2,8051, 3,1313)$ $P_3(-3,7793, -3,2831)$ $P_4(3,5844, -1,8481)$	0,0000	$[-6, 6]^2$
F2	$P_1(0,0000, 0,0000)$	0,0000	$[-1, 1]^2$
F3	$P_n(0,0000, 0,0000)$	0,0000	$[-100, 100]^n$
F4	$P_n(0,0000, 0,0000)$	0,0000	$[-32, 32]^n$
F5	$P_1(-\pi, 12,2750)$ $P_2(\pi, 2,2750)$ $P_3(9,42478, 2,4750)$	0,397887	$[-15, 15]^2$
F6	$P_1(\pi, \pi)$	-1,0000	$[-100, 100]^2$
F7	$P_1(3,0000, 0,5000)$	0,0000	$[-4,5, 4,5]^2$
F8	$P_1(1,0000, 1,0000)$	0,0000	$[-10, 10]^2$

Los resultados de las 40 pruebas hechas a cada una de las funciones se muestran en la Tabla 3, el número de iteraciones, el tiempo y el mínimo alcanzado, son datos promediados de las 40 pruebas.

Tabla 3. Resultados prueba algoritmo sin modificar.

Función	Mínimo global	N° de iteraciones	Tiempo [s]	Mínimo alcanzado	Desviación estándar
F1	-1	2255	30,15	-1,00e+00	0
F2	0	3854	53,28	1,14e-15	2,30e-15
F3	0	647	158,53	1,36e-04	2,61e-04
F4	0	620	235,22	1,74e-03	3,78e-04
F5	0,397887	534	8,76	0,397887	0
F6	-1	633	15,97	-1,00e+00	0
F7	0	1259	18,43	2,71e-10	2,56e-10
F8	0	202	5,24	1,77e-02	2,98e-02

Observaciones:

Al tener en cuenta el criterio de parada de 50 iteraciones, los datos de algunas funciones (F3, F4 Y F8) no lograron un buen acercamiento al mínimo global. Aunque para la función F8 en 26 de las 40 pruebas obtuvo buenos acercamientos, hubo menos exactitud en la respuesta.

En cuanto al tiempo, a mayor número de dimensiones más dura el algoritmo para llegar a una respuesta.

1.1.1.8. *Segunda prueba.* En esta prueba se añade la mejora de la variación del delta según el comportamiento del algoritmo, los otros parámetros tendrán los mismos valores que en la anterior prueba. Se utilizaron las mismas 8 funciones de la Tabla 1 y se realizaron 40 pruebas para cada una de ellas.

Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Resultados prueba algoritmo con las modificaciones propuestas.

Función	Mínimo global	N° de iteraciones	Tiempo [s]	Mínimo alcanzado	Desviación estándar
F1	-1	108	2,89	-1,00e+00	0
F2	0	198	3,27	0,00e+00	0
F3	0	491	115,06	0,00e+00	0
F4	0	727	240,25	3,07e-14	3,43e-15
F5	0,397887	133	3,73	0,397887	0
F6	-1	146	5,45	-1,00e+00	0
F7	0	527	10,15	1,86e-05	3,56e-05
F8	0	147	4,22	0,00e+00	0

Observaciones:

Los resultados de la función F7 tienen una menor precisión en comparación con los resultados en la Tabla 3, por lo que para esta función no sirvió la forma en cómo se implementó el valor de *delta* al algoritmo. Aunque se destaca que disminuyó en más de un 50% el número de iteraciones. En los resultados de la

función F4 se evidencia un aumento en el número de iteraciones y el tiempo, pero hay una mejora en la precisión del resultado.

Para los resultados de las otras funciones, mejoró considerablemente la respuesta a la que se llegó, además el número de iteraciones y el tiempo empleado disminuyó.

La precisión mejoró en más de un 90% y es lo que se esperaba al implementar la nueva forma de calcular el valor de *delta*.

En el

Anexo se muestra con más detalle el funcionamiento de las mejoras implementadas.

1.2.4 Comparación Resultados del Algoritmo Con la Literatura. Después de validar el algoritmo con distintas funciones de prueba, se procede a comparar los resultados con los de la literatura disponible. En la Tabla 5 se muestra una comparación con otros algoritmos, como el Algoritmo de Búsqueda Gravitacional (GSA) y el algoritmo de enjambre de partículas (PSO). Con estos resultados se demuestra el correcto funcionamiento del algoritmo, además de su eficiencia y eficacia. En la mayoría de las funciones logró llegar al óptimo global, excepto para la función F4, pero, aun así, fue el que más se acercó.

Tabla 5. Comparación con otros algoritmos.

Función	GSA [7]		EMO Población= 50	Óptimo global
	100 asteroides	1000 asteroides		
F5	0,3984	0,3983	0,397887	0,397887
F6	-0,788	-0,991	-1	-1
Función	GSA [5]	PSO [5]	EMO Población=50	Óptimo global
F3	7,10E-11	1,20E-3	0	0
F4	6,90E-10	6,00E-3	3,43E-15	0

Se utiliza las funciones F1 y F5, para comparar la versión modificada del algoritmo EMO de este trabajo con la versión original del autor [5], esto se evidencia en la Tabla 6, donde se demuestra que las modificaciones hechas al algoritmo funcionan correctamente, logrando llegar al óptimo global en menos número de iteraciones.

Tabla 6. Comparación con el algoritmo original.

Función	EMO [5]		EMO		Óptimo global
	Mínimo	Iteraciones	Mínimo	Iteraciones	
F1	0	520	-1	108	-1
F5	0,3980	315	0,397887	133	0,397887

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

La técnica del análisis circuital es una alternativa muy interesante a la hora de ejecutar el análisis electromagnético de una guía de onda, en este caso una guía de onda circular totalmente llena con un dieléctrico. Con esta técnica se pueden ejecutar problemas con propiedades electromagnéticas distintas, dividiéndolo en sectores, cuya solución es más fácil de obtener matemáticamente. Para dar solución al modelo circuital, se utiliza el algoritmo de optimización electromagnética (EMO), de esta manera se llevará a cabo el desarrollo de este proyecto.

2.1 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos de este trabajo, se traza una ruta que consta de dos fases, la primera fase muestra de forma resumida la obtención del modelo circuital de la guía de onda circular totalmente llena con un dieléctrico. En la segunda fase se realizará la implementación del algoritmo de optimización electromagnética (EMO), la cual corresponde a la estrategia propuesta para dar solución al problema matemático del modelo circuital planteado en la primera fase.

Figura 4. Diagrama de la metodología utilizada.



En esta segunda fase, se realizan distintas pruebas para valorar el rendimiento y correcto funcionamiento de la estrategia. Para ello se propone variar algunos parámetros del modelo y del algoritmo. En cada uno de los escenarios, se realizarán 40 repeticiones y se mostrarán los resultados para su posterior análisis.

Variación de los parámetros:

- Los parámetros del modelo que variarán son las segmentaciones o número de cilindros en los que se va a dividir: de 2 a 4 segmentaciones, manteniendo la altura y el radio del cilindro.
- Los parámetros del algoritmo que variarán son la población (m): 20-50-100, y las iteraciones de búsqueda local: 5-10.

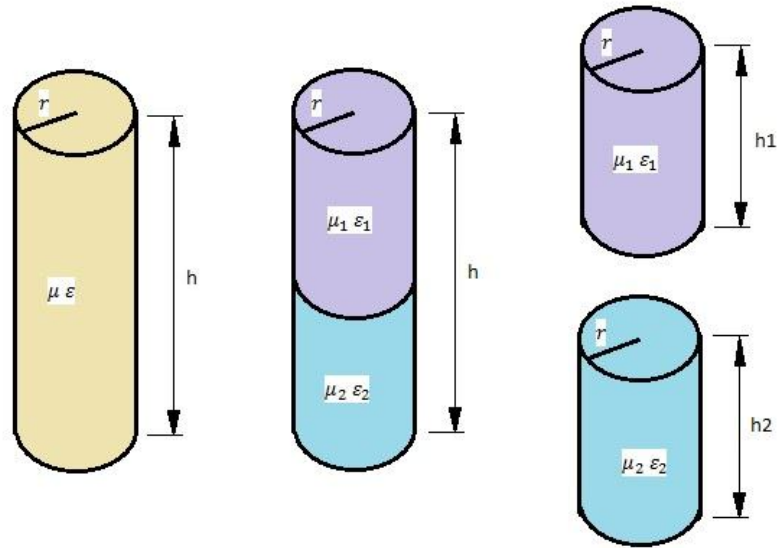
2.2 MODELO CIRCUITAL

En esta etapa se comienza a desarrollar el modelo circuital de la guía de onda circular. La base está en la teoría desarrollada en [3], [8] y [9].

2.2.1 Cilindro Dividido en Dos Partes. Inicialmente se hará para la partición de un cilindro de radio r y altura h en dos secciones, como se muestra en la

Figura 5.

Figura 5. Cilindro dividido en dos, caso básico.



Para empezar con el desarrollo del modelo circuital, es necesario basarse en la ecuación presentada en (17), y se utiliza los modos TM_{mnp} . El cilindro superior se llamará cilindro 1, y al inferior, cilindro 2. Cada uno con sus características magnéticas y eléctricas propias.

Se empezará caracterizando el cilindro 1 como una red de un puerto. Para ello se necesita hallar la Matriz de Admitancia Generalizada (GAM) y posteriormente la Matriz de Dispersión Generalizada (GSM). El cilindro 1 tiene una altura h_1 , teniendo en cuenta que el centro del cilindro 1 es el punto de referencia, la distancia desde este punto hasta la parte superior del cilindro será $h_1/2$, y la distancia desde el punto de referencia hasta la parte inferior del cilindro será de $-h_1/2$. Ahora, teniendo ya referenciado el cilindro, se puede aplicar las

condiciones de contorno, y de esta manera poder plantear una relación entre el campo eléctrico y el campo magnético:

$$\bar{Y}_1 = \frac{\bar{h}^{(1)}}{\bar{e}^{(1)}} \quad (26)$$

Con la ecuación (26) se obtiene los parámetros de admitancia de la siguiente manera:

$$\bar{Y}_1 = \text{diag} \left[\frac{j\omega\varepsilon_1}{k_{z1} \tanh(k_{z1}h_1)} \right] \quad (27)$$

Como por ahora se está trabajando con el caso más básico, que es el del cilindro de un solo puerto, obtenemos una matriz Y de dimensión 2×2 . Ya con la matriz de admitancia completada, se puede realizar la siguiente operación matemática planteada en la ecuación (28), y de esta manera obtener la matriz de dispersión:

$$\bar{S} = \left[\bar{Y} - \bar{Y}_o^{(r)} \right]^{-1} \cdot \left[-\bar{Y} + \bar{Y}_o^{(i)} \right] \quad (28)$$

Donde $\bar{Y}_{o1}^{(r)}$ y $\bar{Y}_{o1}^{(i)}$, son las admitancias reflejada e incidente en el puerto 1, respectivamente. Estas admitancias se pueden hallar, haciendo la relación correspondiente entre los campos eléctricos y magnéticos, reflejados e incidentes:

$$\bar{Y}_{o1}^{(r)} = \text{diag} \left[\frac{j\omega\varepsilon_1}{k_{z1}} \right] \quad (29)$$

$$\bar{Y}_{o1}^{(i)} = \text{diag} \left[-\frac{j\omega\varepsilon_1}{k_{z1}} \right] \quad (30)$$

La admitancia incidente en el cilindro 1 tiene dirección $+z$, ya que es la que entra por el puerto 1 y, por consiguiente, la admitancia reflejada tiene dirección $-z$ por ser la que sale del puerto 1.

Aprovechando que las matrices implicadas en el proceso son diagonales, con el mismo valor en su diagonal, se puede realizar más fácilmente las operaciones de la ecuación (28), y afirmar que la matriz de dispersión del cilindro 1 es:

$$\bar{\bar{S}}_1 = \text{diag} \left[\frac{1 + \tanh(k_{z1}h_1)}{\tanh(k_{z1}h_1) - 1} \right] \quad (31)$$

Para el cilindro 2, el proceso es análogamente el mismo. Su respectiva matriz de dispersión es:

$$\bar{\bar{S}}_2 = \text{diag} \left[\frac{\tanh(k_{z2}h_2) + 1}{\tanh(k_{z2}h_2) - 1} \right] \quad (32)$$

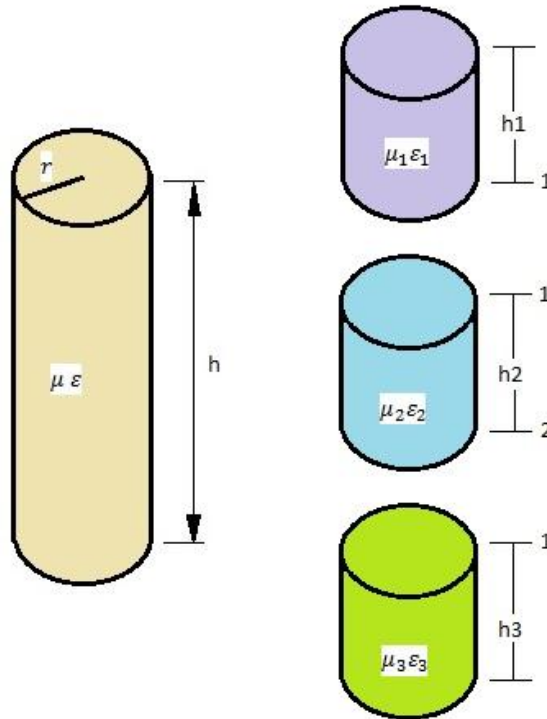
Con las matrices de dispersión $\bar{\bar{S}}_1$ y $\bar{\bar{S}}_2$, se puede pasar a calcular las frecuencias de resonancia del sistema que conforman los dos cilindros. Como ya conocemos μ y ε del material, la ecuación (33) permitirá calcular dichas frecuencias.

$$|\det(\bar{\bar{S}}_1 \bar{\bar{S}}_2 - I)| = 0 \quad (33)$$

La ecuación (33) también puede ser usada para hallar la permitividad eléctrica, esto si se conoce la frecuencia en la cual se quiere trabajar.

2.2.2 Cilindro Dividido en Tres Partes. Se abordará este problema de igual manera como se hizo con el cilindro dividido en dos partes. La Figura 6 muestra al cilindro principal dividido en tres partes, cada una de ellas con sus características magnéticas y eléctricas propias. Cada parte está referenciada en el punto medio, de tal manera que la parte superior de cada cilindro tenga una distancia equivalente a $h_i/2$ con respecto a este punto, y la parte inferior, una distancia de $-h_i/2$, también respecto a su punto de referencia, siendo i el subíndice de cada cilindro.

Figura 6. Cilindro dividido en tres partes.



En este caso, se tiene dos redes de un puerto, el cilindro superior y el inferior, y una red de dos puertos, la cual corresponde al cilindro que se encuentra en el medio. Cada cilindro puede ser representado con su propia matriz de dispersión. El objetivo es el mismo que para el caso del cilindro dividido en dos partes, por consiguiente, es necesario llegar a dos matrices de dispersión para poder utilizar la ecuación (33), y de esta manera poder obtener las frecuencias de resonancia.

Como en este problema tenemos el cilindro dividido en tres partes distintas, es necesario utilizar la técnica de interconexión de redes, ampliamente expuesta por Peñaranda-Foix en [3]. Con esta técnica, se puede conectar la red de dos puertos con cualquiera de las otras, y de esta manera, obtener las dos matrices de dispersión que se necesitan. Basándose en esto, se decide interconectar la red de dos puertos, con la red de un puerto que se encuentra en la parte inferior, de esta

forma, se obtiene una matriz de dispersión nueva que representa la interconexión entre el cilindro 2 y el cilindro 3.

A continuación, se analizará el procedimiento que se debe realizar para construir la matriz de dispersión de la red de dos puertos. La matriz de admitancia a la que se debe llegar es de la forma:

$$\bar{Y}_2 = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Se iniciará trabajando con el puerto 1, el cual se encuentra ubicado en $z = h_2/2$. Aplicando las condiciones de contorno respectivas, se establece la relación entre el campo eléctrico y el magnético:

$$\vec{h}^{(1)} = \bar{Y}_{11} \vec{e}^{(1)} \quad (35)$$

Con la ecuación (35) se obtiene la matriz de admitancia \bar{Y}_{11} :

$$\bar{Y}_{11} = \text{diag} \left[\frac{-j\omega\epsilon_2}{k_{z2}} \frac{1}{\tanh(k_{z2}h_2)} \right] \quad (36)$$

Ahora se pasa a trabajar en el puerto 2, ubicado en $z = -h_2/2$. Aplicamos las condiciones de contorno, se establece la relación entre los campos y se obtiene la matriz de admitancia \bar{Y}_{22} :

$$\vec{h}^{(2)} = \bar{Y}_{22} \vec{e}^{(2)} \quad (37)$$

$$\bar{Y}_{22} = \text{diag} \left[\frac{j\omega\epsilon_2}{k_{z2}} \frac{1}{\tanh(k_{z2}h_2)} \right] \quad (38)$$

Solo queda por establecer la construcción de $\bar{\bar{Y}}_{12}$ y $\bar{\bar{Y}}_{21}$, estas admitancias resultan de las siguientes relaciones:

$$\bar{\bar{Y}}_{12} = \frac{\vec{h}_1}{\vec{e}_2} = \text{diag} \left[\frac{j\omega\varepsilon_2}{k_{z2}} \frac{1}{\sinh(k_{z2}h_2)} \right] \quad (39)$$

$$\bar{\bar{Y}}_{21} = \frac{\vec{h}_2}{\vec{e}_1} = \text{diag} \left[\frac{-j\omega\varepsilon_2}{k_{z2}} \frac{1}{\sinh(k_{z2}h_2)} \right] \quad (40)$$

Teniendo la matriz de admitancia $\bar{\bar{Y}}_2$ ya completada, se pasa a construir la matriz de dispersión $\bar{\bar{S}}_2$, para ello se utiliza la ecuación (28) y se aplica a cada uno de los términos de la matriz $\bar{\bar{Y}}_2$. En este caso, cada puerto tiene su propia admitancia incidente y reflejada:

$$\bar{\bar{Y}}_{o1}^{(i)} = \text{diag} \left[\frac{j\omega\varepsilon_2}{k_{z2}} \right] \quad (41)$$

$$\bar{\bar{Y}}_{o1}^{(r)} = \text{diag} \left[-\frac{j\omega\varepsilon_2}{k_{z2}} \right] \quad (42)$$

$$\bar{\bar{Y}}_{o2}^{(i)} = \text{diag} \left[-\frac{j\omega\varepsilon_2}{k_{z2}} \right] \quad (43)$$

$$\bar{\bar{Y}}_{o2}^{(r)} = \text{diag} \left[\frac{j\omega\varepsilon_2}{k_{z2}} \right] \quad (44)$$

Las ecuaciones (41) y (42) corresponden a las admitancias incidente y reflejada del puerto 1 respectivamente. Las ecuaciones (43) y (44) corresponden a las admitancias incidente y reflejada del puerto 2 respectivamente.

Ahora se puede construir la matriz de dispersión $\bar{\bar{S}}_2$, la cual quedará de la siguiente forma:

$$\bar{\bar{S}}_2 = \begin{bmatrix} \bar{\bar{S}}_{11} & \bar{\bar{S}}_{12} \\ \bar{\bar{S}}_{21} & \bar{\bar{S}}_{22} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Donde:

$$\bar{\bar{S}}_{11} = \text{diag} \left[\frac{\tanh(k_{z2}h_2)+1}{\tanh(k_{z2}h_2)-1} \right] \quad (46)$$

$$\bar{\bar{S}}_{21} = \text{diag} \left[\frac{\sinh(k_{z2}h_2)+1}{\sinh(k_{z2}h_2)-1} \right] \quad (47)$$

$$\bar{\bar{S}}_{12} = \text{diag} \left[\frac{\sinh(k_{z2}h_2)+1}{\sinh(k_{z2}h_2)-1} \right] \quad (48)$$

$$\bar{\bar{S}}_{22} = \text{diag} \left[\frac{\tanh(k_{z2}h_2)+1}{\tanh(k_{z2}h_2)-1} \right] \quad (49)$$

Ahora se procede a construir la matriz de dispersión $\bar{\bar{S}}_3$ correspondiente a la del cilindro 3. En esta ocasión es una red de un puerto, su procedimiento es idéntico al realizado para llegar a la ecuación (32).

$$\bar{\bar{S}}_3 = \text{diag} \left[\frac{\tanh(k_{z3}h_3)+1}{\tanh(k_{z3}h_3)-1} \right] \quad (50)$$

Con las matrices de dispersión $\bar{\bar{S}}_2$ y $\bar{\bar{S}}_3$ ya construidas, se pasa a organizarlas de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \bar{\bar{S}}_{11} & \bar{\bar{S}}_{12} & 0 \\ \bar{\bar{S}}_{21} & \bar{\bar{S}}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\bar{S}}_{33} \end{bmatrix} \rightarrow [\bar{\bar{S}}_{T11}] \quad (51)$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} \bar{\bar{S}}_{11} & \bar{\bar{S}}_{12} \\ \bar{\bar{S}}_{21} & \bar{\bar{S}}_{22} \end{bmatrix} = \bar{\bar{S}}_2 \quad (52)$$

$$[\bar{\bar{S}}_{33}] = \bar{\bar{S}}_3 \quad (53)$$

Para hacer la transición que se muestra en (51) se debe aplicar la técnica de conexión de redes mencionada anteriormente. Ya que la configuración del nuevo sistema representa una red de un puerto, la matriz resultante tendrá un solo elemento, el cual se halla utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{\bar{S}}_{Tpq} = \bar{\bar{S}}_{pq} + \bar{\bar{S}}_{pk}\Delta_1\Delta_{lk}(\bar{\bar{S}}_{lq} + \bar{\bar{S}}_{ll}\Delta_{kl}\bar{\bar{S}}_{kq}) + \bar{\bar{S}}_{pl}\Delta_2\Delta_{kl}(\bar{\bar{S}}_{kq} + \bar{\bar{S}}_{kk}\Delta_{lk}\bar{\bar{S}}_{lq}) \quad (54)$$

Donde:

$$\Delta_{kl} = (1 - \bar{\bar{S}}_{kl})^{-1} \quad (55)$$

$$\Delta_{lk} = (1 - \bar{\bar{S}}_{lk})^{-1} \quad (56)$$

$$\Delta_1 = (1 - \Delta_{lk}\bar{\bar{S}}_{ll}\Delta_{kl}\bar{\bar{S}}_{kk})^{-1} \quad (57)$$

$$\Delta_2 = (1 - \Delta_{kl}\bar{\bar{S}}_{kk}\Delta_{lk}\bar{\bar{S}}_{ll})^{-1} \quad (58)$$

Teniendo en cuenta que la nueva red es de un solo puerto, entonces $p = q = 1$, el cual corresponde al puerto 1 del cilindro 2. Los puertos que se conectaron entre sí fueron, el puerto 2 del cilindro 2 y el puerto 1 del cilindro 3. En este orden, $k = 2$ y corresponde al puerto 2 del cilindro 2, y $l = 3$ y corresponde al puerto 1 del cilindro 3.

Como $\bar{\bar{S}}_{23} = \bar{\bar{S}}_{32} = 0$, las ecuaciones (55) y (56) pasan a tomar un valor de 1.

Reemplazando los demás valores conocidos en la ecuación (54):

$$\bar{\bar{S}}_{T11} = \bar{\bar{S}}_{11} + \bar{\bar{S}}_{12}(1 - \bar{\bar{S}}_{33}\bar{\bar{S}}_{22})^{-1}(\bar{\bar{S}}_{33}\bar{\bar{S}}_{21}) \quad (59)$$

El cilindro 1 representa una red de un puerto, por lo tanto, su matriz de dispersión será:

$$\bar{S}_1 = \text{diag} \left[\frac{1 + \tanh(k_{z1}h_1)}{\tanh(k_{z1}h_1) - 1} \right] \quad (60)$$

En este momento ya se tienen las matrices de dispersión necesarias para aplicar la ecuación (33) y dar por solucionado el problema.

En el Anexo A se trabaja en detalle el caso del cilindro dividido en cuatro partes.

2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO EMO

El algoritmo de optimización electromagnética, es la estrategia que se utilizará para dar solución a la ecuación (33), la cual será la función objetivo a minimizar en cada uno de los casos expuestos anteriormente. El algoritmo hallará las frecuencias de resonancia para el modo TM_{011} de un cilindro uniforme de radio $r = 10 \text{ mm}$ y altura $h = 100 \text{ mm}$, con permitividad relativa $\epsilon_r = 1$ y permeabilidad relativa $\mu_r = 1$.

Como ya se mencionó en la

2.1 METODOLOGÍA, se harán 40 pruebas a cada una de las posibles combinaciones y se presentarán los resultados promediados del tiempo, número de iteraciones y mínimo alcanzado, además de su respectiva desviación estándar y porcentaje de error.

Para dar solución a cada uno de los problemas, se determina el límite inferior del espacio en el cual el algoritmo hará su búsqueda. Como el algoritmo se centrará en encontrar los mínimos de la función objetivo, correspondientes a las frecuencias de resonancia del cilindro principal, se utiliza la ecuación (61), la cual

permite conocer la frecuencia de resonancia más baja, en la que el cilindro empieza a funcionar.

$$f_o = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{X_{mn}}{r}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (61)$$

En la ecuación (61), f_o es la frecuencia de resonancia más baja del modo TM_{mnp} , c corresponde a la velocidad de la luz en el vacío, X_{mn} es el n^{th} cero de la función de Bessel de primer tipo y orden p , r el radio del cilindro, h la altura del cilindro, μ_r y ϵ_r la permeabilidad y permitividad relativas del material, respectivamente.

El valor de la frecuencia f_o , servirá como referencia para determinar el límite inferior del espacio en el que el algoritmo hará la búsqueda.

$$L_{inf} = f_o - 0,1f_o \quad (62)$$

Ya con el L_{inf} definido, se pasa a colocar el valor de los demás parámetros principales del algoritmo:

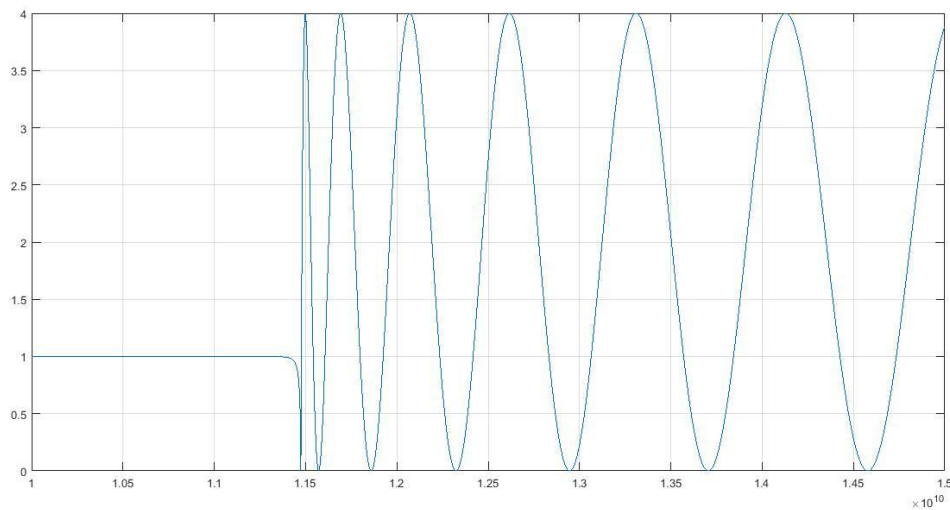
Tabla 7. Valores de los parámetros principales del algoritmo.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Número máximo de iteraciones	<i>MAXITER</i>	1500
Número de iteraciones de búsqueda local	<i>LSITER</i>	5 – 10
Población	<i>m</i>	20 – 50 – 100
Criterio de parada	<i>Tcuenta1</i>	30
Número de cifras significativas	<i>Vs</i>	17

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones serán presentados a continuación, utilizando el algoritmo modificado. Para cada una de los distintos casos, se muestra el promedio del tiempo de ejecución y del número de iteraciones. La Figura 7 muestra las frecuencias de resonancia para los modos TM_{011} del cilindro propuesto ($r=10$ mm y $h=100$ mm), en un rango de 10 a 15 GHz, las cuales corresponden con las que el algoritmo tiene que encontrar en cada uno de los casos.

Figura 7. Frecuencias de resonancia para los modos TM_{011} .



En el Anexo B se muestra en detalle los resultados de las frecuencias de resonancia obtenidas por el algoritmo EMO.

En la Figura 8 se muestra los resultados del tiempo de ejecución y desviación estándar, para el caso del cilindro segmentado en dos partes. Aquí se ha variado la población (m) y el número de iteraciones locales del algoritmo (LSITER). En los resultados se evidencia una relación proporcionalmente directa entre el tiempo y el

valor de la población, esto sin hacer variar considerablemente el error absoluto ($f_{simulación} - f_{teórico}$), en cual en todas las pruebas fue menor a 10×10^{-27} , error relativamente bajo en comparación con los reportados en la literatura en la sección 0. Dicho incremento es debido a que, al aumentar el valor de la población, el algoritmo necesita más recursos en cada iteración lo que aumenta el costo computacional.

También se detalla una leve disminución en el tiempo de ejecución durante las pruebas con LSITER=10, lo que quiere decir que colocar más puntos de búsqueda en la vecindad de la mejor respuesta, ayuda al algoritmo a encontrar la respuesta óptima más rápido.

Figura 8. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de dos particiones.

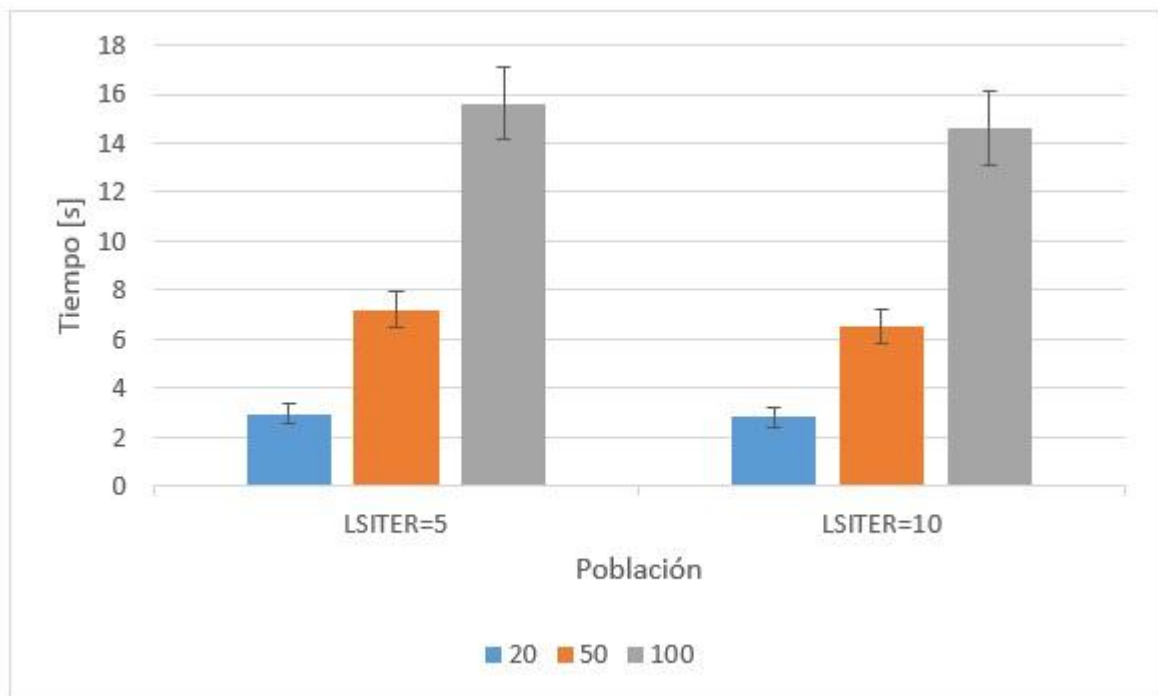


Figura 9 y Figura 10 se muestra los resultados del tiempo promedio, para un cilindro de tres y cuatro particiones respectivamente. Se puede ver que sigue un patrón muy parecido a los resultados obtenidos para un cilindro de dos particiones. El error absoluto ha aumentado, esta vez estuvo en un rango de $1 \times 10^{-22} < E_{abs} < 10 \times 10^{-22}$ para el cilindro de tres particiones, y en un rango de $1 \times 10^{-21} < E_{abs} < 10 \times 10^{-21}$ para el cilindro de cuatro particiones, pero aun así son errores muy bajos.

Figura 9. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de tres particiones.

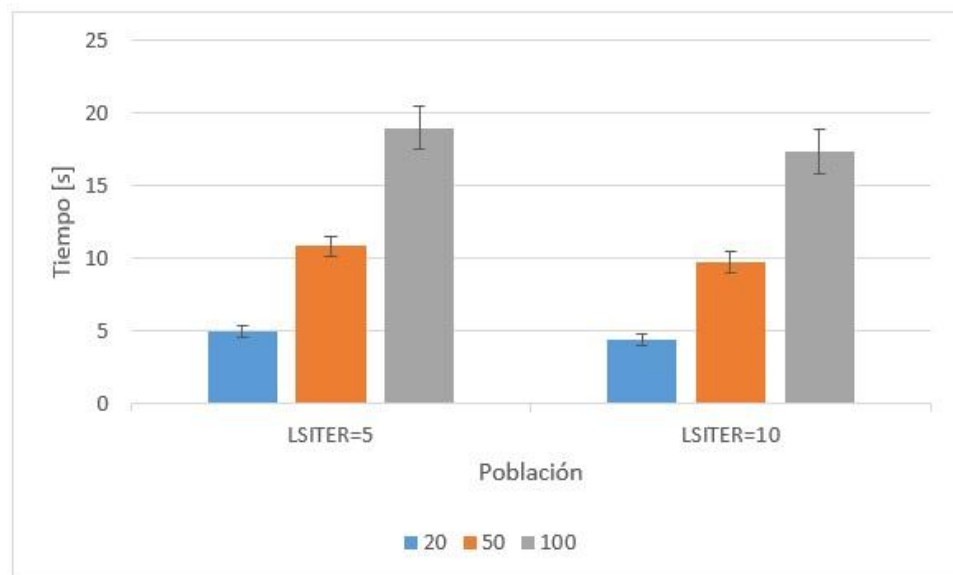
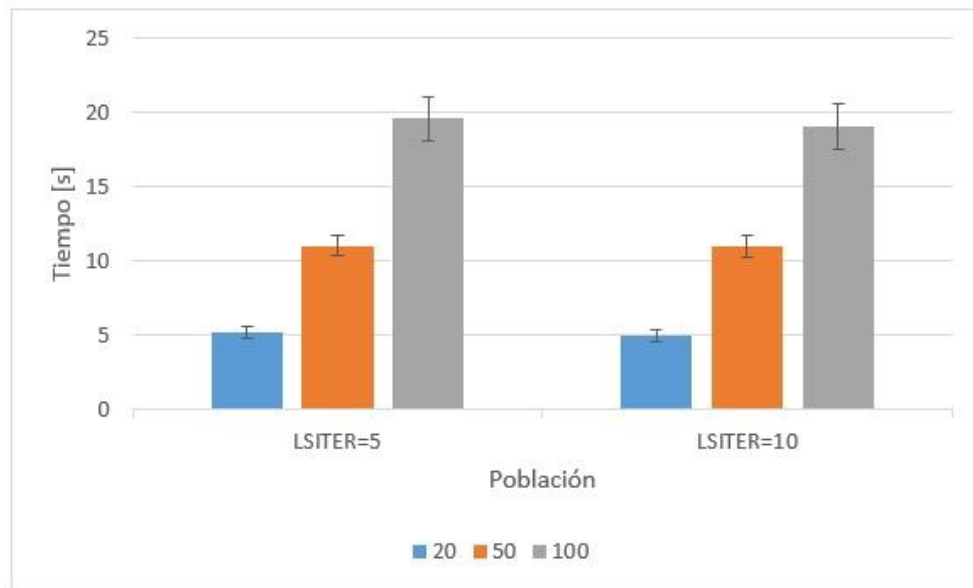
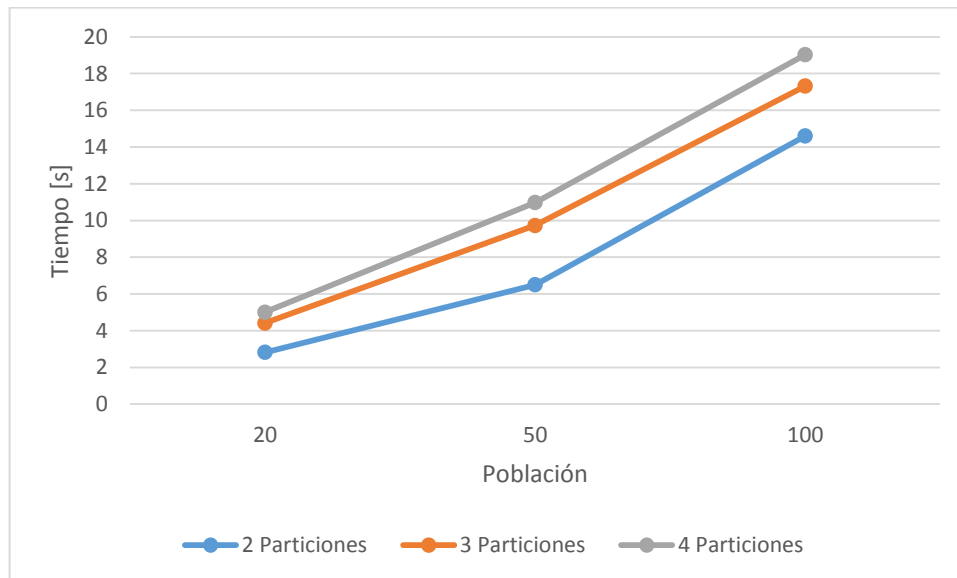


Figura 10. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de cuatro particiones.



Ya se ha observado los resultados del tiempo de cada uno de los casos. La Figura 11 presenta una comparación del tiempo promedio con LSITER=10, para las particiones estudiadas, en la que se detalla un aumento en el tiempo de ejecución, al pasar de dos a tres particiones, aumento que se hace significativo si se tiene en cuenta la cantidad de pruebas a realizar.

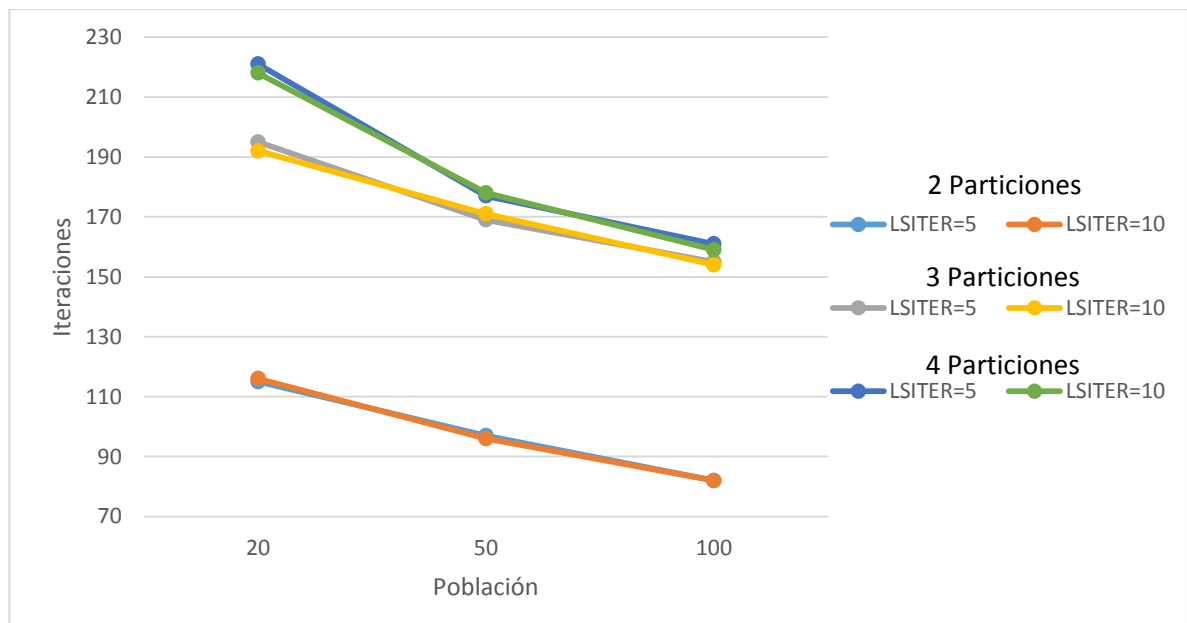
Figura 11. Resultados promedio del tiempo en cada uno de los casos.



En todos los resultados anteriores, se puede ver que la población altera significativamente el tiempo de ejecución del algoritmo. Sin embargo, los resultados de las frecuencias de resonancia no se modificaron (ver Anexo B), demostrando de esta manera que el algoritmo es capaz de trabajar con pocos recursos, y dar un muy buen resultado.

Figura 12 muestra el número de iteraciones promedio para todos los casos. Como era de esperarse, a mayor número de población, menos iteraciones le llevaría al algoritmo para llegar a una respuesta óptima. Sin embargo, esto le significaría más tiempo de ejecución, lo cual no lo hace muy útil para espacios pequeños. El valor de LSITER no influye significativamente en el número de iteraciones. Otra observación muy importante, es que al aumentar el número de particiones se aumenta considerablemente el número de iteraciones, esto debido a que se aumenta la complejidad del problema a resolver.

Figura 12. Número de iteraciones promedio para todos los casos.



3.1 COMPARACIÓN DE LA ESTRATEGÍA IMPLEMENTADA CON LA LITERATURA

En esta sección se hará una serie de pruebas para comparar los resultados con los reportados en la literatura. Como referencia se utiliza el trabajo realizado por Iván Amaya y Rodrigo Correa en [9]. En este trabajo se usa la teoría de análisis circuital en distintos problemas, utilizando los algoritmos UPSO (Unified Particle Swarm Optimization algorithm) y SBHS (Self-adjustable Bandwidth Harmony Search algorithm) como estrategia para dar solución a los problemas.

Se tomará el caso del cilindro dividido en dos particiones, con altura $h = 60,0$ mm y radio $r = 9,8$ mm, con $\mu_r = 1$ y $\varepsilon_r = 1$. Se hallarán las frecuencias de resonancia para los modos TM_{011} en el rango comprendido entre 10 y 25 GHz. Se inicia tomando como base el modelo desarrollado en la sección 0, y, en particular, la función objetivo definida en la ecuación (33). Las pruebas realizadas se ejecutaron considerando una población $m = 50$, y un número de iteraciones de búsqueda local $LSITER = 10$.

En la Tabla 8 se muestran los resultados promedio de la mejor solución, del número de iteraciones y del tiempo, todo esto para 30 repeticiones de cada algoritmo. Se observa que el tiempo de ejecución para el algoritmo EMO, en comparación con los demás, es mayor. Pero, aun así, la mejor solución encontrada es la más precisa de todas, disminuyendo así el error absoluto.

Tabla 8. Comparación resultados con la literatura.

Algoritmo	Mejor Solución	Iteraciones	Tiempo [s]
UPSO [9]	6,53E-10	11,44	0,18
UPSO + Penalización [9]	1,89E-09	16,47	0,25
SBHS [9]	8,80E-10	440,89	0,20
SBHS + Penalización [9]	2,34E-09	1886,63	0,97
EMO	2,40E-31	121,83	6,29

En la Figura 13 y Figura 14 se muestra la comparación del número de iteraciones y el tiempo de ejecución respectivamente. En el primer caso, EMO se desempeña mejor que SBHS, pero un poco peor que UPSO. Con lo cual se demuestra que el algoritmo EMO tiene una eficacia muy alta y una eficiencia muy aceptable.

Figura 13. Comparación del número de iteraciones.

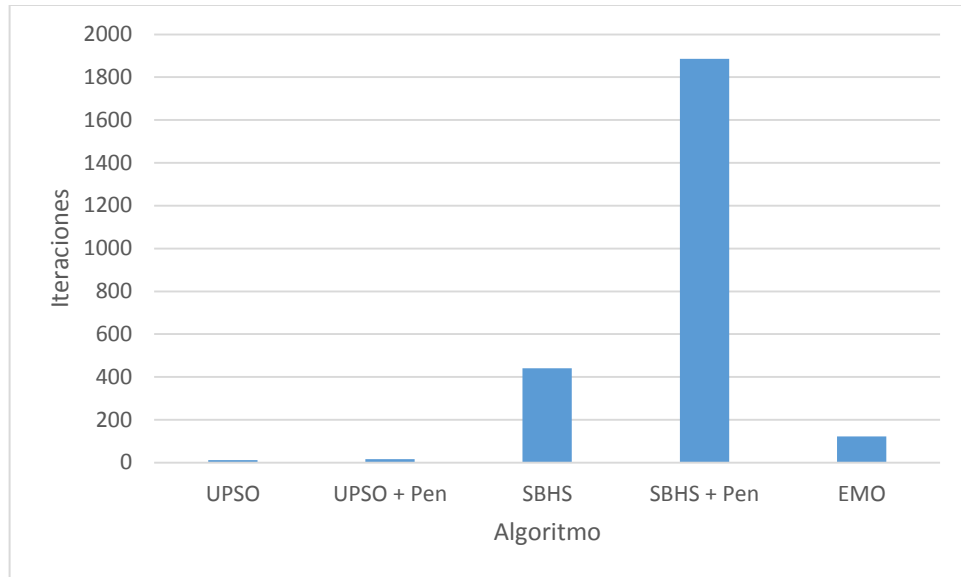
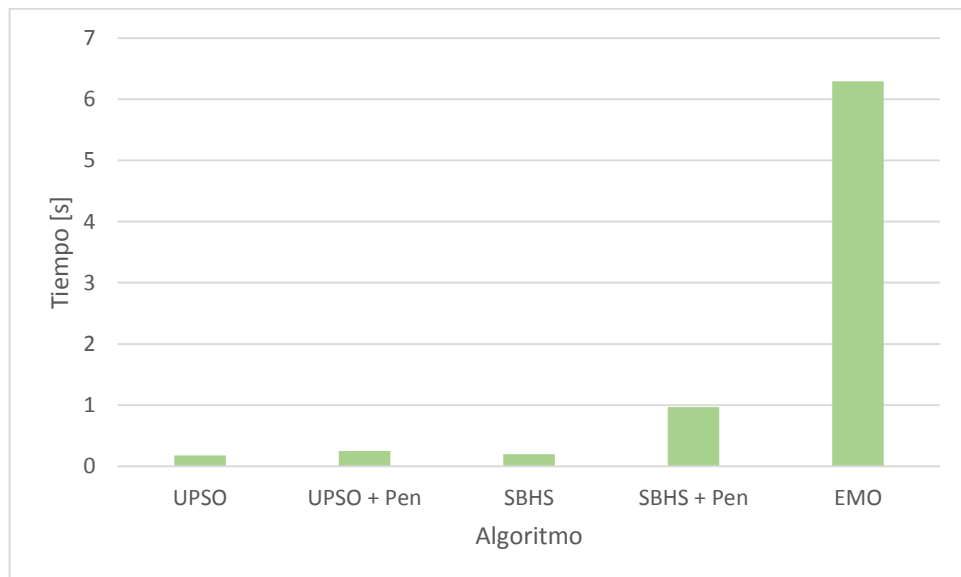


Figura 14. Comparación del tiempo de ejecución.



4 CONCLUSIONES

Este trabajo presentó la forma como se puede utilizar el algoritmo EMO para resolver problemas con múltiples soluciones. En particular, se abordó el caso de encontrar las múltiples frecuencias de resonancia para un aplicador microondas circular, totalmente lleno con un dieléctrico. Cabe resaltar que aun cuando los datos presentados asumen el mismo material en todos los bloques, el modelo y el algoritmo permiten incorporar materiales diferentes para cada uno. Sin embargo, estas últimas pruebas no se presentan debido a que no se cuenta con un software de referencia que permita validar los resultados, y a que el modelo matemático (simple para el caso homogéneo) se torna muy complejo para resolver analíticamente.

El modelamiento circuital representa una alternativa simple y sencilla de implementar, que puede ser usada en problemas electromagnéticos difíciles de desarrollar. En este trabajo se comprobó su versatilidad y funcionalidad al utilizarse para hallar las frecuencias de resonancia de una guía de onda circular totalmente llena con un dieléctrico. Cabe distinguir que esta técnica se puede aplicar para más de cuatro particiones y en estructuras distintas.

En lo que respecta al desempeño del algoritmo, la modificación en el cálculo del parámetro “delta” mejoró la precisión del algoritmo en más de un 90% (Ver Sección 0), permitiendo obtener resultados con hasta 4 decimales de precisión en todos los casos estudiados. Al modificar los parámetros del algoritmo EMO (como la población y el número de iteraciones de búsqueda local), no se detectó un cambio considerable en el porcentaje de error de los resultados, pero sí en el número de iteraciones. Esto se debe a que, a mayor población, menor número de iteraciones necesita el algoritmo para llegar a una respuesta óptima. El tiempo de cómputo, por su parte, es directamente proporcional al valor de la población e

inversamente proporcional al valor de iteraciones de búsqueda local (LSITER). Sin embargo, para valores altos de LSITER esto no se cumple, debido al recurso computacional limitado. Aun así, y considerando los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir que este algoritmo es apropiado para resolver este tipo de problemas en particular.

A manera de observación cabe destacar que la mejora del criterio de parada expuesto en la sección 1.1.1.5, permitió reducir el tiempo de ejecución del algoritmo, pues no es necesario esperar a que se agoten todas las iteraciones disponibles. Además, la creación de la interfaz de usuario mostrada en la sección 1.1.1.6, facilitó la utilización del algoritmo y evita cometer errores al momento de cambiar los parámetros.

REFERENCIAS

- [1] R. F. Harrington, "Time-Harmonic Electromagnetic Fields". New York. McGraw-Hill, 1961.
- [2] C. A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics". New York. Wiley, 1989
- [3] F. Peñaranda, "Aplicación de la teoría de análisis circuital generalizado a la resolución de problemas de difracción electromagnética". Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia, Marzo de 2001.
- [4] Y. A. Loranca, "Lineas de transmisión y guías de onda". Tesis Profesional, UDLAP, Enero 2003.
- [5] Ilker-Birbil S., Shu Cherng F., "An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization". Journal of Global Optimization 25: 263-282, 2003.
- [6] E. Cuevas-Jiménez, D. Oliva-Navarro, "Modelado de filtros IIR usando un algoritmo inspirado en el electromagnetismo". Ingeniería Investigación y Tecnología XIV, 01 (2013): 125-138.
- [7] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi, "GSA: A Gravitational Search Algorithm", Information Sciences, 179 (2009) 2232-2248.
- [8] I. Amaya, "Microwave applicator optimization through metaheuristic algorithms for the mining industry". Ph.D. Thesis, Universidad Industrial de Santander, 2015.
- [9] I. Amaya, R. Correa, "Finding resonant frequencies of microwave cavities through a Modified Harmony Search algorithm", Int. J. Bio-Inspired Comput. In-Press. (2015).

BIBLIOGRAFÍA

AMAYA I., "Microwave Applicator Optimization Through Metaheuristic Algorithms for the Mining Industry". Ph.D. Thesis. Universidad Industrial de Santander. 2015.

C. A., "Advanced Engineering Electromagnetics". New York. Wiley, 1989.

CUEVAS E., OLIVA-NAVARRO D., "Modelado de filtros IIR usando un algoritmo inspirado en el electromagnetismo". Ingeniería Investigación y Tecnología XIV, 01 (20013): 125-138.

HARRINGTON R. F., "Time-Harmonic Electromagnetic Fields". New York. McGraw-Hill, 1961.

ILKER-BIRBIL S., SHU-CHERNG F., "An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization". Journal of Global Optimization, volumen 25, 2003: 263-282.

OLIVA D., "Algoritmos Inspirados en la Naturaleza Aplicados a Visión Computacional: Optimización Basada en Principios del Electromagnetismo". Universidad de Guadalajara, Noviembre de 2010.

PEÑARANDA F. F., "Aplicación de la teoría de análisis circuital generalizado a la resolución de problemas de difracción electromagnética". Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia, Marzo de 2001.

PEÑARANDA F., F. L., & CATALA-CIVERA J., "Circuit Analysis of Cylindrical Structures Applied to the Electromagnetic Resolution of Resonant Cavities". Passive Microwave Components and Antennas, pp. 141-168, 2010.

PEÑARANDA F., JANEZIC M., CATALA J., CANOS A., "Full-Wave Analysis of Dielectric-Loaded Cylindrical Waveguides and Cavities Using a New Four-Port Ring Network". IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 60, Septiembre de 2012.

SNITZER E., "Cylindrical Dielectric Waveguide Modes". Research Center, American Optical Company. Abril, 1961.

VALERO A., "Resolución de problemas electromagnéticos complejos mediante análisis circuital generalizado". Universidad Politécnica de Valencia, Junio de 1997.

YEH C., SHIMABUKURO F., "The Essence of Dielectric Waveguides". Los Angeles. Springer, 2008

ANEXOS

Anexo A. Modificaciones al algoritmo de optimización

- Criterios de parada: Inicialmente solo hay un criterio de parada, y se cumple cuando se llega al máximo número de iteraciones (MAXITER). El nuevo criterio de parada consiste en hacer un seguimiento a cada mejor solución que se produzca en cada una de las iteraciones, cuando una solución ya se ha repetido cierto número de veces (Tcuenta1, número impuesto por el usuario), el algoritmo se detiene.

También se incluye dos contadores, el primero (contador 1) permite conocer con exactitud cuántas iteraciones llevó el algoritmo hasta llegar con la respuesta, el segundo (contador2) tiene como función, hacer que el algoritmo funcione por un número de iteraciones más (Tcuenta2=75), esto con el fin de que la gráfica no termine justo cuando se cumple el límite establecido por "Tcuenta1".

```
if cuenta1 < Tcuenta1
    if fxbestf == fb %Pregunta si es igual al anterior
        cuenta1 = cuenta1 + 1;
    else
        cuenta1 = 1;
    end
    contador = contador + 1;
else
    contador2 = contador2 + 1;
    contador1 = contador - Tcuenta1 - 1;
    if (contador2 == Tcuenta2)
        iteracion = MAXITER;
    end
end
```

El anterior código se pone en la parte final del ciclo “while” principal, con esto se garantiza que funcione para cada una de las iteraciones. El parámetro “cuenta1” tiene como valor inicial 1, y se define al inicio del algoritmo con los demás parámetros, igual que “contador”, “contador1” y “contador2”.

- Cifras significativas: Esta modificación permite escoger el número de cifras significativas (decimales), con ello se logra que el algoritmo converja más rápido y en menos número de iteraciones. Este número se denota como “vs”.

```
fxbest1 = fxbest*(1*(10^(vs)));  
fxbest2 = floor(fxbest1);  
fxbestf = fxbest2/(1*(10^(vs)));
```

La función del anterior código es muy simple, da a la variable “fxbest1” el valor de la mejor solución “fxbest” multiplicada por 10^{vs} , luego de ello se utiliza la función “floor”, para que nos devuelva en “fxbest2” el valor de “fxbest1” redondeado al entero inferior. Después de esto se almacena en “fxbestf” el valor de “fxbest2” dividido en 10^{vs} , este valor será el de la mejor solución con el número de decimales solicitado.

Este código se coloca justo después de llamar a la función que realiza la fase de *Movimiento*.

- Parámetro de búsqueda local (delta): para aprovechar aún más la fase de búsqueda local, y hacer que el algoritmo en cada iteración mejore la precisión, se hizo que el parámetro “delta” variara. Esta modificación consiste en reducir un 90% el espacio de búsqueda local cada cierto número de iteraciones (Tcuentad1=10), en las cuales cada mejor solución es la misma que la anterior.

```

if cuentad1 < Tcuentad1
    if fxbestf==fb
        cuentad1 = cuentad1 + 1;
    else
        cuentad1 = 1;
    end
else
    delta = (delta)/10;
    cuentad1 = 1;
end

```

En el código, cada 10 iteraciones en las cuales la mejor solución sea igual que la anterior, el valor de “delta” disminuirá en un 90%. De esta forma se aumenta la probabilidad de encontrar una mejor solución que esté cerca a la anterior.

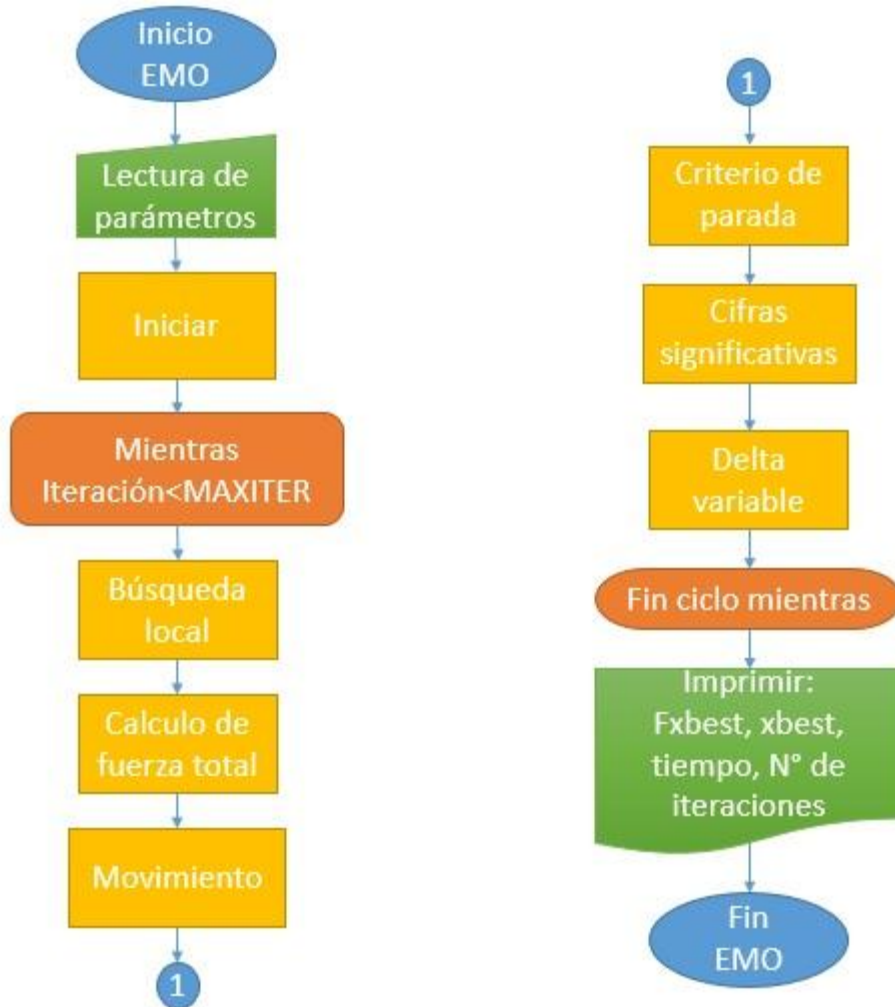
El valor inicial de “delta” se calcula al inicio del algoritmo, para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$delta = \frac{Lim_{sup}-Lim_{inf}}{200(m)(LSITER)} \quad (63)$$

El código del parámetro de búsqueda local se ubica justo antes del código que establece el nuevo criterio de parada.

En la Figura 15 se muestra el orden en el que se deben ubicar las modificaciones en el código principal.

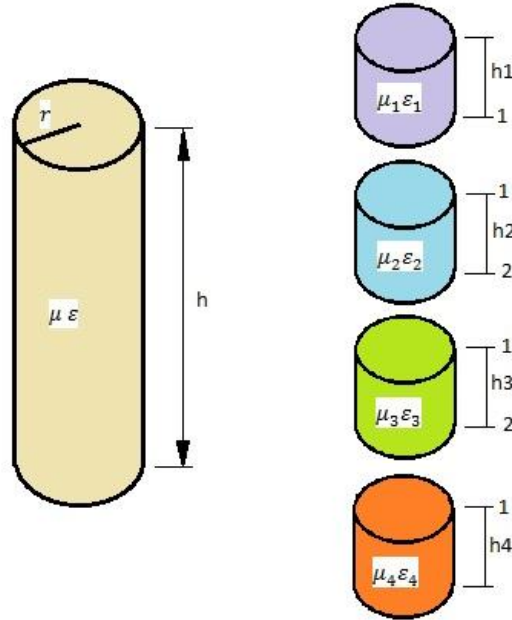
Figura 15. Estructura del algoritmo con las modificaciones.



Anexo A. Desarrollo del cilindro dividido en cuatro partes

En este caso se divide el cilindro en cuatro partes como se muestra en la Figura 16, cada parte con sus características eléctricas y magnéticas propias. También tendremos en cuenta que cada cilindro está referenciado en el medio, de igual manera que en los anteriores dos casos.

Figura 16. Cilindro dividido en cuatro partes.



Lo primero que se hace es escribir la matriz de dispersión de cada uno de los cilindros, como son estructuras de uno y dos puertos, la construcción de estas matrices se hace de la misma forma que como se hizo en el caso del cilindro dividido en tres partes.

Las matrices de dispersión son:

$$\bar{\bar{S}}_1 = \text{diag} \left[\frac{1 + \tanh(k_{z1}h_1)}{\tanh(k_{z1}h_1) - 1} \right] \quad (64)$$

$$\bar{\bar{S}}_2 = \begin{bmatrix} \text{diag} \left[\frac{\tanh(k_{z2}h_2) + 1}{\tanh(k_{z2}h_2) - 1} \right] & \text{diag} \left[\frac{\sinh(k_{z2}h_2) + 1}{\sinh(k_{z2}h_2) - 1} \right] \\ \text{diag} \left[\frac{\sinh(k_{z2}h_2) + 1}{\sinh(k_{z2}h_2) - 1} \right] & \text{diag} \left[\frac{\tanh(k_{z2}h_2) + 1}{\tanh(k_{z2}h_2) - 1} \right] \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$\bar{\bar{S}}_3 = \begin{bmatrix} \text{diag} \left[\frac{\tanh(k_{z3}h_3) + 1}{\tanh(k_{z3}h_3) - 1} \right] & \text{diag} \left[\frac{\sinh(k_{z3}h_3) + 1}{\sinh(k_{z3}h_3) - 1} \right] \\ \text{diag} \left[\frac{\sinh(k_{z3}h_3) + 1}{\sinh(k_{z3}h_3) - 1} \right] & \text{diag} \left[\frac{\tanh(k_{z3}h_3) + 1}{\tanh(k_{z3}h_3) - 1} \right] \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$\bar{\bar{S}}_4 = \text{diag} \left[\frac{1 + \tanh(k_{z4}h_4)}{\tanh(k_{z4}h_4) - 1} \right] \quad (67)$$

Ahora, utilizando la técnica de interconexión de redes, se construye una matriz $\bar{\bar{S}}_{T1}$ que resultará de conectar el cilindro 1 y el cilindro 2, y otra matriz $\bar{\bar{S}}_{T2}$ que se construirá de la conexión del cilindro 3 y el cilindro 4.

$$\begin{bmatrix} \bar{\bar{S}}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\bar{S}}_{22} & \bar{\bar{S}}_{23} \\ 0 & \bar{\bar{S}}_{32} & \bar{\bar{S}}_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \bar{\bar{S}}_{T1} \quad (68)$$

Donde $\bar{\bar{S}}_{11}$ es el único término de la matriz $\bar{\bar{S}}_1$, y los términos $\bar{\bar{S}}_{22}$, $\bar{\bar{S}}_{23}$, $\bar{\bar{S}}_{32}$ y $\bar{\bar{S}}_{33}$, son los correspondientes a los de la matriz $\bar{\bar{S}}_2$. Para llegar a la matriz $\bar{\bar{S}}_{T2}$, se utilizará el siguiente arreglo matricial:

$$\begin{bmatrix} \bar{\bar{S}}_{11} & \bar{\bar{S}}_{12} & 0 \\ \bar{\bar{S}}_{21} & \bar{\bar{S}}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\bar{S}}_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \bar{\bar{S}}_{T2} \quad (69)$$

Donde los términos $\bar{\bar{S}}_{11}$, $\bar{\bar{S}}_{12}$, $\bar{\bar{S}}_{21}$ y $\bar{\bar{S}}_{22}$ corresponden a los de la matriz $\bar{\bar{S}}_3$. El término $\bar{\bar{S}}_{33}$ es el único término de la matriz $\bar{\bar{S}}_4$.

Utilizando las ecuaciones (54), (55), (56), (57) y (58), se calcula el único elemento de $\bar{\bar{S}}_{T1}$ y $\bar{\bar{S}}_{T2}$:

$$\bar{\bar{S}}_{T1} = \bar{\bar{S}}_{33} + \bar{\bar{S}}_{32}(1 - \bar{\bar{S}}_{11}\bar{\bar{S}}_{22})^{-1}(\bar{\bar{S}}_{11}\bar{\bar{S}}_{23}) \quad (70)$$

$$\bar{\bar{S}}_{T2} = \bar{\bar{S}}_{11} + \bar{\bar{S}}_{12}(1 - \bar{\bar{S}}_{33}\bar{\bar{S}}_{22})^{-1}(\bar{\bar{S}}_{33}\bar{\bar{S}}_{21}) \quad (71)$$

Ya con las matrices de dispersión se puede utilizar la ecuación (33) y poder hallar las frecuencias de resonancia:

$$|\det(\bar{\bar{S}}_{T1}\bar{\bar{S}}_{T2} - I)| = 0 \quad (72)$$

Anexo B. Simulaciones y resultados

En la

Tabla 9,

Tabla 10 y Tabla 11 se muestra los resultados del tiempo promedio, para un cilindro de dos, tres y cuatro particiones respectivamente.

Tabla 9. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de dos particiones.

Tiempo	m=20	m=50	m=100
LSITER=5	Tiempo=2,938 [s] Desviación estándar=4,770E-01 %Error=8,803E-27	Tiempo=7,202 [s] Desviación estándar=6,821E-01 %Error=9,595E-27	Tiempo=15,621 [s] Desviación estándar=1,596E+00 %Error=6,220E-27
LSITER=10	Tiempo=2,815 [s] Desviación estándar=3,218E-01 %Error=3,695E-27	Tiempo=6,491 [s] Desviación estándar=7,471E-01 %Error=5,815E-27	Tiempo=14,597 [s] Desviación estándar=1,434E+00 %Error=6,015E-27

Tabla 10. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de tres particiones.

Tiempo	m=20	m=50	m=100
LSITER=5	Tiempo=4,896 [s] Desviación estándar=4,296E-01 %Error=6,927E-22	Tiempo=10,813 [s] Desviación estándar=9,256E-01 %Error=8,953E-22	Tiempo=18,959 [s] Desviación estándar=2,004E+00 %Error=9,386E-22
LSITER=10	Tiempo=4,408 [s] Desviación estándar=4,907E-01 %Error=6,173E-22	Tiempo=9,729 [s] Desviación estándar=8,015E-01 %Error=7,541E-22	Tiempo=17,319 [s] Desviación estándar=1,972E+00 %Error=9,873E-22

Tabla 11. Resultados promedio de tiempo en un cilindro de cuatro particiones.

Tiempo	m=20	m=50	m=100
LSITER=5	Tiempo=5,122 [s] Desviación estándar=5,569E-01 %Error=3,528E-21	Tiempo=11,014 [s] Desviación estándar=8,116E-01 %Error=5,638E-21	Tiempo=19,563 [s] Desviación estándar=2,133E+00 %Error=8,912E-21
LSITER=10	Tiempo=5,002 [s] Desviación estándar=5,274E-01 %Error=2,347E-21	Tiempo=10,972 [s] Desviación estándar=6,372E-01 %Error=4,629E-21	Tiempo=19,019 [s] Desviación estándar=1,993E+00 %Error=6,734E-21

En la Figura 17 y

Figura 18 se puede ver la variación del tiempo para LSITER=5 y LSITER=10 respectivamente, para un cilindro de dos particiones. En las dos figuras se

evidencia, que, a mayor valor de población, mayor es el tiempo de ejecución y su desviación estándar. Esto debido a que en cada iteración el algoritmo necesita más recursos al aumenta el valor de la población.

Figura 17. Tiempo promedio LSITER=5 Cilindro de 2 particiones.

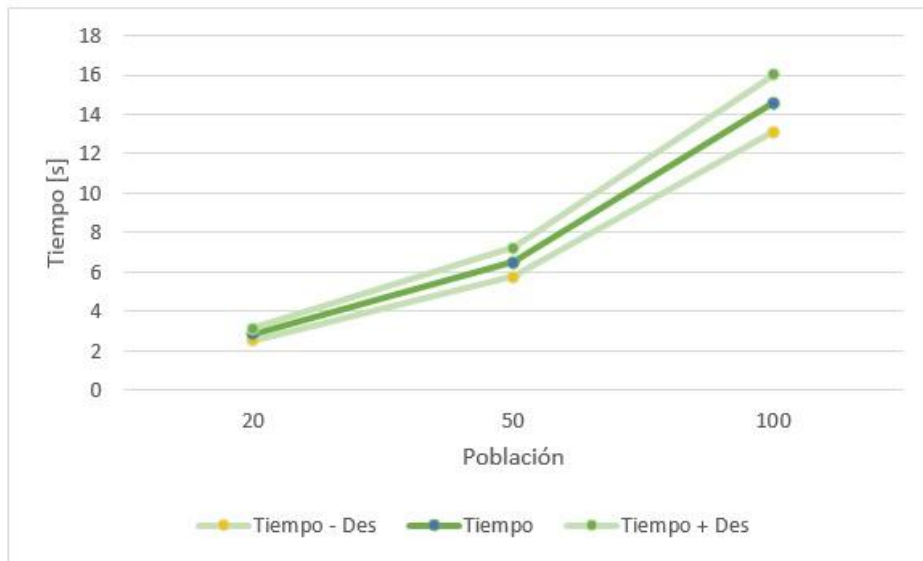
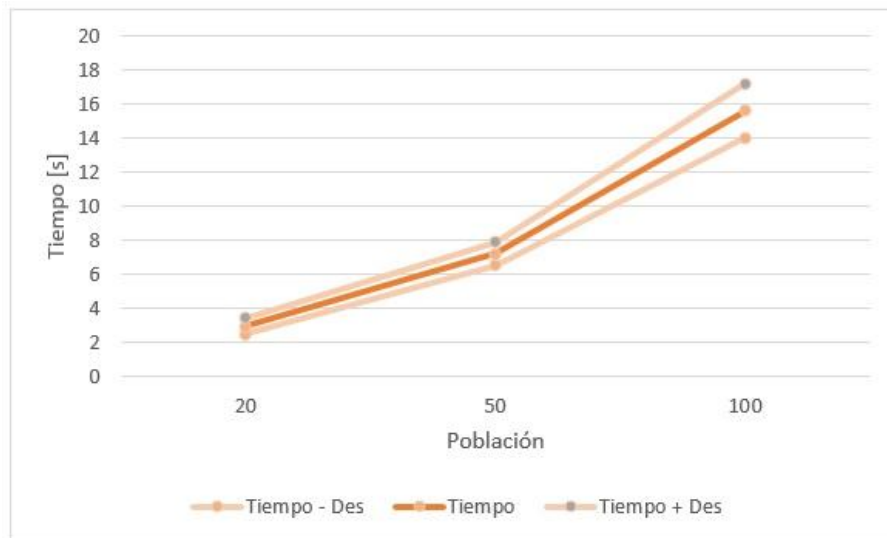


Figura 18. Tiempo promedio LSITER=10 Cilindro de 2 particiones.



A continuación, se presenta los resultados de las frecuencias para cada uno de los casos, esto teniendo en cuenta el espacio de búsqueda. Estos resultados

corresponden a los modos TM_{011} de un cilindro de altura $h=100$ mm, un radio $r=10$ mm, con $\mu_r = 1$ y $\varepsilon_r = 1$. En la Tabla 12 se encuentran los resultados para el cilindro de 2 particiones. Hay que destacar que el error es mínimo, y los resultados prácticamente son los mismos que los teóricos. Las frecuencias halladas se clasifican en la tabla según el número de veces que se obtuvieron. Una observación importante, es que, al aumentar el valor de LSITER y de la población, hay más probabilidad de que se obtengan todas las frecuencias de resonancia en el espacio limitado.

Tabla 12. Resultados frecuencias para cilindro de dos particiones.

FRECUENCIA [Hz]	m=20 LSITER=5	m=20 LSITER=10	m=50 LSITER=5	m=50 LSITER=10	m=100 LSITER=5	m=100 LSITER=10
11571627651,7881	0	6	0	6	6	4
11859309859,9776	2	0	4	4	0	2
12323865874,5484	6	6	0	8	4	4
12946269181,8265	6	4	6	10	6	6
13705031092,9352	6	10	10	2	8	12
14578876660,5623	20	14	20	10	16	12

En la Tabla 13 y

Tabla 14 se muestran los resultados de las frecuencias halladas por el algoritmo para un cilindro de tres y cuatro particiones, respectivamente. En todas las frecuencias se mantiene la misma exactitud, demostrando el buen funcionamiento del algoritmo y de la estrategia propuesta.

Tabla 13. Resultados frecuencias para cilindros de tres particiones.

FRECUENCIA [Hz]	m=20 LSITER=5	m=20 LSITER=10	m=50 LSITER=5	m=50 LSITER=10	m=100 LSITER=5	m=100 LSITER=10
11571627651,7881	0	4	2	4	4	4
11859309859,9776	0	0	0	2	2	4
12323865874,5484	6	2	2	4	4	4
12946269181,8265	4	4	2	10	8	10
13705031092,9352	8	12	12	12	10	8
14578876660,5623	22	18	22	8	12	10

Tabla 14. Resultados frecuencias para cilindros de cuatro particiones.

FRECUENCIA [Hz]	m=20 LSITER=5	m=20 LSITER=10	m=50 LSITER=5	m=50 LSITER=10	m=100 LSITER=5	m=100 LSITER=10
11571627651,7881	0	4	4	8	0	8
11859309859,9776	4	6	0	2	6	4
12323865874,5484	0	6	0	2	4	4
12946269181,8265	10	0	8	10	12	4
13705031092,9352	10	8	10	6	8	12
14578876660,5623	16	16	18	12	10	8

En la Tabla 16 y Tabla 17 se muestran los resultados del promedio de iteraciones para los cilindros de tres y cuatro particiones. En estas se evidencia un leve aumento en el número de iteraciones, en comparación con los mostrados en la Tabla 15, para el cilindro de dos particiones, esto debido a que hay una mayor complejidad de la función objetivo a optimizar. Además, se concluye que, a mayor número de población, el número de iteraciones que utilizará el algoritmo será menor.

Tabla 15. Iteraciones promedio para un cilindro de dos particiones.

Iteraciones	m=20	m=50	m=100
LSITER=5	Número de iteraciones= 115	Número de iteraciones= 97	Número de iteraciones= 82
LSITER=10	Número de iteraciones= 116	Número de iteraciones= 96	Número de iteraciones= 82

Tabla 16. Iteraciones promedio para un cilindro de tres particiones.

Iteraciones	m=20	m=50	m=100
LSITER=5	Número de iteraciones= 195	Número de iteraciones= 169	Número de iteraciones= 155
LSITER=10	Número de iteraciones= 192	Número de iteraciones= 171	Número de iteraciones= 154

Tabla 17. Iteraciones promedio para un cilindro de cuatro particiones.

Iteraciones	m=20	m=50	m=100
LSITER=5	Número de iteraciones= 221	Número de iteraciones= 177	Número de iteraciones= 161
LSITER=10	Número de iteraciones= 218	Número de iteraciones= 178	Número de iteraciones= 159