

**DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA  
MEDIANTE EL MÉTODO DE LA ESPIRAL**

**RAFAEL ARMANDO ORTÍZ GELVES  
EDGAR SNEYDER GARCÍA MORANTES**

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

**2013**

**DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA  
MEDIANTE EL MÉTODO DE LA ESPIRAL**

**RAFAEL ARMANDO ORTIZ GELVES**

**EDGAR SNEYDER GARCÍA MORANTES**

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

**DIRECTOR**

**PhD. CARLOS RODRIGO CORREA CELY**

**CODIRECTOR**

**PhD(c) IVAN MAURICIO AMAYA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA**

**Y DE TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2013**

## DEDICATORIA

*Este trabajo va dedicado primeramente a Dios a quien le debo mi vida y a mis padres y hermanos que siempre me han dado todo su apoyo.*

*Edgar Sneyder García Morantes*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Le agradezco a Dios la realización de este trabajo, a mis padres y hermanos, a mi nonita por su apoyo incondicional, al profe Correa y a Iván por su orientación durante la ejecución de este trabajo, a mis amigos de la Universidad, a mis amigos del CIDLIS, a mis amigos del CEMOS, a mis pastores y amigos de la iglesia y a todos los que estuvieron alrededor mío brindándome su compañía y ayuda.*

*Edgar Sneyder García Morantes*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.....</b>	<b>18</b>
2.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
2.2	OBJETIVOS.....	19
2.2.1	OBJETIVO GENERAL .....	19
2.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>20</b>
3.1	TERMINOLOGIA .....	20
3.1.1	VARIABLES PRINCIPALES DEL PROGRAMA.....	20
3.2	ALGORITMO OPTIMIZACIÓN DE LA ESPIRAL N-DIMENSIONAL....	21
3.3	MODIFICACIÓN DEL ALGORITMO .....	23
3.4	ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO .....	25
<b>4</b>	<b>FUNCIONES DE PRUEBA .....</b>	<b>31</b>
4.1	Reproducción de resultados .....	32
4.1.1	FUNCIÓN DE SCHWEFEL`S.....	32
4.1.2	FUNCIÓN DE 2N MÍNIMA .....	36
4.1.3	FUNCIÓN DE RASTRIGIN .....	40
4.1.4	FUNCIÓN DE GRIEWANK .....	44
4.2	Ejecución del algoritmo de la espiral para las funciones de prueba con 200 espirales en el espacio solución. ....	48
<b>5</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DEL MÉTODO DE LA ESPIRAL EN UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA .....</b>	<b>50</b>
5.1	SELECCIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL MÉTODO DE LA ESPIRAL .....	50
5.1.1	SELECCIÓN DEL RADIO (r) Y THETA ( $\theta$ ) .....	50
5.1.2	SELECCIÓN DEL CRITERIO DE FRONTERA.....	55

5.2	RESULTADOS OBTENIDOS .....	58
5.2.1	Absorbedor de tres capas .....	58
5.2.2	Diseño de un absorbedor electromagnético de 7 Capas.....	62
5.2.3	Diseño de un absorbedor de 9 capas.....	63
5.3	CONTRASTE DE RESULTADOS .....	65
5.3.1	Contraste del método de la espiral con GSA, SADE, PSO y CFO para un absorbedor de 5 capas.....	65
5.3.2	Contraste del método de la espiral con MOPSO para un absorbedor de 5 capas.....	68
5.3.3	Contraste del método de la espiral con PSO MODIFICADO para un absorbedor de 7 capas.....	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de la espiral para $n=2$ dimensiones. Fuente: Autores. ....	22
Figura 2. Diagrama de bloques método de la espiral. Fuente: Autores. ....	24
Figura 3. Bloque del criterio de parada. Fuente: Autores.....	25
Figura 4. Ondas producidas al momento de incidir una onda perpendicularmente sobre una superficie plana. Fuente: Autores.....	27
Figura 5. Sistema multicapa, en el cual una onda incide perpendicularmente desde la izquierda. Fuente: Autores. ....	28
Figura 6. Función de Schwefel's para $n=2$ dimensiones. Fuente: Autores. ....	33
Figura 7. Comportamiento del algoritmo en la función de Schwefel's con $n=2$ , $r=0,95$ y $\theta=45^\circ$ . Fuente: Autores.....	35
Figura 8. Convergencia del algoritmo en la función de Schwefel's. Fuente: Autores. ....	36
Figura 9. Función de $2n$ mínima para $n=2$ dimensiones. Fuente: Autores.....	37
Figura 10. Comportamiento del algoritmo en la función de $2n$ mínima con $n=2$ , $r=0,99$ y $\theta=90^\circ$ . Fuente: Autores.....	39
Figura 11. Convergencia del algoritmo en la función de $2n$ mínima. Fuente: Autores. ....	40
Figura 12. Función de Rastrigin para $n=2$ dimensiones. Fuente: Autores. ....	41
Figura 13. Comportamiento del algoritmo en la Función de Rastrigin con $n=2$ , $r=0,99$ y $\theta=90^\circ$ . Fuente: Autores.....	43
Figura 14. Convergencia del algoritmo en la función de Rastrigin. Fuente: Autores. ....	44
Figura 15. Función de Griewank para $n=2$ dimensiones. Fuente: Autores. ....	45
Figura 16. Comportamiento del algoritmo en la función de Griewank con $n=2$ , $r=0,99$ y $\theta=90^\circ$ . Fuente: Autores.....	47
Figura 17. Convergencia del algoritmo en la función de Griewank. Fuente: Autores. ....	48
Figura 18. Diagrama de barras para comparar los resultados de las Espirales 14, 16, 19, 23 y 24. . Fuente: Autores.....	54
Figura 19. Primer criterio de frontera. Fuente: Autores.....	56

Figura 20. Segundo criterio de frontera. Fuente: Autores.....	56
Figura 21. Tercer criterio de frontera. Fuente: Autores.....	57
Figura 22. Distribución de los coeficientes de reflexión. Fuente: Autores.....	59
Figura 23. Primer diseño del absorbedor electromagnético de 3 capas. Fuente: Autores. ....	60
Figura 24. Segundo diseño del absorbedor electromagnético de 3 capas. Fuente: Autores. ....	61
Figura 25. Tercer diseño del absorbedor electromagnético de 3 capas. Fuente: Autores. ....	62
Figura 26. Diseño del absorbedor de 7 capas en el rango de frecuencias de 0,8 a 5,4 GHz. Fuente: Autores. ....	63
Figura 27. Diseño del absorbedor de 9 capas en el rango de frecuencias de 0,8 a 5,4 GHz. Fuente: Autores. ....	65
Figura 28. Absorbedor de 5 capas optimizado para el rango de frecuencias de 2-8 GHz. Fuente: Autores. ....	67
Figura 29. Gráfica de la relación entre el grosor y el coeficiente de reflexión. Fuente: Autores. ....	69
Figura 30. Diseños obtenidos del frente de Pareto. Fuente: Autores.....	70
Figura 31. Diseño de 7 capas con el algoritmo de la espiral y con PSO modificado [10]. Fuente: Autores. ....	73
Figura 32. Modelo de la espiral variando $r = 0,1$ y theta de $20^\circ$ , $40^\circ$ , $60^\circ$ y $80^\circ$ . Fuente: Autores. ....	78
Figura 34. Modelo de la espiral variando $r = 0,3$ y theta de $20^\circ$ , $40^\circ$ , $60^\circ$ y $80^\circ$ . Fuente: Autores. ....	79
Figura 35. Modelo de la espiral variando $r = 0,4$ y theta de $20^\circ$ , $40^\circ$ , $60^\circ$ y $80^\circ$ . Fuente: Autores. ....	80
Figura 36. Modelo de la espiral variando $r = 0,5$ y theta de $20^\circ$ , $40^\circ$ , $60^\circ$ y $80^\circ$ . Fuente: Autores. ....	80
Figura 37. Modelo de la espiral variando $r = 0,6$ y theta de $20^\circ$ , $40^\circ$ , $60^\circ$ y $80^\circ$ . Fuente: Autores. ....	81
Figura 39. Modelo de la espiral variando $r = 0,8$ y theta de $20^\circ$ , $40^\circ$ , $60^\circ$ y $80^\circ$ . Fuente: Autores. ....	82

Figura 41. Modelo de la espiral variando $r = 0,9$ y theta de $40^\circ$ y $80^\circ$ . Fuente: Autores. ....	83
Figura 43. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 14. Fuente: Autores.....	84
Figura 45. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 19. Fuente: Autores.....	85
Figura 46. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 23. Fuente: Autores.....	86
Figura 47. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 24. Fuente: Autores.....	87
Figura 48. Diferentes presentaciones de los absorbedores E.M. Autor: EMERSON & CUMMING .....	92
Figura 49. Absorbedores elásticos magnéticos. Autor: EMERSON & CUMMING .....	93

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características equipo de cómputo.....	31
Tabla 2. Parámetros de las espirales de prueba.....	32
Tabla 3. Estadísticas de los resultados obtenidos con la función de Schwefel's. .....	33
Tabla 4. Estadísticas de los resultados obtenidos con la función de 2n mínima. .....	37
Tabla 5. Estadísticas de los resultados obtenidos con la función de Rastrigin.	41
Tabla 6. Estadísticas de los resultados obtenidos con la función de Griewank. .....	45
Tabla 7. Resultados de las funciones de prueba para 200 espirales.....	49
Tabla 8. Iteraciones promedio variando el parámetro r del algoritmo de la espiral. ....	51
Tabla 9. Banco de materiales. ....	51
Tabla 10. Espirales de prueba. ....	52
Tabla 11. Resultado preliminar obtenido al ejecutar el algoritmo 10 veces para cada espiral de prueba. ....	53
Tabla 12. Características importantes obtenidas de las 30 ejecuciones.....	55
Tabla 13. Estadísticas de los 3 criterios de frontera. ....	57
Tabla 14. Diseños realizados.....	59
Tabla 15. Estadísticas del diseño de un absorbedor de 7 capas.....	62
Tabla 16. Materiales y grosores del diseño de 7 capas.....	62
Tabla 17. Estadísticas del diseño de un absorbedor de 9 capas.....	64
Tabla 18. Materiales y grosores del diseño de 9 capas.....	64
Tabla 19. Parámetros de los algoritmos a contrastar.....	66
Tabla 20. Diseños obtenidos de los algoritmos a contrastar.....	66
Tabla 21. Estadísticas de los coeficientes de reflexión en [dB] en las 20 ejecuciones.....	67
Tabla 22. Tabla de los materiales y grosores utilizados en los dos diseños.....	70
Tabla 23. Estadísticas del absorbedor de 7 capas en el rango de 0,1 a 20 GHz. .....	71
Tabla 24. Materiales usados en el diseño de 7 capas en el rango de 0,1 a 20 GHz.....	72
Tabla 25. Resultados del algoritmo para 30 ejecuciones, $r=0,95$ , $\theta=80^\circ$ , criterio de frontera 3 y 200 espirales en el campo solución. ....	87
Tabla 26. Resultados del algoritmo de la espiral para un absorbedor electromagnético de 5 capas, $r=0,95$ y $\theta=80^\circ$ .....	88
Tabla 27. Resultados obtenidos con el algoritmo de la espiral para el diseño de un absorbedor electromagnético de 5 capas. ....	89

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Graficas de las espirales variando r y theta .....	78
ANEXO B: Histograma de frecuencias de cada una de las espirales seleccionadas.....	84
ANEXO C: Resultados del algoritmo de la espiral aplicado al absorbedor electromagnético .....	87
ANEXO D: Resultados del algoritmo de la espiral para un absorbedor electromagnético de cinco capas. ....	88
ANEXO E: Resultados obtenidos para contrastar el algoritmo de la espiral con MOPSO .....	89
ANEXO F: Descripción de los métodos PSO, CFO, SADE y GSA.....	89
ANEXO G: Ejemplos de absorbedores en la vida real.....	92

## RESUMEN

Título: Diseño de un absorbedor electromagnético multicapa mediante el método de la espiral. <sup>1</sup>

Autores: Rafael Armando Ortiz Gelves y Edgar Sneyder García Morantes.<sup>2</sup>

Palabras claves: absorbedor electromagnético, método de la espiral, optimización, coeficiente de reflexión, algoritmo.

En el presente trabajo de investigación se hizo uso de un algoritmo metaheurístico, conocido como el método de la espiral, con el fin de diseñar un absorbedor electromagnético multicapa capaz de absorber la mayor cantidad de energía que sobre él incide, por lo que fue necesario optimizar características tales como el grosor de cada material que conforma el absorbedor, y el tipo de material usado para cada capa, mediante sus características eléctricas y magnéticas. Asimismo, al método se le realizaron modificaciones, con el fin de mejorar su rendimiento y obtener una mejor respuesta.

Inicialmente, se presentan las pruebas que se realizaron al método de la espiral, mediante cuatro diferentes funciones, que permitieron verificar la eficacia del método, y proceder a implementar el método en el diseño del absorbedor electromagnético multicapa. Luego de obtener los resultados, éstos fueron contrastados con otros métodos ya usados para esta aplicación [4,9,11]. Donde se encontraron resultados muy similares, lo cual permite establecer al método de la espiral como un método que puede ser usados en muchos más campos de ingeniería. De igual manera, se implementaron dos diseños de absorbedores electromagnéticos de 7 y 9 capas, de los cuales el absorbedor de 7 capas presentó un mejor desempeño que el de 9 capas teniendo como parámetros de comparación el coeficiente de reflexión y grosor del absorbedor.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

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

## ABSTRACT

Title: Design of a multilayered electromagnetic absorber by the spiral optimization algorithm.<sup>3</sup>

Authors: Rafael Armando Ortiz Gelves and Edgar Sneyder García Morantes.<sup>4</sup>

Keywords: electromagnetic absorber, spiral algorithm, optimization, reflection coefficient.

In the present research work was used a metaheuristic algorithm, known as the spiral method, in order to design a multilayer electromagnetic absorber capable to absorb most of its incident energy. So it was necessary to optimize characteristics such as the thickness of each material forming the absorber, and the type of material used for each layer by its electrical and magnetic characteristics. Also, the method is performed modifications in order to improve its performance and to obtain a better response at the moment to use this method in the design of multilayer electromagnetic absorber.

Initially, tests are presented that were carried out to the spiral method, using four different functions, which allowed to verify the effectiveness of the method, and proceed to implement the method in the design of multilayer electromagnetic absorber. After obtaining the results, they were compared with other methods previously used for this application [4,9,11]. Where were found very similar results, which allows to set the spiral method as a method that can be used in many more fields of engineering. Similarly, two designs were implemented electromagnetic absorber layers 7 and 9, of which the absorber layer 7 showed a better performance than the 7-layer having as comparison parameters and the reflection coefficient of the absorber thickness.

---

<sup>3</sup> Bachelor thesis

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

## 1 INTRODUCCIÓN

Las ondas electromagnéticas cada día son más utilizadas en diversos campos, como por ejemplo en aviación, televisión y telefonía, entre otros. Debido al gran número de campos en los que se usan, la interferencia de ondas electromagnéticas ha aumentado y ha afectado el funcionamiento de dispositivos electrónicos que son bastante sensibles a este fenómeno [8]. Debido a esto, los absorbedores electromagnéticos han adquirido mayor importancia en estudios de investigación en los últimos años, desarrollándose estudios sobre el diseño óptimo de los mismos, con diferentes métodos de optimización. El tipo de absorbedor más común es el multicapa, el cual está compuesto por varias capas planas de diferentes materiales [3], las cuales presentan características de absorción que dependen de su permeabilidad magnética ( $\mu$ ), permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ), conductividad ( $\sigma$ ), y supresión del efecto de reflexión. Asimismo, estos materiales presentan distintos grosores y pesos que son características fundamentales, junto con las anteriormente mencionadas, en el diseño óptimo de un absorbedor electromagnético.

Un absorbedor electromagnético óptimo debe estar compuesto por capas delgadas y livianas, que presenten una amplia banda de absorción, y que permitan un alto rechazo a la reflexión en un rango de frecuencias determinado, ya que la escogencia de parámetros depende de la frecuencia sobre la cual se vaya a implementar el absorbedor. Para este proyecto de investigación se definió la banda de trabajo entre 0,8 GHz y 5,4 GHz. Desafortunadamente, el hecho de que el material sea liviano y delgado produce una baja supresión al efecto de reflexión, y viceversa [4]. Por esta razón, es necesario diseñar un absorbedor cuyas capas tengan una buena relación entre las características mencionadas. Por otro lado, el diseño físico de estos absorbedores toma como referencia simulaciones realizadas con distintos métodos de optimización y métodos metaheurísticos, que son implementados en distintos software y herramientas.

Los métodos metaheurísticos son muy usados en la solución de problemas con funciones de alta complejidad, tal como lo es el diseño de absorbedores multicapa, pues permiten mayor facilidad y agilidad en el momento de realizar cálculos complejos que con otros algoritmos tradicionales. En este trabajo en particular, se usará un algoritmo metaheurístico llamado el método de optimización de la espiral, el cual fue desarrollado por Kenichi Tamura y Keiichiro Yasuda en el 2011 [7]. Actualmente, este método se encuentra en sus inicios y, según la revisión hecha al estado del arte, se encuentran pocas aplicaciones, ninguna de ellas relacionada al diseño de absorbedores electromagnéticos. Sin embargo, por sus características de intensificación y diversificación, se consideró que podría brindar buenos resultados.

Este informe de investigación se distribuye de la siguiente manera: En la sección 1 se presenta la introducción. En la sección 2 se presenta la descripción del trabajo de grado. En la sección 3 los fundamentos teóricos. En la sección 4 las funciones de prueba utilizadas para validar el método. En la sección 5 la implementación del algoritmo de la espiral en el absorbedor electromagnético. En la sección 6, las conclusiones del trabajo de investigación, y finalmente en las secciones 7, 8 y 9 se encuentran las recomendaciones para trabajos futuros, las referencias y los anexos respetivamente.

## **2 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO<sup>5</sup>**

### *2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA*

En la actualidad existen varias compañías de telecomunicaciones especializadas en realizar pruebas de compatibilidad electromagnética (EMC) y medir patrones de radiación de antenas, para lo cual, se usan diferentes

---

<sup>5</sup> Corresponde a una contribución intelectual consensuada entre los estudiantes Rafael Ortiz y Edgar García con el profesor Rodrigo Correa e Iván Amaya.

elementos de medición, que se encargan de realizar mediciones adecuadas sobre las antenas, y por ende identificar de la mejor manera los parámetros bajo los cuales trabajan dichas antenas. Debido a esto, los elementos de medición deben estar en zonas libres de interferencias electromagnéticas e independencia de las condiciones climáticas, que permitan asemejarse con gran exactitud a la propagación en el espacio libre.

Por consiguiente, estos elementos deben atenuar las interferencias externas para evitar que influyan en el interior mediante un apantallamiento, y atenuar campos generados en el interior, que afecten la medición. Para ello es necesario diseñar de manera óptima absorbedores electromagnéticos que permitan realizar un apantallamiento sobre las ondas indeseadas al momento de realizar las mediciones y mejorar la confiabilidad de la medición y caracterización de las antenas, evitando así mal funcionamiento de equipos, perturbaciones en las comunicaciones y sobre todo lo más importante riesgos para la salud humana. Por lo tanto, para poder diseñar de manera óptima un absorbedor electromagnético es necesario resolver la ecuación que describe su comportamiento, la cual es bastante compleja de resolver con métodos tradicionales y es por ello que se implementó una solución con un método metaheurístico.

## *2.2 OBJETIVOS*

### *2.2.1 OBJETIVO GENERAL*

Diseñar un absorbedor multicapa, mediante la estrategia de optimización por espiral.

## 2.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Implementar el método de optimización de espiral mediante la herramienta MATLAB, identificando las características que permitan optimizar el diseño de absorbedores electromagnéticos multicapa. Ver sección 5.
2. Contrastar los resultados obtenidos mediante el método de optimización de la espiral frente a los resultados obtenidos a partir de otros métodos, tales como PSO y MOPSO, ya realizados por otros investigadores [4,9,11]. Ver sección 5.

## 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 TERMINOLOGIA

En esta sección se muestran las variables que se presentan en el algoritmo de optimización de la espiral, incluyendo los parámetros que permitieron mejorar el funcionamiento del algoritmo.

#### 3.1.1 VARIABLES PRINCIPALES DEL PROGRAMA

$r$  = Taza de convergencia de la distancia entre el punto y el centro de la espiral.

$\theta$  = Angulo de rotación alrededor del origen de la espiral.

$n$  = Número de dimensiones de la espiral.

$m$  = Número de espirales.

### 3.2 ALGORITMO OPTIMIZACIÓN DE LA ESPIRAL N-DIMENSIONAL

El método de la espiral es un algoritmo de optimización que se encuentra dentro de una amplia gama de métodos metaheurísticos<sup>6</sup>, de los cuales se puede resaltar los algoritmos genéticos, de colonia de hormigas, tabú, enjambre de partículas, etc. y basa su construcción en analogía al fenómeno de la espiral presente en la naturaleza. El desarrollo de su algoritmo [7] se presenta a continuación:

La rotación de un punto en un espacio n- dimensional puede escribirse en términos de la matriz de rotación como

$$x' = R_{n-1,n}^{(n)}(\theta_{n-1,n})x \quad (1)$$

para obtener una espiral se multiplica por un factor  $r$  a la matriz de rotación

$$x' = r R_{n-1,n}^{(n)}(\theta_{n-1,n})x \quad (2)$$

donde el factor  $r$  debe estar en el rango de 0 a 1 para que tenga convergencia. La ecuación (2) muestra el modelo de una espiral logarítmica discreta con punto de convergencia el origen. Esto representa un problema ya que el modelo no sería lo suficientemente flexible porque su centro siempre sería el origen, por tal motivo se modifica de la siguiente forma:

$$x_{i(k+1)}' = r R_{n-1,n}^{(n)}(\theta_{n-1,n})x_{i(k)} - \left( r R_{n-1,n}^{(n)}(\theta_{n-1,n}) - I_n \right) x^*; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

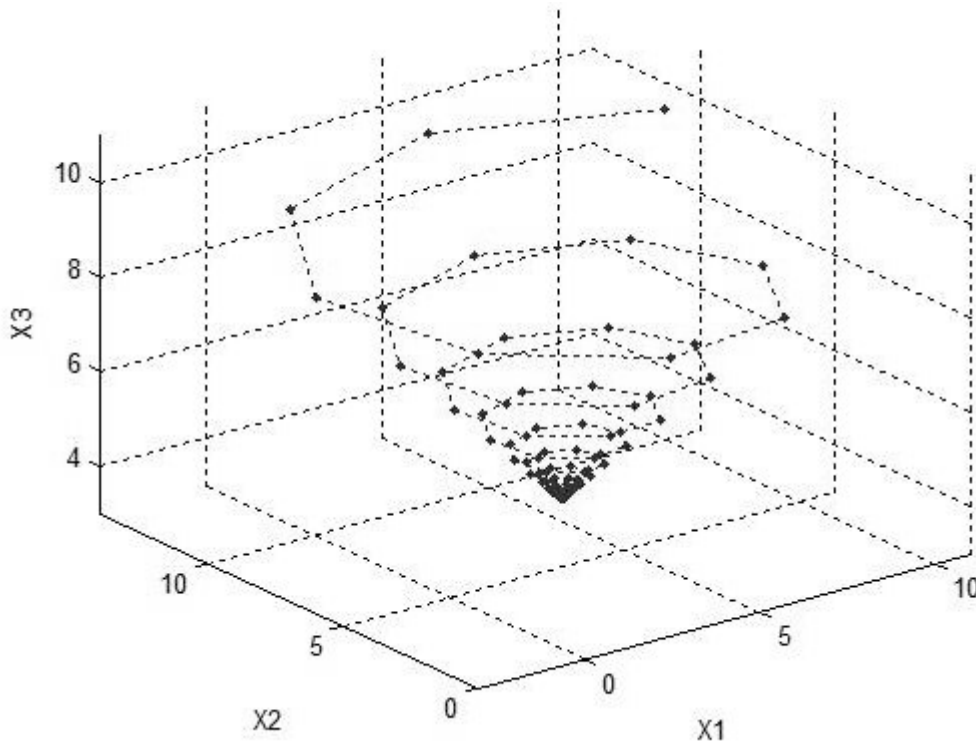
donde  $x_{i(k)}$  son los puntos de inicio y  $x^*$  es el punto de convergencia. Con este arreglo el modelo queda mejorado, puesto que el centro de convergencia se puede

---

<sup>6</sup> Método heurístico diseñado para resolver un problema de tipo computacional usando procedimientos genéricos y abstractos de tal forma que la solución esperada sea óptima

modificar en la ecuación. A continuación se mostrará una simulación en matlab de la ecuación (3) para el caso de dos dimensiones, siendo X3 una función de X2 y X1:

Figura 1. Modelo de la espiral para n=2 dimensiones.



Fuente: Autores.

Como se puede observar en la Figura 1, el punto inicial fue [10,10] y el punto final fue [0,0] a modo de ejemplo. Es importante destacar que este método combina dos características esenciales de un buen método metaheurístico: la diversificación y la intensificación. La primera se presenta en la fase inicial, y es una estrategia para buscar la mejor solución en una región amplia del dominio de búsqueda. La Intensificación, en la fase final, permite buscar la mejor solución alrededor de un buen punto de solución. El método de la espiral realiza estas dos estrategias de forma natural e individual para cualquier punto de convergencia, por lo cual los autores originales del método suponen que este puede convertirse en un buen modelo de optimización. El algoritmo propuesto por los autores consta de cinco pasos:

Paso 0: Preparación, en el cual se selecciona un número de puntos de búsqueda mayor o igual a dos, el ángulo  $0 \leq \theta < 2\pi$ , el factor  $0 < r < 1$  y un número máximo de iteraciones  $k_{max}$ . Se establece  $k = 0$ .

Paso 1: Inicialización, se establece los puntos iniciales  $x_i$  en la región factible de posibles soluciones de forma aleatoria y el centro  $x^* = x(0)_{i_g}$ ,  $i_g = \arg \min f(x_i(0))$  para  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Paso 2: actualizar  $x_i$ ,  $x_{i(k+1)}' = r R_{n-1,n}^{(n)}(\theta_{n-1,n})x_{i(k)} - (r R_{n-1,n}^{(n)}(\theta_{n-1,n}) - I_n)x^*$  donde  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Paso 3: Actualizar  $x^*$ ,  $x^* = x_{i_g}(k+1)$ ,  $i_g = \arg \min f(x_i(k+1))$  para  $i = 1, 2, \dots, m$ .

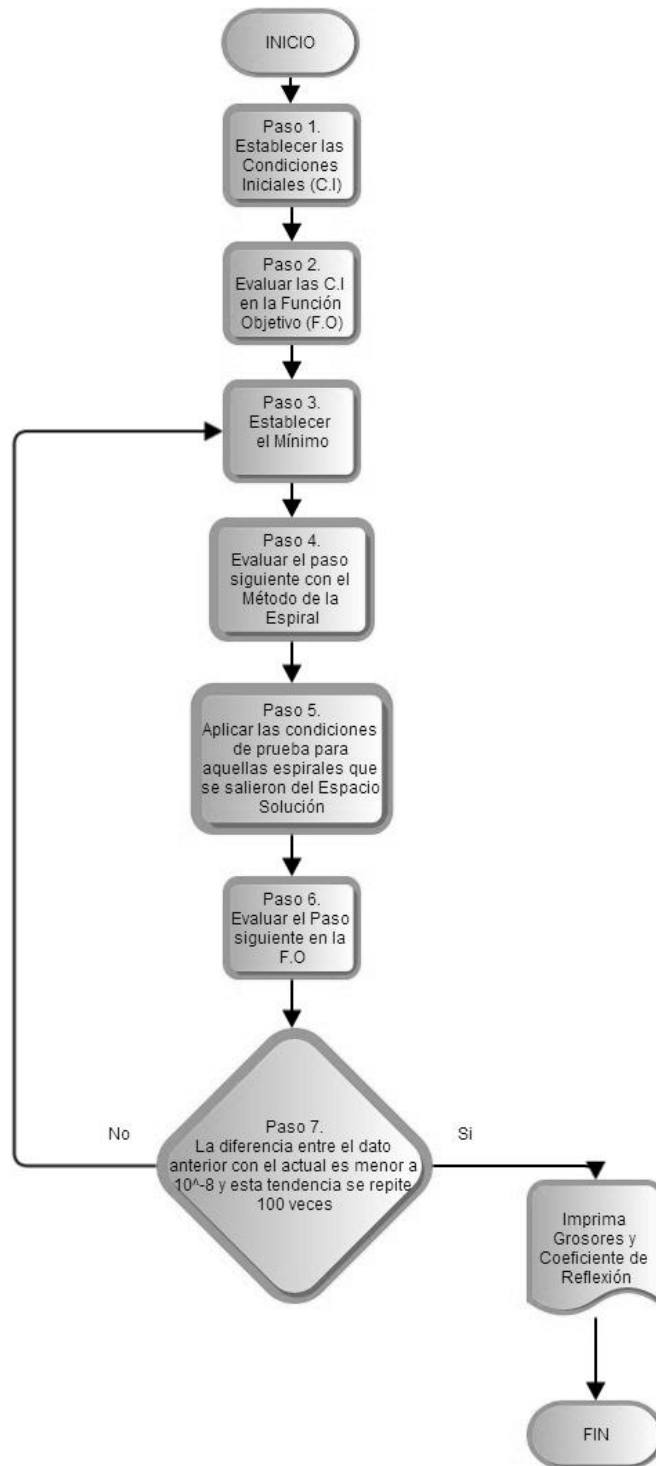
Paso 4: Chequear el criterio de terminación, si  $k = k_{max}$  termine, de lo contrario, establezca  $k = k + 1$  y regrese al paso 2.

### 3.3 MODIFICACIÓN DEL ALGORITMO

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques del algoritmo de la espiral aplicado al problema del absorbedor electromagnético. Este diagrama consta de 7 bloques principales, entre los que se destacan las condiciones iniciales, la evaluación de la función objetivo y el establecimiento del mínimo, la aplicación de las condiciones de frontera y el criterio de parada. En la Figura 3 se muestra este último proceso en detalle. En éste, se señalan las tres condiciones que se le establecieron al algoritmo para detenerlo. La primera consiste en evaluar que la diferencia entre el grosor actual y el anterior sea menor a  $10^{-8}$ , la segunda consiste en evaluar que la diferencia entre el material actual y el anterior sea igual a cero y la tercera consiste en que la diferencia entre el coeficiente de reflexión actual y el anterior sea menor a  $10^{-8}$  y esta tendencia se repita cien veces. Cabe aclarar que se deben cumplir estas tres condiciones al tiempo para detener el algoritmo. Adicionalmente, el algoritmo tiene un número máximo de iteraciones de  $10^5$  (el cual no está incluido en la Figura 3) para que se detenga en caso que no converja. En secciones posteriores se mostrará la

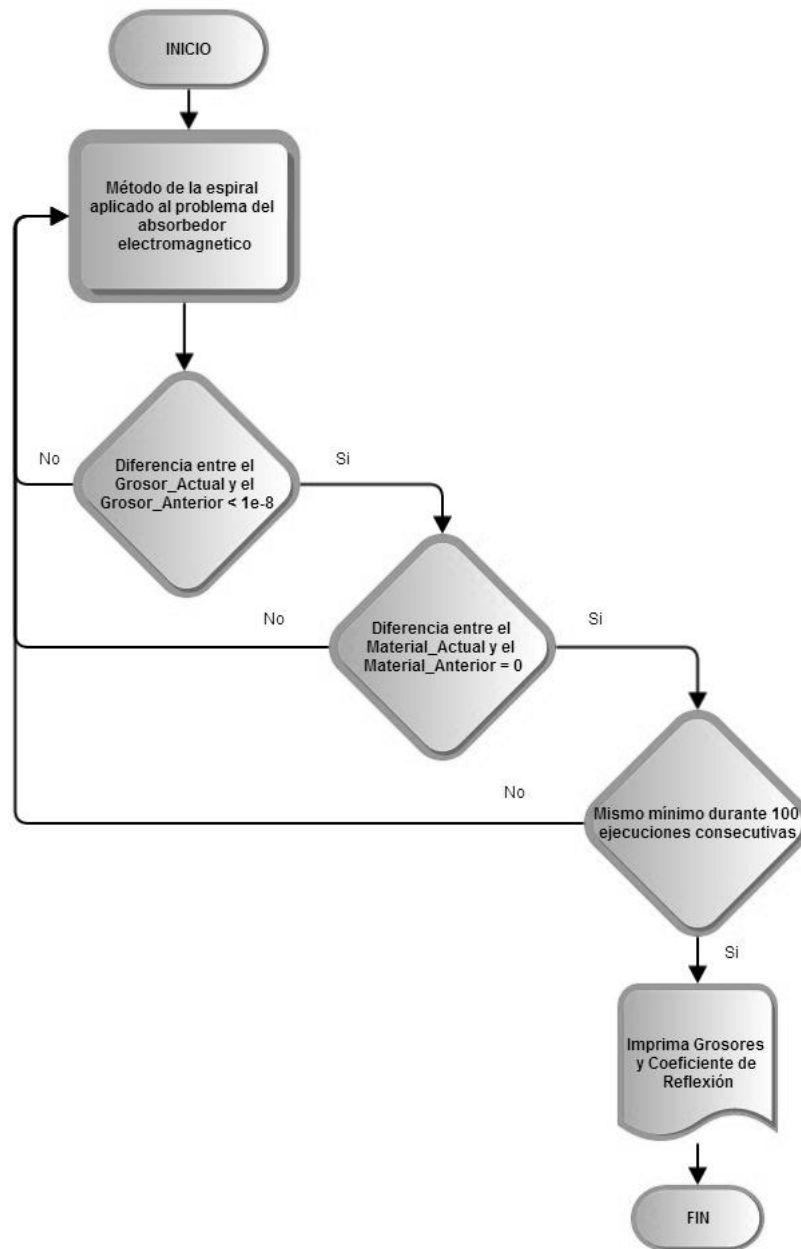
composición de otros bloques como el de la función objetivo y las condiciones de frontera.

Figura 2. Diagrama de bloques método de la espiral.



Fuente: Autores.

Figura 3. Bloque del criterio de parada.



Fuente: Autores.

### 3.4 ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO

Un absorbedor electromagnético está conformado por una o varias capas de materiales, y tiene como función atenuar la energía que sobre éste incide. Por

lo tanto, uno de los parámetros que permite medir la eficiencia de un absorbedor, es el coeficiente de reflexión, el cual indica que tanta energía incidente es reflejada por el absorbedor, que a su vez depende de las propiedades magnéticas ( $\mu$ ) y eléctricas ( $\sigma$  y  $\epsilon$ ) de los materiales que lo componen.

Debido a lo anterior, los absorbedores electromagnéticos son usados en varias aplicaciones en la cuales es necesario reducir la radiación no deseada que puede interferir de manera crítica en el funcionamiento de sistemas (e.g., celulares). Estos además son usados para recrear el espacio libre en las cámaras anecoicas, que son usadas para pruebas de compatibilidad electromagnética (EMC) y medición de radiación de antenas, haciendo que la eliminación del fenómeno de reflexión sea indispensable para mejorar la calidad de la medición.

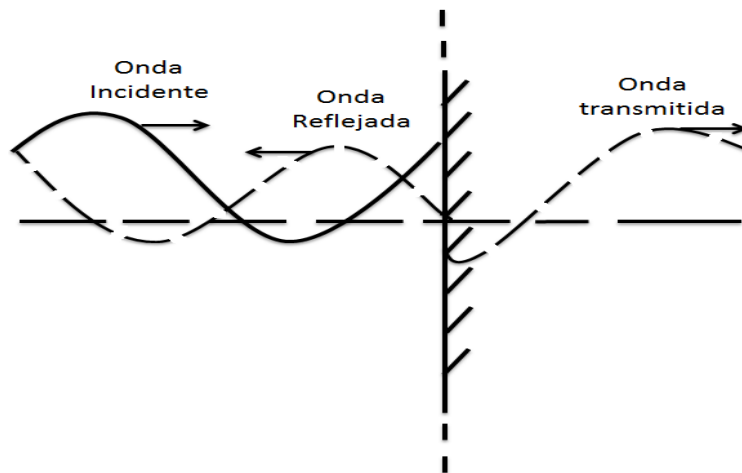
Como se mencionó anteriormente, los materiales presentan características magnéticas y eléctricas que permiten la caracterización de estos. Estas características son la permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) descritas en las ecuaciones (4) y (5) respectivamente donde  $\epsilon'_k$  es la constante dieléctrica y  $\delta_\epsilon$  es el ángulo de pérdidas eléctricas,  $\mu'_k$  es la componente real de la permeabilidad magnética y  $\delta_m$  es el ángulo de pérdidas magnéticas, también se muestra la tangente de pérdidas eléctrica y magnética. En la mayoría de estos materiales, tanto la permeabilidad como la permitividad dependen de la frecuencia de trabajo, por lo cual la menor variación de la frecuencia puede cambiar significativamente las características del material.

$$\epsilon_k = \epsilon'_k - j\epsilon'_k \tan(\delta_\epsilon); \text{ donde } \tan(\delta_\epsilon) = \frac{\epsilon''_k}{\epsilon'_k} = \frac{\sigma_k}{\omega\epsilon'_k} \quad (4)$$

$$\mu_k = \mu'_k - j\mu'_k \tan(\delta_m); \text{ donde } \tan(\delta_m) = \frac{\mu''_k}{\mu'_k} \quad (5)$$

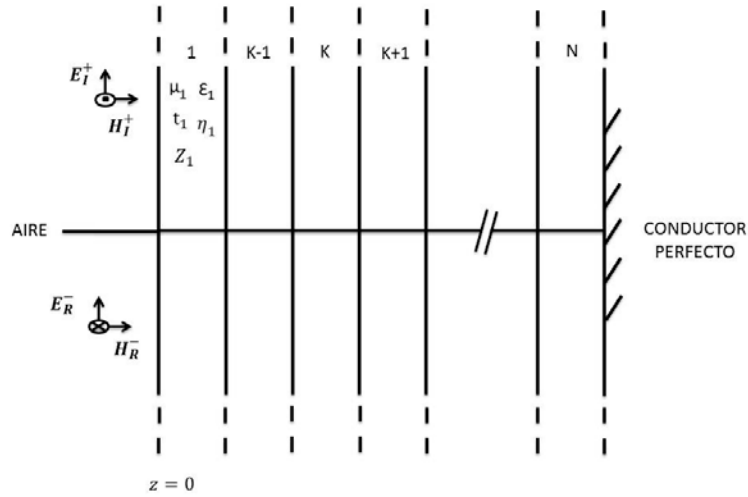
Según [2], cuando una onda electromagnética incide perpendicularmente sobre cierta superficie plana, se generan dos ondas. La primera de ellas es una onda de dirección opuesta a la onda incidente llamada onda reflejada y la otra atraviesa la superficie plana y es llamada onda transmitida, tal y como se muestra en la Figura 4. La dirección de propagación de estas ondas está dada por el vector poynting, el cual se define como el producto cruz entre el vector de campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) y el vector de campo magnético ( $\vec{H}$ ). Por consiguiente, cada una de las ondas presentará estos tres vectores. Ahora, como se muestra en la Figura 5, asumiendo que la dirección de propagación es el eje z, al aplicar, para n capas, se generarían tanto la onda reflejada ( $\vec{E}_x^-, \vec{H}_y^-$ ), como la incidente ( $\vec{E}_x^+, \vec{H}_y^+$ ), en las fronteras de cada una de las capas, excepto en la última región, que solo se presenta la onda incidente ( $\vec{E}_{xm}^+, \vec{H}_{ym}^+$ ), asumiendo que la última región es un conductor perfecto sin efectos de reflexión.

Figura 4. Ondas producidas al momento de incidir una onda perpendicularmente sobre una superficie plana.



Fuente: Autores.

Figura 5. Sistema multicapa, en el cual una onda incide perpendicularmente desde la izquierda.



Fuente: Autores.

Asimismo, es importante resaltar que cada una de estas ondas son sinusoidales, por lo que tanto el campo eléctrico como el magnético ( $\vec{E}_x, \vec{H}_y$ ) se pueden expresar de manera compleja. Teniendo en cuenta esto, el campo eléctrico total para cada región sería:

$$E_x(z) = E_I^+ e^{-\theta z} + E_R^- e^{\theta z} \quad (6)$$

donde  $\theta$  es un ángulo de fase arbitrario y  $z$  es la dirección de propagación de la onda. Ahora, reorganizando la ecuación (6), se tiene:

$$E_x(z) = E_I^+ e^{-\theta z} \left[ 1 + \frac{E_R^- e^{\theta z}}{E_I^+ e^{-\theta z}} \right] = E_I^+ e^{-\theta z} [1 + \Gamma(z)] \quad (7)$$

El cual  $\Gamma(z)$  es llamado el coeficiente de reflexión en cualquier lugar de la región, definido como la relación compleja entre la onda reflejada y la transmitida como se muestra a continuación:

$$\Gamma(z) = \frac{E_R^-}{E_I^+} e^{2\theta z} \quad (8)$$

Ahora, para el campo magnético la relación es la siguiente:

$$\begin{aligned} H_y(z) &= H_I^+ e^{-\theta z} + H_R^- e^{\theta z} \\ &= \frac{E_I^+}{\eta} e^{-\theta z} \left[ 1 - \frac{E_R^- e^{\theta z}}{E_I^+ e^{-\theta z}} \right] \\ &= \frac{E_I^+ e^{-\theta z}}{\eta} [1 - \Gamma(z)] \end{aligned} \quad (9)$$

La impedancia de campo total  $Z(z)$ , está definida para cualquier parte de  $Z$ , mediante la relación del campo eléctrico total (7) y el campo magnético total (9).

$$Z(z) = \frac{E_x(z)}{H_y(z)} = \eta \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)} (\Omega) \quad (10)$$

Despejando de la ecuación (10) el coeficiente de reflexión, se obtiene la expresión de la ecuación (11), donde se muestra  $\Gamma(z)$  en función de  $Z(z)$ , la cual es de gran utilidad cuando se conoce el valor de  $Z(z)$ .

$$\Gamma(z) = \frac{Z(z) - \eta}{Z(z) + \eta} \quad (11)$$

De acuerdo con [1], es posible asociar el comportamiento de las ondas en una línea de transmisión con el de una onda incidente sobre cierto material, por lo cual para obtener el valor de la impedancia total de campo, se recurre a la ecuación de líneas de transmisión.

$$Z_1 = \eta_1 \frac{Z_2 + \eta_1 \tanh(\Phi_1 t_1)}{\eta_1 + Z_2 \tanh(\Phi_1 t_1)} \quad (12)$$

Generalizando, es posible expresar  $Z_k$  usando la expresión recursiva:

$$Z_k = \begin{cases} \eta_k \frac{Z_{k+1} + \eta_k \tanh(\Phi_k t_k)}{\eta_k + Z_{k+1} \tanh(\Phi_k t_k)} & k < n \\ \eta_n \tanh(\Phi_n t_n) & k = n \end{cases} \quad (13)$$

Donde  $\eta_k$  es la impedancia de la onda de la capa k-ésima y  $\Phi_k$  es la constante de propagación definidas por

$$\eta_k = \sqrt{\frac{\mu_k}{\varepsilon_k}} \quad (14)$$

$$\Phi_k = j\omega\sqrt{\mu_k\varepsilon_k} = 2\pi f\sqrt{\mu_k\varepsilon_k} \quad (15)$$

Por consiguiente, el coeficiente de reflexión depende de la frecuencia sobre la cual se esté, y para la interfaz entre el aire y el absorbedor ( $Z = \mathbf{0}$ ) es:

$$R(f) = \frac{Z_1 - \eta_0}{Z_1 + \eta_0} \text{ donde } \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega \quad (16)$$

Uno de los parámetros de diseño de los absorbedores es el de minimizar el valor del coeficiente de reflexión en dB por lo cual la primera función objetivo será

$$f_1 = RL = 20 \log\{\min(\max|R(f)|)\} \quad (17)$$

Donde  $\max|R(f)|$  es el coeficiente de reflexión máximo sobre un rango de frecuencias. Por otro lado, la otra función objetivo que se tiene es con respecto al grosor de cada una de las placas que componen el absorbedor multicapa.

$$f_2 = \sum_{j=1}^n x_j \quad (18)$$

#### 4 FUNCIONES DE PRUEBA

En esta sección se realizan una serie de pruebas con funciones unimodales y multimodales, que permiten verificar el correcto funcionamiento del algoritmo del método de la espiral implementado en la herramienta MATLAB. En la Tabla 1 se muestran las características del equipo de cómputo usado para cada una de las pruebas.

Tabla 1. Características equipo de cómputo.

PROCESADOR	Intel Core i5 – 2450 [MHz]
MEMORIA RAM	6 [GB]
ALIMENTACIÓN	120 [V] – 60 [Hz]
SISTEMA OPERATIVO	Windows Seven – 64 bits
VERSIÓN MATLAB	Mathworks@ Matlab@ 7.0.4

Fuente: Autores.

#### 4.1 Reproducción de resultados

En esta sección se presentan las funciones de prueba usadas para la verificación del algoritmo, y que fueron tomadas de [6].

##### 4.1.1 FUNCIÓN DE SCHWEFEL'S

La función de Schwefel's es una función unimodal, ya que presenta solo un mínimo global en todo el espacio solución, está representada por la siguiente ecuación (19) :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2 \quad (19)$$

Se procedió a buscar el mínimo de esta función utilizando el algoritmo de la espiral para 3, 30 y 100 dimensiones con 4 tipos de espirales de prueba, de valores de r y theta mostrados en la Tabla 2.

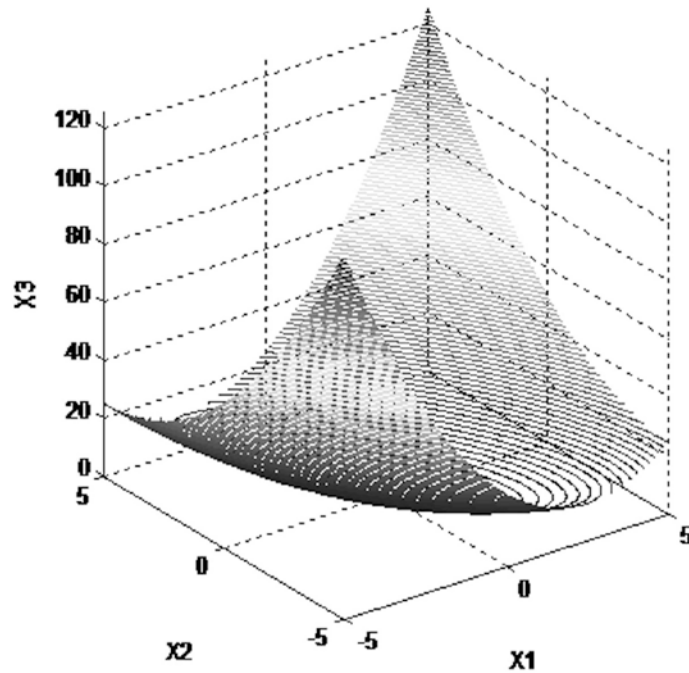
Tabla 2. Parámetros de las espirales de prueba.

	r	Theta
Espiral 1	0,95	45°
Espiral 2	0,95	90°
Espiral 3	0,99	45°
Espiral 4	0,99	90°

Fuente: Autores.

En la Figura 6 se observa la gráfica de esta función para 2 dimensiones donde X3 es función de X2 y X1. El mínimo de esta función se encuentra en la coordenada (0,0,...,0) y su valor es de 0. Acotándose el espacio solución entre  $-5 \leq x_i \leq 5$ .

Figura 6. Función de Schwefel's para n=2 dimensiones.



Fuente: Autores.

Para la ejecución de cada prueba se usaron 20 espirales. Cada una de ellas con los mismos valores de r y theta según el caso. Los resultados arrojados al implementar al algoritmo la ecuación de Schwefel's se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Estadísticas de los resultados obtenidos con la función de Schwefel's.

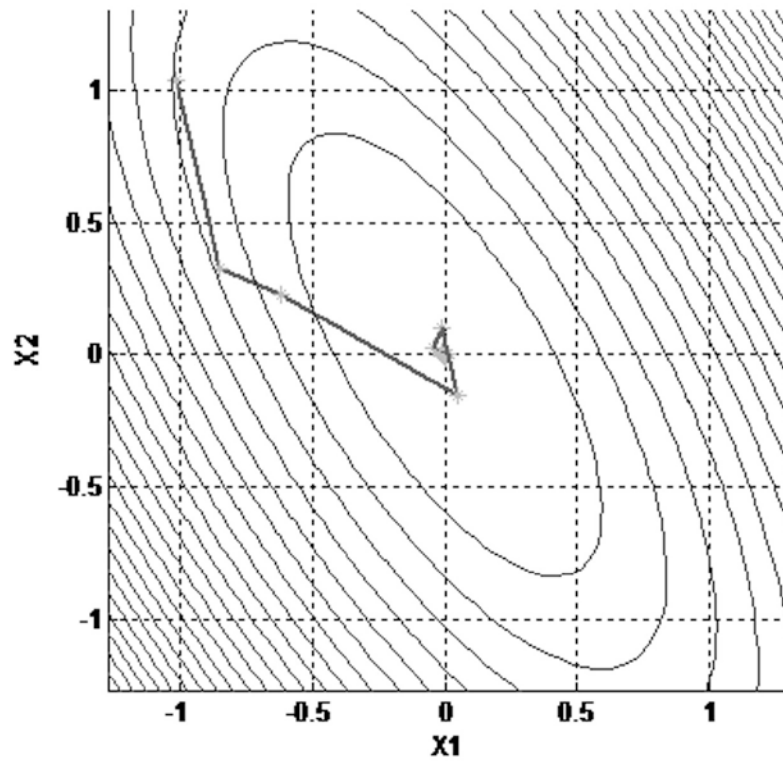
		Espiral1	Espiral2	Espiral3	Espiral4
n=3	Media	0	0	0	0
	Mejor	0	0	0	0
	Peor	0	0	0	0
	Desv. Est.	0	0	0	0
	iterac	444	456	2063	2107
	t prom [s]	0,2	0,2	2,1	2,2
n=30	Media	79,5	14,5	2,6	2,4
	Mejor	42,3	5,7	0,1	1,1
	Peor	198,8	21,2	8,4	4,0
	Desv. Est.	43,7	5,1	2,6	1,1
	iterac	468	465	2187	2168
	t prom [s]	1,0	1,0	13,4	13,3
n=100	Media	1334,3	295,0	697,3	81,2

Mejor	737,1	87,4	362,8	45,9
Peor	2233,8	1064,0	1173,1	163,2
Desv. Est.	491,1	286,2	278,6	41,4
iterac	470	465	2198	2169
t prom [s]	5,1	5,1	60,5	53,5

Fuente: Autores.

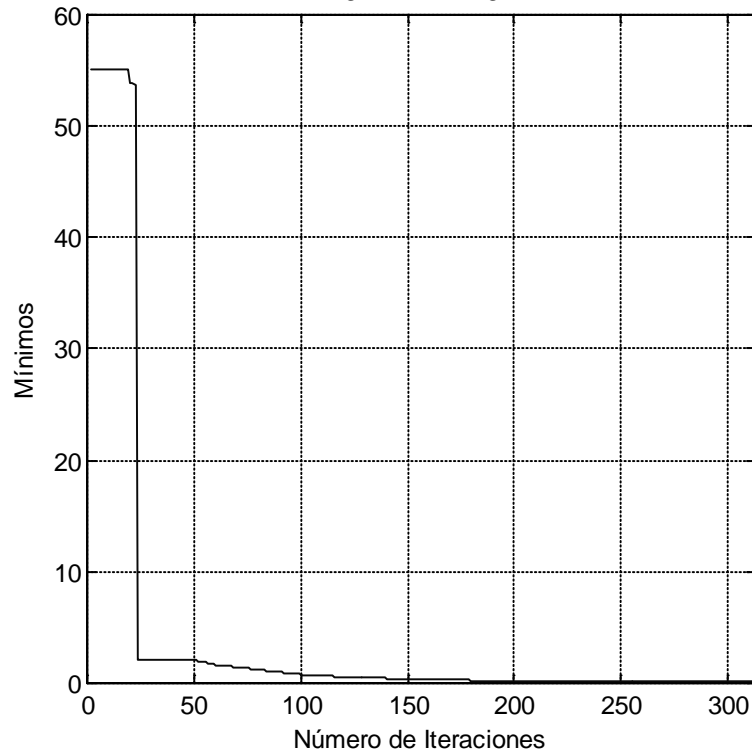
Como se puede apreciar en la Tabla 3, el mejor resultado se obtuvo con la espiral 4 ( $r= 0,99$  y  $\theta=90^\circ$ ), presentando la menor desviación estándar de cada una de las pruebas, lo cual indica que la dispersión de cada una de las espirales es poca y que tienden al mismo mínimo. Asimismo, esta espiral presenta la mejor media de cada una de las espirales, corroborando que es la mejor opción para hallar el mínimo de esta función. Además, se observa que el tiempo que emplea el algoritmo en encontrar el mínimo para esta espiral es el mayor de las cuatro espirales, pero es más preciso en los datos y en su dispersión. Por otro lado, en la Figura 7, es posible apreciar el comportamiento del algoritmo en la función de prueba, mostrándose el camino tomado por el algoritmo a medida que transcurren las iteraciones intentando buscar el mínimo de la función. De igual manera, a través de la Figura 8, se aprecia que el algoritmo no necesita más de 150 iteraciones para encontrar el óptimo.

Figura 7. Comportamiento del algoritmo en la función de Schwefel's con  $n=2$ ,  $r=0,95$  y  $\theta=45^\circ$ .



Fuente: Autores.

Figura 8. Convergencia del algoritmo en la función de Schwefel's.



Fuente: Autores.

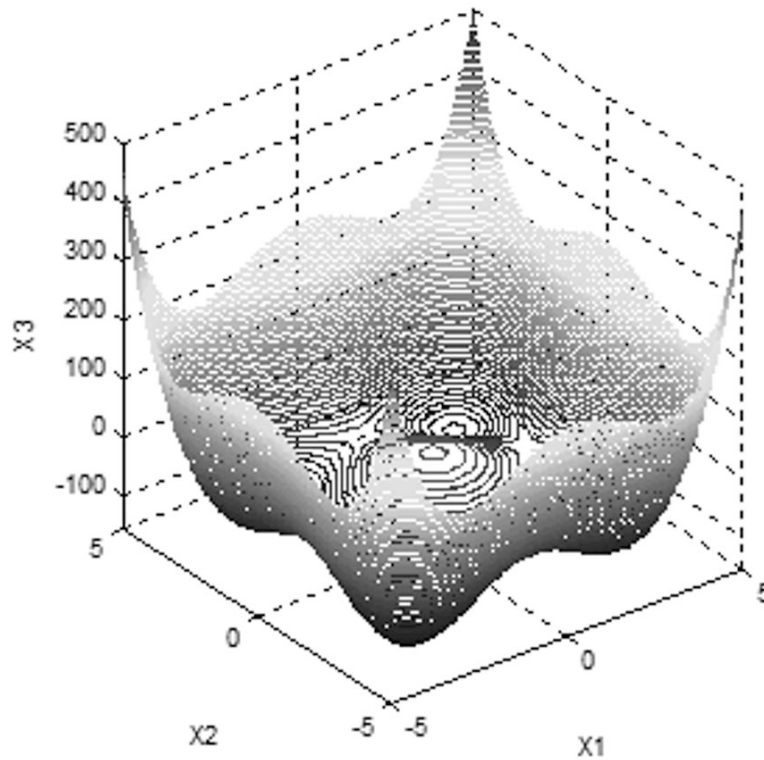
#### 4.1.2 FUNCIÓN DE 2N MÍNIMA

La función 2N Mínima es una función multimodal, ya que presenta tres mínimos locales en todo el espacio solución, y un mínimo global, se representa por la siguiente ecuación (20) :

$$f_{(x)} = \sum_{i=1}^n (x_i^4 - 16x_i^2 + 5x_i) \quad (20)$$

En la Figura 9 es posible observar la gráfica de esta función para 2 dimensiones, siendo X3 función de X2 y X1. El mínimo de esta función se encuentra en la coordenada (-2,9,-2,9,...,-2,9) con un valor aproximado de -78n.

Figura 9. Función de 2n mínima para n=2 dimensiones.



Fuente: Autores.

Por otro lado, se procedió a buscar el mínimo de esta función utilizando el algoritmo de la espiral para  $n= 3, 30$  y  $100$  dimensiones, con cuatro espirales de prueba, de valores  $r$  y  $\theta$  consignados en la Tabla 2. Para ello se colocaron 20 espirales en el espacio solución que está acotado para valores entre  $-5 \leq x_i \leq 5$ , arrojando los resultados de la Tabla 4.

Tabla 4. Estadísticas de los resultados obtenidos con la función de 2n mínima.

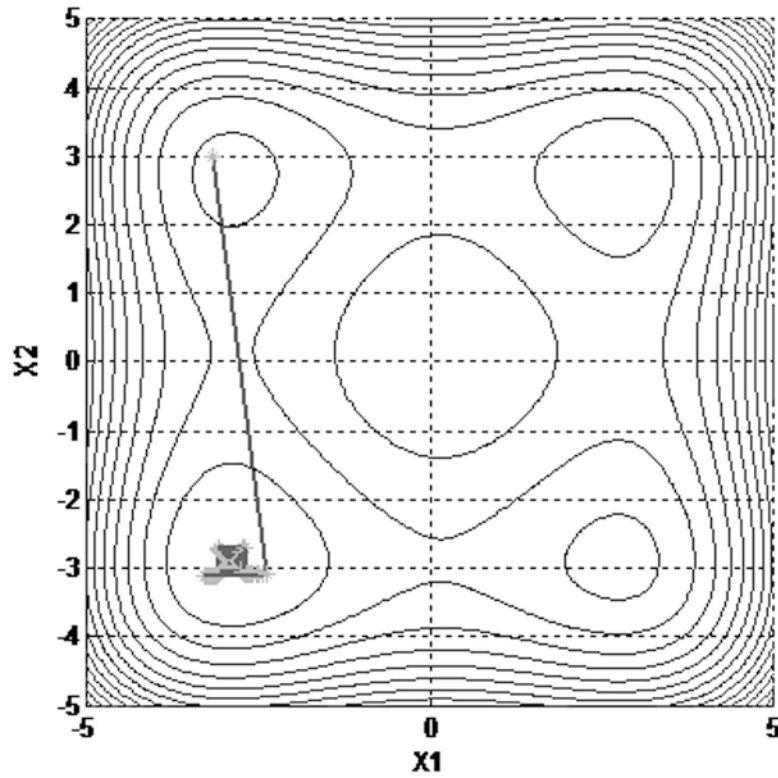
		Espiral1	Espiral2	Espiral3	Espiral4
n=3	Media	-224,5	-215,6	-231,5	-211,9
	Mejor	-235	-235	-235	-235
	Peor	-205,1	-178,5	-206,7	-177,6
	Desv. Est.	13,0	19,3	8,8	21,7
	iterac	454	462	2120	2144
	t prom [s]	0,2	0,2	2,1	2,1
n=30	Media	-1897,5	-1886,8	-2030,5	-2009,6

	Mejor	-1996	-1991,6	-2180,3	-2095,3
	Peor	-1762,6	-1783,0	-1841,1	-1897,6
	Desv. Est.	80,8	58,8	107,5	80,8
	iterac	467	464	2191	2166
	t prom [s]	0,8	0,8	13,3	12,6
n=100	Media	-4871,7	-3795,2	-6408,3	-5143,3
	Mejor	-5223,1	-5129,8	-6803,1	-5411,1
	Peor	-4409,3	4875,4	-6074,3	-4850,5
	Desv. Est.	258,3	3053,7	226,9	214,8
	iterac	470	465	2193	2171
	t prom [s]	3,8	3,8	46,0	42,6

Fuente: Autores.

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla 4, se aprecia que la espiral 2 fue la que mejor resultados arrojó para cada una de las pruebas realizadas, contando con la desviación estándar más baja al igual que la mejor media, demostrándose que la dispersión de los datos es pequeña. Además, esta espiral presenta junto con la espiral 1 el tiempo de ejecución promedio más bajo. Asimismo, a través de la Figura 10 es posible identificar cómo se comporta el algoritmo en la función de prueba a través de la ejecución del algoritmo, mostrando que converge rápidamente.

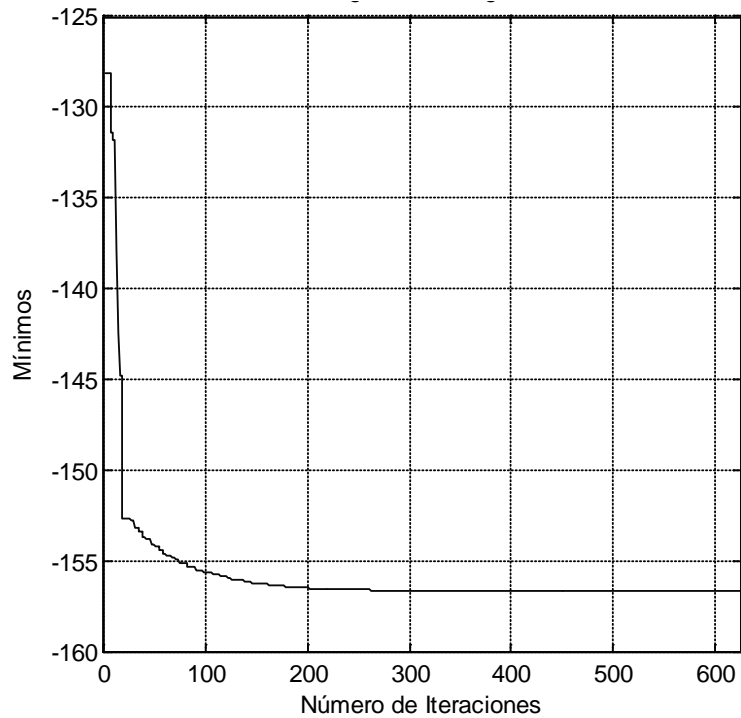
Figura 10. Comportamiento del algoritmo en la función de  $2n$  mínima con  $n=2$ ,  $r=0,99$  y  $\theta=90^\circ$ .



Fuente: Autores.

En la Figura 11 es posible observar de nuevo la rápida convergencia del algoritmo a su valor deseado al no tomar más de 200 iteraciones para llegar allí.

Figura 11. Convergencia del algoritmo en la función de 2n mínima.



Fuente: Autores.

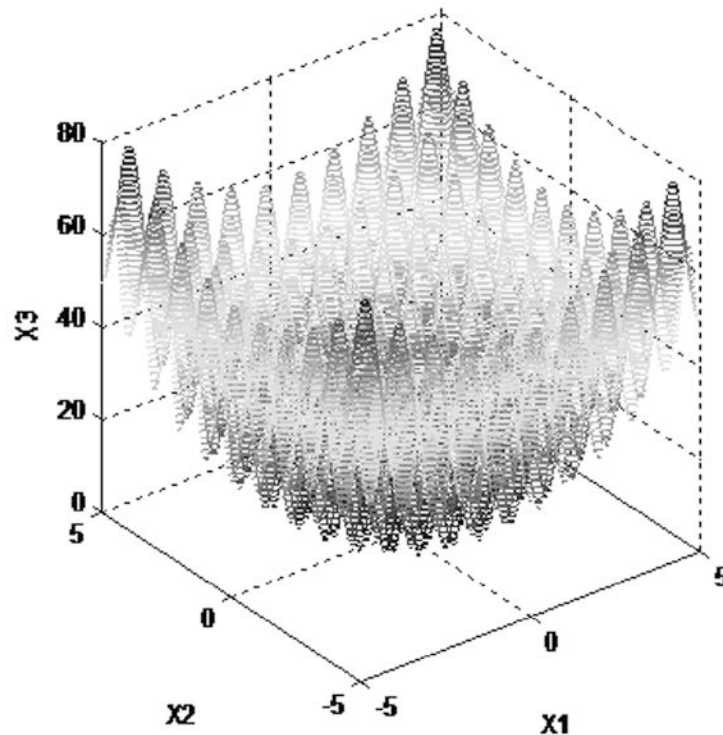
#### 4.1.3 FUNCIÓN DE RASTRIGIN

La función de Rastrigin es una función multimodal, por lo cual contiene varios mínimos locales y un mínimo global, y está dada por la ecuación (21) para n dimensiones:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10\cos 2\pi x_i + 10) \quad (21)$$

En la Figura 12 se observa la gráfica de esta función para 2 dimensiones, siendo X3 función de X2 y X1, con varios mínimos locales y un único mínimo global, el cual se encuentra en la coordenada (0,0,...,0) donde es igual a 0.

Figura 12. Función de Rastrigin para n=2 dimensiones.



Fuente: Autores.

Ahora, para buscar el mínimo de esta función se utilizó el algoritmo de la espiral para  $n=3, 30$  y  $100$  dimensiones con las 4 espirales de prueba de la Tabla 2. Para ello se colocaron 20 espirales en el espacio solución que está acotado para valores entre  $-5 \leq x_i \leq 5$ . Los resultados de esta simulación se encuentran consignados en la Tabla 5.

Tabla 5. Estadísticas de los resultados obtenidos con la función de Rastrigin.

		Espiral1	Espiral2	Espiral3	Espiral4
n=3	Media	2,3	2,0	0,7	3,1
	Mejor	1,0	1,0	0,0	0,0
	Peor	9,0	8,0	2,0	9,0
	Desv. Est.	2,5	2,2	0,7	2,4
	iterac	457	460	2123	2157
	t prom [s]	0,2	0,2	2,1	2,2
n=30	Media	207,5	69,4	138,3	49,4
	Mejor	152,0	44,2	62,7	29,9

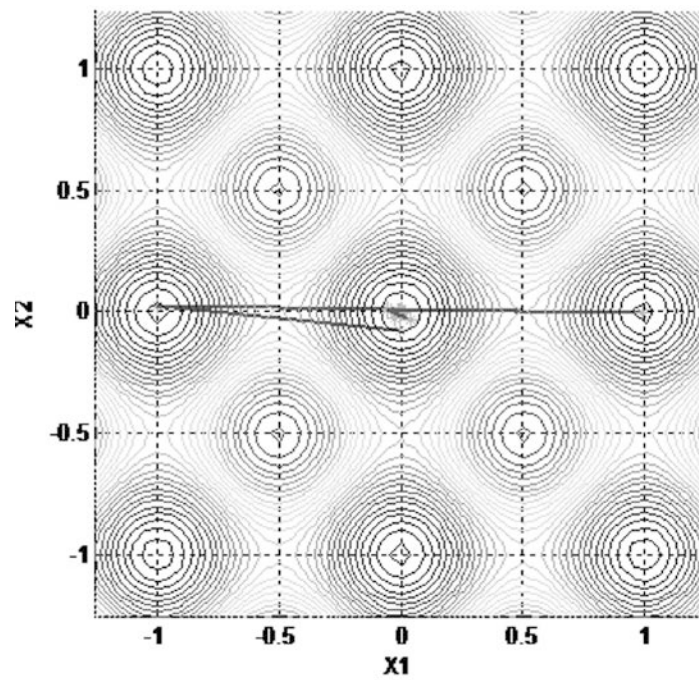
	Peor	289,6	115,0	194,0	87,9
	Desv. Est.	55,2	22,0	40,5	18,1
	iterac	477	464	2187	2167
	t prom [s]	0,7	0,8	12,8	12,5
n=100	Media	1063,2	548,3	765,8	443,5
	Mejor	972,6	501,0	668,5	345,8
	Peor	1170,8	636,7	855,5	521,6
	Desv. Est.	66,5	49,7	48,8	56,6
	iterac	468	465	2194	2169
	t prom [s]	3,7	3,6	47,2	56,6

Fuente: Autores.

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 5, se aprecia que la espiral 4 fue la que mejor resultados arrojó para cada una de las pruebas realizadas, contando con la desviación estándar más baja al igual que la mejor media, demostrándose que la dispersión de los datos es baja para estos parámetros de espiral.

Para ver cómo se comporta el algoritmo en la función de prueba se procedió a realizar el gráfico del camino tomado por el algoritmo a medida que transcurren las iteraciones lo cual se puede observar en la Figura 13 identificándose que el algoritmo converge rápidamente al mínimo.

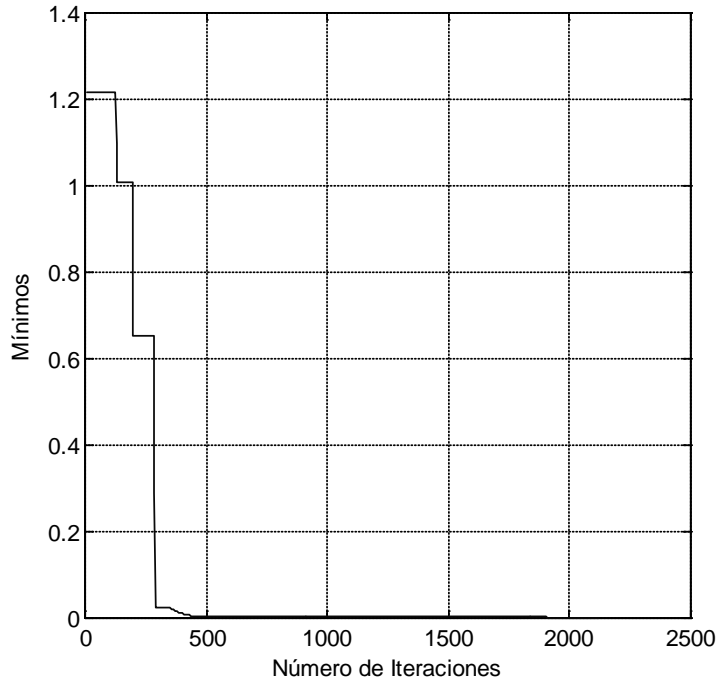
Figura 13. Comportamiento del algoritmo en la Función de Rastrigin con  $n=2$ ,  $r=0,99$  y  $\theta=90^\circ$ .



Fuente: Autores.

En la Figura 14 se puede observar la convergencia del algoritmo, el cual se acerca a su valor deseado en menos de 500 iteraciones. A pesar de los varios mínimos locales que presenta esta función, el algoritmo es capaz de buscar el mínimo global gracias a sus características de intensificación y diversificación.

Figura 14. Convergencia del algoritmo en la función de Rastrigin.



Fuente: Autores.

#### 4.1.4 FUNCIÓN DE GRIEWANK

La función de Griewank es una función multimodal, con varios mínimos locales y un mínimo global, lo cual hace que el algoritmo sea propenso a quedarse encerrado en un mínimo local y no encontrar el mínimo global de la función. A continuación, se presenta la ecuación (22), la cual describe la función para n dimensiones:

$$f(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad (22)$$

En la Figura 15 se observa la gráfica de esta función para 2 dimensiones, siendo X3 función de X2 y X1, representándose los diferentes mínimos locales y el mínimo global de esta función que se encuentra en la coordenada (0,0,...,0) y su valor aproximado es igual a 0.

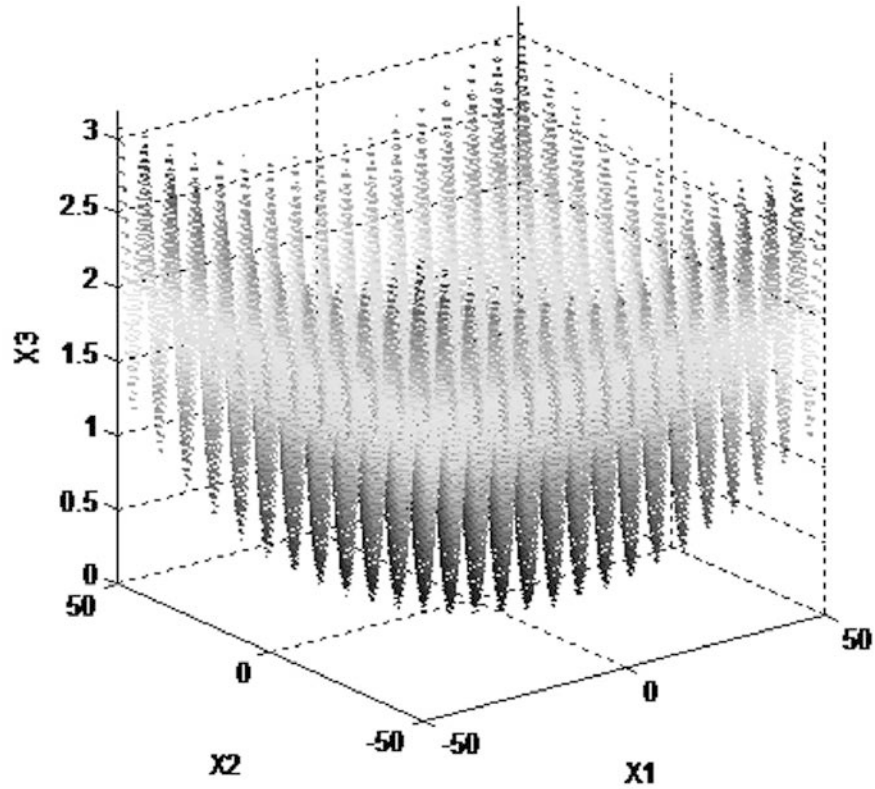


Figura 15. Función de Griewank para n=2 dimensiones. Fuente: Autores.

Al momento de buscar el mínimo de esta función se utilizó el algoritmo de la espiral para n= 3, 30 y 100 dimensiones y 4 espirales de prueba, con los valores de r y theta consignados en la Tabla 2. Para ello se colocaron 20 espirales en el espacio solución que está acotado para valores entre  $-50 \leq x_i \leq 50$ . Los resultados de esta simulación se encuentran consignados en la Tabla 6.

Tabla 6. Estadísticas de los resultados obtenidos con la función de Griewank.

		Espiral1	Espiral2	Espiral3	Espiral4
n=3	Media	0,1	0,1	0,0	0,1
	Mejor	0,0	0,0	0,0	0,0
	Peor	0,2	0,2	0,1	0,2
	Desv. Est.	0,1	0,0	0,0	0,0
	iterac	500	506	2354	2374
	t prom [s]	0,2	0,2	2,5	2,5
n=30	Media	1,4	0,8	0,0	0,2

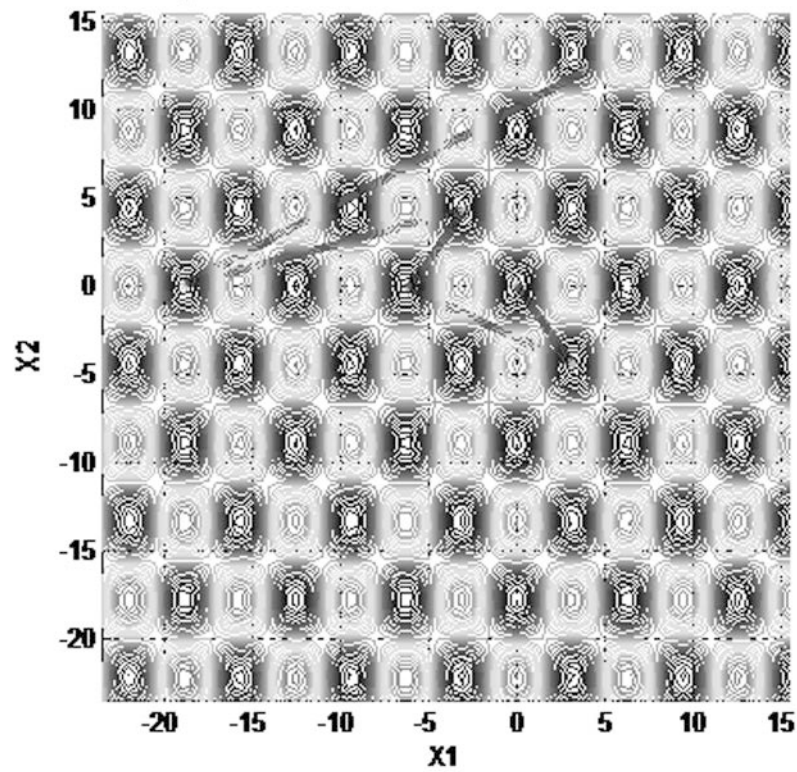
	Mejor	1,1	0,5	0,0	0,0
	Peor	2,0	1,1	0,0	1,0
	Desv. Est.	0,3	0,2	0,0	0,3
	iterac	502	509	2416	2396
	t prom [s]	0,9	0,9	15,3	15,1
n=100	Media	7,9	1,7	2,5	1,7
	Mejor	6,3	1,5	1,5	1,5
	Peor	10,7	1,9	4,7	1,8
	Desv. Est.	1,4	0,1	1,1	0,1
	iterac	513	510	2421	2395
	t prom [s]	4,1	4,0	64,6	55,6

Fuente: Autores.

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla 6, se aprecia que la espiral 4 fue la que mejor resultados arrojó para cada una de las pruebas realizadas, contando con la desviación estándar más baja al igual que la mejor media, demostrándose que la dispersión de los datos es baja para estos parámetros de espiral.

Para ver cómo se comporta el algoritmo en la función de prueba se procedió a realizar el gráfico del camino tomado por el algoritmo a medida que transcurren las iteraciones, lo cual se puede observar en la Figura 16. Demostrándose que el algoritmo converge rápidamente gracias a sus características de intensificación y diversificación.

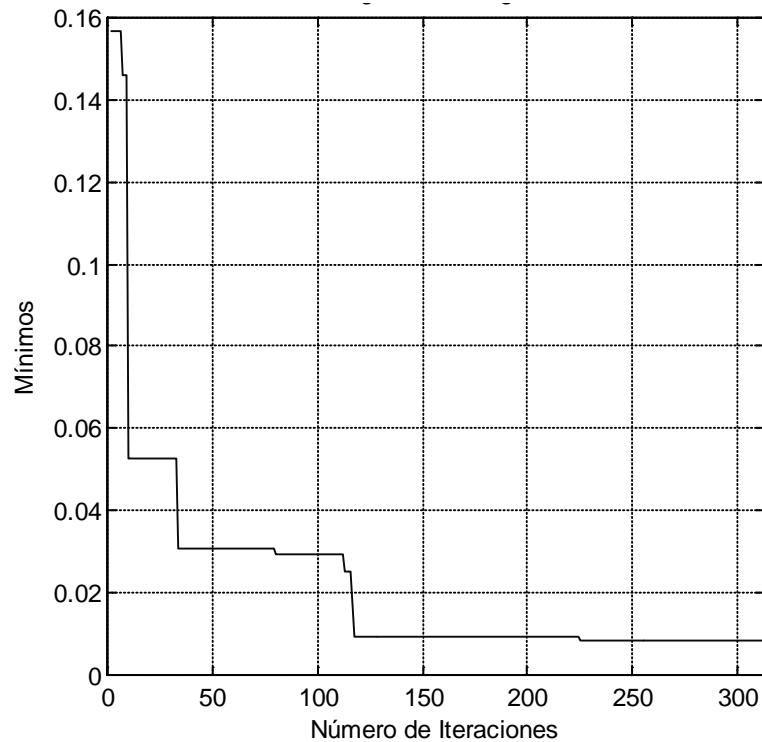
Figura 16. Comportamiento del algoritmo en la función de Griewank con  $n=2$ ,  $r=0,99$  y  $\theta=90^\circ$ .



Fuente: Autores.

En la Figura 17, se puede observar la convergencia del algoritmo el cual se acerca a su valor deseado en menos de 150 iteraciones, a pesar de que la función objetivo tenga un contorno complicado haciendo que el algoritmo permanezca en mínimos locales pero gracias a la diversificación que tiene este, le permite escaparse y así encontrar el mínimo global en dicha área de búsqueda.

Figura 17 Convergencia del algoritmo en la función de Griewank.



Fuente: Autores.

De los resultados obtenidos en esta sección se puede observar que a medida que se aumenta el número de dimensiones, la respuesta del algoritmo comienza a alejarse de la deseada, debido a la complejidad de la función, y haciendo que el algoritmo converja a mínimos locales. Por tal motivo, fue necesario agregar más espirales en el campo solución como se mostrará en la siguiente sección.

#### 4.2 Ejecución del algoritmo de la espiral para las funciones de prueba con 200 espirales en el espacio solución.

En esta sección se realizaron las mismas pruebas que en la sección pasada pero con 200 espirales en el espacio solución, esto debido a que al usar 20 espirales los resultados se distanciaban del resultado que se quería (0 para Rastrigin, Schwefel's, y Griewank y  $-2,9 \cdot n$  para  $2n$ -Minima). Los resultados se encuentran almacenados en la Tabla 7, y se observa que el 94% de todas las

medias fueron más cercanas a la respuesta deseada con respecto a las encontradas con 20 espirales. De igual manera, es posible observar que a medida que se aumenta el número de dimensiones se aleja más de la respuesta, lo cual conlleva a que se haga necesario un aumento en el número de espirales. En la presente investigación, el máximo número de dimensiones (considerando los materiales y los grosores) es de 18, por lo que con 200 espirales en el espacio solución hay mayor probabilidad de encontrar los diseños más cercanos a los óptimos.

Tabla 7. Resultados de las funciones de prueba para 200 espirales.

		Función de Schwefel's				Función 2n mínima			
		Espiral1	Espiral2	Espiral3	Espiral4	Espiral1	Espiral2	Espiral3	Espiral4
n=3	Media	0,0	0,0	0,0	0,0	-235,0	-235,0	-233,1	-228,4
	Mejor	0,0	0,0	0,0	0,0	-235,0	-235,0	-235,0	-235,0
	Peor	0,0	0,0	0,1	0,1	-235,0	-235,0	-225,7	-202,3
	Desv. Est.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	9,9
	iterac	212	216	272	582	161	162	324	220
	t prom [s]	10,0	4,4	10,3	23,9	5,3	4,8	11,0	8,9
n=30	Media	24,6	1,1	24,6	0,1	-1996,4	-2019,2	-1407,7	-2041,8
	Mejor	6,0	0,2	0,0	0,0	-2095,2	-2180,3	-2180,3	-2152,1
	Peor	38,9	3,0	143,6	0,8	-1895,2	-1925,9	-940,7	-1897,6
	Desv. Est.	11,0	1,0	52,7	0,3	68,1	76,6	478,3	77,1
	iterac	477,0	454	1065	1129	290	226	307	1255
	t prom [s]	88,1	82,3	373,8	363,7	36,8	26,6	89,2	477,7
n=100	Media	721,0	48,8	905,4	10,4	-5728,7	-6044,2	-6545,6	-6682,5
	Mejor	525,2	33,2	195,7	6,0	-5881,6	-6457,5	-6769,7	-6956,8
	Peor	1002,2	80,3	2419,0	24,4	-5504,9	-5701,0	-6200,2	-6532,7
	Desv. Est.	161,6	14,1	944,7	5,8	117,4	196,8	170,6	135,3
	iterac	532,0	507	931	1258	342	336	1290	1026
	t prom [s]	332,5	359,0	1073,3	1988,3	143,9	171,0	1804,5	1204,5
		Función de Rastrigin				Función de Griewank			
n=3	Media	0,2	0,5	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
	Mejor	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Peor	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	Desv. Est.	0,4	0,7	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	iterac	328	331	1215	1236	376	377	1451	1465
	t prom [s]	14,7	17,0	104,3	104,3	17,1	15,9	128,5	103,2
n=30	Media	133,7	39,7	104,3	41,8	0,8	0,0	0,0	0,0
	Mejor	82,3	24,9	49,8	23,9	0,2	0,0	0,0	0,0
	Peor	213,3	65,7	154,2	60,7	1,2	0,1	0,0	0,0
	Desv. Est.	37,2	12,6	38,9	11,2	0,3	0,0	0,0	0,0
	iterac	340	336	1173	1067	384	381	1510	1484
	t prom [s]	41,7	47,7	555,7	450,3	53,7	32,7	730,9	725,8
n=100	Media	812,8	223,5	715,6	96,6	5,3	1,1	1,7	0,0
	Mejor	694,5	178,2	549,2	59,7	4,1	1,1	1,2	0,0
	Peor	1015,8	256,1	854,3	141,3	6,2	1,1	2,3	0,0
	Desv. Est.	91,0	28,2	94,4	24,9	0,6	0,0	0,3	0,0
	iterac	342	336	1288	1108	386	381	1518	1487
	t prom [s]	153,3	165,7	1858,3	1428,3	184,0	196,4	2225,5	2146,4

Fuente: Autores.

## **5 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DEL MÉTODO DE LA ESPIRAL EN UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA**

### *5.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL MÉTODO DE LA ESPIRAL*

En esta sección se describirá y explicará la obtención de los valores óptimos de los parámetros del método de la espiral, para poder encontrar la mejor solución al momento de implementar el algoritmo en el absorbedor electromagnético. Asimismo, se mostrarán las pruebas realizadas para tomar la decisión del mejor criterio de frontera.

#### *5.1.1 SELECCIÓN DEL RADIO ( $r$ ) Y THETA ( $\theta$ )*

Para la selección de los parámetros  $r$  y  $\theta$  del modelo de la espiral aplicado al problema del absorbedor electromagnético, se tuvieron las siguientes consideraciones:

1. Que el algoritmo cumpla con las especificaciones de la diversificación en la fase inicial de la búsqueda e intensificación en la fase final de la búsqueda que debe tener todo método de búsqueda heurístico.
2. Que el algoritmo no converja a mínimos locales de la función objetivo

Para ello, se hizo un análisis preliminar de las espirales que se iban a poner a prueba, tal y como se observa en el anexo 9.1, donde las pruebas de la Figura 32 a la Figura 35, no cumplen con la primera consideración de diversificación e intensificación ya que rápidamente convergen al punto deseado sin explorar otras opciones del espacio solución, mientras que las gráficas de la Figura 36 a la Figura 42 sí lo hacen.

Tabla 8. Iteraciones promedio variando el parámetro r del algoritmo de la espiral.

r	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
iter_promedio	8	10	12	15	19	25	34	53	110	224

Fuente: Autores.

Debido a que muchas espirales cumplen con esta primera consideración, se decidió realizar una segunda prueba, pero esta vez aplicándose a la función objetivo con las siguientes condiciones: El absorbedor electromagnético (ejemplos de absorbedores electromagnéticos en la vida real se pueden observar en el ANEXO G) está compuesto de 3 capas, con grosores que pueden estar en el rango de [0 a 2 mm] y en un rango de frecuencias de 0,8 a 5,4 [GHz]. Adicionalmente, hay un banco de materiales propuesto por [9], [5] (ver Tabla 9) para el diseño del absorbedor y 200 espirales distribuidas aleatoriamente en el campo solución, cabe resaltar que estos materiales son ficticios y que tratan de imitar características de materiales reales. Los materiales se encuentran agrupados en 5 subgrupos: los materiales dieléctricos sin pérdidas, los materiales magnéticos con pérdidas en los que la permeabilidad tiene un modelo que es inversamente proporcional a la frecuencia y esta a su vez depende de los parámetros  $a$  y  $b$  que son exponentes que varían según el material, los materiales dieléctricos con pérdidas en los que se observa que la permitividad tiene un modelo inversamente proporcional a la frecuencia y esta a su vez se encuentra elevada a los factores  $a$  y  $b$  que varían según el material y el ultimo subgrupo son los materiales magnéticos de tipo relajación donde se observa un modelo para la permeabilidad un poco más complejo que el anterior, este modelo depende de los parámetros  $\mu_m$  y  $f_m$  que varían según el material.

Tabla 9. Banco de materiales.

Materiales dieléctricos sin pérdidas ( $\mu' = 1, \mu'' = 0$ )
--

No.	$\epsilon'$			
1	10			
2	50			
Materiales magnéticos con pérdidas ( $\epsilon' = 15, \epsilon'' = 0$ )				
$\mu = \mu' - j\mu''$	$\mu'(f) = \frac{\mu'(1GHz)}{f^a}$	$\mu''(f) = \frac{\mu''(1GHz)}{f^b}$		
No.	$\mu'(1GHz)$	$a$	$\mu''(1GHz)$	$b$
3	5	0,974	10	0,961
4	3	1,000	15	0,957
5	7	1,000	12	1
Materiales dieléctricos con pérdidas ( $\mu' = 1, \mu'' = 0$ )				
$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$	$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon'(1GHz)}{f^a}$	$\epsilon''(f) = \frac{\epsilon''(1GHz)}{f^b}$		
No.	$\epsilon'(1GHz)$	$a$	$\epsilon''(1GHz)$	$b$
6	5	0,861	8	0,569
7	8	0,778	10	0,682
8	10	0,778	6	0,861
Materiales magnéticos de tipo relajación ( $\epsilon' = 15, \epsilon'' = 0$ )				
$\mu = \mu' - j\mu''$	$\mu'(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2 + f_m^2}$	$\mu''(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2 + f_m^2}$		
Donde $f_m$ y $f$ están en GHz				
No.	$\mu_m$	$f_m$		
9	35	0,8		
10	35	0,5		
11	30	1,0		
12	18	0,5		
13	20	1,5		
14	30	2,5		
15	30	2,0		
16	25	3,5		

Fuente [9], [5]

Para la selección de los parámetros óptimos del algoritmo de la espiral se establecieron unas espirales de prueba como se muestra en la Tabla 10 y se ejecutó el algoritmo 10 veces para cada espiral de prueba.

Tabla 10. Espirales de prueba.

<b>Espiral 1</b>	r=0,5	tetha=20°	<b>Espiral 9</b>	r=0,7	tetha=20	<b>Espiral 17</b>	r=0,9	tetha=20
------------------	-------	-----------	------------------	-------	----------	-------------------	-------	----------

<b>Espiral 2</b>	r=0,5	tetha=40°	<b>Espiral 10</b>	r=0,7	tetha=40	<b>Espiral 18</b>	r=0,9	tetha=40
<b>Espiral 3</b>	r=0,5	tetha=60°	<b>Espiral 11</b>	r=0,7	tetha=60	<b>Espiral 19</b>	r=0,9	tetha=60
<b>Espiral 4</b>	r=0,5	tetha=80°	<b>Espiral 12</b>	r=0,7	tetha=80	<b>Espiral 20</b>	r=0,9	tetha=80
<b>Espiral 5</b>	r=0,6	tetha=20°	<b>Espiral 13</b>	r=0,8	tetha=20	<b>Espiral 21</b>	r=0,95	tetha=20
<b>Espiral 6</b>	r=0,6	tetha=40°	<b>Espiral 14</b>	r=0,8	tetha=40	<b>Espiral 22</b>	r=0,95	tetha=40
<b>Espiral 7</b>	r=0,6	tetha=60°	<b>Espiral 15</b>	r=0,8	tetha=60	<b>Espiral 23</b>	r=0,95	tetha=60
<b>Espiral 8</b>	r=0,6	tetha=80°	<b>Espiral 16</b>	r=0,8	tetha=80	<b>Espiral 24</b>	r=0,95	tetha=80

Fuente: Autores.

De allí se obtuvieron los resultados consignados en la Tabla 11. En esta prueba se tuvo como primer criterio de selección que el coeficiente de reflexión fuese menor a -20 [dB] [4], y que el número de veces que se haya repetido el coeficiente de reflexión deseado fuera mayor o igual a 7. De este primer criterio, se determina que las espirales resaltadas (gris oscuro), es decir las espirales 14, 16, 19, 23 y 24 son las que cumplen con los requisitos planteados.

Tabla 11. Resultado preliminar obtenido al ejecutar el algoritmo 10 veces para cada espiral de prueba.

<b>Coef_Ref</b>	-16,47	-21,23	-21,55	-21,6	-17	-21,5835	-21,59	-21,534
<b>Desv. Est</b>	0,089495259	0,117982499	0,107574134	0,137842946	0,08572809	0,143033832	0,16718158	0,080580444
<b>% Error</b>	13,6%	18,6%	15,9%	18,4%	10,0%	15,5%	18,5%	8,4%
<b># de Aciertos</b>	0,00	2,00	3,00	3,00	0,00	4,00	4,00	0,00
<b>Iter_Prom</b>	53,00	305,60	470,90	689,10	344,40	104,40	369,70	299,90
	<b>Espiral 9</b>	<b>Espiral 10</b>	<b>Espiral 11</b>	<b>Espiral 12</b>	<b>Espiral 13</b>	<b>Espiral 14</b>	<b>Espiral 15</b>	<b>Espiral 16</b>
<b>Grosor</b>	[0.6,1.66,1.69]	[0.61,1.64,1.8]	[0.57,1.83,1.91]	[0.59,1.8,1.69]	[0.6,1.86,1.78]	[0.6,1.87,1.77]	[0.6,1.85,1.78]	[0.6,1.74,1.87]
<b>Material</b>	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,5,4]	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]
<b>Coef_Ref</b>	-20,8706	-21,0614	-21,14	-21,258	-21,5614	-21,565	-21,56	-21,5064
<b>Desv. Est</b>	0,159036991	0,103730112	0,150631884	0,102681088	0,156041262	0,120512155	0,109289393	0,128197806
<b>% Error</b>	23,7%	18,6%	22,8%	8,9%	15,1%	9,7%	12,2%	8,0%
<b># de Aciertos</b>	2,00	1,00	1,00	6,00	5,00	7,00	5,00	8,00
<b>Iter_Prom</b>	121,70	233,90	475,30	82,40	172,20	219,80	463,00	261,50
	<b>Espiral 17</b>	<b>Espiral 18</b>	<b>Espiral 19</b>	<b>Espiral 20</b>	<b>Espiral 21</b>	<b>Espiral 22</b>	<b>Espiral 23</b>	<b>Espiral 24</b>
<b>Grosor</b>	[0.6,1.97,1.71]	[0.6,2,1.68]	[0.6,2,1.68]	[0.6,1.98,1.69]	[0.6,2,1.67]	[0.6,1.95,1.72]	[0.6,1.96,1.7]	[0.59,1.99,1.68]
<b>Material</b>	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]	[16,3,4]
<b>Coef_Ref</b>	-21,6	-21,6	-21,6	-21,6	-21,6	-21,6	-21,6	-21,6
<b>Desv. Est</b>	0,134999926	0,099955205	0,124588005	0,103193821	0,14612835	0,155284596	0,075772824	0,061190605
<b>% Error</b>	16,1%	11,2%	7,3%	11,0%	15,5%	14,4%	5,3%	3,2%
<b># de Aciertos</b>	4,00	5,00	7,00	5,00	3,00	5,00	7,00	9,00
<b>Iter_Prom</b>	752,10	435,00	840,60	743,30	1071,80	911,00	734,00	861,50

Fuente: Autores.

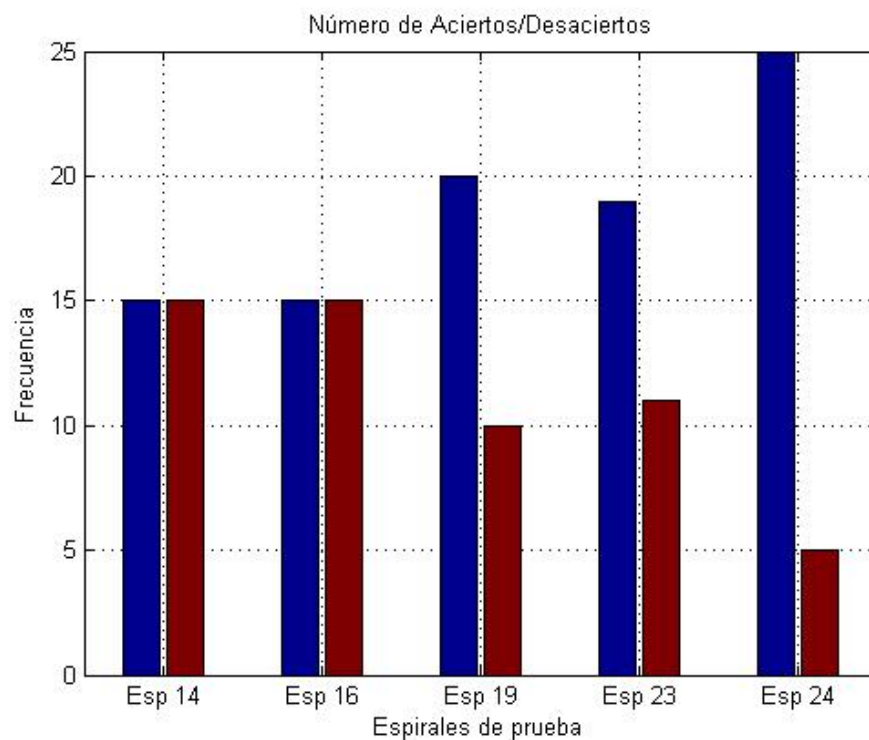
Ahora, para encontrar los parámetros r y theta óptimos se tomaron las espirales que cumplieron con el anterior requisito, se ejecutó el programa 30 veces y se tuvo como criterio el grado de dispersión de los datos obtenidos. Para ello se

agruparon los resultados en histogramas de frecuencias, tal y como se muestra en el anexo 9.2. Las clases utilizadas (en decibeles) para la construcción de estos fueron:

$[-10,435, -12,435)$ ,  $[-12,435, -14,435)$ ,  $[-14,435, -16,435)$ ,  $[-16,435, -18,435)$ ,  $[-18,435, -20,435)$  y  $[-20,435, -22,435]$ .

La Figura 18 se muestra la comparación de los resultados obtenidos para cada una de las espirales seleccionadas.

Figura 18. Diagrama de barras para comparar los resultados de las Espirales 14, 16, 19, 23 y 24.



Fuente: Autores.

Un resumen de otras características importantes obtenidas con las 30 ejecuciones se muestra en la Tabla 12, donde se puede ver el mejor mínimo global obtenido después de las 30 ejecuciones, el porcentaje de error con respecto al mejor que se obtuvo de cada espiral de prueba, el número de iteraciones promedio y el número de aciertos, es decir, las veces que el

algoritmo dio una respuesta satisfactoria que para el caso de 3 capas es que fuese menor de -20[dB] [4].

Tabla 12. Características importantes obtenidas de las 30 ejecuciones.

	<b>Espiral 14</b>	<b>Espiral 16</b>	<b>Espiral 19</b>	<b>Espiral 23</b>	<b>Espiral 24</b>
<b>Mín Global</b>	-21,6	-21,59	-21,6	-21,6	-21,6
<b>% Error</b>	14,1%	13,7%	8,8%	8,7%	3,6%
<b>Iter_Prom</b>	316,77	376,20	615,53	683,97	628,53
<b>Aciertos</b>	15	15	20	19	25

Fuente: Autores.

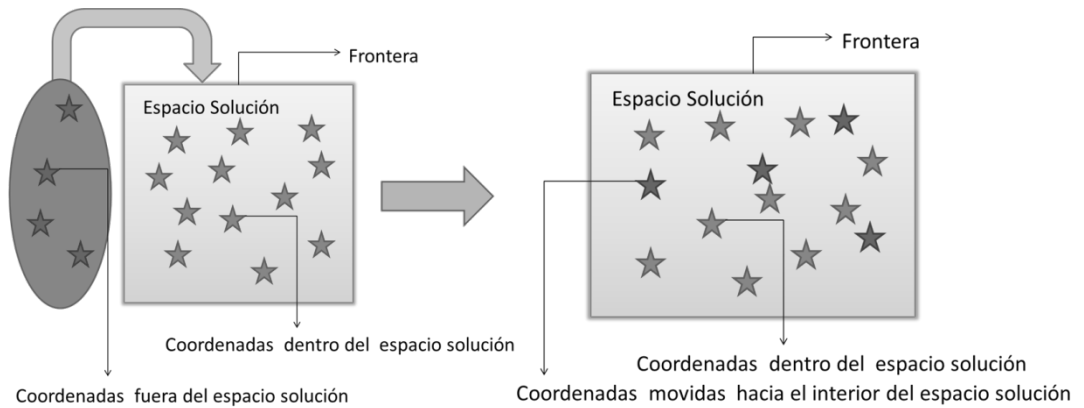
De la Figura 18, se puede observar que el diagrama de barras del algoritmo utilizando la Espiral de prueba 24 obtuvo un menor grado de dispersión, agrupando aproximadamente el 83% de sus respuestas en la clase 6. Por otra parte se observa que el mayor número de aciertos se obtuvieron con la espiral de prueba 24. Por lo que se puede concluir que los parámetros  $r$  y  $\theta$  óptimos para el método de la espiral aplicado al problema del absorbedor electromagnético son  $r=0,95$  y  $\theta=80^\circ$ . Además, de la Figura 42 se observa que esta combinación es la que produce la mayor diversificación en la fase inicial de la búsqueda y mayor Intensificación en la fase final. El único inconveniente de este parámetro es que a medida que aumenta  $r$  se aumenta el número de iteraciones, y por lo tanto aumenta el tiempo de ejecución, como se observa en la Tabla 8 y en la Tabla 12.

### 5.1.2 SELECCIÓN DEL CRITERIO DE FRONTERA

Para la ejecución del algoritmo se tuvieron en cuenta 3 condiciones de frontera:

1. Si las coordenadas se encontraban fuera del espacio solución estas retornaban aleatoriamente dentro de él, como se observa en la Figura 19.

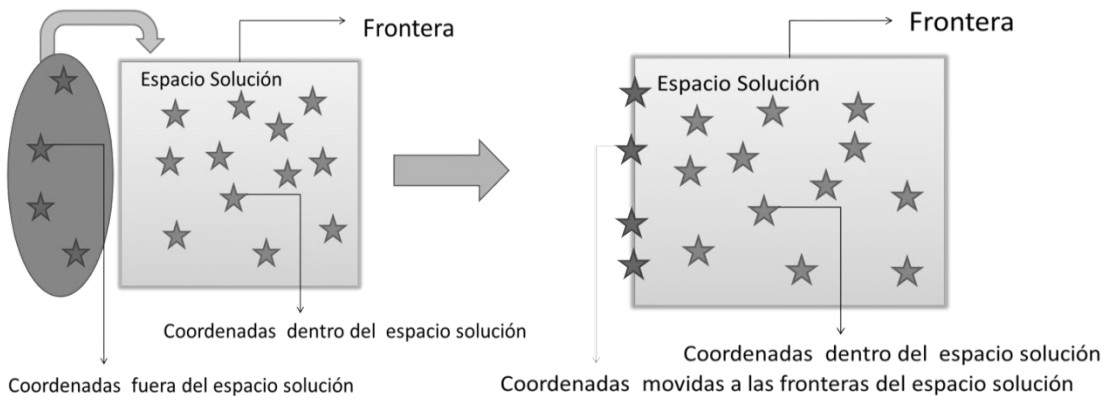
Figura 19. Primer criterio de frontera.



Fuente: Autores.

2. Si las coordenadas se encontraban fuera del espacio solución. Estas se ubicaban justo en la frontera más cercana, como se observa en la Figura 20.

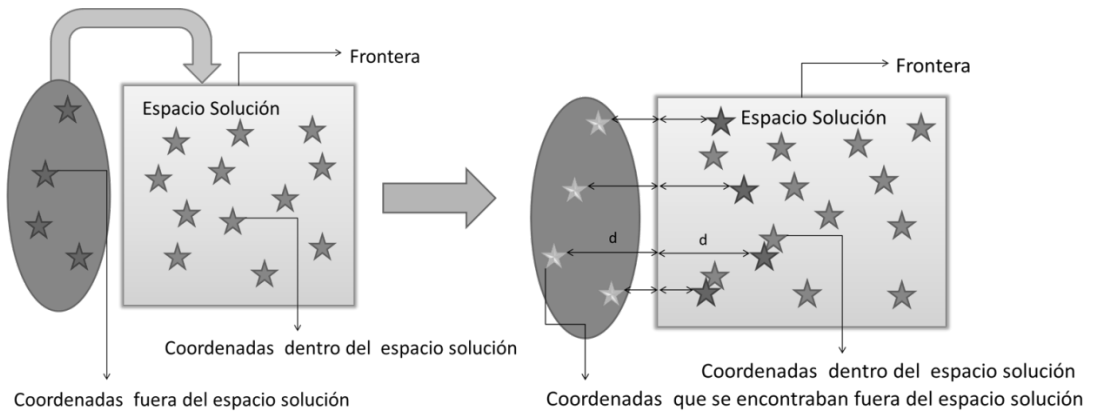
Figura 20. Segundo criterio de frontera.



Fuente: Autores.

3. Si las coordenadas se hallaban fuera del espacio solución, éstas se reflejaban en la frontera más cercana hacia el interior del espacio solución, tal y como se observa en la Figura 21.

Figura 21. Tercer criterio de frontera.



Fuente: Autores.

Para cada uno de estos 3 criterios, se procedió a ejecutar el algoritmo de la espiral aplicado al absorbedor electromagnético 10 veces, con los parámetros  $r=0,95$ ,  $\theta=80^\circ$  y 200 espirales en el espacio solución en el rango de 0,8 a 5,4 [GHz]. Las estadísticas de dichas ejecuciones se encuentran resumidas en la Tabla 14.

Tabla 13. Estadísticas de los 3 criterios de frontera.

	Criterio de Frontera 1	Criterio de Frontera 2	Criterio de Frontera 3
Coef_Ref [dB]	-21,6	-21,1	-21,3
% de Aciertos	90%	20%	40%
Iter_prom	1010	1048	1063
Coordenadas Fuera del E. Sol	643	459	311
Desv. Est de las coordenadas fuera del E. Sol	361,5	382,9	202,7

Fuente: Autores.

En la Tabla 13, se pueden observar cinco parámetros estadísticos que se utilizaron para caracterizar las 10 ejecuciones realizadas para cada criterio de frontera, el primero busca el mejor coeficiente de reflexión obtenido, el segundo indica el porcentaje de aciertos que logró cada criterio en la prueba, el tercero representa el número de iteraciones promedio que ejecutó el

programa, el cuarto muestra el número de coordenadas promedio que el algoritmo tuvo por fuera del espacio solución y el quinto enseña la desviación estándar de las coordenadas que estuvieron por fuera del espacio solución. De allí, se puede observar que a pesar de que con el criterio de Frontera 2 y 3 se obtuvieron en promedio menos coordenadas por fuera del espacio solución, fue con el criterio de frontera 1 que el algoritmo tuvo un porcentaje de aciertos mayor. Por consiguiente, este fue el que se escogió para ser implementado en el diseño del absorbedor electromagnético multicapa.

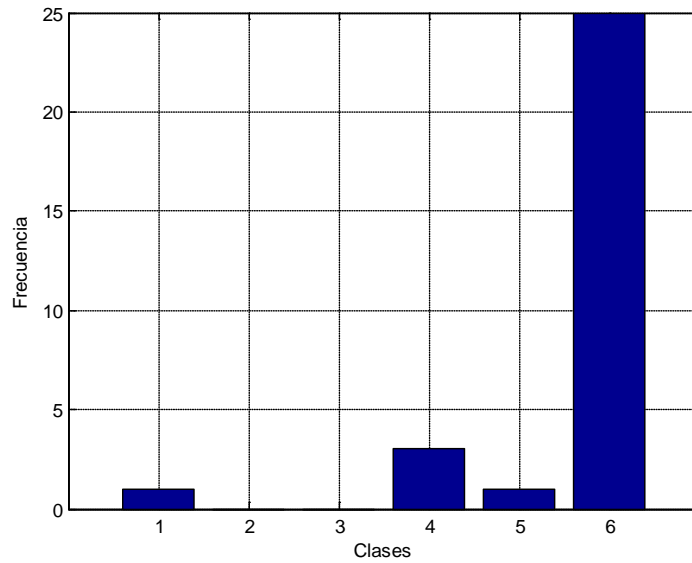
## 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS

### 5.2.1 Absorbedor de tres capas

Con los parámetros  $r=0,95$ ,  $\theta=80^\circ$  establecidos en la sección 5.1.1 y con el criterio de frontera 1 establecido en la sección 5.1.2, se procedió a ejecutar el algoritmo 30 veces, con 200 espirales en el campo solución según se vio en la sección 4.2 con grosores máximos para cada capa de 2 [mm] y en el rango de frecuencias de 0,8 a 5,4 [GHz], obteniendo los resultados que se observan en la Tabla 25 (ver Anexo 9.3). Puesto que en las 30 ejecuciones se obtuvieron diferentes diseños con distintos coeficientes de reflexión, se procedió a realizar un histograma de frecuencias con los coeficientes de reflexión obtenidos para determinar los diseños óptimos. Estos resultados agrupados se muestran en la Figura 22 , y las clases utilizadas (en decibeles) para la construcción de este fueron:

$[-12,80, -14,24)$ ,  $[-14,24, -15,69)$ ,  $[-15,69, -17,13)$ ,  $[-17,13, -18,58)$ ,  $[-18,58, -20,02)$  y  $[-20,02, -21,47]$ .

Figura 22. Distribución de los coeficientes de reflexión.



Fuente: Autores.

Tomando los diseños que caen sobre las clases 5 y 6, se obtienen tres posibles diseños que se muestran en la Tabla 14, en esta se puede observar que el tercer diseño es el más delgado pero es el segundo que tiene mejor coeficiente de reflexión.

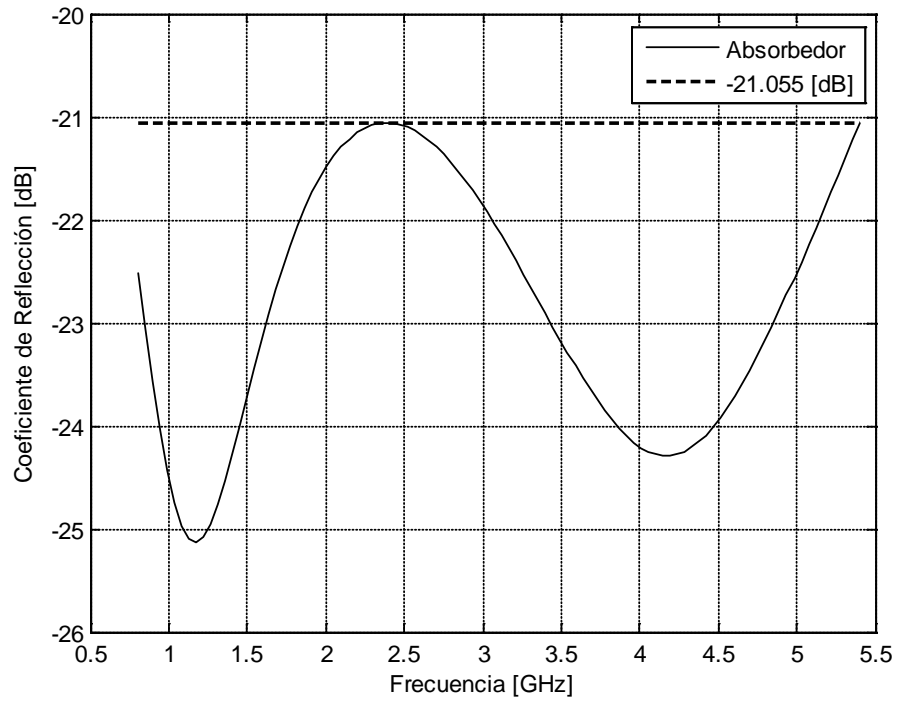
Tabla 14. Diseños realizados.

	Primer Diseño		Segundo Diseño		Tercer Diseño	
	Material	Grosor [mm]	Material	Grosor [mm]	Material	Grosor [mm]
Capa 1	16	0,5824	16	0,6010	16	0,6870
Capa 2	5	1,7942	3	1,9990	12	1,8225
Capa 3	4	1,9153	4	1,6338	4	1,6800
Grosor Total [mm]	4,2919		4,2338		4,1895	
Max. Coef. Ref. [dB]	-21,055		-21,465		-21,174	

Fuente: Autores.

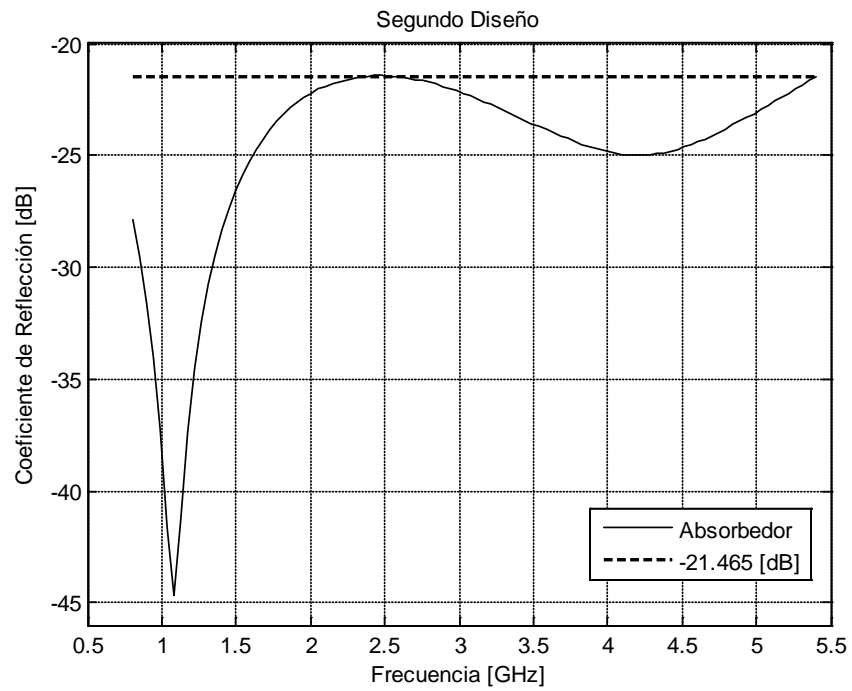
Asimismo, el comportamiento de los tres absorbedores sobre la banda de frecuencias [0,85 GHz, 5,4 GHz], se muestran en la Figura 23, Figura 24 y Figura 25.

Figura 23. Primer diseño del absorbedor electromagnético de 3 capas.



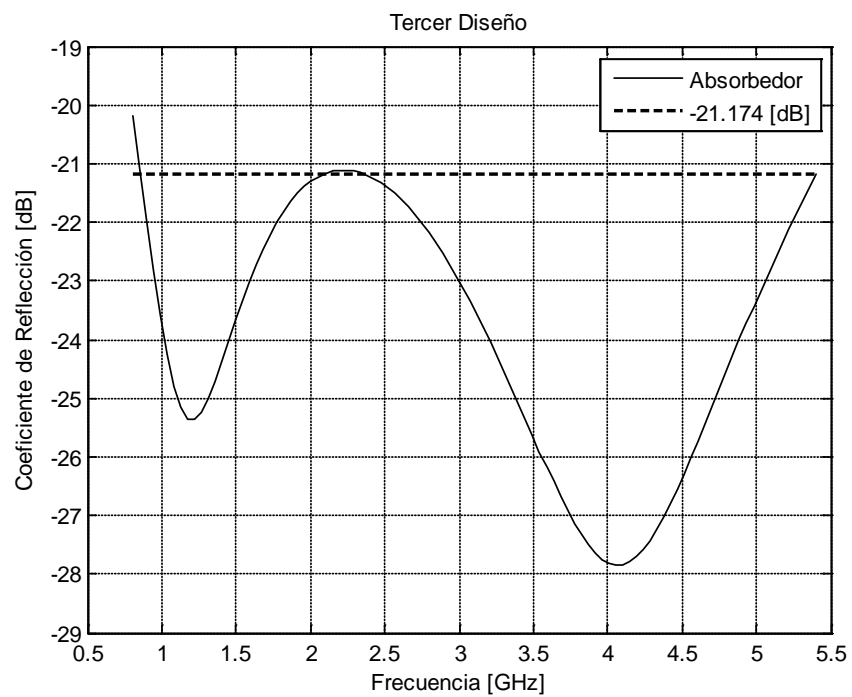
Fuente: Autores.

Figura 24. Segundo diseño del absorbedor electromagnético de 3 capas.



Fuente: Autores.

Figura 25. Tercer diseño del absorbedor electromagnético de 3 capas.



Fuente: Autores.

### 5.2.2 Diseño de un absorbedor electromagnético de 7 Capas

Para esta sección se ejecutó el algoritmo 20 veces para  $r=0,95$  y  $\theta=80^\circ$  en el rango de frecuencias de 0,8 a 5,4 [GHz] y con grosor máximo por cada capa de 2 [mm]. Las estadísticas obtenidas de las 20 ejecuciones se encuentran en la Tabla 15.

Tabla 15. Estadísticas del diseño de un absorbedor de 7 capas.

Mejor. Coef. Ref. [dB]	Peor. Coef. Ref. [dB]	Media	Desv. Est.	Tiempo promedio [min]
-26,134	-21,731	-23,813	1,218	8,96

Fuente: Autores.

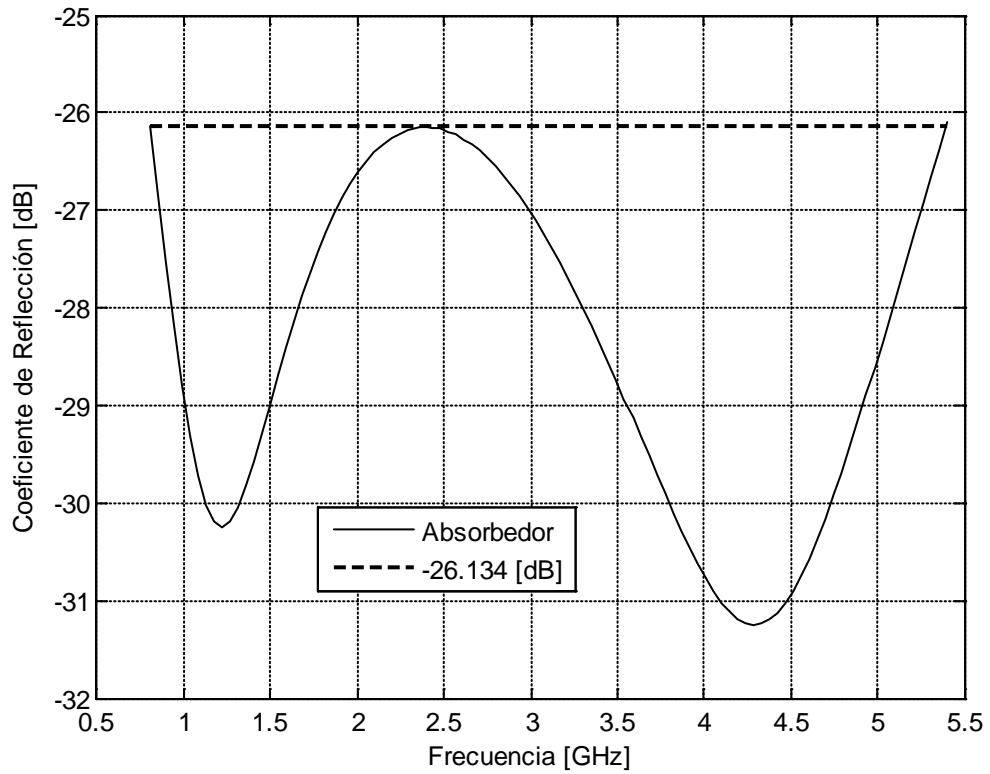
El diseño escogido de estas ejecuciones se encuentra en la Tabla 16. Asimismo, el comportamiento del diseño de 7 capas sobre la banda de frecuencias [0,8 GHz, 5,4 GHz], se muestran en la Figura 26.

Tabla 16. Materiales y grosores del diseño de 7 capas.

Capa	Diseño 7 Capas	
	Material	Grosor [mm]
1	14	0,549
2	6	1,069
3	6	0,308
4	6	0,566
5	5	1,568
6	5	0,524
7	5	1,677
Grosor Total [mm]	6,26	
Max. Coef. Ref. [dB]	-26,134	

Fuente: Autores.

Figura 26. Diseño del absorbedor de 7 capas en el rango de frecuencias de 0,8 a 5,4 GHz.



Fuente: Autores.

### 5.2.3 Diseño de un absorbedor de 9 capas

Para esta sección se ejecutó el algoritmo 20 veces para  $r=0,95$  y  $\theta=80^\circ$  en el mismo rango de frecuencias (es decir, 0,8 a 5,4 [GHz]). Las estadísticas obtenidas de las 20 ejecuciones se encuentran en la Tabla 17.

Tabla 17. Estadísticas del diseño de un absorbedor de 9 capas.

Mejor. Coef. Ref. [dB]	Peor. Coef. Ref. [dB]	Media	Desv. Est.	Tiempo promedio [min]
-25,658	-21,319	-23,547	1,198	11,06

Fuente: Autores.

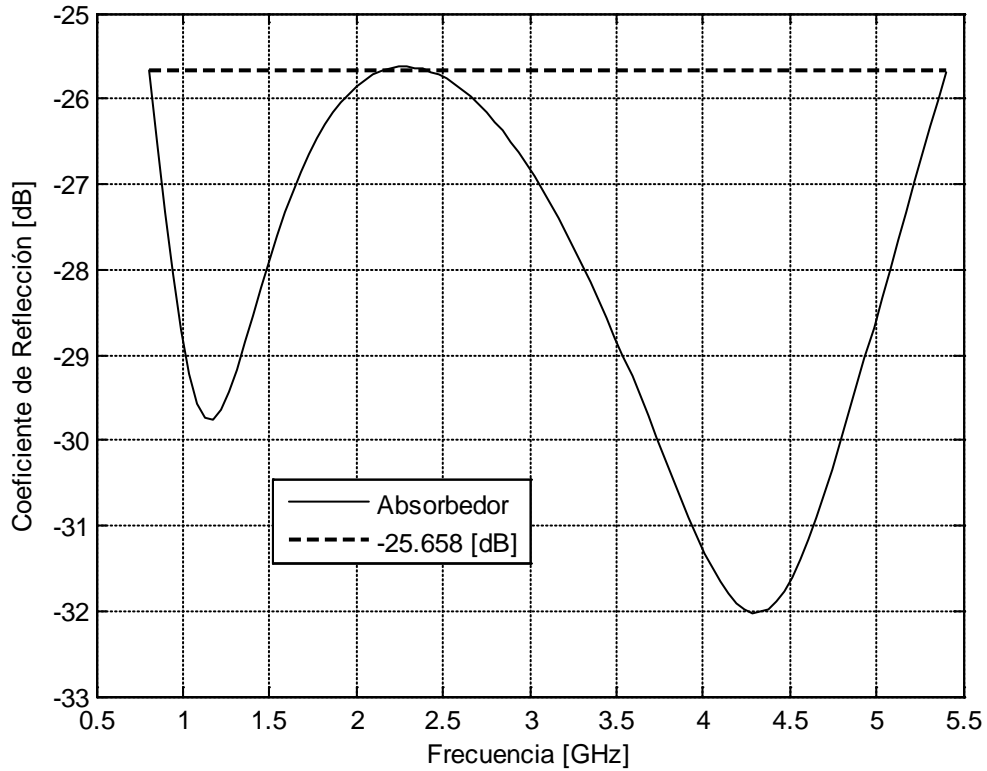
El diseño escogido de estas ejecuciones se encuentra en la Tabla 18. Asimismo, el comportamiento del diseño de 9 capas sobre la banda de frecuencias [0,8 GHz, 5,4 GHz], se muestran en la Figura 27.

Tabla 18. Materiales y grosores del diseño de 9 capas.

Capa	Diseño 9 Capas	
	Material	Grosor [mm]
1	14	0,572
2	8	0,604
3	6	1,568
4	5	1,011
5	5	1,725
6	6	1,902
7	9	0,236
8	6	0,421
9	3	0,600
Grosor Total [mm]	8,638	
Max. Coef. Ref. [dB]	-25,658	

Fuente: Autores.

Figura 27. Diseño del absorbedor de 9 capas en el rango de frecuencias de 0,8 a 5,4 GHz.



Fuente: Autores.

### 5.3 CONTRASTE DE RESULTADOS

#### 5.3.1 Contraste del método de la espiral con GSA, SADE, PSO y CFO para un absorbedor de 5 capas

El objetivo de esta sección es comparar el comportamiento de los algoritmos en cuanto al mejor resultado obtenido, el peor, la media y la desviación estándar. Los algoritmos de optimización a contrastar son el GSA (Gravitational Search Algorithm), el SADE (Self-Adaptive Differential Evolution), el PSO (Particle Swarm Optimization) y el CFO (Central Force Optimization). Los parámetros de cada método de optimización se encuentran registrados en la Tabla 19. En el

anexo 9.6 se encuentra una breve descripción de cada uno de los métodos y el significado de cada uno de los parámetros.

Tabla 19. Parámetros de los algoritmos a contrastar.

Método	Parámetros
CFO	$N_t = 1000, A_{max} = 0,1, N_p = 20, G = 1,7, \alpha = 0,6, \beta = 0,9$ y $F_{resp} = 0,9$
PSO	$c_1 = c_2 = 2; swarm\ size = 100; w_{max} = 0,95; w_{min} = 0,4$ y $iter_{max} = 100$
SADE	$error = 10^{-7}; N = 1000$ y $h = 18$ donde $F \in [0,5 - 1]$ y $CR \in [0 - 1]$
GSA	$N = 20; G_o = 100; \alpha = 20; R_{norm} = 2$ y $iter_{max} = 1000$
Espiral	$r = 0,95; \theta = 80^\circ$ y $m = 200$

Fuente: Autores.

Para ello se ejecutaron los algoritmos 20 veces, en el rango de frecuencias de 2 – 8 [GHz] con incrementos en la frecuencia de 0,5 [GHz] para un absorbedor electromagnético de 5 capas utilizando los materiales de la Tabla 9 y con un grosor máximo total de las cinco capas de 5 [mm]. Los diseños obtenidos se encuentran en la Tabla 20. Es importante resaltar que los resultados y estadísticas mostrados de aquí en adelante con los otros algoritmos (CFO, SADE, GSA y PSO) fueron tomados de [9].

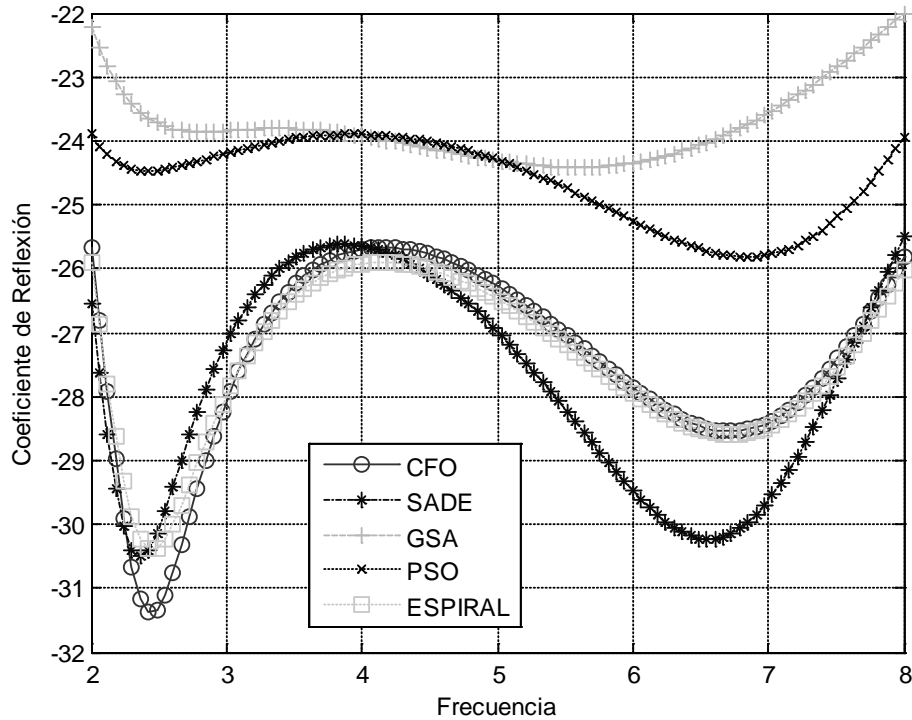
Tabla 20. Diseños obtenidos de los algoritmos a contrastar.

Capa	CFO		SADE		GSA		PSO		ESPIRAL	
	Material	Grosor[mm]	Material	Grosor[mm]	Material	Grosor[mm]	Material	Grosor[mm]	Material	Grosor[mm]
1	16	0,377	16	0,384	16	0,418	14	0,455	16	0,365
2	6	1,572	6	0,433	6	1,593	6	1,995	6	1,128
3	6	0,991	6	1,143	8	0,485	8	0,322	6	1,927
4	6	0,377	6	1,446	13	1,366	5	0,986	14	1,111
5	15	1,425	15	1,454	4	0,986	11	1,128	11	0,460
Grosor Total [mm]	4,774		4,860		4,850		4,888		4,944	
Max Coef. Ref. [dB]	-25,698		-25,485		-21,955		-23,889		-25,935	

Fuente: Autores.

La Figura 28, muestra el coeficiente de reflexión como función de la frecuencia para cada uno de los diseños, donde se puede observar que el diseño obtenido por el método de la espiral es ligeramente mejor que los demás.

Figura 28. Absorbedor de 5 capas optimizado para el rango de frecuencias de 2-8 GHz.



Fuente: Autores.

El análisis estadístico de las 20 ejecuciones se encuentra resumido en la Tabla 21, de la cual se puede concluir que el algoritmo de la espiral produce resultados ligeramente mejores a los algoritmos de SADE y CFO. Cabe resaltar que el algoritmo de la espiral produce mejores resultados con respecto a GSA y PSO para este caso. Si se desea observar los resultados obtenidos con el algoritmo de la espiral puede revisar el anexo 9.4, de los cuales cabe resaltar que se produjeron resultados por debajo de  $-25,935$  [dB] pero no pudieron ser tomados en cuenta para esta comparación porque excedían los 5 [mm] de ancho total.

Tabla 21. Estadísticas de los coeficientes de reflexión en [dB] en las 20 ejecuciones.

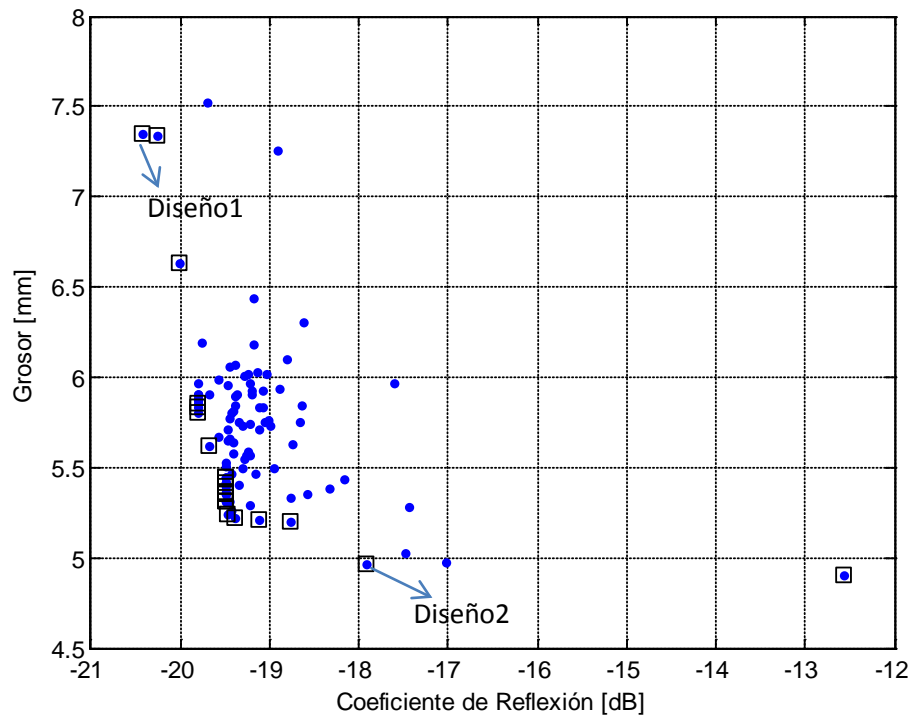
	CFO	SADE	GSA	PSO	ESPIRAL
Mejor	- 25,698	- 25,485	- 21,955	- 23,889	-26,202
Peor	- 21,848	- 22,760	- 10,222	- 19,838	-21,763
Media	- 23,154	- 24,001	- 15,552	- 22,495	-23,801
Desv. Est.	0,988	0,784	2,802	1,122	1,063

Fuente: Autores.

### 5.3.2 Contraste del método de la espiral con MOPSO para un absorbedor de 5 capas

En esta sección se busca obtener un diseño que optimice dos objetivos que están en conflicto, el grosor del absorbedor y el coeficiente de reflexión [11]. Para ello se ejecutó el algoritmo 100 veces y se almacenaron los resultados en la Tabla 27. En ésta se observa el grosor del diseño y el coeficiente de reflexión obtenido. Los parámetros de simulación fueron  $r = 0,95$ ,  $theta = 80^\circ$  y rango de frecuencias entre 0,2 a 10 GHz. Luego, se realizó una gráfica con estas dos variables, para 100 ejecuciones, tal y como se observa en la Figura 29.

Figura 29. Gráfica de la relación entre el grosor y el coeficiente de reflexión.



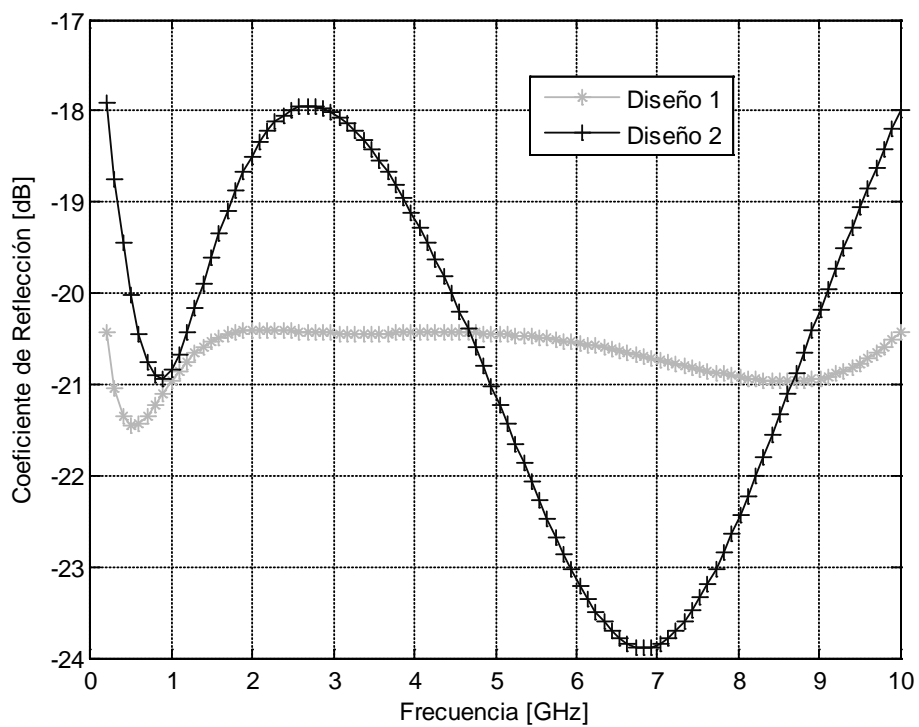
Fuente: Autores.

Para encontrar los diseños óptimos se hizo uso del frente de Pareto<sup>7</sup> de esta distribución, los cuales se encuentran enmarcados dentro de un recuadro negro de la Figura 29. Es sobre estos puntos en los que se puede escoger los diseños óptimos que consideran estos dos criterios, mejor grosor y mejor coeficiente de reflexión. Asimismo, cabe notar que un buen diseño depende de qué es lo que se esté buscando. Es decir, se puede buscar un diseño que sea suficientemente delgado pero con un coeficiente de reflexión menor, o se puede buscar que éste último sea grande pero el ancho aumentaría significativamente. Teniendo en cuenta esto, se escogieron dos diseños del frente de Pareto, que remarcan lo anteriormente dicho. En la Figura 30, se muestra que el diseño 1 tiene mayor absorción, pero de la Figura 29 se puede observar que es más ancho, mientras tanto el diseño 2 es más delgado pero tiene menor coeficiente de reflexión. Sin embargo, en la Figura 30 es posible

<sup>7</sup> Para esto los autores se apoyaron en una función que halla el frente de Pareto. La dirección web es <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17251-pareto-front>

apreciar que en un rango de frecuencias el diseño 1 es más absorbente que el 2 y viceversa. Apreciándose además que el diseño 1 mantiene un coeficiente de reflexión muy similar en el rango de frecuencias de 0,2 a 10 GHz, mientras el diseño 2 muestra que es muy sensible al rango de frecuencias en el que se trabaje ya que en algunos presenta un coeficiente de reflexión de -18 [dB] o -24 [dB] según la frecuencia.

Figura 30. Diseños obtenidos del frente de Pareto.



Fuente: Autores.

En la Tabla 22, se muestran los materiales y grosores de cada capa de los dos diseños de la Figura 30.

Tabla 22. Tabla de los materiales y grosores utilizados en los dos diseños.

Capa	Diseño 1 Espiral		Diseño 1 MOPSO		Diseño 2 Espiral		Diseño 2 MOPSO	
	Materi al	Grosor [mm]	Materi al	Grosor [mm]	Materi al	Grosor [mm]	Materi al	Grosor [mm]
1	14	0,4086	13	0,4092	16	0,4502	15	0,2357

2	6	1,7021	5	1,697	6	1,1923	3	0,3277
3	5	1,9625	4	1,943	3	0,7379	4	0,1847
4	6	1,745	5	1,9189	4	1,8164	2	0,0882
5	4	1,5286	3	1,5407	3	0,764	3	1,2509
Grosor Total [mm]	7,347		7,5088		4,961		2,0872	
Max. Coef. Ref. [dB]	-20,42		-20,7		-17,91		-10	

Fuente: Autores.

Comparando los resultados obtenidos el algoritmo de la espiral, con los obtenidos por el algoritmo MOPSO [11] en la banda de 0,2 a 10 GHz muestra que estos son menos dispersos ya que se encuentran agrupados en un rango de grosores de 4,9 a 7,5 [mm] y en un rango de coeficientes de reflexión de -12,5 a -20,4 [dB] a diferencia de los rangos obtenidos por MOPSO que van de 0 a -25 [dB]. De igual manera, los resultados obtenidos en el diseño 2 muestran que el MOPSO, presenta mejores resultados teniendo en cuenta el grosor del absorbedor ya que este es más delgado.

### 5.3.3 Contraste del método de la espiral con PSO MODIFICADO para un absorbedor de 7 capas

El objetivo de esta sección es diseñar un absorbedor electromagnético de 7 capas en el rango de 0,1 a 20 GHz, utilizando el banco de materiales de la Tabla 9 y compararlos con los resultados obtenidos por [10]. Las estadísticas de los resultados obtenidos por el algoritmo de la espiral se encuentran en la Tabla 23.

Tabla 23. Estadísticas del absorbedor de 7 capas en el rango de 0,1 a 20 GHz.

Mejor. Coef. Ref. [dB]	Peor. Coef. Ref. [dB]	Media	Desv. Est.	Tiempo promedio [min]
------------------------	-----------------------	-------	------------	-----------------------

-17,563	-12,788	-15,181	1,241	29,56
---------	---------	---------	-------	-------

Fuente: Autores.

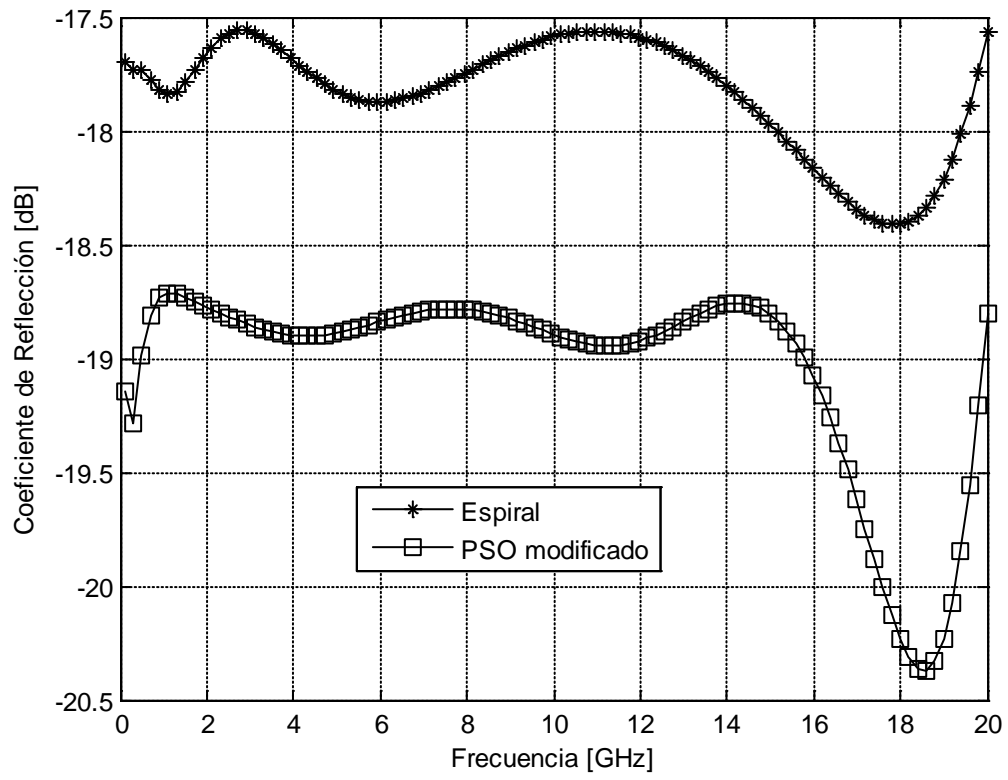
En la Tabla 24 se observa los materiales usados para el diseño realizado por el algoritmo de la espiral y se agrega el diseño realizado por los autores de [10] para contrastarlos. De ello se encuentra que a pesar de que el PSO MODIFICADO genera un mayor coeficiente de reflexión (como se muestra en la Figura 31), el diseño obtenido por la espiral es más delgado haciendo que este se vuelva más atractivo para algunas aplicaciones.

Tabla 24. Materiales usados en el diseño de 7 capas en el rango de 0,1 a 20 GHz.

Capa	ESPIRAL		PSO MODIFICADO	
	Material	Grosor [mm]	Material	Grosor [mm]
1	14	0,2156	14	0,2127
2	6	1,9423	6	2,179
3	14	0,5082	14	0,601
4	8	0,8703	6	1,159
5	4	1,6732	5	1,704
6	8	1,5732	6	2,197
7	5	1,3247	5	1,656
Grosor Total [mm]	8,108		9,600	
Max. Coef. Ref. [dB]	-17,563		-18,5	

Fuente: Autores.

Figura 31. Diseño de 7 capas con el algoritmo de la espiral y con PSO modificado [10].



Fuente: Autores.

## 6 CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

1. Se cumplieron satisfactoriamente todos los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación.

2. De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que:

2.1 Al diseñar un absorbedor electromagnético de tres capas en el rango de frecuencia de 0,8 a 5,4 GHz, con el algoritmo de la espiral, se encontraron resultados similares (tanto en términos de materiales como de espesores) a los obtenidos en [4], donde se aplicó análisis por intervalos. De esta forma se logró validar que la estrategia utilizada en esta investigación es una alternativa viable para optimizar el tipo de absorbedores estudiados (es decir, planares multicapa)

2.2 El diseño 1 del absorbedor electromagnético de 5 capas en el rango de frecuencias de 0,2 a 10 GHz, presentó características similares al obtenido con MOPSO [11]. Sin embargo, en el segundo diseño MOPSO entregó una configuración más delgada pero con menor capacidad de absorción. Teniendo en cuenta que en este último lo que se buscaba era minimizar el espesor (sin dejar totalmente de lado el coeficiente de reflexión), se puede concluir que el algoritmo de la espiral tiende a dar mayor prioridad al criterio de reflexión que al de espesor. Adicionalmente, al comparar los dos diseños se encontró que el primero presenta una respuesta más estable en función de la frecuencia, mientras que el segundo es bastante sensible a la misma.

3. Se implementó el método de la espiral para  $n$  dimensiones, y se diseñó un absorbedor electromagnético de 7 y 9 capas en el rango de frecuencias de 0,8 a 5,4 GHz, obteniéndose un mínimo de atenuación de -26,134 [dB] y -25,658 [dB] y un grosor de 6,26 [mm] y 8,638 [mm] respectivamente, lo cual muestra que el diseño de 7 capas presenta mejores características que el de 9 capas.
4. Al diseñar un absorbedor electromagnético de cinco capas en el rango de frecuencia de 2 a 8 GHz (Alta frecuencia), y compararlo con los diseños entregados por PSO, CFO, SADE y GSA, en [9], se encontró que los resultados son muy similares a los arrojados por SADE y GSA, y mejores que con PSO y GSA, constatando que el método de la espiral es una alternativa que produce resultados similares a métodos que dependen de más parámetros, haciéndolo más sencillo y eficaz y por ende más atractivo a nivel práctico.
5. Se realizaron pruebas y estudios estadísticos con el fin de ajustar los parámetros del algoritmo de la espiral, tales como  $r$  y  $\theta$ , la condición de frontera y el número de iteraciones mínimo, lo que ayudó a reducir los tiempos de ejecución del método.

## 7 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Usar un banco de materiales reales, con el fin que luego de ejecutar el algoritmo se cuente con un diseño que se pueda implementar. Adicionalmente, se recomienda implementar una estrategia que permita ajustar los parámetros del algoritmo a medida que transcurre su ejecución, buscando minimizar los tiempos de ejecución sin necesidad de mucha interacción por parte del usuario, lo que facilitaría la aplicación exitosa del método a diferentes campos de la ingeniería.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

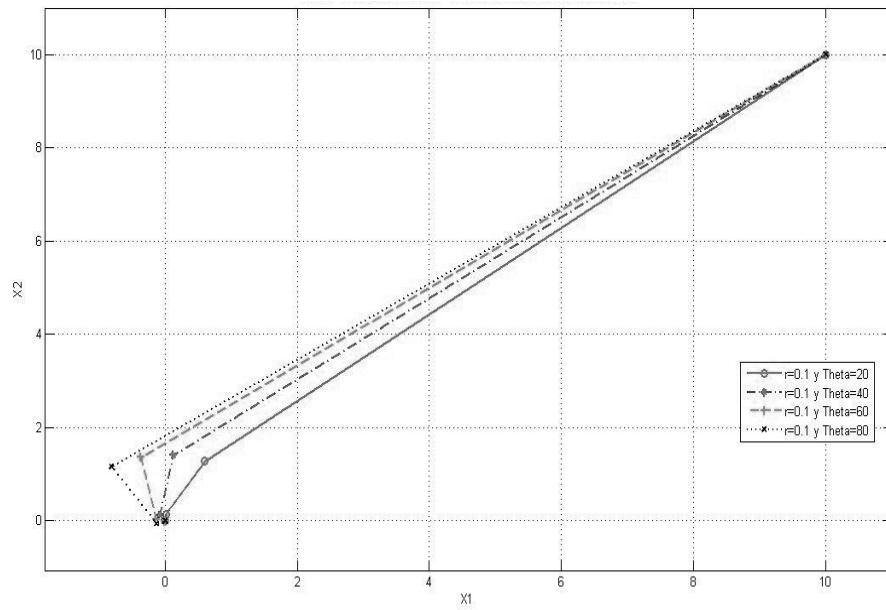
- [1] A. Bronwell, "Transmission-Line Analogies of Plane Electro-magnetic-Wave Reflections," *I.R.E.*, no. 1, pp. 233-241, 1944.
- [2] C. T. A. Johnk, *Engineering Electromagnetic Fields and Waves*, Segunda Ed., vol. 344–354. New York: John Wiley & Sons, 1998, pp. 344-354.
- [3] E. Michielssen, J.-M. Sajer, S. Ranjithan, and R. Mittra, "Genetic algorithm design of Pareto optimal broadband microwave absorbers," *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques*, vol. 38, no. 3, pp. 518-525, 1996.
- [4] E. Salazar and E. Mora, "Diseño de absorbedores electromagnéticos óptimos utilizando optimización por enjambre de partículas y análisis de intervalos," *Universidad Industrial de Santander*, pp. 1-35, 2011.
- [5] H. Liu, L. Zhang, and Y. Gao, "Electromagnetic Wave Absorber Optimal Design Based on Improved Particle Swarm Optimization," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto*, pp. 797-800, 2009.
- [6] K. Tamura and K. Yasuda, "Spiral Dynamics Inspired Optimization," *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 15, no. 8, 2011.
- [7] K. Tamura and K. Yasuda, "Spiral Optimization," *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, no. 1, pp. 1759-1764, 2011.
- [8] K.-yeon Park, S.-eui Lee, C.-gon Kim, and J.-hung Han, "Fabrication and Electromagnetic Characteristics of Electromagnetic Wave Absorbing Sandwich Structures," no. 3, pp. 576-584, 2006.

- [9] M. J. Asi and N. I. Dib, "Design Of Multilayer Microwave Broadband Absorbers Using Central Force Optimization," vol. 26, no. September, pp. 101-113, 2010.
- [10] M. S. Chamaani, S., S. Mirtaheri, "Design of very thin wide band absorbers using modified local best particle swarm optimization," *AEU — Int. J. Electron. Commun.*, vol. 62, pp. 549– 556, 2008.
- [11] S. Chamaani, "Modified Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Electromagnetic Absorber Design," *Progress In Electromagnetics Research, PIER 79*, pp. 353-366, 2008.

## ANEXOS

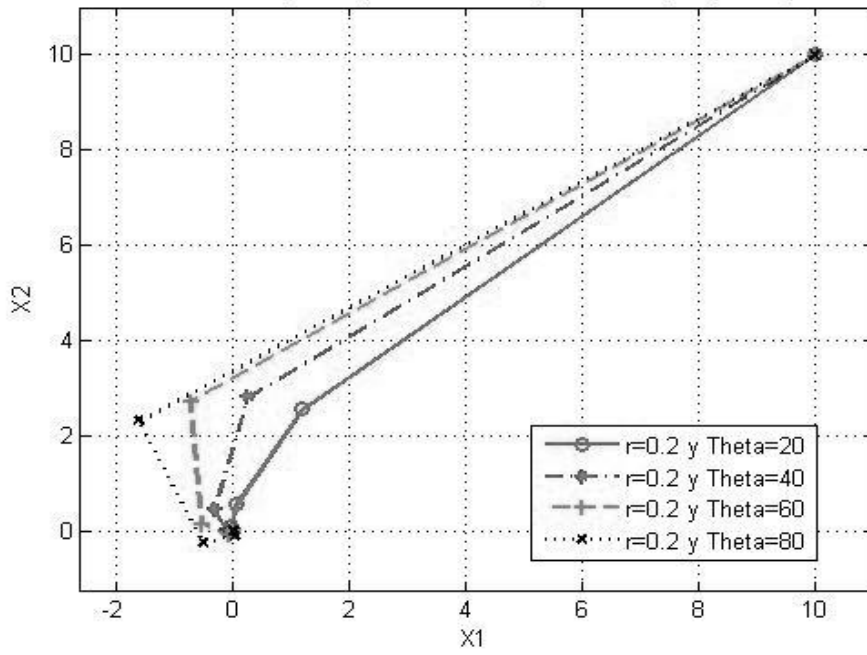
### 8.1 ANEXO A: Graficas de las espirales variando $r$ y $\theta$

Figura 32. Modelo de la espiral variando  $r = 0,1$  y  $\theta$  de  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ .



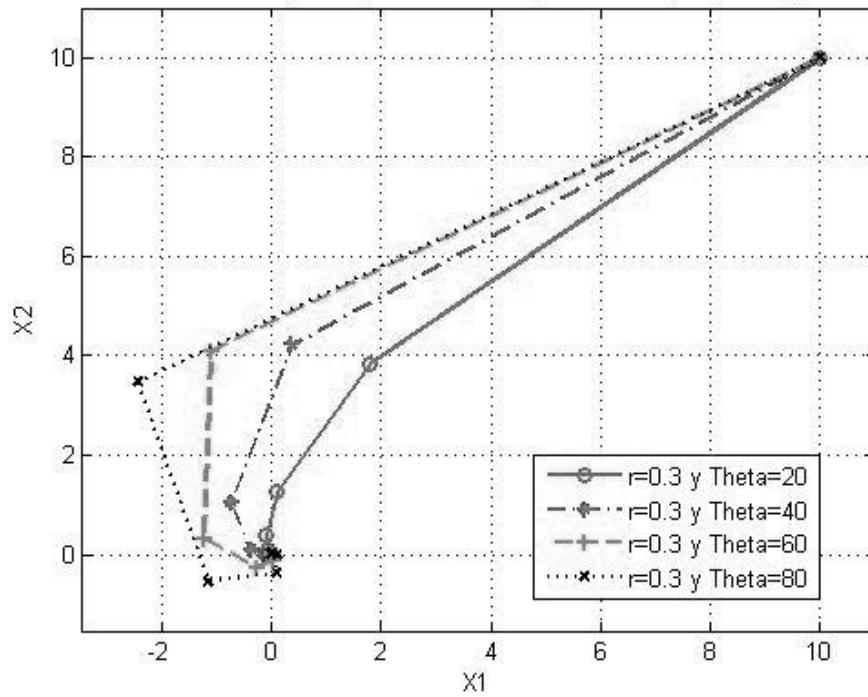
Fuente: Autores.

Figura 33. Modelo de la espiral variando  $r = 0,2$  y  $\theta$  de  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$



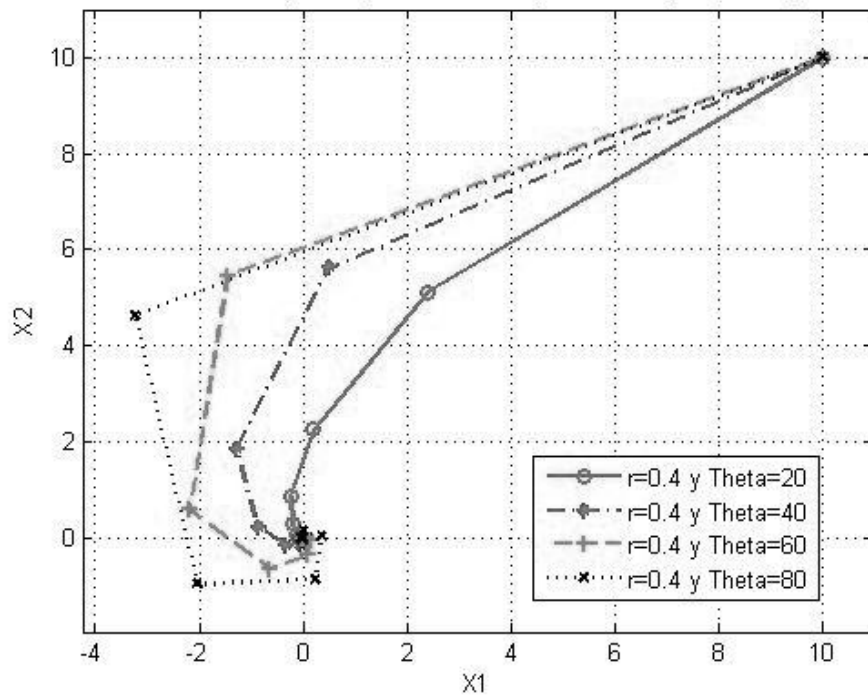
Fuente: Autores.

Figura 34. Modelo de la espiral variando  $r = 0,3$  y theta de  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ .



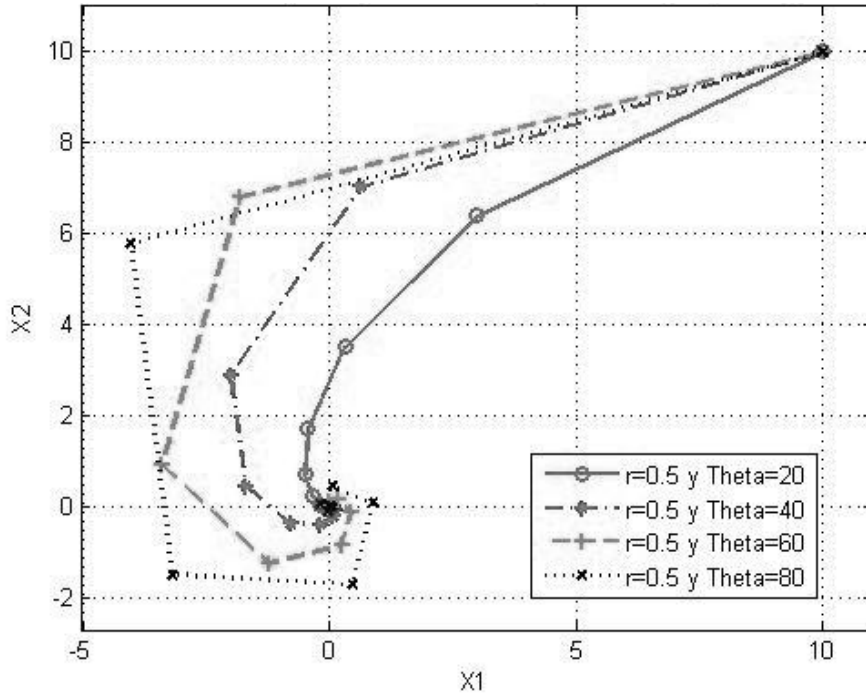
Fuente: Autores.

Figura 35. Modelo de la espiral variando  $r = 0,4$  y theta de  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ .



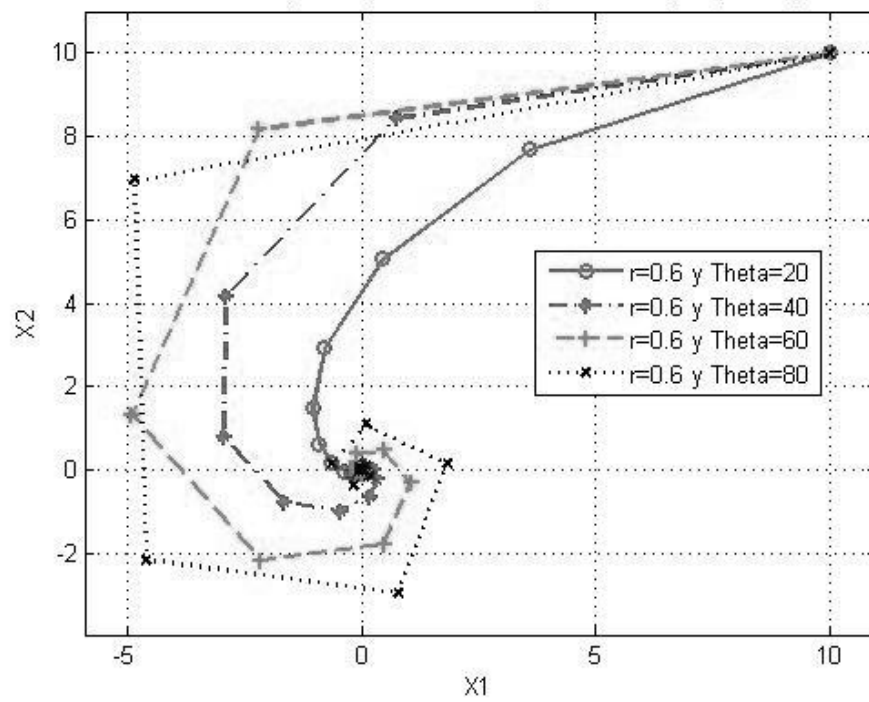
Fuente: Autores.

Figura 36. Modelo de la espiral variando  $r = 0,5$  y  $\theta$  de  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ .



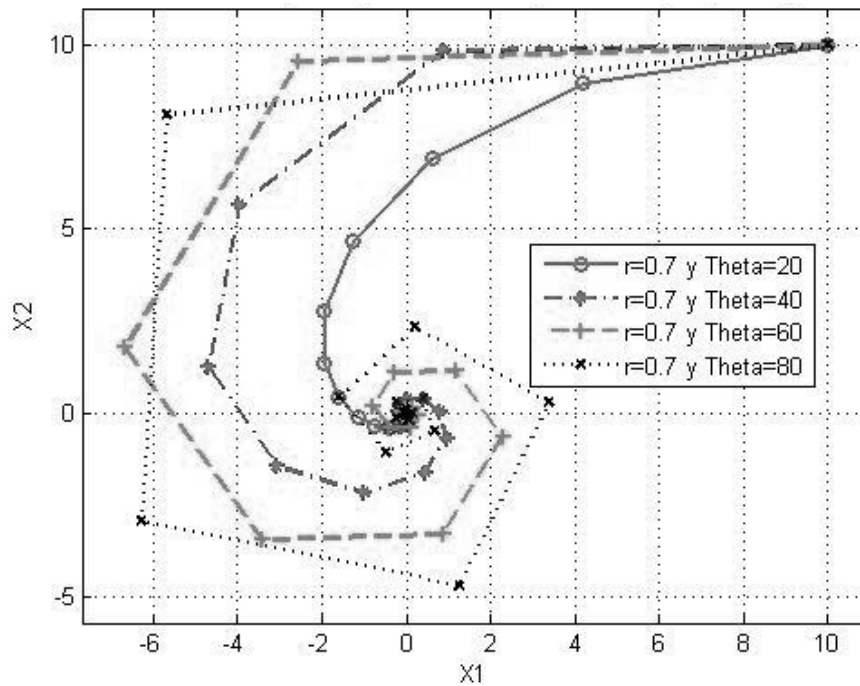
Fuente: Autores.

Figura 37. Modelo de la espiral variando  $r = 0,6$  y theta de  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ .



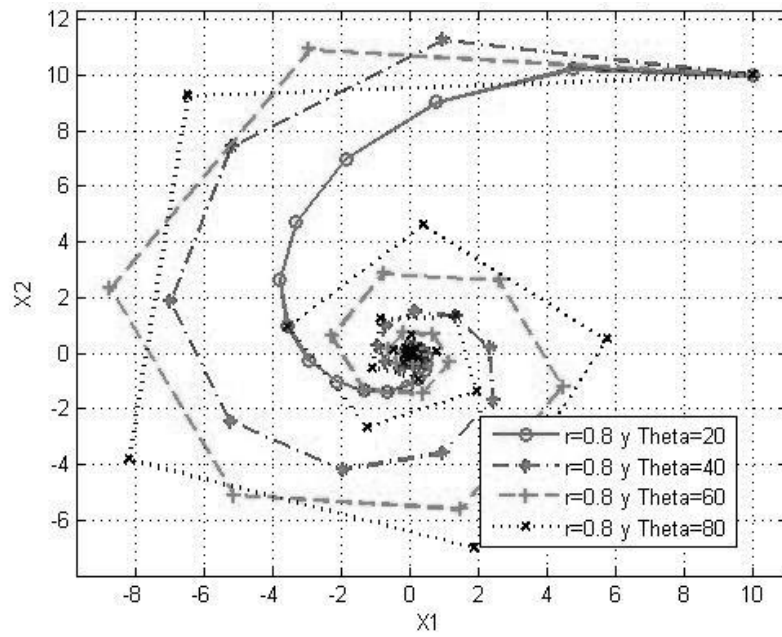
Fuente: Autores.

Figura 38. Modelo de la espiral variando  $r = 0,7$  y theta de  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ .



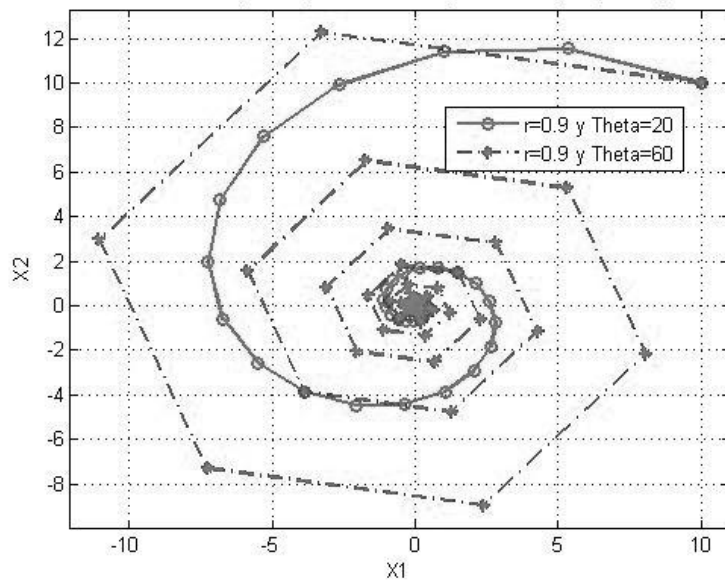
Fuente: Autores.

Figura 39. Modelo de la espiral variando  $r = 0,8$  y theta de  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ .



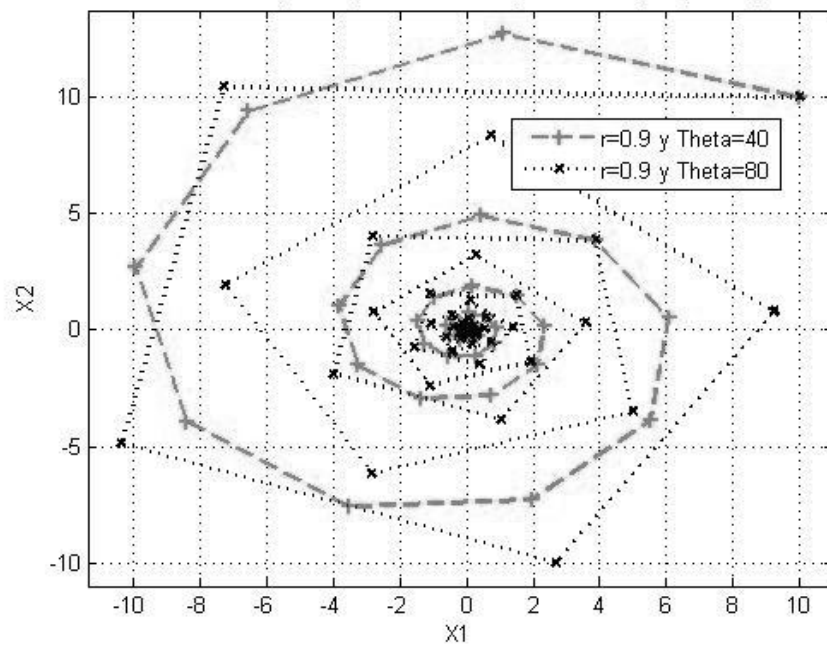
Fuente: Autores.

Figura 40. Modelo de la espiral variando  $r = 0,9$  y theta de  $20^\circ$  y  $60^\circ$ .



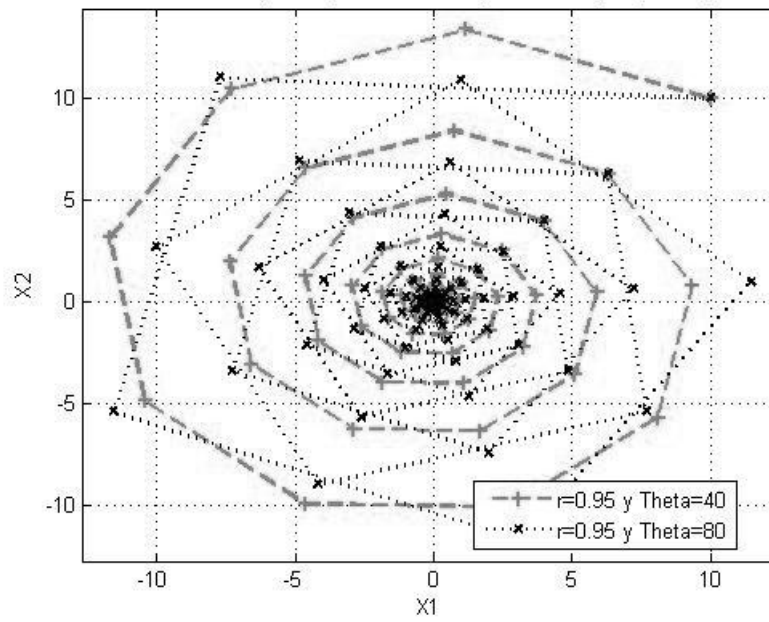
Fuente: Autores.

Figura 41. Modelo de la espiral variando  $r = 0,9$  y theta de  $40^\circ$  y  $80^\circ$ .



Fuente: Autores.

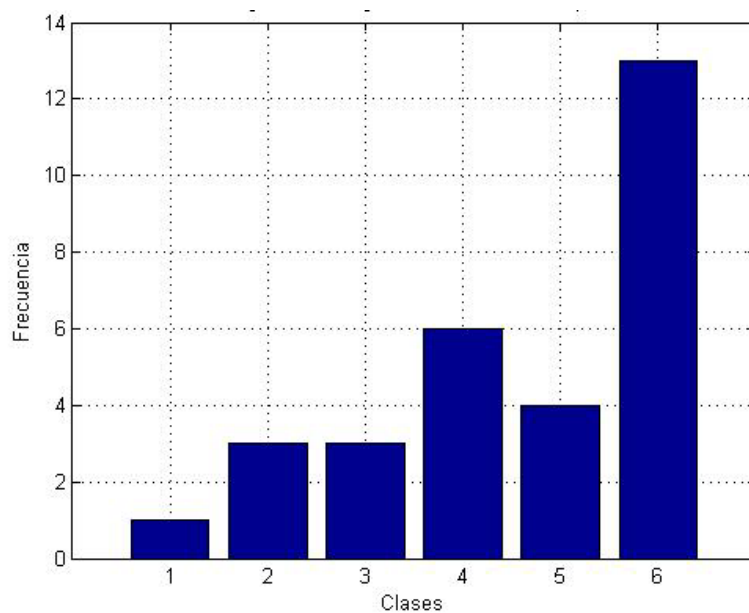
Figura 42. Modelo seleccionado con  $r=0,95$  y  $\theta = 80^\circ$ .



Fuente: Autores.

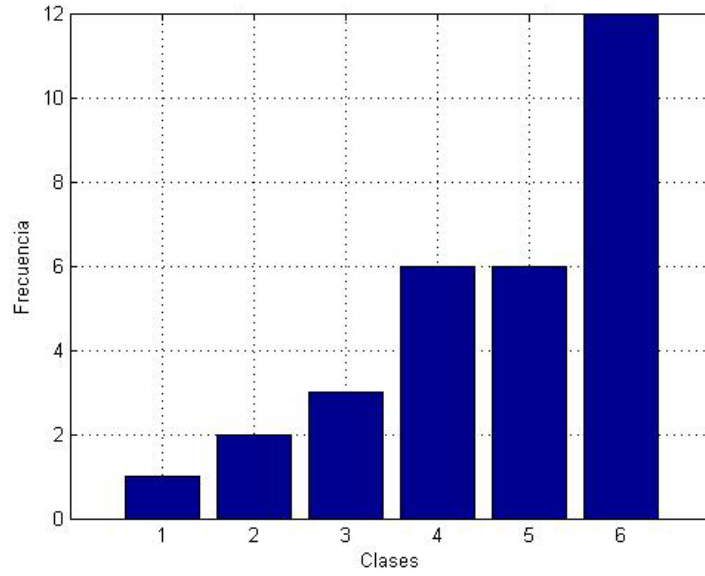
8.2 **ANEXO B: Histograma de frecuencias de cada una de las espirales seleccionadas.**

Figura 43. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 14.



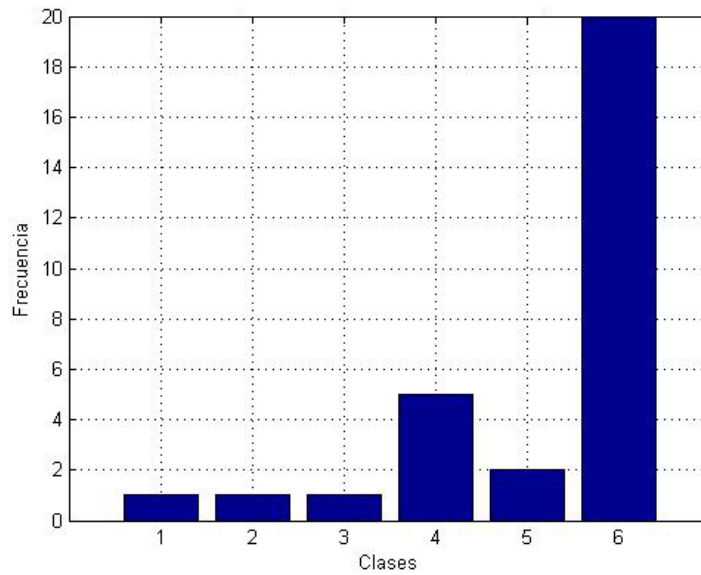
Fuente: Autores.

Figura 44. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 16.



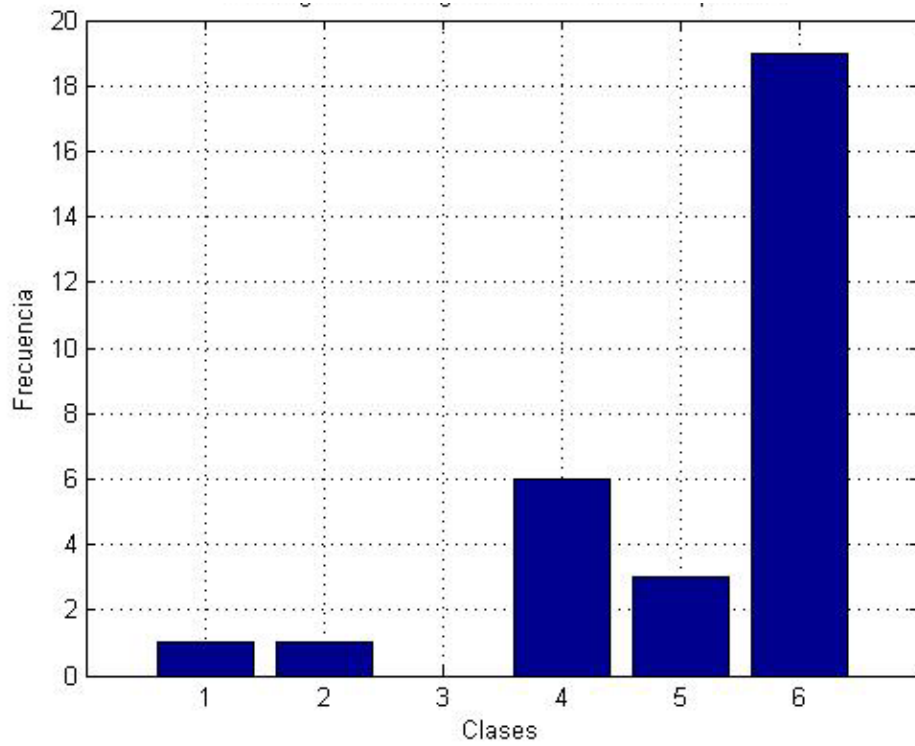
Fuente: Autores.

Figura 45. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 19.



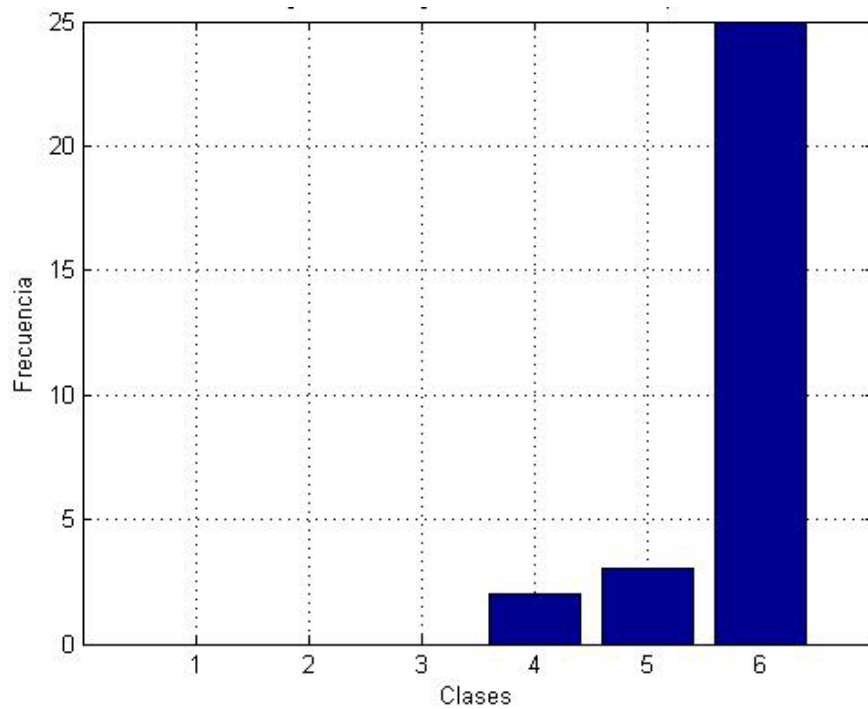
Fuente: Autores.

Figura 46. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 23.



Fuente: Autores.

Figura 47. Histograma para establecer la convergencia del algoritmo para la Espiral 24.



Fuente: Autores.

### 8.3 ANEXO C: Resultados del algoritmo de la espiral aplicado al absorbedor electromagnético

Tabla 25. Resultados del algoritmo para 30 ejecuciones,  $r=0,95$ ,  $\theta=80^\circ$ , criterio de frontera 3 y 200 espirales en el campo solución.

Coef_Ref [dB]	Iter	t. ejec [s]	Materiales			Grosores[mm]		
-21,461	1019	285,9	16	3	4	0,6030	1,9890	1,6460
-21,053	1023	308,3	16	5	4	0,5810	1,8130	1,8990
-21,174	1001	319,1	16	12	4	0,6870	1,8250	1,6800
-21,455	1097	300,8	16	3	4	0,6022	1,9598	1,6650
-21,465	1001	409,5	16	3	4	0,6010	1,9990	1,6338
-21,055	1036	319,6	16	5	4	0,5824	1,7942	1,9153
-21,054	1048	457,7	16	5	4	0,5857	1,6915	1,9998
-21,459	1053	396,5	16	3	4	0,6009	1,9731	1,6512
-21,054	1001	336,2	16	5	4	0,5819	1,8120	1,9012
-18,370	1001	361,2	16	3	10	0,5398	1,9997	1,6611
-21,053	1116	402,7	16	5	4	0,5815	1,8157	1,8968
-21,454	1066	378,8	16	3	4	0,6022	1,9557	1,6676
-18,185	1917	781,9	16	4	10	0,6066	1,5183	1,5736
-21,418	1001	409,7	16	3	4	0,6052	1,8392	1,7584
-21,463	1001	343,0	16	3	4	0,6013	1,9912	1,6405
-21,455	1001	318,6	16	3	4	0,6019	1,9604	1,6634
-21,052	1022	325,6	16	5	4	0,5821	1,8324	1,8876
-21,460	1001	323,6	16	3	4	0,6013	1,9918	1,6398
-17,162	1055	334,0	15	2	9	0,9106	0,9997	1,4394
-21,048	1049	345,7	16	5	4	0,5808	1,8703	1,8556
-21,464	1001	254,2	16	3	4	0,6005	1,9976	1,6331
-21,055	1001	306,4	16	5	4	0,5822	1,7955	1,9136
-21,053	1001	332,9	16	5	4	0,5815	1,8217	1,8926
-21,464	1060	279,8	16	3	4	0,6010	1,9952	1,6365
-18,787	1459	840,1	16	12	10	0,7305	1,9967	1,8844
-21,460	1001	398,0	16	3	4	0,6043	1,9984	1,6460
-21,417	1001	428,3	16	3	4	0,6071	1,8436	1,7623
-12,797	1807	754,8	13	2	9	1,2114	1,8040	0,8390
-21,420	1001	327,3	16	3	4	0,6050	1,8565	1,7457
-21,461	1005	380,5	16	3	4	0,5958	1,9991	1,6164

Fuente: Autores.

**8.4 ANEXO D: Resultados del algoritmo de la espiral para un absorbedor electromagnético de cinco capas.**

Tabla 26. Resultados del algoritmo de la espiral para un absorbedor electromagnético de 5 capas,  $r=0,95$  y  $\theta=80^\circ$ .

Min [dB]	Capas					Grosos [mm]				
	C1	C2	C3	C4	C5	G1	G2	G3	G4	G5
-23,028	14	6	5	8	9	0,4387	1,9637	1,9606	0,3521	0,6509
-23,609	14	6	6	5	9	0,4519	0,9144	1,4553	0,5790	1,5633
-24,262	14	6	6	13	3	0,4207	1,1802	1,7431	1,6633	1,1379
-21,763	14	6	1	3	3	0,5099	1,3524	0,8708	1,1347	1,9345
-24,635	14	6	6	11	6	0,4360	1,8804	1,2446	1,9884	1,7900
-24,418	16	6	5	5	2	0,4779	1,5130	1,0540	1,8241	0,9267
-23,546	16	6	3	5	6	0,4908	1,4959	1,4931	1,4630	1,2748
-23,493	16	6	6	11	11	0,4068	0,4575	1,7169	1,3319	0,5473
-24,114	16	6	6	13	5	0,4078	0,6761	1,5233	1,1833	1,6181
-26,202	16	6	6	15	6	0,3922	1,5920	1,5635	1,3955	1,5590
-24,267	16	7	6	15	8	0,3951	1,4538	1,6206	1,3368	1,3204
-23,262	14	6	5	3	3	0,4446	1,9561	1,6318	0,6637	1,1819
-22,353	14	6	8	11	3	0,4339	1,5411	1,5404	1,1812	1,4746
-23,417	14	6	6	11	9	0,4150	0,8535	1,8883	0,8036	1,2768
-23,352	14	6	5	11	3	0,4403	1,9699	1,6000	0,6494	0,2844
-25,935	16	6	6	14	11	0,3649	1,1278	1,9174	1,1114	0,4598
-23,862	14	6	6	6	11	0,4135	1,1538	0,3103	1,3582	1,9707
-24,347	14	6	6	11	2	0,4450	1,7035	1,2493	1,9706	1,0716
-23,991	14	6	6	9	6	0,4432	1,9463	1,0180	1,9682	1,9278
-22,173	14	8	6	6	9	0,4023	1,2466	0,4858	1,0789	1,7914

Fuente: Autores.

## 8.5 ANEXO E: Resultados obtenidos para contrastar el algoritmo de la espiral con MOPSO

Tabla 27. Resultados obtenidos con el algoritmo de la espiral para el diseño de un absorbedor electromagnético de 5 capas.

Coef. Ref [dB]	Grosor [mm]	Coef. Ref [dB]	Grosor [mm]	Coef. Ref [dB]	Grosor [mm]	Coef. Ref [dB]	Grosor [mm]
-18,660	5,751	-19,120	5,713	-19,241	5,591	-19,714	7,519
-19,815	5,872	-19,813	5,911	-19,815	5,855	-19,401	5,846
-19,428	5,468	-19,502	5,443	-19,220	5,968	-19,023	5,766
-19,298	5,553	-19,040	6,018	-19,811	5,911	-19,486	5,654
-20,255	7,336	-19,474	5,960	-19,808	5,801	-19,120	5,832
-19,409	5,577	-18,902	5,936	-17,475	5,025	-19,488	5,314
-19,216	5,933	-19,226	5,570	-17,613	5,971	-18,913	7,258
-19,486	5,716	-19,421	5,643	-19,675	5,905	-19,459	5,666
-19,184	6,185	-17,915	4,961	-19,802	5,964	-18,989	5,738
-19,502	5,525	-19,380	5,910	-19,500	5,404	-19,090	5,932
-18,577	5,351	-19,157	5,469	-19,497	5,352	-19,688	5,623
-19,776	6,194	-19,141	6,028	-19,811	5,878	-18,817	6,099
-18,779	5,336	-18,740	5,629	-19,288	6,006	-18,771	5,199
-19,230	5,288	-19,501	5,414	-19,124	5,208	-19,579	5,992
-19,585	5,673	-19,495	5,351	-19,319	5,735	-19,227	5,745
-19,502	5,506	-19,498	5,362	-19,399	6,070	-19,077	5,834
-18,654	5,846	-19,398	5,219	-20,422	7,347	-18,161	5,432
-19,178	6,443	-17,442	5,280	-19,214	5,909	-19,811	5,890
-19,395	5,899	-19,456	5,775	-19,318	5,497	-19,254	6,022
-18,953	5,498	-19,422	5,818	-19,482	5,242	-19,812	5,833
-19,428	5,262	-18,617	6,309	-19,500	5,398	-12,562	4,901
-19,270	5,571	-18,334	5,382	-20,008	6,638	-19,064	5,751
-19,502	5,447	-17,032	4,976	-19,353	5,408	-19,493	5,419
-19,503	5,450	-19,358	5,758	-19,434	5,809	-19,489	5,318
-19,445	6,066	-19,499	5,448	-19,499	5,418	-19,446	5,311

Fuente: Autores.

## 8.6 ANEXO F: Descripción de los métodos PSO, CFO, SADE y GSA.

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los métodos PSO, CFO, SADE, y GSA. Es importante aclarar que toda esta información fue tomada de [9].

### 8.6.1 Método de optimización PSO (PARTICLE SWARM OPTIMIZATION).

Este método se basa en el comportamiento social de los animales, ya sea como bandadas o enjambres. En el cual cada una de las partículas se

comunica entre sí para encontrar la mejor posición de acuerdo a la función objetivo. A continuación se muestran los parámetros usados en este método de optimización.

$c_1$  = Factor que determina el grado de influencia de la memoria de la partícula sobre ella misma.

$c_2$  = Factor que determina el grado de influencia del enjambre sobre la partícula.

*swarm size* = Tamaño del enjambre.

$w_{max}$  = Peso inicial.

$w_{min}$  = Peso final.

$iter_{max}$  = Número máximo de iteraciones.

### 8.6.2 Método de optimización CFO (CENTRAL FORCE OPTIMIZATION).

El CFO es un método de optimización que se basa en la analogía de la cinemática de las partículas en un campo gravitacional, definidas por las leyes de Newton. Este método presenta además una modificación, la cual se basa principalmente en la aceleración de las partículas. A continuación se mostrarán cada uno de los parámetros usados por este algoritmo.

$N_t$  = Número de iteraciones realizadas por el algoritmo.

$A_{max}$  = Es un valor que determina la aceleración del método, donde el valor de 1 hace alusión al CFO sin modificación.

$N_p$  = Número de sondas encargadas de la búsqueda.

$\alpha$  = Constante propia del algoritmo.

$\beta$  = Constantes propias del algoritmo.

$F_{rep}$  = Un valor entre 0 y 1 ajustado por el programador, el cual le permite a las partículas regresar a su espacio solución.

### 8.6.3 Método de optimización SADE (SELF-ADAPTIVE DIFFERENTIAL EVOLUTION).

El método de optimización SADE es una versión del DE, que es un método metaheurístico y estocástico que se basa en un algoritmo evolucionario para problemas de optimización global. En esta modificación, el establecimiento de los parámetros de control son adaptativos. A continuación se muestran los parámetros por los cuales se rige este método.

$\epsilon$  = Es un valor pequeño positivo, que se usa como criterio de parada.

$N$  = Número máximo de iteraciones.

$h$  = Número de

$F$  = Factor de diferenciación que toma valores entre [0,5 y 1].

CR = Constante aleatoria que puede tomar valores entre [0 y 1].

### 8.6.4 Método de optimización GSA (GRAVITATIONAL SELF ALGORITHM).

El método de optimización de GSA se basa en la ley de la gravedad de Newton. Este es un método bastante usado debido a sus buenas propiedades de convergencia, además de mostrar buenos resultados al momento de ser implementados en funciones matemáticas de pruebas en comparación con otros métodos. A continuación se muestran los parámetros usados para este algoritmo.

$G_0$  = Constante gravitacional inicial.

$\alpha$  = Constante gravitacional inicial.

$R_{norm}$  = Distancia euclideana entre dos agentes.

$iter_{max}$  = Número máximo de iteraciones.

### 8.7 ANEXO G: Ejemplos de absorbedores en la vida real

En la figura 48. Se puede observar las diferentes configuraciones físicas que pueden presentar los absorbedores electromagnéticos los cuales pueden ser de espuma o plásticos.

Figura 48. Diferentes presentaciones de los absorbedores E.M.



Fuente: EMERSON & CUMMING

La Figura 49. Muestra un absorbedor magnético el cual está compuesto con un relleno ferromagnético lo que da al absorbedor una alta permeabilidad y perdidas magnéticas. Este tipo de absorbedor tiene la ventaja de que tiene la

capacidad de comprimir en gran medida la longitud de onda en diseños muy delgados, la desventaja es que son costosos y pesados. La mayoría de diseños realizados en este trabajo de investigación utilizan este tipo de materiales.

Figura 49. Absorbedores elásticos magnéticos.



Fuente: EMERSON & CUMMING