

**IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE BUSQUEDA GRAVITACIONAL  
(GSA) PARA EL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNETICO  
ÓPTIMO**

**ALEJANDRO DAVID MIRANDA GUTIERREZ**

**JUAN DIEGO RUIZ RONCANCIO**

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

**BUCARAMANGA**

**2014**

**IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE BUSQUEDA GRAVITACIONAL  
(GSA) PARA EL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNETICO  
ÓPTIMO.**

**ALEJANDRO DAVID MIRANDA GUTIERREZ**

**JUAN DIEGO RUIZ RONCANCIO**

**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 TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

Al Eterno quien me guía en el camino y me hizo confiar en su promesa, a mis padres Jorge y Rocío, a mis hermanos, que siempre han confiado en mí y me dan fuerza cada día.

Juan Diego Ruiz Roncancio.

A mis padres Alejandro y Mónica, a mi hermano Juan David, por todo su amor, cariño, sacrificio y apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida y que me han permitido alcanzar este logro académico, les dedico a ellos este trabajo de grado.

Alejandro David Miranda.

## AGRADECIMIENTOS

A nuestro director y codirector, Carlos Rodrigo Correa e Iván Mauricio Amaya por su enorme colaboración, su constante atención, disposición y consejo en la elaboración de este trabajo de grado.

También deseamos agradecer a la señora Esmat Rashedi del departamento de ingeniería Eléctrica de Shahid Bahonar University, Irán, por su asesoramiento en la implementación del algoritmo de búsqueda.

## TABLA DE CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>18</b> |
| <b>1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO .....</b>  | <b>19</b> |
| 1.1 Planteamiento del problema.....  | 19        |
| 1.2 Objetivo general.....  | 19        |
| 1.3 Objetivos específicos.....   | 19        |
| <b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>   | <b>20</b> |
| 2.1 Terminología.....  | 20        |
| 2.1.1 Variables principales del programa.....  | 20        |
| 2.1.2 Leyes, definiciones y conceptos físicos.....   | 22        |
| 2.1.3 Análisis e interpretación de gráficos.....   | 23        |
| 2.2 Algoritmo de búsqueda gravitacional (GSA).....   | 26        |
| 2.3 Comunicaciones inalámbricas.....   | 31        |
| 2.4 Absorbedor electromagnético.....   | 32        |
| 2.5 Fundamentos teóricos de los absorbedores electromagnéticos.....                                  | 33        |
| <b>3 FUNCIONES DE PRUEBA .....</b>   | <b>35</b> |
| 3.1 Criterio de parada.....  | 38        |
| 3.2 Criterio de frontera.....  | 38        |
| 3.3 Parámetro $k_{best}$ .....   | 39        |
| 3.4 Número de agentes.....   | 41        |
| 3.5 Parámetro alfa, constante de gravedad.....   | 42        |
| 3.6 Parámetros seleccionados.....  | 44        |
| <b>4 APLICACIÓN DEL ALGORITMO EN EL DISEÑO DEL ABSORBEDOR ELECTROMAGNETICO MULTICAPA ÓPTIMO.....</b> | <b>45</b> |
| 4.1 Selección de frecuencias de trabajo.....   | 47        |
| 4.2 Diseño de absorbedor electromagnético de baja frecuencia.....                                    | 47        |
| 4.2.1 Diseño de prueba con GSA.....  | 47        |
| 4.2.2 Diseño absorbedor electromagnético de tres capas para baja frecuencia.....                     | 51        |
| 4.2.3 Diseño absorbedor electromagnético de cinco capas para baja frecuencia.....                    | 55        |
| 4.3 Diseño de absorbedor electromagnético de alta frecuencia.....                                    | 59        |
| 4.3.1 Diseño absorbedor electromagnético de tres capas para alta frecuencia.....                     | 59        |
| 4.3.2 Diseño absorbedor electromagnético de cinco capas para alta frecuencia.....                    | 63        |
| 4.4 Probabilidad de acierto.....   | 65        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.4.1    | Absorbedor de tres capas .....                    | 66        |
| 4.4.2    | Absorbedor de cinco capas .....                   | 69        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSIONES.....</b>                          | <b>72</b> |
| <b>6</b> | <b>RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....</b> | <b>74</b> |
|          | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                         | <b>75</b> |
|          | <b>ANEXOS .....</b>                               | <b>76</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Ejemplo de la evolución del agente Fbest respecto al tiempo.....   | 24 |
| Figura 2. Ejemplo del comportamiento del absorbedor sobre una banda de frecuencia .....  | 24 |
| Figura 3. Comportamiento en frecuencia de diseños de absorbedores electromagnéticos. ....                                      | 25 |
| Figura 4. Ejemplo de un histograma para una muestra de 30 datos.....   | 26 |
| Figura 5 Diagrama de flujo algoritmo GSA.[4] .....   | 30 |
| Figura 6 <i>Esquema general absorbedor N capas</i> .....   | 33 |
| Figura 7. <i>Función de Jong en 3D</i> . ....  | 36 |
| Figura 8. <i>Función de Schwefel en 3D</i> . ....  | 36 |
| Figura 9. <i>Función de Rastrigin en 3D</i> . ....   | 37 |
| Figura 10. Variación de G(t) con el aumento de la constante alfa. ....   | 44 |
| Figura 11. <i>Comportamiento en el dominio de la frecuencia, 0.85 – 2 GHz. Diseño de Prueba</i> .....                          | 49 |
| Figura 12. <i>Comportamiento de los absorbedores en el dominio de la frecuencia, 0.85 – 2 GHz. Diseño de Prueba</i> .....      | 51 |
| Figura 13. Diagrama de bloques del proceso en cascada. ....  | 52 |
| Figura 14. Comportamiento en baja frecuencia del diseño de tres capas.....   | 54 |
| Figura 15. <i>Comportamiento de los absorbedores en el dominio de la frecuencia, 0.85 – 2 GHz. Diseño de tres capas</i> . .... | 55 |
| Figura 16. Comportamiento en la frecuencia del diseño de cinco capas para baja frecuencia. ....                                | 58 |
| Figura 17. Comportamiento de los absorbedores, baja frecuencia, diseño de cinco capas .....                                    | 59 |
| Figura 18. Comportamiento en alta frecuencia diseño de tres capas. ....  | 62 |
| Figura 19. Comparación de resultados diseño de tres capas en alta frecuencia. ..   | 62 |
| Figura 20. Comportamiento en alta frecuencia del diseño de cinco capas .....   | 65 |
| Figura 21. Comparación de resultados (2 -8 GHz) .....  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22. Histograma, muestra de 30 datos. ....                                  | 67 |
| Figura 23. Probabilidad de acierto del algoritmo para absorbedor de tres capas .. | 68 |
| Figura 24. Histograma, muestra de 30 datos, absorbedor 5 capas. ....              | 70 |
| Figura 25. Valor Fbest, criterio de parada función Jong. ....                     | 79 |
| Figura 26. Valor Fbest, criterio de parada función Schwefel. ....                 | 80 |
| Figura 27. Valor Fbest, criterios de parada función Rastrigin. ....               | 80 |
| Figura 28. Alfa=20. ....  | 86 |
| Figura 29. Alfa=1. ....   | 87 |
| Figura 30. Alfa=inf. ....   | 87 |
| Figura 31. Go=1. ....   | 87 |
| Figura 32. Go=inf. ....   | 88 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Espectro electromagnético [5].   | 32 |
| Tabla 2. Funciones de prueba [10].  | 36 |
| Tabla 3. <i>Equipo de cómputo utilizado.</i>                                      | 37 |
| Tabla 4. Análisis resultados método I   | 38 |
| Tabla 5. Análisis resultados método II.   | 38 |
| Tabla 6. Criterio de frontera método I.   | 39 |
| Tabla 7. Criterio de frontera método II.  | 39 |
| Tabla 8. Resultados para Kbest_check= 1.  | 40 |
| Tabla 9. Resultados para Kbest_check= 0.  | 40 |
| Tabla 10. Desempeño GSA función de Jong para diferentes poblaciones.              | 41 |
| Tabla 11. Desempeño GSA función de Schwefel para diferentes poblaciones.          | 41 |
| Tabla 12. Desempeño GSA función de Rastrigin para diferentes poblaciones.         | 42 |
| Tabla 13. Variación del parámetro alfa.   | 42 |
| Tabla 14. Variación de Go.  | 43 |
| Tabla 15. Lista de materiales.  | 46 |
| Tabla 16. Resultados, Diseño de Prueba con GSA usando materiales fijos.           | 49 |
| Tabla 17. Comparación de resultados de la primera prueba.                         | 50 |
| Tabla 18. Datos comparativos para el absorbedor de tres capas. Diseño de prueba   | 50 |
| Tabla 19. Diseño uno absorbedor de tres capas para baja frecuencia.               | 53 |
| Tabla 20. Diseño de un absorbedor de tres capas para baja frecuencia.             | 54 |
| Tabla 21. Tabla comparativa absorbedores de tres capas, baja frecuencia.          | 55 |
| Tabla 22. Resultados de GSA para el absorbedor de cinco capas en baja frecuencia. | 57 |
| Tabla 23. Absorbedor de cinco capas para el rango de frecuencia (0.85GHz-2GHZ).   | 57 |
| Tabla 24. Características de los diseños de absorbedor de cinco capas.            | 58 |
| Tabla 25. Resultados del absorbedor de tres capas en alta frecuencia.             | 61 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 26. Diseño de tres capas en el rango de frecuencias de (2 -8 GHz).....                        | 61 |
| Tabla 27. Resultados diseño de tres capas para alta frecuencia.....                                 | 61 |
| Tabla 28. Resultados absorbedor de cinco capas para alta frecuencia.....                            | 64 |
| Tabla 29. Diseño para frecuencia especificada entre (2 GHz – 8 GHz) .....                           | 64 |
| Tabla 30. Análisis de resultados diseño de cinco capas. ....  | 64 |
| Tabla 31. Resultados arrojados por el algoritmo, absorbedor de tres capas para baja frecuencia..... | 66 |
| Tabla 32. Clases e intervalos del histograma absorbedor tres capas. ....                            | 67 |
| Tabla 33. Resultados arrojados por el algoritmo, para 30 ejecuciones, absorbedor 5 capas.....       | 70 |
| Tabla 34. Clases e intervalos del histograma, absorbedor cinco capas. ....                          | 70 |
| Tabla 35. Función de Jong. ....   | 76 |
| Tabla 36. Función de Schwefel.....  | 77 |
| Tabla 37. Función de Rastrigin. ....  | 77 |
| Tabla 38. Método I criterio de parada. ....   | 78 |
| Tabla 39. Método II criterio de parada. ....  | 79 |
| Tabla 40. Kbest_check=1 . ....  | 81 |
| Tabla 41. Kbest_check=0.....  | 82 |
| Tabla 42. Criterio de frontera método I. ....   | 83 |
| Tabla 43. Criterio de frontera método II. ....  | 83 |
| Tabla 44. <i>Absorbedor de tres capas para baja frecuencia</i> .....                                | 84 |
| Tabla 45. <i>Absorbedor de cinco capas para baja frecuencia</i> . ....                              | 84 |
| Tabla 46. <i>Absorbedor de tres capas para alta frecuencia</i> . ....                               | 85 |
| Tabla 47. <i>Absorbedor de cinco capas para alta frecuencia</i> . ....                              | 85 |
| Tabla 48. Diseños para tres capas.....  | 88 |
| Tabla 49. Diseños para cinco capas. ....  | 88 |

## LISTA DE ANEXOS

|   |    |
|---|----|
| ANEXO A. RESULTADOS GSA CON FUNCIONES DE PRUEBA. ....                 | 76 |
| ANEXO B. RESULTADOS DE PRUEBAS DE DISEÑO DE LOS<br>ABSORBEDORES. .... | 84 |
| ANEXO C. RESULTADOS DEL CAMBIO DE ALFA Y GO. ....                     | 86 |
| ANEXO D. DISEÑOS DE ABSORBEDORES CON GSA. ....                        | 88 |

## RESUMEN

**TÍTULO:** Implementación del algoritmo de búsqueda gravitacional (GSA) para el diseño de un absorbedor electromagnético óptimo.\*

**AUTORES:** Alejandro David Miranda Gutiérrez, Juan Diego Ruiz Roncancio.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Absorbedor electromagnético, coeficiente de reflexión, gravitación, optimización, convergencia.

### DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo de investigación se implementó un algoritmo de optimización en el diseño de un absorbedor electromagnético plano multicapa en el rango de frecuencias de las tecnologías inalámbricas (wireless). Para lograr este objetivo se usó un algoritmo heurístico conocido como Algoritmo de Búsqueda Gravitacional (GSA) desarrollado por Esmat Rashedi, Hossein Nezamabadi-pour, Saeid Saryazdi del departamento de ingeniería Eléctrica de Shahid Bahonar University, Irán, el cual se basa en la ley de gravedad y en la interacción de agentes o masas para encontrar mínimos o máximos globales en funciones de elevado grado de complejidad. Para el diseño del absorbedor se tendrán en cuenta parámetros como las dimensiones del dispositivo, los elementos que lo componen y su coeficiente de reflexión.

El informe está dividido en tres etapas. La primera parte consiste en la base teórica del algoritmo GSA y del absorbedor electromagnético, donde se mostraran sus principios y expresiones algebraicas. La segunda parte del informe se ajusta los parámetros del algoritmo GSA y se verifica su efectividad mediante funciones de prueba. Por último se presentan los resultados de evaluar la función objetivo del absorbedor multicapa en el algoritmo y se realiza un contraste con otros diseños elaborados mediante algoritmos de optimización.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Carlos Rodrigo Correa. Codirector: PhD(c) Iván Mauricio Amaya.

## ABSTRACT

**TITLE:** Implementation of gravitational search algorithm (GSA) for the optimal design of electromagnetic absorber.\*

**AUTHORS:** Alejandro David Miranda Gutiérrez, Juan Diego Ruiz Roncancio.\*\*

**KEYWORDS:** Electromagnetic absorber, reflection coefficient, gravitation, optimization, convergence.

### DESCRIPTION:

In the present investigation an optimization algorithm was implemented in the design of a multi-layer electromagnetic absorber in the frequency range of wireless technologies. To achieve this goal a heuristic algorithm called Gravitational Search Algorithm (GSA ) developed by Esmat Rashedi, Hossein Nezamabadi-pour, Saeid Saryazdi Department of Electrical Engineering of Shahid Bahonar University, Iran, which is based on the gravity law and the interaction of agents or masses to find global minimum or maximum of function with a high degree of complexity. For the design of the absorber is taken into account parameters such as the dimensions of the device, the component elements and its reflection coefficient.

The report is divided into three stages. The first part is the theoretical basis of the algorithm GSA and the electromagnetic absorber, where its principles and algebraic expressions will be shown. The second part of the report GSA algorithm parameters is adjusted and its effectiveness is verified by test functions. Finally the results of evaluating the objective function of the multilayer and absorber contrast algorithm is performed with other designs produced using optimization algorithms are presented. The results of the investigation of the GSA method for designing optimal electromagnetic absorber are presented in this paper.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Carlos Rodrigo Correa. Codirector: PhD(c) Iván Mauricio Amaya.

## INTRODUCCIÓN

Los problemas de compatibilidad electromagnética, CEM, se han convertido en foco de atención de investigaciones, y el estudio de los fenómenos de Interferencia Electromagnética, IEM, ha adquirido una importancia relevante en el diseño, desarrollo y el desempeño de los dispositivos. Día a día los sistemas electrónicos y de telecomunicaciones deben interactuar de forma satisfactoria sin producir perturbaciones que afecten a los demás dispositivos. Esto ha incrementado la demanda de elementos que absorban las ondas a diferentes frecuencias y uno de sus principales usos es en la construcción de cámaras anecóicas, que a su vez se utilizan para probar elementos de emisión o recepción como las antenas y para realizar pruebas de compatibilidad [4][12].

El presente informe resume la implementación de un algoritmo de optimización en el diseño de un absorbedor electromagnético. Para ello, es necesario minimizar el máximo coeficiente de reflexión en una banda de frecuencias dadas, así como las dimensiones del dispositivo. Sin embargo, estas dos características no son compatibles, lo que dificulta el proceso de optimización y por lo que se hace recomendable aplicar nuevas estrategias, como lo es el Gravitational Search Algorithm (GSA), que fue desarrollado por Esmat Rashedi, Hossein Nezamabadi-pour y Saeid Saryazdi, del departamento de ingeniería eléctrica de la universidad Shahid Bahonar de Kerman, en Irán [7]. Este informe de investigación muestra si es posible que las soluciones arrojadas por GSA sean comparables (en términos de velocidad de convergencia y costo computacional), con aquellas obtenidas por Central Force Optimization (CFO) [9], Particle Swarm Optimization (PSO) [8], y por Análisis de Intervalos [11]. Así mismo, se mostrarán diseños de absorbedores electromagnéticos multicapa en rangos de frecuencia determinados mediante la herramienta GSA y se contrastará con investigaciones previas.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO<sup>1</sup>

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un absorbedor electromagnético es un dispositivo que, idealmente, atenúa toda la energía que incide sobre él. Estos pueden ser construidos de muchas capas, con diversos tipos de materiales, y deben ser delgados, livianos y con un bajo coeficiente de reflexión para una amplia banda de frecuencias. Sin embargo, estas propiedades entran en conflicto. Es decir, un absorbedor delgado y ligero tendrá menor capacidad de absorción que uno cuyas capas sean más gruesas. Por tanto, realizar el diseño óptimo de un absorbedor electromagnético implica lograr un balance de todos los parámetros que afectan su desempeño (materiales y dimensiones) para lograr un mínimo coeficiente de reflexión para un rango de frecuencias determinado, proceso que puede tornarse complejo con métodos tradicionales debido a la presencia de variables continuas y discretas, así como restricciones y, en general, a la forma de la función objetivo.

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un absorbedor electromagnético óptimo mediante el método de optimización GSA (Gravitational Search Algorithm) algoritmo de búsqueda gravitacional.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar el algoritmo computacional GSA en Matlab.

---

<sup>1</sup> Corresponde a una contribución intelectual consensuada entre los estudiantes Alejandro Miranda y Juan Ruíz, con el profesor Rodrigo Correa y el ingeniero Iván Amaya.

- Diseñar un absorbedor electromagnético óptimo utilizando la herramienta computacional desarrollada y contrastar los resultados frente a algunos trabajos realizados por el grupo de investigación CEMOS.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 TERMINOLOGÍA

En esta sección se presentan los diferentes términos empleados en este trabajo de investigación.

#### 2.1.1 VARIABLES PRINCIPALES DEL PROGRAMA

**N:** Es el tamaño de la población o número de agentes.

**X:** Espacio de búsqueda.

**Up:** Es el límite superior en el espacio de la búsqueda.

**Down:** Es el límite inferior del espacio de búsqueda.

**Func:** Se utiliza para escoger la función objetivo del banco de funciones elaborado.

**Max\_it:** Número máximo de iteraciones. Posible criterio de parada

**R:** Distancia entre dos masas o agentes.

**Rnorm:** Tipo de función norma utilizada. Distancia euclidiana.

**Rpower:** Valor de elevación de la variable R.

**Max\_min**= Maximización o minimización. Dependiendo del tipo de problema el algoritmo necesita ser capaz de maximizar o minimizar la función objetivo.

**G**: Constante de gravedad. Decae con el tiempo desde su valor inicial, se usa para controlar la precisión de la búsqueda.

**fitness**: Guarda los valores de cada agente cuando son evaluados en la función objetivo.

**Best**: Guarda el mejor valor de fitness en cada iteración.

**Worst**: Guarda el peor valor de fitness en cada iteración.

**Best\_X**: Guarda la posición en X donde se encuentra el mejor agente.

**Fbest**: Guarda el mejor valor de todas la iteraciones.

**Lbest**: Guarda la posición del mejor agente de todas las iteraciones.

**V**: Velocidad.

**a**: Aceleración.

**E**: Fuerza.

**M**: Masa

**eps**: Constante pequeña para evitar la división por cero en el cálculo de la fuerza.

**Kbest:** Con el fin de mejorar la precisión del algoritmo y evitar caer en mínimos o máximos locales se emplea una estrategia donde solo los agentes con mayor masa aplican su fuerza a los otros. Los agentes con mayor masa es decir los que tienen mejor desempeño se representan con **Kbest** y disminuyen con el transcurso del tiempo.

**Tiempo de proceso:** Es el tiempo que gasta el algoritmo en obtener una respuesta.

### 2.1.2 LEYES, DEFINICIONES Y CONCEPTOS FÍSICOS.

**Ley de gravedad:** En la ley de gravedad una partícula atrae a otra con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional a la distancia entre ellas [7].

$$F_{ij} = G * \frac{M_1 * M_2}{R^2} \quad (1)$$

**Ley de movimiento:** La velocidad actual de una partícula o masa es igual a la suma de de una fracción de la velocidad previa con la aceleración actual. La aceleración de cualquier partícula o masa es igual a la fuerza que actúa en el sistema dividida entre la masa inercial [7]. La ecuación ( 2) y ( 3) ilustran esta ley.

$$v_i^d(t + 1) = rand_i * v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (2)$$

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (3)$$

**Masa gravitacional activa:** Es una medida de la fuerza de un campo gravitacional debido a un objeto. Todo cuerpo con masa tiene su propio campo gravitacional, objetos con masas pequeñas tienen un campo gravitacional débil comparado al

campo generado por objetos con grandes masas. La masa activa es la que crea el campo.

**Masa gravitacional pasiva:** Es una medida de la fuerza con la que interactúa un objeto ante la presencia de un campo gravitacional, es decir, dado un campo gravitacional objetos con diferentes masas se comportaran de forma distinta, objetos con masas pequeñas experimentan fuerzas pequeñas, caso contrario con objetos con grandes masas. La masa pasiva es la que se acelera ante la presencia de un campo gravitacional.

**Masa inercial:** Es la medida de la resistencia de un objeto al cambio de su estado de movimiento cuando se le aplica una fuerza. Un objeto con mucha masa inercial cambia su estado de movimiento de forma lenta y objetos con masa inercial pequeña lo hacen rápidamente.

### 2.1.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE GRÁFICOS

Este trabajo de investigación presenta esencialmente tres tipos de gráficas. Una de ellas ilustra la evolución del algoritmo GSA, la otra muestra la respuesta en frecuencia de los absorbedores electromagnéticos, y la última emplea histogramas para observar la tendencia de un grupo de datos. A continuación se mostrará la forma de leer e interpretar las figuras.

GSA almacena el valor del agente (también llamado masa) con mejor desempeño, llamado  $F_{best}$ , en cada iteración (sección 2.2). Las masas tienden a ubicarse en las vecindades de una buena solución y se mueven constantemente alrededor de ella hasta que se encuentra el óptimo de la función objetivo o hasta que se cumpla el criterio de parada. La Figura 1 muestra el comportamiento de  $F_{best}$  a medida que transcurren las iteraciones, con lo que puede llegar a determinarse si el algoritmo se está estancando o si está mejorando.

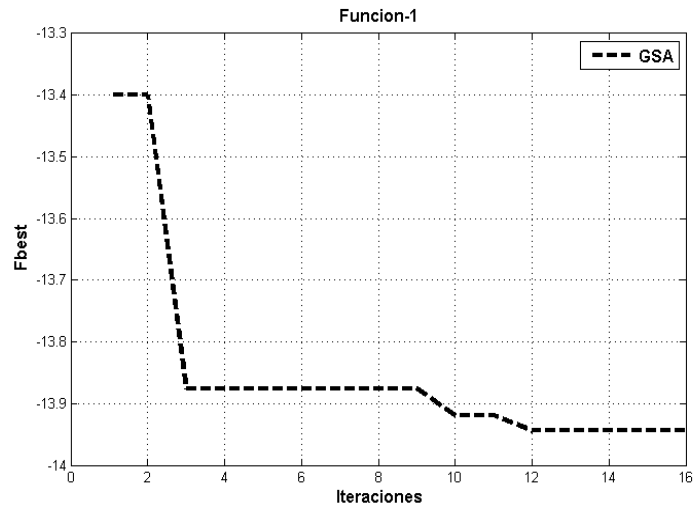


Figura 1. Ejemplo de la evolución del agente Fbest respecto al tiempo.

El segundo tipo de gráficas (Figura 2) representa el comportamiento del absorbedor electromagnético para un rango de frecuencias (capitulo 4). En las abscisas se indican las frecuencias de operación y en las ordenadas su correspondiente coeficiente de reflexión. En la gráfica se visualiza el coeficiente de reflexión máximo, mínimo y el promedio.

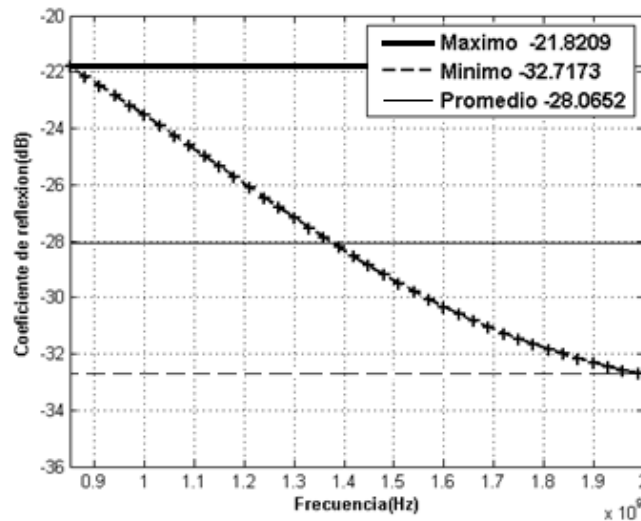


Figura 2. Ejemplo del comportamiento del absorbedor sobre una banda de frecuencia

Para poder interpretar el comportamiento en frecuencia de un absorbedor electromagnético se deben tener en cuenta varios aspectos, como el punto máximo y el punto mínimo. Por ejemplo, en la Figura 2 se señala con líneas continuas el coeficiente de reflexión mínimo, el máximo y el promedio. Teniendo en cuenta lo anterior se pueden realizar comparaciones de diseños y examinar cuál de ellos posee mejores prestaciones. Considere por ejemplo los diseños de la Figura 3, donde se muestra que el absorbedor propuesto por GSA garantiza un máximo coeficiente de reflexión de -21 dB aproximadamente, mientras que el de CFO es de -28dB y el de PSO está alrededor de -22 dB. Por tanto, el diseño propuesto por CFO es mejor a los demás, pues tiene un coeficiente de reflexión máximo menor.

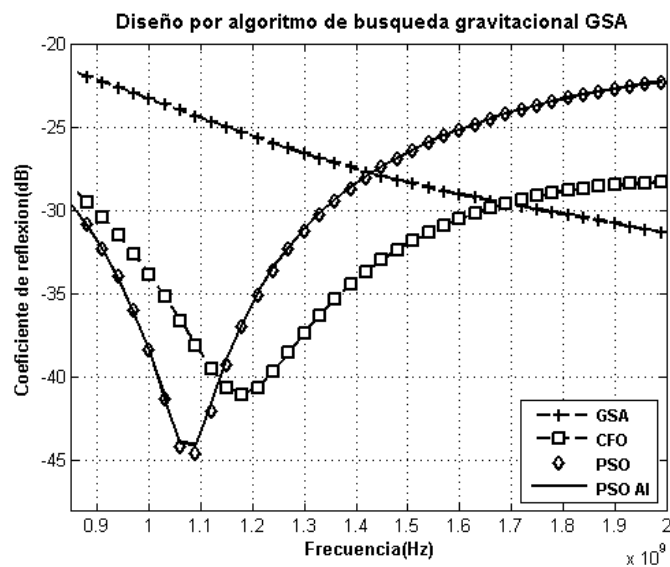


Figura 3. Comportamiento en frecuencia de diseños de absorbedores electromagnéticos.

Ahora para cada diseño de absorbedor tendremos una muestra de datos dispersos que resultan difíciles de leer, por lo que se usan histogramas para organizarlos y presentarlos en forma compacta.

Para construir un histograma se divide el intervalo total o rango (diferencia del valor máximo y mínimo) en subintervalos de igual amplitud llamados clases.

Luego, se ubica el número de veces en los que un dato de la muestra cae en el rango de una clase (Figura 4).

Una aproximación para determinar el número de intervalos está dada por la ecuación (4) y la amplitud de cada clase por la ecuación (5), donde  $k$  corresponde al número de clases, y  $A$  es la amplitud de cada clase [3].

$$k = 1 + 3.3 \log (\text{numero de datos}) \quad (4)$$

$$A = \frac{\text{Rango}}{k} \quad (5)$$

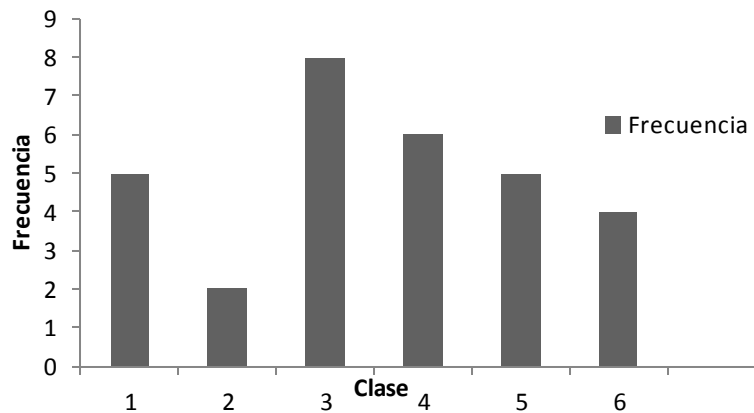


Figura 4. Ejemplo de un histograma para una muestra de 30 datos.

## 2.2 ALGORITMO DE BÚSQUEDA GRAVITACIONAL (GSA)

En esta sección se presenta el algoritmo de optimización basado en la ley de gravedad. Los agentes son considerados como objetos y su desempeño o rendimiento es medido por su masa. Todos los agentes son atraídos los unos a los otros por la fuerza de gravedad, y de forma global la gravedad provoca el

movimiento de los objetos a aquellos que poseen mayor masa. Los objetos más masivos, que corresponden a buenas soluciones, se mueven más lentamente que los ligeros, con lo cual se asegura la habilidad del algoritmo de encontrar las soluciones más adecuadas u optimas alrededor de los máximos o mínimos globales del espacio de búsqueda.

En GSA, cada masa (agente) tiene cuatro especificaciones: posición, masa inercial, masa gravitacional activa y masa gravitacional pasiva. La posición de las masas corresponde a la solución del problema, y sus masas inerciales y gravitacionales se determinan usando la función de desempeño.

El algoritmo de búsqueda gravitacional se describe a continuación [7]:

En primer lugar se considera un sistema de  $n$  agentes y  $d$  dimensiones donde sus posiciones están descritas en la ecuación (6).

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \text{ Para } i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Este sistema de agentes es evaluado en la función objetivo ( $fit$ ), y de esta función se extrae o calcula los mejores y peores valores ( $best$  y  $worst$  respectivamente) para los dos casos: maximización o minimización. La ecuación (7) y la ecuación (8) muestran las expresiones para el segundo caso, mientras que (9) y (10) corresponden al primero.

$$best(t) = \min_{j \in \{1 \dots N\}} fit_j(t) \quad (7)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1 \dots N\}} fit_j(t) \quad (8)$$

$$best(t) = \max_{j \in \{1 \dots N\}} fit_j(t) \quad (9)$$

$$worst(t) = \min_{j \in \{1 \dots N\}} fit_j(t) \quad (10)$$

Luego de esto, se determina un sistema de masas de la función objetivo. Un agente más masivo representa un resultado más eficiente, lo que significa que un agente pesado presenta mayor atracción y se mueve más despacio [7]. El sistema de masas está determinado por las expresiones:

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

donde se asume que la masa gravitacional (activa y pasiva) y la masa inercial son iguales.

$$M_i = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (12)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_i(t)} \quad (13)$$

Como paso siguiente, se halla la fuerza entre los agentes mediante:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) * \frac{M_{pi}(t) * M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} * (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (14)$$

Donde  $M_{aj}$  es la masa gravitacional activa del agente  $j$ ,  $M_{pi}$  es la masa gravitacional pasiva del agente  $i$ ,  $G(t)$  es la constante gravitacional en el tiempo ' $t$ ', ' $\epsilon$ ' es una pequeña constante, y  $R_{ij}$  es la distancia Euclidiana entre los agentes ' $i$ ' y ' $j$ ' [3]. Se asume que  $M_{aj}$  y  $M_{pi}$  son iguales a la masa gravitacional inercial  $M_i$  (ver ecuación (11)) [7].

$$R_{ij}(t) = \| X_i(t), X_j(t) \| \quad (15)$$

La constante gravitacional,  $G$ , es inicializada en el inicio y se reduce con el tiempo para controlar la precisión de la búsqueda. En otras palabras, es una función del valor inicial ( $G_0$ ) y tiempo ( $t$ ).

$$G(t) = G(G_0, t) = G_0 * e^{-\alpha \frac{t}{T}}. \quad (16)$$

Para dar características estocásticas al algoritmo, se supone que la fuerza total que actúa en el agente  $i$  en una dimensión  $d$  sea la suma ponderada aleatoria de las fuerzas ejercidas por los otros agentes.

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (17)$$

donde  $rand_j$  es un numero aleatorio en el intervalo  $[0,1]$ .

Por la ley de movimiento, la aceleración del agente  $i$  en el tiempo  $t$  y en la dimensión  $d$ ,  $a_i^d(t)$  está dada por la siguiente fórmula:

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_i^d(t)} \quad (18)$$

Donde  $M_{ij}(t)$  es la masa inercial del  $i$ -ésimo agente.

Además la velocidad de un agente es considerada como una razón entre su velocidad actual sumada a su aceleración [7]. Por lo tanto la posición y velocidad puede ser calculada como:

$$v_i^d(t+1) = rand_i * v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (19)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (20)$$

Se puede controlar la interacción de la fuerza ejercida sobre una partícula o agente, mediante el valor  $Kbest$ . Este valor hace referencia a los agentes con mejor desempeño (mayor masa). Así mismo, la ecuación (17) puede reescribirse como sigue:

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in Kbest, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (21)$$

En la Figura 5 se observa el diagrama de flujo del algoritmo GSA [7].

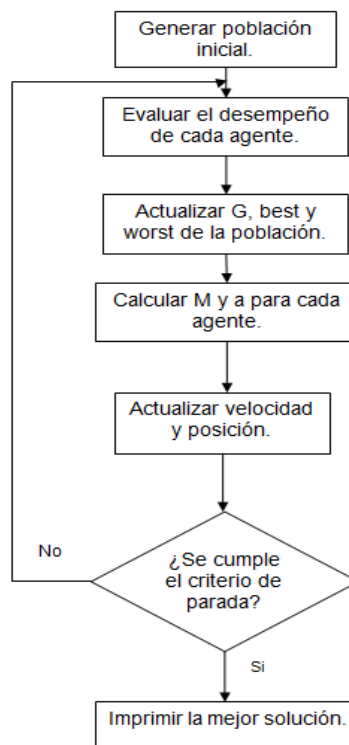


Figura 5 Diagrama de flujo algoritmo GSA.[7]

Los pasos del algoritmo (de forma resumida) son entonces:

1. Identificar el espacio de búsqueda.
2. Inicializar aleatoriamente las posiciones de los agentes
3. Evaluar el desempeño de cada agente
4. Actualizar  $G(t), best(t), worst(t)$  y  $M_i$
5. Calcular la fuerza total experimentada por cada agente.
6. Calcular aceleración y velocidad.
7. Actualizar la posición de los agentes.
8. Volver al paso 3 hasta cumplir la condición de parada.
9. Fin.

### 2.3 COMUNICACIONES INALÁMBRICAS.

Las comunicaciones inalámbricas se utilizan de manera amplia en la actualidad. Éstas se basan en las leyes o fenómenos electromagnéticos de la naturaleza. Las ondas electromagnéticas (OEM) se producen debido a la interacción de los campos eléctricos y magnéticos entre sí. Dichos campos son perpendiculares entre ellos y también son perpendiculares a la dirección de propagación.

Las OEM se encuentran clasificadas según su frecuencia o longitud de onda, en lo que se conoce como espectro electromagnético; dentro de este, se encuentran por ejemplo las ondas de radio, las microondas, los rayos x, el infrarrojo, etc. [9]. En la Tabla 1 se observa la distribución del espectro electromagnético y las diferentes aplicaciones en la actualidad.

| Banda | Significado          | Rango frecuencia | Servicios                   |
|-------|----------------------|------------------|-----------------------------|
| VLF   | Muy baja frecuencia. | 3kHz-30kHz       | Conducción de electricidad. |

|              |                                 |                    |  |
|--------------|---------------------------------|--------------------|--|
| LF           | Baja frecuencia.                | 30kHz-300kHz       | Conducción de electricidad, navegación marítima, control de tráfico aéreo. |
| MF           | Frecuencia media.               | 300kHz-3MHz        | Radio AM.  |
| HF           | Alta frecuencia.                | 3MHz-30MHz.        | Radio SW.  |
| VHF          | Muy alta frecuencia.            | 30MHz-300MHz.      | Radio FM, TV, radio dos vías.  |
| UHF          | Ultra alta frecuencia.          | 300MHz-3GHz        | TV UHF, telefonía celular, WLL, comunicaciones móviles.                    |
| SHF          | Frecuencia súper alta.          | 3GHz-30GHz         | Servicios por satélite y microondas, MMDS, LMDS                            |
| EHF          | Frecuencia extremadamente alta. | 30GHz en adelante. | LMDS   |
| Infrarrojo   |                                 | 300 GHz -384 THz   | WPANs  |
| Luz visible  |                                 | 450 THz - 750 THz  | Fibras ópticas.  |
| Ultravioleta |                                 | 789 THz – 30 PHz   |  |

Tabla 1.Espectro electromagnético [9].

## 2.4 ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO.

Un absorbedor electromagnético es un dispositivo que atenúa, idealmente, toda onda electromagnética que incida en él. En un absorbedor electromagnético son importantes dos parámetros, el índice de reflexión y su composición.

Las propiedades de los absorbedores hacen que sean muy utilizados en la construcción de cámaras anecoicas, que son empleadas por grandes compañías de telecomunicaciones para realizar pruebas de compatibilidad electromagnética (EMC), medir pruebas de radiación en antenas, sección de radar equivalente (RCS), prevenir falsas imágenes del mástil de un buque, prevenir las “Ghost TV”, mejorar los ambientes de comunicaciones ETC (Electronic Toll Collection System) y prevenir interferencias entre las vías de las mismas [8], [5].

## 2.5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS ABSORBEDORES ELECTROMAGNÉTICOS.

Un absorbedor multicapa dispuesto sobre un conductor perfecto puede ser simplificado como se muestra en la Figura 6. Sobre el dispositivo incide una onda electromagnética de forma perpendicular.

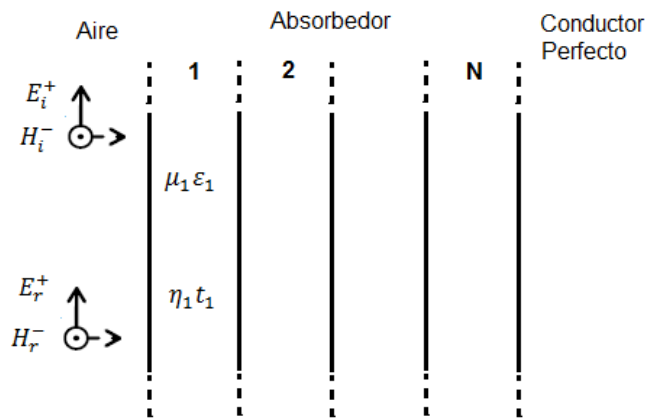


Figura 6 Esquema general absorbedor  $N$  capas

En cada una de las capas intermedias, existe una onda progresiva y una regresiva,  $(E_i^+, H_i^+)$  y  $(E_r^-, H_r^-)$ . El campo eléctrico total para cada región se convierte en:

$$E_x(Z) = E_i^+ e^{-\gamma Z} + E_r^- e^{-\gamma Z} \quad (22)$$

$$= E_i^+ e^{-\gamma Z} \left[ 1 + \frac{E_r^-}{E_i^+} e^{-2\gamma Z} \right] = E_i^+ e^{-\gamma Z} [1 + \Gamma(Z)] \quad (23)$$

Donde  $\Gamma(Z)$  es el coeficiente de reflexión en cualquier punto de la región  $z$ , y la relación entre la onda reflejada y la onda incidente es:

$$\Gamma(Z) = \frac{E_r^-}{E_i^+} e^{-\gamma Z} \quad (24)$$

El correspondiente campo magnético es:

$$H_y(Z) = H_i^+ e^{-\gamma Z} + H_r^- e^{-\gamma Z} \quad (25)$$

$$= E_i^+ e^{-\gamma Z} \left[ 1 - \frac{E_r^-}{E_i^+} e^{-2\gamma Z} \right] = \frac{E_i^+}{\eta} e^{-\gamma Z} [1 - \Gamma(Z)] \quad (26)$$

La impedancia total del campo  $z(z)$  se define para cualquier localización 'z' como la razón del campo eléctrico total (22) por el campo magnético (25).

$$z(z) = \frac{E_x(Z)}{H_y(Z)} = \eta \cdot \frac{1 + \Gamma(Z)}{1 - \Gamma(Z)} \quad (27)$$

$$\Gamma(z) = \frac{z(z) - \eta}{z(z) + \eta} \quad (28)$$

El coeficiente de reflexión  $R$  en la interface ( $z=0$ ) entre el aire y el absorbedor es

$$R(f) = \frac{Z_1 - \eta_0}{Z_1 + \eta_0} \quad (29)$$

De acuerdo a las ecuaciones de línea de transmisión se obtiene la impedancia del campo total  $z_1$  así:

$$Z_1 = \eta_1 \frac{Z_2 + jZ_1 \tan(\beta_1 t_1)}{\eta_1 + jZ_2 \tan(\beta_1 t_1)} \quad (30)$$

Podemos expresar  $z_k$  usando la fórmula de iteración de la siguiente manera:

$$Z_k = \begin{cases} \frac{Z_{k+1} + j\eta_k \tan(\beta_k t_k)}{\eta_k + jZ_{k+1} \tan(\beta_k t_k)} & \text{para } k < n \\ j\eta_n \tan(\beta_n t_n) & \text{para } k = n \end{cases} \quad (31)$$

donde  $\eta_k$  es la impedancia de la onda de la  $k$ -ésima capa y  $\beta_k$  es la constante de fase dada por:

$$\eta_k = \sqrt{\frac{\mu_k}{\epsilon_k}} \quad (32)$$

$$\beta_k = \omega \sqrt{\mu_k \epsilon_k} = 2\pi f \sqrt{\mu_k \epsilon_k} \quad (33)$$

El diseño del absorbedor está definido como un problema de minimización de la cantidad  $R$  (expresada en dB), dada por:

$$RL = 20 \log \{ \max |R(f)|, f \in \beta \} \quad (34)$$

Donde  $\beta = \{f_{min}, f_2, f_2, \dots, f_{N-1}, f_{max}\}$  es la banda de frecuencias [5].

### 3 FUNCIONES DE PRUEBA

Para comprobar el correcto funcionamiento y realizar una calibración del algoritmo se emplean tres funciones de prueba. La función de Jong, la de Schwefel, y la función de Rastrigin. Las características de estas funciones se muestran en la Tabla 2. Se utiliza GSA para encontrar el mínimo global de estas funciones y se cambian los parámetros del algoritmo para observar los resultados [13].

| Función  | Ecuación                                       | Mínimo global                             | Coordenadas                            | Características    |
|----------|--|---|--|--------------------|
| Jong     | $f(x) = \sum_{i=1}^n X_i^2$                    | $f(x) = 0$<br>rango(-5.12,5.12)           | $X_i = 0,$<br>$i = 1, \dots, n$        | Unimodal, convexa. |
| Schwefel | $\sum_{i=1}^n (-X_i \text{sen}(\sqrt{ X_i }))$ | $f(x) = -418.9829 * n$<br>rango(-500,500) | $X_i = 420.9687,$<br>$i = 1, \dots, n$ | Multimodal         |

|                  |  |   |                                 |            |
|------------------|--|---|---------------------------------|------------|
| <b>Rastrigin</b> | $f(x) = 10 * n + \sum_{i=1}^n (X_i^2 - 10 * \cos(2\pi X_i))$ | $f(x) = 0$<br><i>rango</i> (-5.12,5.12) | $X_i = 0,$<br>$i = 1, \dots, n$ | Multimodal |
|------------------|--|---|---------------------------------|------------|

Tabla 2. Funciones de prueba [13].

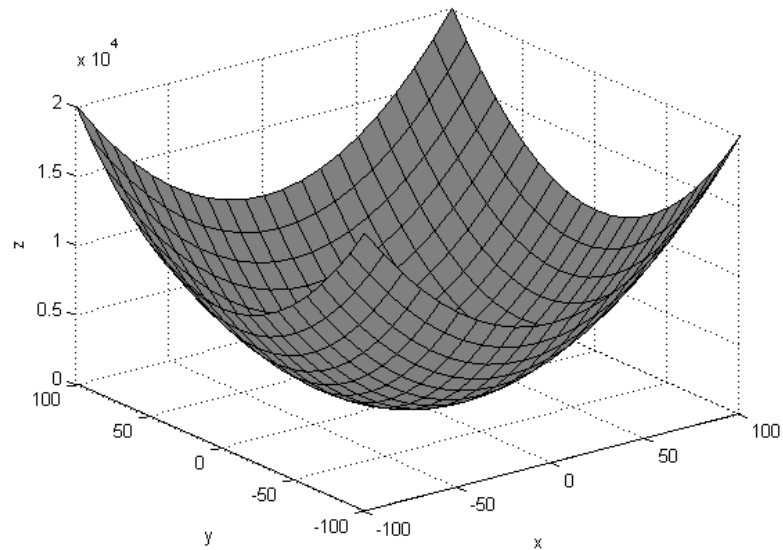


Figura 7. Función de Jong en 3D.

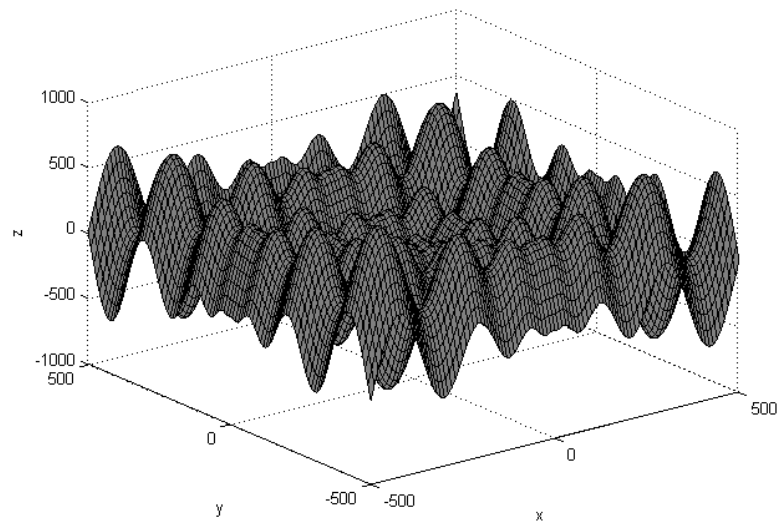


Figura 8. Función de Schwefel en 3D.

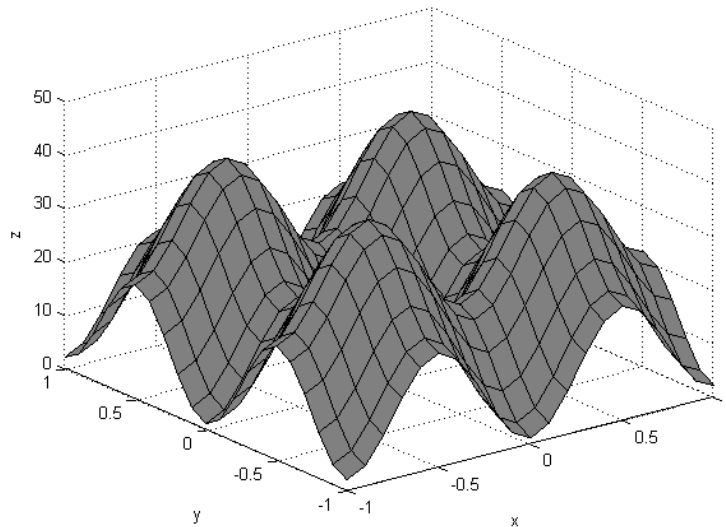


Figura 9. Función de Rastrigin en 3D.

Con el fin de verificar el desempeño se ejecuta 10 veces el algoritmo se evalúan algunas variables representativas tales como el Fbest promedio, la dispersión de los datos y el tiempo de ejecución total. El estudio de estas variables se usará para hacer una adecuada selección de los parámetros del GSA.<sup>2</sup>

El algoritmo se implementó en la plataforma del software de Matlab [1] y se ejecuta en un computador personal de las características mostradas en la Tabla 3.

| Equipo de computo |                                     |
|-------------------|-------------------------------------|
| Procesador        | Intel® Core™ i5-2410M CPU @ 2.30GHz |
| Memoria RAM       | 4.00GB                              |
| Alimentación      | Conectado a la red                  |
| Plan de energía   | Alto rendimiento                    |

Tabla 3. Equipo de cómputo utilizado.

<sup>2</sup> Los resultados de la ejecución con funciones de prueba se encuentran en el anexo A (sección 0).

### 3.1 CRITERIO DE PARADA

Para la selección del criterio de parada se implementan dos métodos. En el primero, el usuario determina el número de veces que el algoritmo se ejecuta (numero de iteraciones, max\_it=100), mientras que en el segundo se observa los cambios de la mejor solución encontrada hasta el momento. Cuando la solución—Fbest—no presenta cambios superiores a un umbral establecido (0.000001%) el algoritmo detiene su búsqueda.

La Tabla 4 y Tabla 5 resumen los resultados encontrados al utilizar los diferentes criterios de parada. Como se observa, ambas soluciones son cercanas, y los resultados tienen poca dispersión. Por otro lado, el tiempo total de ejecución disminuye de forma significativa cuando se usa el Método II<sup>3</sup>. Por tanto, se escoge el Método II como criterio de parada.

| FUNCION   | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACIÓN  |
|-----------|------------|-----------------|-------------|
| JONG      | 38,844748  | 2,56007E-04     | 6,32912E-04 |
| SCHWEFEL  | 39,015630  | -692,54246      | 9,52383E+01 |
| RASTRIGIN | 39,574961  | 5,33598E-01     | 5,09493E-01 |

Tabla 4. Análisis resultados método I

| FUNCION   | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACION  | ITERACIONES |
|-----------|------------|-----------------|-------------|-------------|
| JONG      | 8,058539   | 1,01862E-04     | 1,60848E-04 | 27          |
| SCHWEFEL  | 10,561299  | -716,2186       | 9,62174E+01 | 15          |
| RASTRIGIN | 9,122895   | 3,64015E-01     | 6,71202E-01 | 31          |

Tabla 5. Análisis resultados método II.

### 3.2 CRITERIO DE FRONTERA

<sup>3</sup> En el anexo A (sección 0), se ilustra la evolución de GSA con respecto al tiempo para los dos métodos, allí se observa que el mínimo global es localizado rápidamente durante las primeras iteraciones.

La frontera son los límites de operación del algoritmo. En ciertas ocasiones los agentes se salen de los límites establecidos y es necesario devolverlos al espacio de búsqueda válido. Se realizaron pruebas sobre dos posibles métodos que dan solución a este inconveniente.

- Método I: Posicionar los agentes donde se encuentra el Fbest actual, es decir si un agente es encontrado fuera de la frontera, entonces entra al espacio de búsqueda en la posición donde se encuentra localizado la partícula con mayor masa (7), (9).
- Método II: Los agentes retornan al espacio de búsqueda válido de forma aleatoria.

Al ejecutar pruebas con las tres funciones, se observan mejoras en el valor promedio de Fbest y en la precisión del algoritmo—medida por la desviación estándar—por lo que las partículas se reintegrarán usando el Método I (la Tabla 6 y la Tabla 7 muestran los resultados).

| FUNCIÓN   | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACIÓN  |
|-----------|------------|-----------------|-------------|
| JONG      | 40,94000   | 1,36627E-04     | 1,61176E-04 |
| SCHEWEFEL | 40,37000   | -731,2555       | 7,82309E+01 |
| RASTRIGIN | 38,81000   | 1,74350E-01     | 3,63637E-01 |

Tabla 6. Criterio de frontera método I.

| FUNCIÓN   | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACIÓN  |
|-----------|------------|-----------------|-------------|
| JONG      | 39,29000   | 1,05809E-04     | 1,57828E-04 |
| SCHEWEFEL | 39,49000   | -683,6343       | 1,04942E+02 |
| RASTRIGIN | 39,5000    | 1,06107E-02     | 2,08116E-02 |

Tabla 7. Criterio de frontera método II.

### 3.3 PARÁMETRO KBEST

Una técnica propuesta por los autores de GSA, [7] busca reducir el riesgo de quedar atrapado en óptimos locales, consiste en calcular la fuerza total sobre cada masa usando solo los agentes con mayor desempeño. *kbest* es un conjunto de

agentes con la mayor masa, y es función del tiempo. Inicialmente, toma un valor igual a la población y decrece con el tiempo de forma lineal. Así, en la primera iteración todos los agentes se atraen mutuamente y eventualmente solo un agente atrae a los demás (ecuación (21)).

La variable *Kbest\_check* (sección 2.1.1) permite al usuario elegir el comportamiento de *Kbest*: cuando *Kbest\_check* es 0 toda la población ejerce fuerza sobre cada masa, y el número de agentes *Kbest* será igual a *N*. Cuando *Kbest\_check* es igual a 1 solo los agentes con mejor desempeño podrán atraer a los otros, el valor inicial de los agentes *Kbest* será *N* (toda la población) y su número decrecerá con el tiempo.

Se ejecuta el algoritmo para las funciones de prueba mediante los dos métodos y se observan los resultados en la Tabla 8 y Tabla 9.

| FUNCION   | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACIÓN  |
|-----------|------------|-----------------|-------------|
| JONG      | 10,226984  | 2,97451E-04     | 5,15913E-04 |
| SCHEWEL   | 10,428589  | -704,0826       | 7,03589E+01 |
| RASTRIGIN | 10,532785  | 2,88321E-01     | 4,66851E-01 |

Tabla 8. Resultados para *Kbest\_check*= 1.

| FUNCION   | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACIÓN  |
|-----------|------------|-----------------|-------------|
| JONG      | 10,428.423 | 4,01403E-04     | 5,70106E-04 |
| SCHWEL    | 10,444.677 | -713,77046      | 1,17295E+02 |
| RASTRIGIN | 10,684.581 | 1,93604E-01     | 3,88374E-01 |

Tabla 9. Resultados para *Kbest\_check*= 0.

Para la selección de los parámetros del algoritmo la variable *kbest\_check* será ajustada en 1, por lo que se usaran el conjunto de agentes *kbest* para el cálculo de la fuerza total

### 3.4 NÚMERO DE AGENTES.

Para determinar el número adecuado de agentes o masas involucrados en el proceso de optimización, se realizaron pruebas con diferentes tamaños de población (baja, media y alta)<sup>4</sup> [10].

- POBLACION I: 20 agentes.
- POBLACION II: 50 agentes.
- POBLACION III: 100 agentes.

Se escoge una población de agentes alta, ya que los resultados arrojados por el algoritmo muestran que la dispersión de los datos disminuye y Fbest aumenta (ver Tabla 10 y Tabla 11).

- Función de Jong: Función unimodal, convexa, continua.

| POBLACION | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACIÓN |
|-----------|------------|-----------------|------------|
| N=20      | 1,969.578  | 3,915681E-04    | 7,052E-04  |
| N=50      | 10,226.984 | 2,974515E-04    | 5,159E-04  |
| N=100     | 38,583.407 | -1,666703E-03   | 1,189E-02  |

Tabla 10. Desempeño GSA función de Jong para diferentes poblaciones.

- Función de Schwefel: Función multimodal.

| POBLACION | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACIÓN |
|-----------|------------|-----------------|------------|
| N=20      | 2,044830   | -580,043596     | 109,472466 |
| N=50      | 10,428589  | -704,082608     | 70,358923  |
| N=100     | 39,075377  | -771,844151     | 52,203645  |

Tabla 11. Desempeño GSA función de Schwefel para diferentes poblaciones.

- Función de Rastrigin: Función multimodal.

| POBLACION | TIEMPO (s) | PROMEDIO F_BEST | DESVIACIÓN  |
|-----------|------------|-----------------|-------------|
| N=20      | 2,049265   | 5,61376E-01     | 6,72214E-01 |
| N=50      | 10,532785  | 2,88321E-01     | 4,66851E-01 |
| N=100     | 39,045385  | 1,53288E-02     | 4,32125E-02 |

<sup>4</sup> Para ver las tablas de resultados de las funciones de prueba, remítase al anexo A (sección 0).

Tabla 12. Desempeño GSA función de Rastrigin para diferentes poblaciones.

### 3.5 PARÁMETRO ALFA, CONSTANTE DE GRAVEDAD.

En GSA la fuerza de gravedad cumple el rol de comunicador, y gracias a ella un agente puede percibir el desempeño e interactuar con los demás agentes. Su magnitud está determinada por la constante de gravedad,  $G$ , la cual se inicializa y se actualiza en cada iteración. Durante las primeras iteraciones permite un sondeo del espacio de búsqueda para encontrar potenciales soluciones y de esta forma evita quedar atrapado en óptimos locales. Estos primeros momentos son conocidos como la etapa de exploración.

A medida que transcurre el tiempo, la constante de gravedad se reduce de forma exponencial, e inicia la etapa de explotación, en la que los agentes intentan encontrar el valor óptimo alrededor de una buena solución. La forma como se actualiza la constante de gravedad está dada por la ecuación (16), donde  $\alpha$  y  $G_0$  son constantes dadas. Para la ejecución del algoritmo con funciones de prueba se toma  $\alpha$  y  $G_0$  igual a 20 y 100, respectivamente, basados en [7]. Para observar el comportamiento de GSA ante cambios realizados en estos parámetros se realizan los siguientes ensayos con la función de Rastrigin<sup>5</sup>.

#### Variación de alfa:

- Para alfa = 20 y Go = 100.
- Para alfa = 1000 y Go = 100.
- Para alfa = 1 y Go = 100.

| Alfa | Go  | Fbest      |
|------|-----|------------|
| 20   | 100 | 8,66828E-5 |
| 1    | 100 | 0,76915625 |
| 1000 | 100 | 4,8823301  |

Tabla 13. Variación del parámetro alfa.

<sup>5</sup> Los resultados de las pruebas de variación de alfa y Go se encuentran en el anexo C (sección 0).

### Variación de Go:

- Para alfa = 20 y Go = 1.
- Para alfa = 20 y Go = 100.
- Para alfa = 20 y Go = 1000.

| Alfa | Go   | Fbest      |
|------|------|------------|
| 20   | 100  | 8,66828E-5 |
| 20   | 1    | 0,00233770 |
| 20   | 1000 | 4,29622897 |

Tabla 14. Variación de Go.

De las pruebas se puede decir que:

El valor de  $\alpha$  en la función constante de gravedad en el tiempo (16) afecta la velocidad de decrecimiento como se observa en la Figura 10. De la Tabla 13 y Tabla 14 se observa que un aumento en el valor de las constantes hace que Fbest se aleje del mínimo global (refiérase al mínimo global de la función de Rastrigin de la Tabla 2). Por otro lado si se determinan valores pequeños para las constantes el Fbest está cercano al mínimo global pero no tanto como con los valores sugeridos por los autores ( $\text{alfa}=20, \text{Go}=100$ )[7]. En la ejecución del algoritmo se observa también que el aumento de  $\alpha$  disminuye el tiempo de cómputo, pero Fbest no es el esperado. En términos del algoritmo, significa que la exploración y la explotación se ven perjudicadas. [7]. La Figura 10 muestra la variación de la fuerza de gravedad en el tiempo al realizar un cambio en la constante alfa.

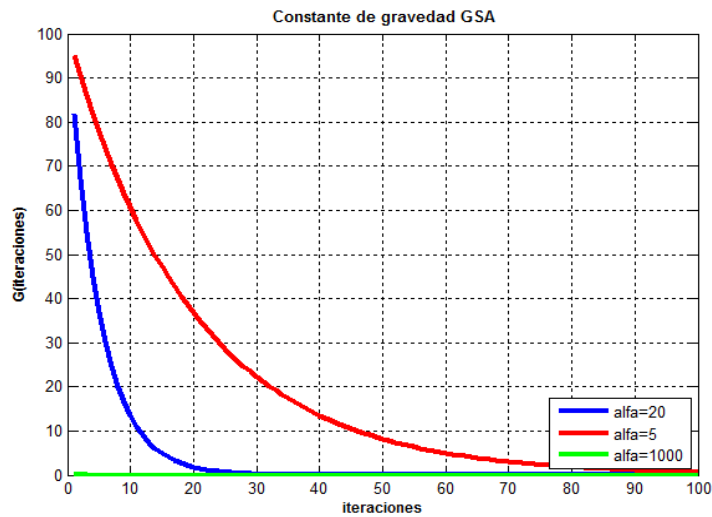


Figura 10. Variación de  $G(t)$  con el aumento de la constante alfa.

### 3.6 PARÁMETROS SELECCIONADOS

Del análisis de los resultados mostrados en los numerales anteriores, se seleccionaron los siguientes parámetros:

- I. El algoritmo detiene su búsqueda cuando no detecta cambios significativos en la evolución de las masas  $F_{best}$
- II. Cuando un agente sale del espacio de búsqueda válido, entonces es devuelto en la posición donde se encuentra localizado la partícula con mayor masa.
- III. La variable  $k_{best\_check}$  es igual a 1 por lo tanto solo los agentes  $k_{best}$  son usados para calcular la fuerza total sobre cada masa.
- IV. El tamaño de la población es de 100 agentes.
- V. Las variables  $\alpha$  y  $G_0$  son 20 y 100 respectivamente.

#### 4 APLICACIÓN DEL ALGORITMO EN EL DISEÑO DEL ABSORBEDOR ELECTROMAGNETICO MULTICAPA ÓPTIMO

Para el desarrollo del absorbedor multicapa se establecieron parámetros de diseño tales como una lista de materiales (Tabla 15), la frecuencia de operación y las dimensiones del dispositivo absorbedor. El banco de materiales puede clasificarse en tres categorías [6]:

- I. Sin pérdidas dieléctricas, con permitividad independiente a la frecuencia. (Materiales 1-2).
- II. Con pérdidas magnéticas (Materiales 3-5) y con pérdidas dieléctricas (Materiales 6-8). La permitividad y permeabilidad está definida para una frecuencia de 1GHz.
- III. Con pérdidas magnéticas, estos materiales se definen por su permeabilidad real en DC,  $U_m$  y la frecuencia  $f_m$ .

| Materiales dieléctricos sin pérdidas ( $\mu_r = 1$ )                                |                     |       |                      |       |
|---|---------------------|-------|----------------------|-------|
| Número  |                     |       |                      |       |
| 1   | $\epsilon_r$        |       |                      |       |
| 2   | 10                  |       |                      |       |
|   | 50                  |       |                      |       |
| Materiales magnéticos con pérdidas ( $\epsilon_r = 15$ )                            |                     |       |                      |       |
| $\mu_r = \mu' - j\mu''$ $\mu'(f) = \frac{\mu'}{f^a}$ $\mu''(f) = \frac{\mu''}{f^b}$ |                     |       |                      |       |
| Número  | $\mu'(1\text{GHz})$ | $a$   | $\mu''(1\text{GHz})$ | $b$   |
| 3   | 5                   | 0,974 | 10                   | 0,961 |
| 4   | 3                   | 1,000 | 15                   | 0,957 |
| 5   | 7                   | 1,000 | 12                   | 1,000 |

| Materiales dieléctricos con pérdidas ( $\mu_r = 1$ )           |                          |       |                           |       |
|--|--------------------------|-------|---------------------------|-------|
| $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$                         |                          |       |                           |       |
| $\epsilon'(f) = \frac{\epsilon'}{f^a}$                         |                          |       |                           |       |
| $\epsilon''(f) = \frac{\epsilon''}{f^b}$                       |                          |       |                           |       |
| Número   | $\epsilon'(1\text{GHz})$ | $a$   | $\epsilon''(1\text{GHz})$ | $b$   |
| 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 ( $\epsilon_r = 15$ ) |                          |       |                           |       |
| $\mu_r = \mu' - j\mu''$  |                          |       |                           |       |
| $\mu'(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2 + f_m^2}$                    |                          |       |                           |       |
| $\mu''(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2 + f_m^2}$                   |                          |       |                           |       |
| Número   | $\mu_m$                  | $f_m$ |                           |       |
| 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   |                           |       |

Tabla 15. Lista de materiales.[6]

Para el diseño del absorbedor electromagnético multicapa óptimo se utiliza la función objetivo dada en la fundamentación teórica (Ver sección 2.5). Se escoge un diseño de tres capas, donde el máximo grosor de las mismas es 2mm.

## 4.1 SELECCIÓN DE FRECUENCIAS DE TRABAJO

El absorbedor se diseñó para operar en el rango de frecuencias inalámbricas (0,85 - 8 GHz), pues dentro de la banda de frecuencia de esta tecnología se encuentran los operadores de telefonía móvil en Colombia (0,85GHz, 1,8 GHz, 1,9 GHz) el protocolo de comunicaciones Bluetooth (2,4GHz) [IEEE 802.15.1], Wi Fi (2,4GHz, 5GHz, 5,4GHz) [IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n] y el protocolo de comunicación ZigBee (0,868GHz, 0,915GHz, 2,4GHz) [IEEE 802.15.4], entre otras aplicaciones. Por lo tanto para abarcar las frecuencias de las aplicaciones en tecnologías inalámbricas se procedió a diseñar dos absorbedores electromagnéticos para dos rangos de frecuencia, definidos así [5]:

1. Absorbedor de baja frecuencia:  $0.85 \text{ (GHz)} < f < 2 \text{ (GHz)}$ .
2. Absorbedor de alta frecuencia:  $2 \text{ (GHz)} < f < 8 \text{ (GHz)}$ .

## 4.2 DISEÑO DE ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE BAJA FRECUENCIA.

### 4.2.1 DISEÑO DE PRUEBA CON GSA

En esta primera prueba se diseña un absorbedor multicapa ( $N = 3$ ), se busca optimizar el máximo coeficiente de reflexión en el rango de frecuencias de (0.85-2 [GHz]). El propósito de esta prueba es confirmar si los parámetros encontrados en la sección 3.6, son los adecuados para el diseño de absorbedores, es decir, se quiere verificar que el algoritmo de búsqueda GSA sea capaz de localizar el mínimo global en el espacio de búsqueda y de arrojar el grosor de cada capa que asegure el mejor índice de absorción.

Para verificar si el algoritmo localiza el mínimo global de la función objetivo, se compara el mejor resultado alcanzado con GSA contra los obtenidos con otros métodos de optimización, Tabla 16 y Tabla 17.

Para contrastar el desempeño de GSA, los materiales que se usarán para el diseño del absorbedor son tomados de otras investigaciones [8] y permanecerán fijos durante todo el proceso de optimización. El algoritmo intentará encontrar el ancho del dispositivo que ofrezca el mejor coeficiente de reflexión en toda la banda de frecuencias deseada. Una vez escogido un conjunto de materiales se ejecuta el algoritmo de búsqueda GSA 30 veces y se seleccionan los grosores de capas que aseguren la máxima absorción. Los resultados se consignan en la Tabla 16.

| <b>Capa 3 (mm)</b> | <b>Capa 2 (mm)</b> | <b>Capa 1 (mm)</b> | <b>Coeficiente (dB)</b> | <b>Grosor total (mm)</b> |
|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| <b>Lbest(1)</b>    | <b>Lbest(2)</b>    | <b>Lbest(3)</b>    | <b>Fbest</b>            |                          |
| 1,821              | 1,60914            | 1,05115            | -25,1875868             | 4,249503                 |
| 1,89612            | 1,70535            | 0,792456           | -26,5680363             | 4,343328                 |
| 1,8072             | 1,80047            | 0,861678           | -26,9540938             | 4,423925                 |
| 1,6841             | 1,62487            | 0,859548           | -24,7200828             | 3,941143                 |
| 1,87066            | 1,52572            | 0,907593           | -26,3813172             | 4,067753                 |
| 1,91418            | 1,76904            | 0,887753           | -27,9759289             | 4,513701                 |
| 1,72169            | 1,82193            | 1,01377            | -24,0639646             | 4,481826                 |
| 1,61508            | 1,91152            | 0,663511           | -25,2171464             | 4,299304                 |
| 1,46621            | 1,55467            | 0,998894           | -20,5118508             | 3,346547                 |
| 1,99691            | 1,67352            | 0,910729           | -25,2403451             | 4,721584                 |
| 1,82562            | 1,75143            | 0,427838           | -27,2314998             | 4,369501                 |
| 1,96415            | 1,55442            | 0,898708           | -26,626158              | 4,380253                 |
| 1,92834            | 1,69496            | 1,02518            | -27,2565757             | 4,482853                 |
| 1,83648            | 1,96035            | 1,05963            | -26,7279857             | 4,704425                 |
| 1,92305            | 1,69864            | 0,842908           | -26,7577984             | 4,50944                  |
| 1,97873            | 1,74003            | 0,315424           | -25,8387639             | 4,73253                  |
| 1,74668            | 1,94313            | 0,808758           | -23,3369688             | 4,353318                 |
| 1,95523            | 1,98199            | 1,02491            | -26,1432415             | 4,936117                 |
| 1,99956            | 1,79379            | 0,449193           | -27,3576307             | 4,704086                 |
| 1,71614            | 1,38941            | 0,716461           | -21,7941396             | 3,533386                 |
| 1,81704            | 1,72293            | 0,867711           | -25,190616              | 4,438674                 |
| 1,90361            | 1,96997            | 0,819358           | -25,7837713             | 4,898756                 |
| 1,67896            | 1,99746            | 0,741856           | -23,4198996             | 4,736051                 |

|                   |          |          |             |          |
|-------------------|----------|----------|-------------|----------|
| 1,8847            | 1,50564  | 0,816253 | -24,9238762 | 4,233246 |
| 1,82125           | 0,951369 | 0,632171 | -19,661793  | 3,088045 |
| 1,95156           | 1,6061   | 0,671371 | -27,8025463 | 4,366415 |
| 1,74218           | 1,89035  | 0,830477 | -23,8711832 | 4,657439 |
| 1,27834           | 1,92153  | 0,938209 | -21,3631222 | 3,649059 |
| 1,75319           | 1,91534  | 0,772699 | -25,504218  | 4,384992 |
| 1,93975           | 1,54839  | 0,325658 | -26,0490689 | 4,355845 |
| <b>Materiales</b> |          |          |             |          |
| 4                 | 3        | 16       |             |          |

Tabla 16. Resultados, Diseño de Prueba con GSA usando materiales fijos.

De la primera prueba se observa que el mínimo del máximo coeficiente de reflexión para este conjunto de materiales es dado por un absorbedor con un grosor máximo de 4.513701 mm. La Figura 11 muestra el comportamiento en el dominio de la frecuencia para el rango entre (0.85 GHz -2GHz).

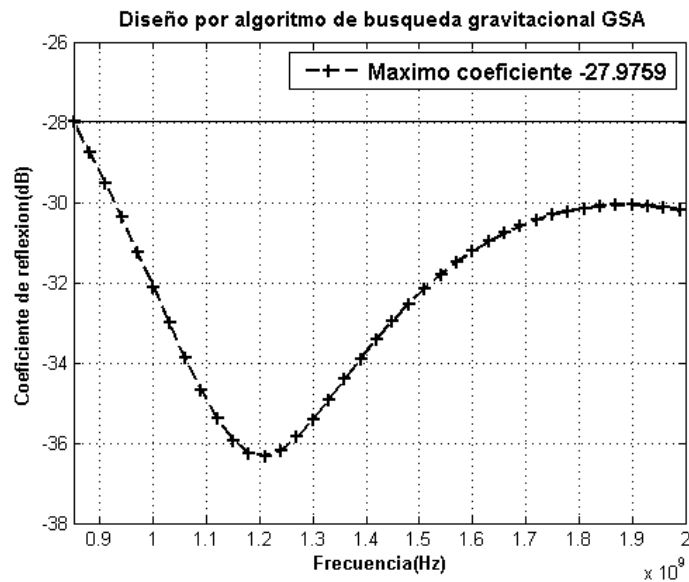


Figura 11. Comportamiento en el dominio de la frecuencia, 0.85 – 2 GHz. Diseño de Prueba

La Tabla 17 muestra el contraste del mejor resultado de las ejecuciones con GSA con los mejores arrojados por otros algoritmos [9]. Se observa que el diseño de

absorbedor obtenido por GSA es 0.19mm más grueso que el diseño de CFO, y mayor a su vez que PSO y PSO con análisis de intervalos. Sin embargo, el absorbedor propuesto ofrece un máximo de atenuación en el rango de frecuencias deseado comparable con CFO y más favorable que PSO, luego GSA es capaz de localizar la mejor solución en el espacio de búsqueda y encuentra el valor óptimo alrededor de este punto.

|                             | GSA diseño 1 |             | PSO[4]   |             | PSO-AI[4] |             | CFO[4]     |             |
|-----------------------------|--------------|-------------|----------|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|
|                             | Material     | Grosor (mm) | Material | Grosor (mm) | Material  | Grosor (mm) | Material   | Grosor (mm) |
| Capa 1                      | 16           | 0,830477    | 16       | 0,5998      | 16        | 0,6009      | 16         | 0,772281    |
| Capa 2                      | 3            | 1,769040    | 3        | 2           | 3         | 1,9963      | 3          | 1,559500    |
| Capa 3                      | 4            | 1,914183    | 4        | 1,6268      | 4         | 1,6326      | 4          | 1,982848    |
| Coefficiente Reflexión (dB) | -27,9759289  |             | -22,7232 |             | -22,7232  |             | -28,488462 |             |
| Grosor total (mm)           | 4,5137       |             | 4,2266   |             | 4,2298    |             | 4,314629   |             |

Tabla 17. Comparación de resultados de la primera prueba.

Los valores máximo, mínimo, promedio y la desviación del coeficiente de reflexión para los diferentes diseños se definen en la Tabla 18. Se concluye que GSA es capaz de localizar una buena solución en el espacio de búsqueda por lo que será un método útil para encontrar buenos diseños de absorbedores.

| Algoritmo | Mínimo(dB)   | Máximo(dB) | Promedio(dB) | Desviación   |
|-----------|--------------|------------|--------------|--------------|
| GSA       | -36,324468   | -27,975926 | -32,2018346  | 2,37509873   |
| PSO       | -44,58862776 | -22,7232   | -29,73963500 | 6,6200053914 |
| PSO_AI    | -44,05349462 | -22,7232   | -29,67188258 | 6,5483484420 |
| CFO       | -41,04147213 | -28,488462 | -32,84026359 | 4,1369413009 |

Tabla 18. Datos comparativos para el absorbedor de tres capas. Diseño de prueba

La Figura 12 muestra el coeficiente de reflexión en función de la frecuencia para los diseños de absorbedores arrojados por los distintos métodos de optimización.

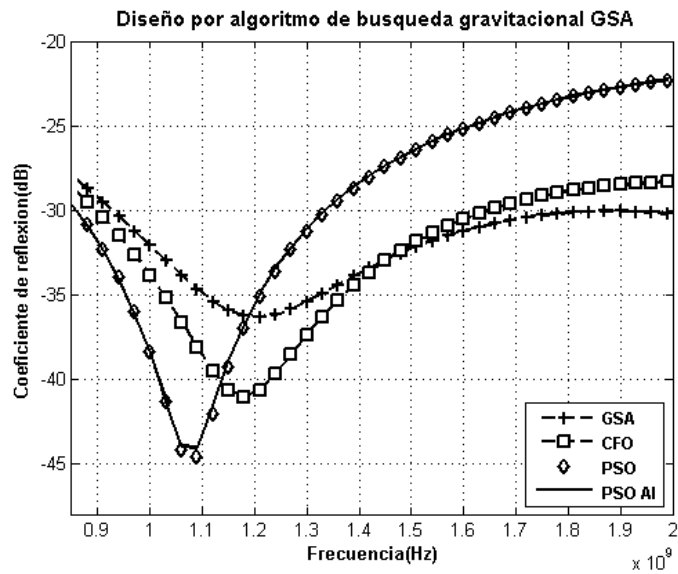


Figura 12. Comportamiento de los absorbedores en el dominio de la frecuencia, 0.85 – 2 GHz.

*Diseño de Prueba*

#### 4.2.2 DISEÑO ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE TRES CAPAS PARA BAJA FRECUENCIA

A continuación se construirá un absorbedor electromagnético de tres capas. A diferencia del procedimiento realizado en la sección anterior, los materiales que se desean optimizar son desconocidos, al igual que el grosor de cada capa, por lo tanto el número de variables a optimizar son 6. Un absorbedor electromagnético de  $N$  capas implica optimizar  $2N$  parámetros.

Con el fin de reducir el número de variables y la dificultad del problema se aplica una acercamiento llamado el método en cascada [9]. Este método consiste en realizar un número de veces diferentes pruebas y escoger el mejor resultado del proceso. En esta primera etapa se obtienen varios diseños de absorbedores, de donde a cada uno de los posibles diseños se les aplica el algoritmo de búsqueda GSA. Se optimizan las seis variables y se obtiene el máximo coeficiente de reflexión. Para ilustrar mejor este método remítase al diagrama de bloques de la Figura 13.



Figura 13. Diagrama de bloques del proceso en cascada.

El siguiente paso es seleccionar el conjunto de materiales con la mejor capacidad de absorción, y manteniendo este juego de materiales fijos se procede nuevamente a ejecutar un cierto número de veces GSA, de donde se obtiene el máximo coeficiente de reflexión para los materiales seleccionados. Así, de esta manera el número de parámetros a considerar disminuye y se obtiene un posible diseño de un buen absorbedor electromagnético en poco tiempo y a un costo computacional relativamente bajo.

En este trabajo de investigación se ejecuta el GSA 10 veces para la primera etapa del método (ver anexo B sección 0), y se escoge el absorbedor con el mejor índice de reflexión. Con esta combinación de materiales se implementa el algoritmo GSA 30 veces, y los resultados se muestran en la Tabla 19.

| Capa 3 (mm) | Capa 2 (mm) | Capa 1 (mm) | Coefficiente (dB) | Grosor total (mm) |
|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|
| Lbest(1)    | Lbest(2)    | Lbest(3)    | Fbest             |                   |
| 1,8210047   | 1,6091406   | 0,81935783  | -21,8208963       | 4,2495031         |
| 1,896121    | 1,7053507   | 0,7418564   | -22,5405571       | 4,343328          |
| 1,8072006   | 1,8004714   | 0,81625285  | -21,6429943       | 4,4239248         |
| 1,6841031   | 1,6248693   | 0,6321707   | -22,5783593       | 3,941143          |
| 1,8706599   | 1,5257221   | 0,67137105  | -23,4198486       | 4,0677531         |
| 1,9703449   | 1,2719975   | 0,46593394  | -22,7359696       | 3,7082764         |
| 1,873675    | 1,4695382   | 0,58931137  | -24,129218        | 3,9326647         |
| 1,6150838   | 1,9115206   | 0,77269941  | -21,211764        | 4,2993037         |

|                   |           |            |             |           |
|-------------------|-----------|------------|-------------|-----------|
| 1,4662145         | 1,5546743 | 0,32565819 | -21,9814083 | 3,3465469 |
| 1,8836077         | 1,0535423 | 0,30571009 | -21,6642115 | 3,24286   |
| 1,7373537         | 1,7106758 | 0,68766225 | -22,5212724 | 4,1356917 |
| 1,9641526         | 1,5544227 | 0,86167814 | -22,1357715 | 4,3802535 |
| 1,8637761         | 1,4685393 | 0,57732138 | -24,3785572 | 3,9096368 |
| 1,3728235         | 1,8002571 | 0,33068955 | -22,8284955 | 3,5037701 |
| 1,9610381         | 1,475038  | 0,89754109 | -21,8631187 | 4,3336172 |
| 1,6782313         | 1,5984526 | 0,6597311  | -22,178786  | 3,936415  |
| 1,7466807         | 1,9431258 | 0,66351146 | -22,0959195 | 4,3533179 |
| 1,6637944         | 1,324518  | 0,39988745 | -22,3000181 | 3,3881999 |
| 1,9202545         | 1,2695302 | 0,61710508 | -23,7485241 | 3,8068898 |
| 1,7161394         | 1,3894091 | 0,42783753 | -23,6858259 | 3,533386  |
| 1,3903184         | 1,8368992 | 0,48418012 | -21,8843668 | 3,7113978 |
| 1,7513875         | 1,3324651 | 0,41249933 | -23,8683925 | 3,496352  |
| 1,8592861         | 1,5040776 | 0,44868558 | -21,5600897 | 3,8120493 |
| 1,6633946         | 1,7867239 | 0,50265007 | -22,8042322 | 3,9527687 |
| 1,8672596         | 1,1210048 | 0,28927375 | -23,8723126 | 3,2775382 |
| 1,9515598         | 1,6060977 | 0,80875801 | -22,4131196 | 4,3664155 |
| 1,8858859         | 1,3328205 | 0,81550263 | -21,6954235 | 4,034209  |
| 1,2783397         | 1,9215261 | 0,44919293 | -21,3791973 | 3,6490587 |
| 1,8572055         | 1,3316832 | 0,40670724 | -22,2589415 | 3,595596  |
| 1,4328432         | 1,7643697 | 0,34995861 | -22,8815594 | 3,5471715 |
| <b>Materiales</b> |           |            |             |           |
| <b>4</b>          | <b>5</b>  | <b>16</b>  |             |           |

Tabla 19. Diseño uno absorbedor de tres capas para baja frecuencia.

Los resultados indican que el máximo índice de reflexión para esta combinación de materiales corresponde a un absorbedor con un grosor total de 3,9096 mm. La Tabla 20 muestra las características del diseño propuesto y se contrasta con diferentes absorbedores encontrados por otros métodos de optimización. El comportamiento en el dominio de la frecuencia para este absorbedor se presenta en la Figura 14. La Figura 15 ilustra la respuesta en frecuencia del diseño en contraste con PSO, PSO con análisis de intervalos y CFO.

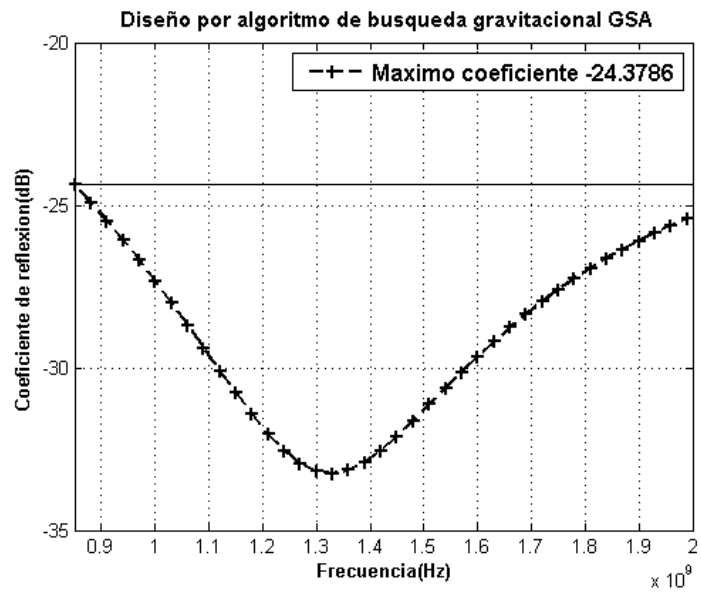


Figura 14. Comportamiento en baja frecuencia del diseño de tres capas.

|                            | GSA diseño 2 |             | PSO[4]   |             | PSO-AI[5] |             | CFO[4]     |             |
|----------------------------|--------------|-------------|----------|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|
|                            | Material     | Grosor (mm) | Material | Grosor (mm) | Material  | Grosor (mm) | Material   | Grosor (mm) |
| Capa 1                     | 16           | 0,57732     | 16       | 0,5998      | 16        | 0,6009      | 16         | 0,772281    |
| Capa 2                     | 5            | 1,46685     | 3        | 2           | 3         | 1,9963      | 3          | 1,559500    |
| Capa 3                     | 4            | 1,86377     | 4        | 1,6268      | 4         | 1,6326      | 4          | 1,982848    |
| Coeficiente Reflexión (dB) | -24,3785572  |             | -22,7232 |             | -22,7232  |             | -28,488462 |             |
| Grosor total (mm)          | 3,90794      |             | 4,2266   |             | 4,2298    |             | 4,314629   |             |

Tabla 20. Diseño de un absorbedor de tres capas para baja frecuencia.

Los valores máximo, mínimo, promedio y la desviación del coeficiente de reflexión para los diferentes diseños se resumen en la Tabla 21.

| Algoritmo | Mínimo(dB)   | Máximo(dB)   | Promedio(dB) | Desviación   |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| GSA       | -32,254356   | -24,37855720 | -29,061814   | 2,753726     |
| PSO       | -44,58862776 | -22,7232     | -29,73963500 | 6,6200053914 |
| PSO_AI    | -44,05349462 | -22,7232     | -29,67188258 | 6,5483484420 |
| CFO       | -41,04147213 | -28,488462   | -32,84026359 | 4,1369413009 |

Tabla 21. Tabla comparativa absorbedores de tres capas, baja frecuencia.

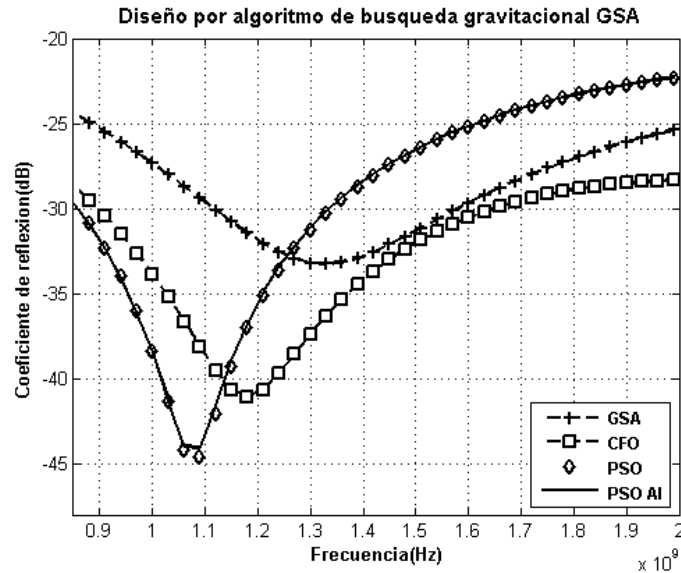


Figura 15. Comportamiento de los absorbedores en el dominio de la frecuencia, 0.85 – 2 GHz. Diseño de tres capas.

El diseño propuesto por GSA tiene mejor capacidad de absorción que el absorbedor construido con PSO y PSO-AI. Sin embargo el conjunto de materiales encontrados mediante el método en cascada, no son los más adecuados pues no superan al dispositivo presentado por CFO.

### 4.2.3 DISEÑO ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE CINCO CAPAS PARA BAJA FRECUENCIA.

Se realiza un diseño de absorbedor de cinco capas para el rango de frecuencia entre 0.85 GHz-2 GHz, optimizando las 10 variables (material y grosor de cada

capa). Se seleccionan los materiales que conforman el absorbedor<sup>6</sup> y se ejecuta el algoritmo 30 veces para encontrar los grosores de capa óptimos. La Tabla 22 muestra los resultados. En la Tabla 23 se compara el desempeño de GSA frente a los otros métodos de optimización.

En la Figura 16 se observa la respuesta en frecuencia del absorbedor arrojado por GSA, mientras que la Figura 17 muestra el comportamiento del diseño propuesto por PSO, SADE, CFO y GSA en las frecuencias de interés.

| <b>Coefficiente Reflexión Promedio (dB)</b> | <b>Capa 5(mm)</b> | <b>Capa 4(mm)</b> | <b>Capa 3(mm)</b> | <b>Capa 2(mm)</b> | <b>Capa 1(mm)</b> |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| -22,2732872                                 | 1,8495            | 0,81449           | 0,92488           | 1,1126            | 1,1293            |
| -22,8070833                                 | 0,55492           | 1,7667            | 0,96493           | 1,0960            | 0,70054           |
| -24,1302838                                 | 0,79472           | 1,8196            | 0,90867           | 1,3002            | 0,96429           |
| -24,6348104                                 | 1,5207            | 1,5119            | 0,97941           | 1,3503            | 0,33589           |
| -20,8219037                                 | 1,4726            | 1,1731            | 0,58317           | 1,1601            | 0,94728           |
| -18,5167918                                 | 1,3695            | 0,75911           | 0,78588           | 1,1159            | 1,4521            |
| -21,2171702                                 | 1,8357            | 1,2061            | 1,2522            | 1,5465            | 1,0331            |
| -20,6911192                                 | 0,55413           | 1,5398            | 1,2129            | 1,3181            | 0,70090           |
| -25,5089794                                 | 1,1586            | 1,5517            | 0,88604           | 1,2502            | 0,53595           |
| -26,4374624                                 | 0,71168           | 1,9131            | 1,0009            | 1,4123            | 0,75256           |
| -26,8674184                                 | 1,5312            | 1,8291            | 0,69851           | 1,1495            | 0,11518           |
| -28,941879                                  | 1,9713            | 1,5189            | 0,69343           | 1,2514            | 0,40641           |
| -25,1242974                                 | 1,2619            | 1,4196            | 0,83846           | 1,3104            | 0,71448           |
| -23,7126355                                 | 1,6547            | 1,0963            | 1,2654            | 1,4647            | 0,90962           |

<sup>6</sup> Para observar los datos del diseño remítase a la sección 0, anexo B, Tabla 45.

|                   |         |         |         |        |         |
|-------------------|---------|---------|---------|--------|---------|
| -21,7730332       | 1,3510  | 1,4359  | 0,75543 | 1,4131 | 0,75032 |
| -25,4719047       | 1,7914  | 1,7178  | 0,73478 | 1,4028 | 0,21532 |
| -22,4612939       | 1,8240  | 1,2503  | 0,87566 | 1,1967 | 0,15594 |
| -22,6365982       | 1,2773  | 1,3805  | 0,91162 | 1,1534 | 0,95839 |
| -22,9859429       | 1,2855  | 1,6222  | 0,79048 | 1,0612 | 0,44980 |
| -25,4004883       | 1,3222  | 1,6017  | 0,84665 | 1,2987 | 0,87015 |
| -21,9826672       | 1,6387  | 1,1018  | 0,88452 | 1,2855 | 0,62644 |
| -24,0805386       | 1,2487  | 1,3826  | 0,90672 | 1,2662 | 1,0020  |
| -21,4384521       | 1,3461  | 1,3735  | 0,84914 | 1,0500 | 0,33175 |
| -20,9064837       | 0,87691 | 1,4112  | 1,1498  | 1,4899 | 1,0326  |
| -24,5673286       | 0,57257 | 1,8679  | 0,99964 | 1,3019 | 0,97627 |
| -25,8932109       | 1,1078  | 1,6586  | 0,96926 | 1,3215 | 0,38653 |
| -26,2458029       | 1,5910  | 1,4413  | 0,94516 | 1,3546 | 0,73603 |
| -19,075917        | 0,58360 | 1,1821  | 1,2694  | 1,2741 | 1,2324  |
| -21,4831611       | 1,9099  | 0,87740 | 1,0350  | 1,2291 | 1,2946  |
| -23,4479485       | 1,7862  | 1,1416  | 0,94789 | 1,2443 | 0,94811 |
| <b>Materiales</b> | 12      | 5       | 2       | 15     | 8       |

Tabla 22. Resultados de GSA para el absorbedor de cinco capas en baja frecuencia.

|                             | GSA diseño 3 |             | PSO[4]   |             | PSO-AI[13][4] |             | CFO[4]     |             |
|-----------------------------|--------------|-------------|----------|-------------|---------------|-------------|------------|-------------|
|                             | Material     | Grosor (mm) | Material | Grosor (mm) | Material      | Grosor (mm) | Material   | Grosor (mm) |
| Capa 1                      | 8            | 0.40641     | 16       | 0,5998      | 16            | 0,6009      | 16         | 0,772281    |
| Capa 2                      | 15           | 1.2514      | 3        | 2           | 3             | 1,9963      | 3          | 1,559500    |
| Capa 3                      | 2            | 0.69343     | 4        | 1,6268      | 4             | 1,6326      | 4          | 1,982848    |
| Capa 4                      | 5            | 1,5189      | -        | -           | -             | -           | -          | -           |
| Capa 5                      | 12           | 1,9713      | -        | -           | -             | -           | -          | -           |
| Coefficiente Reflexión (dB) | -28.941879   |             | -22,7232 |             | -22,7232      |             | -28,488462 |             |
| Grosor total (mm)           | 5.8414       |             | 4,2266   |             | 4,2298        |             | 4,314629   |             |

Tabla 23. Absorbedor de cinco capas para el rango de frecuencia (0.85GHz-2GHz).

En la Tabla 24 se puede apreciar las características de los diseños, en cuanto a valores máximos, mínimos, promedio y desviación en el rango de frecuencia establecido.

| Algoritmo | Mínimo(dB)   | Máximo(dB)  | Promedio(dB) | Desviación   |
|-----------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| GSA       | -41.7322544  | -28.9286327 | -33.6390381  | 3.99305445   |
| PSO       | -44,58862776 | -22,7232    | -29,73963500 | 6,6200053914 |
| PSO_AI    | -44,05349462 | -22,7232    | -29,67188258 | 6,5483484420 |
| CFO       | -41,04147213 | -28,488462  | -32,84026359 | 4,1369413009 |

Tabla 24. Características de los diseños de absorbedor de cinco capas.

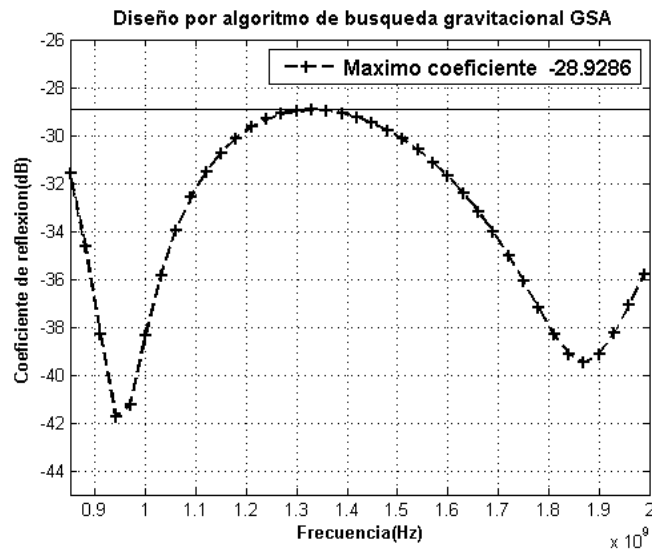


Figura 16. Comportamiento en la frecuencia del diseño de cinco capas para baja frecuencia.

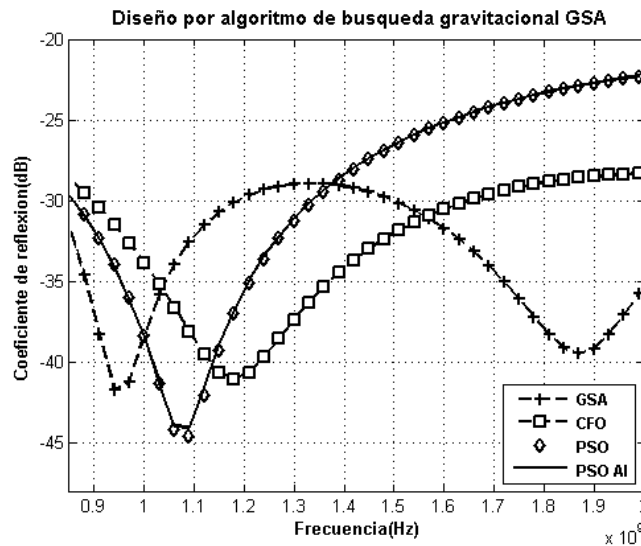


Figura 17. Comportamiento de los absorbedores, baja frecuencia, diseño de cinco capas

### 4.3 DISEÑO DE ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE ALTA FRECUENCIA.

A continuación se construirán absorbedores electromagnéticos de tres y de cinco capas, para una banda de frecuencias comprendida entre los 2 – 8 GHz, los grosores de cada capa y los materiales que conforman el absorbedor son desconocidos, por lo tanto para cada capa,  $N$ , los parámetros a optimizar son  $2N$ .

#### 4.3.1 DISEÑO ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE TRES CAPAS PARA ALTA FRECUENCIA.

Siguiendo la metodología planteada en la sección 4.2.2 (método en cascada), se realiza el diseño de un absorbedor de tres capas que trabaje en el rango de frecuencias entre 2 – 8GHz y posteriormente compararlo con absorbedores de cinco capas en este rango de frecuencia de operación. Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 25.

El comportamiento en frecuencia del absorbedor y la confrontación con algunos diseños realizados con otros algoritmos se pueden estudiar en la Figura 18 y Figura 19 respectivamente.

| <b>Coefficiente Reflexión<br/>(dB)</b> | <b>Capa 3(mm)</b> | <b>Capa 2(mm)</b> | <b>Capa 1(mm)</b> |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| -16,6501541                            | 1,4937            | 1,9879            | 0,30909           |
| -19,514333                             | 1,7793            | 1,6139            | 0,37530           |
| -15,9025525                            | 1,6582            | 1,1385            | 0,32468           |
| -21,7788469                            | 1,8344            | 1,8980            | 0,39708           |
| -15,6234035                            | 1,2926            | 1,3253            | 0,33758           |
| -16,9277095                            | 1,4166            | 1,6872            | 0,37269           |
| -18,6887751                            | 1,9578            | 1,4710            | 0,39743           |
| -17,7953261                            | 1,4575            | 1,6488            | 0,40113           |
| -20,2582455                            | 1,8145            | 1,8595            | 0,34830           |
| -19,1417662                            | 1,6288            | 1,6554            | 0,41609           |
| -17,7046674                            | 1,6616            | 1,4627            | 0,43375           |
| -17,5061947                            | 1,6976            | 1,5283            | 0,45421           |
| -15,2711978                            | 1,2965            | 0,83437           | 0,28964           |
| -15,0891126                            | 1,6387            | 1,0304            | 0,47957           |
| -17,99851                              | 1,5275            | 1,7809            | 0,45595           |
| -18,7946375                            | 1,5886            | 1,6317            | 0,42147           |
| -21,3328457                            | 1,7495            | 1,9035            | 0,38971           |
| -15,7678806                            | 1,8666            | 0,98368           | 0,41726           |
| -18,4791534                            | 1,6494            | 1,6552            | 0,31631           |
| -18,7176968                            | 1,9507            | 1,5891            | 0,43949           |
| -15,7996092                            | 1,9839            | 1,2215            | 0,31671           |
| -15,9480152                            | 1,5806            | 1,1804            | 0,45582           |
| -17,6887832                            | 1,5055            | 1,3619            | 0,40275           |
| -16,3094315                            | 1,3085            | 1,2141            | 0,39185           |

|                   |        |        |         |
|-------------------|--------|--------|---------|
| -18,3724823       | 1,5696 | 1,7583 | 0,30400 |
| -16,9082766       | 1,3675 | 1,4267 | 0,40729 |
| -18,3700248       | 1,6355 | 1,6735 | 0,44257 |
| -18,4610482       | 1,5236 | 1,4742 | 0,39448 |
| -16,4137097       | 1,3666 | 1,7630 | 0,45259 |
| -19,1787701       | 1,5711 | 1,6734 | 0,34579 |
| <b>Materiales</b> | 9      | 6      | 16      |

Tabla 25. Resultados del absorbedor de tres capas en alta frecuencia.

|                             | GSA diseño 4 |             | PSO[4]   |             | SADE[13][4] |             | CFO[4]   |             |
|-----------------------------|--------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|
|                             | Material     | Grosor (mm) | Material | Grosor (mm) | Material    | Grosor (mm) | Material | Grosor (mm) |
| Capa 1                      | 16           | 0.39708     | 14       | 0.455       | 16          | 0.384       | 16       | 0.3941      |
| Capa 2                      | 6            | 1.8980      | 6        | 1.995       | 6           | 0.433       | 6        | 1.9646      |
| Capa 3                      | 9            | 1.8344      | 8        | 0.322       | 6           | 1.143       | 9        | 1.8674      |
| Capa 4                      | -            | -           | 5        | 0.986       | 6           | 1.446       | -        | -           |
| Capa 5                      | -            | -           | 11       | 1.128       | 15          | 1.454       | -        | -           |
| Coefficiente Reflexión (dB) | -21.7788469  |             | -23.889  |             | -25.485     |             | -22.5420 |             |
| Grosor total(mm)            | 4.1295       |             | 4.888    |             | 4.860       |             | 4.22631  |             |

Tabla 26. Diseño de tres capas en el rango de frecuencias de (2 -8 GHz).

| Algoritmo | Mínimo(dB)   | Máximo(dB)   | Promedio(dB) | Desviación |
|-----------|--------------|--------------|--------------|------------|
| GSA       | -23.5281691  | -21.7788469  | -23.0896287  | 0.45209031 |
| PSO       | -25.85893661 | -23.9117550  | -24.6568123  | 0.66743015 |
| SADE      | -30.43295702 | -25.45243334 | -27.8409033  | 1.67386396 |
| CFO       | -23.49742730 | -22.49881797 | -23.0060040  | 0.36606683 |

Tabla 27. Resultados diseño de tres capas para alta frecuencia.

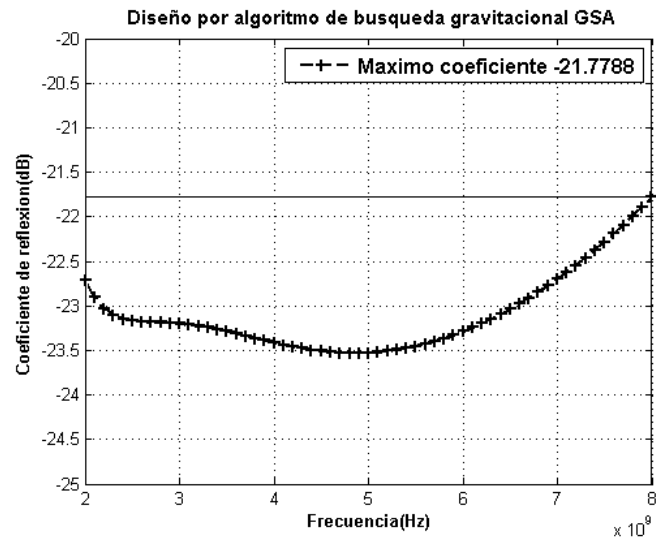


Figura 18. Comportamiento en alta frecuencia diseño de tres capas.

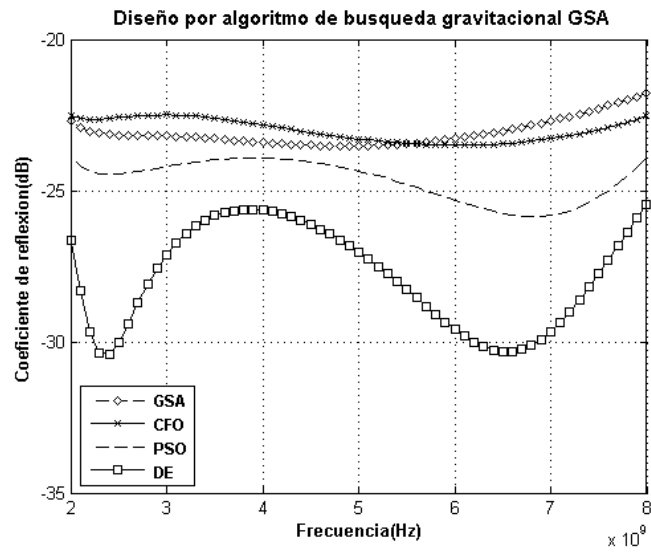


Figura 19. Comparación de resultados diseño de tres capas en alta frecuencia.

### 4.3.2 DISEÑO ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE CINCO CAPAS PARA ALTA FRECUENCIA.

Como siguiente paso, se diseñó un absorbedor de cinco capas, en el rango de frecuencia de 2 GHz – 8GHz, los materiales y los grosores de capa son desconocidos luego se deben optimizar un total de 10 parámetros. Se aplica la aproximación en cascada con el fin reducir la cantidad de variables a considerar. Se analiza la capacidad de absorción en esta banda de frecuencia y se compara con investigaciones previas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 28.

La Tabla 29 muestra el mejor resultado obtenido con GSA y se hace un paralelo comparándolo con los resultados encontrados en otras investigaciones, PSO [4], DE (self-adaptive differential evolution) [2][9] y CFO [9] . En la Figura 20 y Figura 21 se presenta el comportamiento en frecuencia para el diseño propuesto y de los obtenidos por los demás métodos de optimización. Y en la Tabla 30 se encuentran las características del diseño.

| <b>Coefficiente Reflexión (dB)</b> | <b>Capa 5(mm)</b> | <b>Capa 4(mm)</b> | <b>Capa 3(mm)</b> | <b>Capa 2(mm)</b> | <b>Capa 1(mm)</b> |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| -19,5707943                        | 0,00112621        | 0,00145563        | 0,00115036        | 0,00168869        | 0,0003289         |
| -22,6573415                        | 0,00144429        | 0,00094016        | 0,00159938        | 0,00132753        | 0,00036174        |
| -19,3866417                        | 0,00197428        | 0,00056849        | 0,00148928        | 0,00080607        | 0,0003348         |
| -20,0525529                        | 0,00143617        | 0,00144342        | 0,00054205        | 0,00183048        | 0,00038343        |
| -19,0375294                        | 0,00085253        | 0,00123801        | 0,00136034        | 0,00078742        | 0,00031449        |
| -20,2678657                        | 0,0017548         | 0,0007346         | 0,00142551        | 0,00143948        | 0,00037039        |
| -18,7897295                        | 0,00158762        | 0,00071087        | 0,00125057        | 0,00145977        | 0,00034902        |
| -19,4942687                        | 0,00168267        | 0,00079801        | 0,00171614        | 0,00049829        | 0,0002707         |
| -19,1452248                        | 0,0010495         | 0,00119212        | 0,00134379        | 0,00079123        | 0,00031477        |
| -19,0418661                        | 0,00184121        | 0,00113334        | 0,00170866        | 0,00040583        | 0,00035946        |
| -19,3541916                        | 0,00096994        | 0,00100052        | 0,00083405        | 0,00171847        | 0,00031631        |
| -17,526926                         | 0,00097341        | 0,00131737        | 0,0014565         | 0,00094534        | 0,00026518        |
| -21,1189376                        | 0,00159005        | 0,00147673        | 0,00143892        | 0,00181583        | 0,00039593        |
| -20,4155669                        | 0,00181058        | 0,00096823        | 0,00192937        | 0,00145076        | 0,00030604        |
| -18,4253346                        | 0,0012696         | 0,00146895        | 0,0011898         | 0,00170512        | 0,00030899        |
| -19,6679737                        | 0,00113298        | 0,00148992        | 0,00119064        | 0,00138766        | 0,00033631        |

|                   |            |            |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -19,0780574       | 0,00144737 | 0,000857   | 0,00191983 | 0,00171266 | 0,00030386 |
| -17,9156989       | 0,00182715 | 0,00191098 | 0,001995   | 0,00089153 | 0,00043617 |
| -19,1414995       | 0,00110073 | 0,00154214 | 0,00081811 | 0,00158961 | 0,00033469 |
| -20,5982767       | 0,00087368 | 0,00123659 | 0,00167358 | 0,00074638 | 0,00037376 |
| -19,3891923       | 0,0018186  | 0,00149807 | 0,00196849 | 0,00082589 | 0,00041441 |
| -16,2186574       | 0,00102213 | 0,00186701 | 0,00132883 | 0,0006964  | 0,00043649 |
| -20,0595312       | 0,00083022 | 0,00169642 | 0,00137536 | 0,00166234 | 0,00038133 |
| -20,4153805       | 0,00131234 | 0,00106672 | 0,00117539 | 0,00113782 | 0,00031845 |
| -17,1806768       | 0,00154102 | 0,00157581 | 0,00158317 | 0,00042915 | 0,00028133 |
| -21,491158        | 0,00131936 | 0,00112592 | 0,00050044 | 0,00196994 | 0,00033219 |
| -20,8729019       | 0,00026934 | 0,00135932 | 0,00170208 | 0,0015684  | 0,00032119 |
| -19,9688488       | 0,00101016 | 0,00126884 | 0,00187642 | 0,00185378 | 0,00033321 |
| -25,1974062       | 0,00113959 | 0,00113086 | 0,00138977 | 0,00191775 | 0,00036576 |
| -21,5482155       | 0,00014207 | 0,00147829 | 0,00093811 | 0,00183804 | 0,0003647  |
| <b>Materiales</b> | 5          | 16         | 6          | 6          | 16         |

Tabla 28. Resultados absorbedor de cinco capas para alta frecuencia.

|                            | GSA diseño 5 |             | PSO[4]   |             | SADE[13][4] |             | CFO[4]   |             |
|----------------------------|--------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|
|                            | Material     | Grosor (mm) | Material | Grosor (mm) | Material    | Grosor (mm) | Material | Grosor (mm) |
| Capa 1                     | 16           | 0.36576     | 14       | 0.455       | 16          | 0.384       | 16       | 0.3941      |
| Capa 2                     | 6            | 1.91775     | 6        | 1.995       | 6           | 0.433       | 6        | 1.9646      |
| Capa 3                     | 6            | 1.38977     | 8        | 0.322       | 6           | 1.143       | 9        | 1.8674      |
| Capa 4                     | 16           | 1.13086     | 5        | 0.986       | 6           | 1.446       | -        | -           |
| Capa 5                     | 5            | 1.13956     | 11       | 1.128       | 15          | 1.454       | -        | -           |
| Coeficiente Reflexión (dB) | -25,1974062  |             | -23.889  |             | -25.485     |             | -22.5420 |             |
| Grosor total(mm)           | 5.94373      |             | 4.888    |             | 4.860       |             | 4.22631  |             |

Tabla 29. Diseño para frecuencia especificada entre (2 GHz – 8 GHz)

| Algoritmo | Mínimo(dB)   | Máximo(dB)   | Promedio(dB) | Desviación |
|-----------|--------------|--------------|--------------|------------|
| GSA       | -34.0347254  | -25.1973671  | -28.5017560  | 2.7923268  |
| PSO       | -25.85893661 | -23.9117550  | -24.6568123  | 0.66743015 |
| SADE      | -30.43295702 | -25.45243334 | -27.8409033  | 1.67386396 |
| CFO       | -23.49742730 | -22.49881797 | -23.0060040  | 0.36606683 |

Tabla 30. Análisis de resultados diseño de cinco capas.

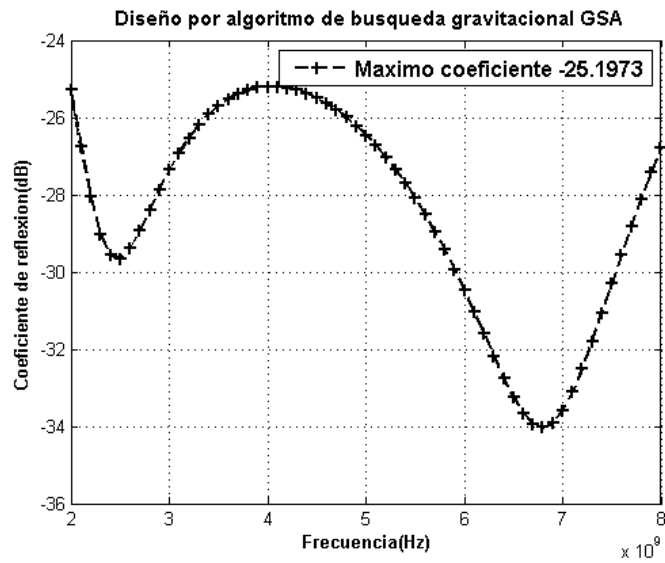


Figura 20. Comportamiento en alta frecuencia del diseño de cinco capas

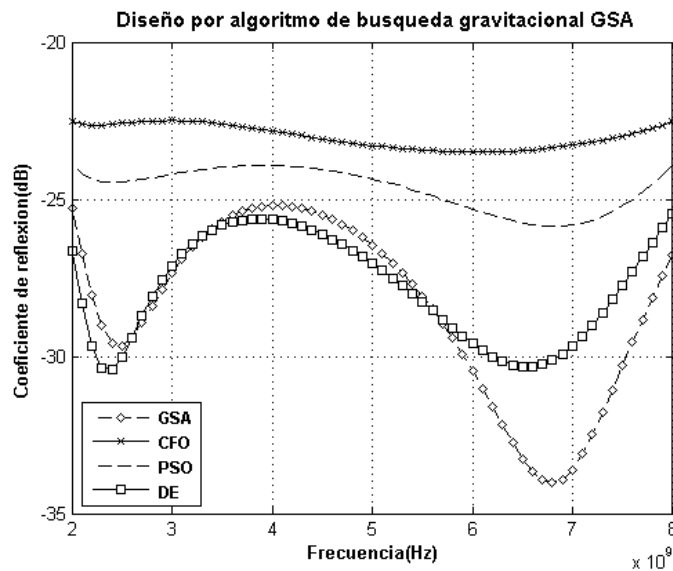


Figura 21. Comparación de resultados (2 -8 GHz)

#### 4.4 PROBABILIDAD DE ACIERTO

Debido a la naturaleza del algoritmo GSA, no se puede garantizar encontrar el mejor resultado en un solo intento o en una sola ejecución. Sin embargo es

posible predecir un número de ejecuciones mínimo tal que aseguremos una alta probabilidad de obtener el mejor diseño de absorbedor.

Observando los parámetros de desempeño (coeficiente de reflexión y dimensiones) de los diseños encontrados, se optó por escoger los mejores de ellos para calcular la probabilidad de acierto. Entre estos están el diseño de tres capas presentado en la Tabla 20 y el diseño para cinco capas de la Tabla 23.

#### 4.4.1 ABSORBEDOR DE TRES CAPAS.

La Tabla 31 representa el coeficiente de reflexión de un absorbedor de tres capas para baja frecuencia, ver sección 4.2.2. Tenemos una muestra de datos no agrupados de los cuales es muy difícil sacar alguna conclusión. Una forma de organizar estos resultados y de presentarlos de una forma compacta y fácil de leer, es construir un histograma, en el cual los datos están reunidos y es posible contabilizar el número de veces que se repiten los diferentes datos de la muestra.

|    | Coeficiente<br>Reflexión (dB) |    | Coeficiente<br>Reflexión (dB) |    | Coeficiente<br>Reflexión (dB) |
|----|-------------------------------|----|-------------------------------|----|-------------------------------|
| 1  | -21,8208963                   | 11 | -22,5212724                   | 21 | -21,8843668                   |
| 2  | -22,5405571                   | 12 | -22,1357715                   | 22 | -23,8683925                   |
| 3  | -21,6429943                   | 13 | -24,3785572                   | 23 | -21,5600897                   |
| 4  | -22,5783593                   | 14 | -22,8284955                   | 24 | -22,8042322                   |
| 5  | -23,4198486                   | 15 | -21,8631187                   | 25 | -23,8723126                   |
| 6  | -22,7359696                   | 16 | -22,178786                    | 26 | -22,4131196                   |
| 7  | -24,1209218                   | 17 | -22,0959195                   | 27 | -23,9854235                   |
| 8  | -21,211764                    | 18 | -22,3000181                   | 28 | -21,3791973                   |
| 9  | -21,9814083                   | 19 | -23,7485241                   | 29 | -22,2589415                   |
| 10 | -21,6642115                   | 20 | -23,6858259                   | 30 | -22,8815594                   |

Tabla 31. Resultados arrojados por el algoritmo, absorbedor de tres capas para baja frecuencia.

Siguiendo con el procedimiento presentado en la sección 2.1.3, se divide el intervalo total o rango del histograma en subintervalos de igual amplitud, llamados clases y sobre cada clase se ubica el número de veces que un dato de la muestra cae en su rango.

Una aproximación para determinar el número de intervalos está dada por la ecuación ( 4) y la amplitud de cada clase por la ecuación ( 5).

Para la construcción del histograma se tienen 6 clases de amplitud 0.5278 (dB), distribuidas como muestra la Tabla 32.

| CLASE | INTERVALO [dB]     |
|-------|--------------------|
| 1     | -24.3786, -23.8508 |
| 2     | -23.8508, -23.323  |
| 3     | -23.323, -22.7952  |
| 4     | -22.7952, -22.2674 |
| 5     | -22.2674, -21.7396 |
| 6     | -21.7396, -21.2118 |

Tabla 32. Clases e intervalos del histograma absorbedor tres capas.

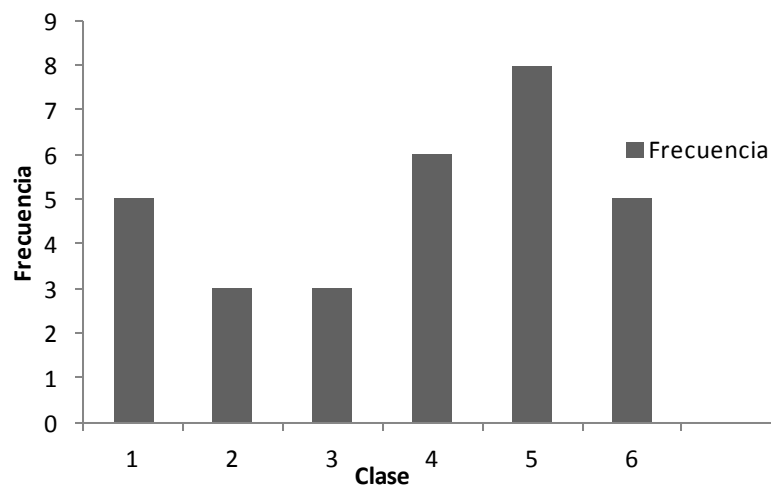


Figura 22. Histograma, muestra de 30 datos.

Deseamos calcular la probabilidad que GSA acierte al valor óptimo del coeficiente de reflexión (clase 1 del histograma de la Figura 22). De las 30 veces que se ejecutó el algoritmo, solo en 5 ocasiones se llegó al evento esperado. Las probabilidades de acierto en la clase 1 ( $P(1)$ ) y fuera de esta ( $P(2)$ ) se calculan con las ecuaciones (35) y (36), y se ilustran en la Figura 23.

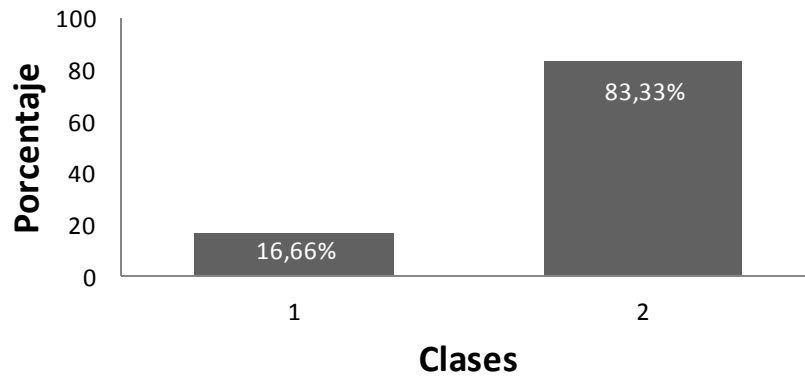


Figura 23. Probabilidad de acierto del algoritmo para absorbedor de tres capas

$$P(1) = \frac{5}{30} * 100 = 16.6666\% \quad (35)$$

$$P(2) = 1 - P(1) = 83.3333\% \quad (36)$$

Cuando se ejecuta el algoritmo de optimización, el coeficiente de reflexión obtenido no influye en el resultado de la siguiente prueba, a esto se le da el nombre de sucesos independientes [14]. Ahora basados en probabilidad condicional podemos calcular el mínimo número de ejecuciones del algoritmo, que se necesitan para obtener el valor óptimo con una alta probabilidad.

$$P(1 \cap 2) = P(1) * P(2) \tag{37}$$

El número de veces que se debe ejecutar el algoritmo, ( $n$ ), para que alcance el valor óptimo con una probabilidad del 99% es entonces:

$$\frac{99}{100} = 0.99 = 1 - (0.83333)^n \tag{38}$$

Despejando, se encuentra que  $n \approx 25.253$ , por lo tanto para un número de ejecuciones  $n > 26$ , es posible que el algoritmo alcance un resultado óptimo, ubicado en la primera clase del histograma (Ver Figura 22).

#### 4.4.2 ABSORBEDOR DE CINCO CAPAS

A continuación se procederá a realizar el histograma de los resultados obtenidos para un absorbedor de cinco capas para baja frecuencia, ver sección 4.2.3. La Tabla 33 contiene el coeficiente de reflexión para una muestra con 30 datos.

|   | Coeficiente<br>Reflexión (dB) |    | Coeficiente<br>Reflexión (dB) |    | Coeficiente<br>Reflexión (dB) |
|---|-------------------------------|----|-------------------------------|----|-------------------------------|
| 1 | -22,2732872                   | 11 | -26,8674184                   | 21 | -21,9826672                   |
| 2 | -22,8070833                   | 12 | -28,941879                    | 22 | -24,0805386                   |
| 3 | -24,1302838                   | 13 | -25,1242974                   | 23 | -21,4384521                   |
| 4 | -24,6348104                   | 14 | -23,7126355                   | 24 | -20,9064837                   |
| 5 | -20,8219037                   | 15 | -21,7730332                   | 25 | -24,5673286                   |
| 6 | -18,5167918                   | 16 | -25,4719047                   | 26 | -25,8932109                   |
| 7 | -21,2171702                   | 17 | -22,4612939                   | 27 | -26,2458029                   |
| 8 | -20,6911192                   | 18 | -22,6365982                   | 28 | -19,075917                    |

|    |             |    |             |    |             |
|----|-------------|----|-------------|----|-------------|
| 9  | -25,5089794 | 19 | -22,9859429 | 29 | -21,4831611 |
| 10 | -26,4374624 | 20 | -25,4004883 | 30 | -23,4479485 |

Tabla 33. Resultados arrojados por el algoritmo, para 30 ejecuciones, absorbedor 5 capas.

La Tabla 34 contiene las clases y sus respectivos intervalos, calculados con la ecuación (4) y la ecuación (5).

| CLASE | INTERVALO [dB]     |
|-------|--------------------|
| 1     | -28.9418, -27.2043 |
| 2     | -27.2043, -25.4668 |
| 3     | -25.4668, -23.7293 |
| 4     | -23.7293, -21.9918 |
| 5     | -21.9918, -20.2543 |
| 6     | -20.2543, -18.5181 |

Tabla 34. Clases e intervalos del histograma, absorbedor cinco capas.

Ahora se procede a construir el histograma (Figura 24).

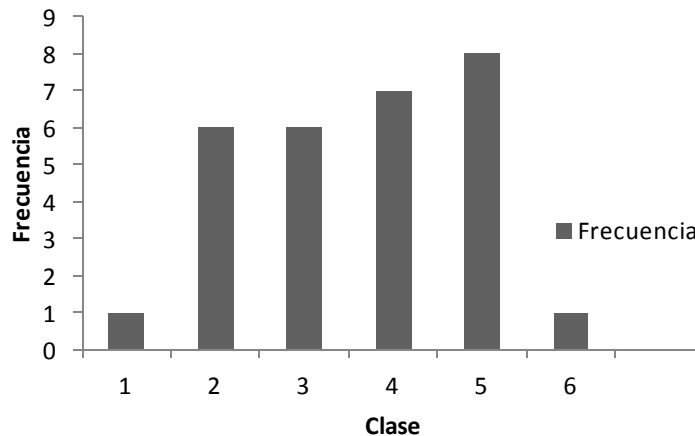


Figura 24. Histograma, muestra de 30 datos, absorbedor 5 capas.

Usando las ecuaciones (35) y (36) calculamos la probabilidad que el algoritmo arroje un diseño que este en la clase 1. La ecuación (38) nos permite estimar el menor número de veces que es necesario ejecutar el algoritmo, ( $n$ ), para que alcance el valor óptimo. Se fija una probabilidad de acierto de 99%.

Se obtiene que es necesario un número de ejecuciones  $n > 136$  para que el algoritmo GSA arroje el resultado deseado.

## 5 CONCLUSIONES

- Se cumplieron satisfactoriamente todos los objetivos planteados en este trabajo de investigación.
- Durante esta investigación se realizó un análisis sobre la forma en que algunos parámetros de GSA afectan su desempeño. Por una parte, se observó que GSA converge muy rápidamente y arroja el mejor resultado en pocas iteraciones. Por tanto, el criterio de parada se implementa para que se detecte esta alta convergencia y se ejecute GSA en el menor número de iteraciones posible (método II sección 3.1). Adicionalmente, se encontró que el criterio de parada llega a influir significativamente en el tiempo de cómputo. Esto logró una reducción del 23.62% en el tiempo de cómputo (población de 100 agentes). Por otra parte, el criterio de frontera utilizado es aquel que reintegra los agentes que se salen del rango de búsqueda válido a la posición donde se encuentra el mejor agente (Fbest) (sección 3.2), este método hace que GSA arroje resultados más cercanos al óptimo global.
- Según los resultados del análisis comparativo realizado en la sección 4.2, concluimos que el algoritmo de búsqueda gravitacional GSA, para un conjunto de materiales dados [16 3 4] encuentra los grosores que constituyen el absorbedor electromagnético multicapa, con el menor coeficiente de reflexión. GSA es capaz de minimizar la función objetivo de un dispositivo absorbedor de forma eficaz, escogiendo la mejor combinación de grosores de capas para construir el absorbedor electromagnético óptimo. GSA supera en hallar el mínimo alrededor del óptimo global a los métodos de optimización (PSO y PSO-AI) y es comparable al hallado por CFO. El dispositivo propuesto tiene un máximo coeficiente de reflexión que es 1.799% menor que CFO y un 4% más grueso que este.
- Se elaboraron dos propuestas de diseño de absorbedores electromagnéticos multicapas  $n = 3$  y  $n = 5$ , usando el método en cascada

(sección 4.2 y 4.3), con el propósito de fijar un juego de materiales con buena capacidad de absorción, acotando las dimensiones y reduciendo el número de variables a considerar por el algoritmo. De esta manera se disminuye la dificultad del problema de minimización. Se concluye que para la obtención de un diseño de absorbedor óptimo se necesita un equilibrio en las variables que afectan su desempeño. Estas variables son representadas por las dimensiones físicas y los materiales usados para las capas. Tanto los materiales como los grosores, deben ser escogidos de tal forma que se proporcione una atenuación admisible para un rango de frecuencia específico.

- Debido a su naturaleza, y considerando la complejidad de la función objetivo, GSA no garantiza encontrar el óptimo en cada iteración. Sin embargo, una selección apropiada de los parámetros, así como la implementación de un estudio estadístico, son herramientas que permiten obtener el óptimo global—con un nivel de confiabilidad deseado—luego de ejecutar varias veces la estrategia. Durante esta investigación, se encontró que era necesario ejecutar 25 veces el algoritmo para tener un 99% de probabilidad de encontrar el óptimo global (diseño de tres capas sección 4.4.1). En cuanto al diseño de cinco capas (sección 4.2.3) es necesario correr GSA 136 veces para obtener un 99% de probabilidad de obtener el diseño óptimo.
- Se diseñó un absorbedor electromagnético de tres capas en el rango de frecuencia de (0.85GHz-2GHz) con GSA, aplicando los ajustes de parámetros y criterios establecidos (Tabla 20). Con respecto a este diseño, se encontró que ofrece un máximo índice de reflexión mejor (un 6.8% mayor) que los encontrados por PSO y PSO con análisis de intervalos. Las dimensiones del dispositivo satisfacen las condiciones establecidas y es un poco más delgado que los demás diseños. De nuevo CFO supera a GSA en capacidad de absorción.

- Se diseñó un absorbedor de cinco capas que ofrece un buen desempeño en todo en rango de frecuencia (0.85GHz-2GHz). El dispositivo supera a los diseños realizados por CFO, PSO y SADE (Tabla 29) en cuanto a coeficiente de reflexión. Sin embargo, es más grueso que los demás en 1.1867mm aproximadamente.
- Se realizó el diseño de un absorbedor de tres capas en el rango de frecuencia de 2GHz a 8GHz (Tabla 26). Este diseño proporciona un máximo de absorción cercano a los realizados por demás investigaciones y su grosor se encuentra por debajo de sus contrapartes, por tanto es mucho más delgado y económico.
- En cuanto al diseño de absorbedor de cinco capas para alta frecuencia se encuentra que debido a su gran tamaño (grosor total), su costo de fabricación será más alto. SADE es el diseño más llamativo superando los demás en capacidad de absorción (Tabla 29).

## **6 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

Realizar un estudio con GSA para el diseño de absorbedores cuyas ondas electromagnéticas no incidan de manera perpendicular a este, sino con otros ángulos de incidencia.

Validar los resultados de diseño mediante experimentos físicos o si es posible la elaboración de algunos de los diseños propuestos.

La principal medida usada para comparar y seleccionar los dispositivos fue el máximo coeficiente de reflexión, sin embargo este no es el único indicador del desempeño de un absorbedor; la reflexión promedio y la desviación del coeficiente de reflexión en el rango de frecuencias de diseño, también pueden ser usados para comparar los diferentes absorbedores. Para futuros trabajos proponemos explorar otras formas de selección de absorbedores electromagnéticos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Gilat, *MATLAB Una introduccion con ejemplos Practicos.*, 2nd ed. Barcelona: Reverté.
- [2] A. M.J and N. . Dib, "Desing of multilayer microwave broadband absorbers using central force optimization.," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 26, no. September, pp. 101–113, 2010.
- [3] C. Rikelme, "Construccion de un histograma," 2011. [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/CsarRikelme/construccion-de-histograma>
- [4] C. Rivas, "Compatibilidad Electromagnética," Tesis de Pregrado, Universidad Fransisco Marroquin. Guatemala, 2002.
- [5] E. Martinez, "Tipos de Antena," *Rev. RED edición Espec. El ABC las Telecomunicaciones*, vol. 1, p. 8, 2002.
- [6] E. Michielssen, J.-M. Sajer, S. Ranjithan, and R. Mittra, "Design of lightweight broad band microwave," *IEEE*.
- [7] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, "GSA: A Gravitational Search Algorithm," *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 179, no. 13, pp. 2232–2248, Jun. 2009.
- [8] E. Salazar and J. Mora, "Diseño de absorbedores electromagnéticos óptimos en el rango de frecuencias de las comunicaciones inalambricas.," Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander., 2010..
- [9] J. Gonzalez and C. Bayona, "Aplicacion del método de optimización por fuerza central (CFO) al diseño de un absorbedor electromagnético óptimo," Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [10] J. Robinson and Y. Rahmat-Samii, *Particle swarm optimization in electromagnetics*, vol. 52, no. 2. IEEE, 2004, pp. 397–407.
- [11] R. E. Moore, B. Kearfott, and M. Cloud, *INTERVAL ANALYSIS*, 1st ed. Louisiana: SIAM, 2009, p. 234.
- [12] Red Pucará, "Guia de compatibilidad electromagnética (EMC).," Barcelona, Reporte, 2006.
- [13] M. Molga and C. Smutnicki, "Test functions for optimization needs," *3 kwietnia*, vol. 1, no. c, pp. 1–43, 2005.
- [14] W. Ronald E, M. Raymond H, and M. Sharon L, *Probabilidad y Estadística para ingenieros*, Sexta. Mexico.

## ANEXOS

### ANEXO A. RESULTADOS GSA CON FUNCIONES DE PRUEBA.

#### TAMAÑO DE LA POBLACIÓN.

Las siguientes tablas manifiestan los resultados de GSA para varios tamaños de población, utilizando las funciones de prueba de Jong, Rastrigin, Schwefel.

| N=20         |               |               | N=50         |               |               | N=100         |               |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| F_BEST       | X             | Y             | F_BEST       | X             | Y             | F_BEST        | X             | Y             |
| 7,788381E-06 | 1,338406E-03  | -2,448888E-03 | 1,015844E-04 | -9,985185E-03 | 1,371301E-03  | 6,356119E-04  | -2,420487E-04 | -2,420487E-04 |
| 4,308652E-04 | -3,081705E-03 | 2,052726E-02  | 9,080989E-06 | -2,582970E-03 | 1,552178E-03  | 2,018556E-02  | -1,675726E-02 | -1,675726E-02 |
| 2,898432E-05 | -5,050960E-03 | -1,863364E-03 | 4,884846E-05 | 5,924399E-03  | -3,708094E-03 | 5,073199E-04  | 4,097503E-03  | 4,097503E-03  |
| 1,859796E-05 | 2,550474E-03  | 3,477504E-03  | 1,100511E-04 | -4,334092E-03 | -9,553363E-03 | 2,468454E-03  | 1,707959E-04  | 1,707959E-04  |
| 4,849231E-06 | -1,960599E-03 | 1,002637E-03  | 2,767381E-04 | 9,989989E-03  | -1,330181E-02 | 2,575534E-03  | -2,182970E-03 | -2,182970E-03 |
| 1,288179E-04 | 3,540871E-03  | 1,078333E-02  | 2,459766E-04 | -1,245802E-02 | -9,527561E-03 | -7,622494E-03 | 1,268865E-02  | 1,268865E-02  |
| 3,179881E-04 | -1,736759E-02 | -4,044134E-03 | 4,285874E-04 | 1,795744E-03  | 2,062432E-02  | -1,765756E-03 | -1,406685E-03 | -1,406685E-03 |
| 6,603727E-04 | 2,175858E-02  | -1,367249E-02 | 1,712599E-03 | -2,848489E-02 | 3,002015E-02  | -3,371946E-03 | -5,674195E-04 | -5,674195E-04 |
| 2,295121E-03 | -1,985423E-03 | -4,786626E-02 | 3,995278E-05 | 6,122241E-03  | -1,571926E-03 | -1,941634E-03 | 1,104897E-03  | 1,104897E-03  |
| 2,229547E-05 | -7,727657E-04 | -4,658144E-03 | 1,096104E-06 | 1,010581E-03  | -2,735524E-04 | -2,833768E-03 | 1,373805E-03  | 1,373805E-03  |

Tabla 35. Función de Jong.

| N=20        |             |             | N=50        |             |             | N=100       |             |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| F_BEST      | X           | Y           | F_BEST      | X           | Y           | F_BEST      | X           | Y           |
| -712,347626 | 447,003652  | 439,317074  | -827,970180 | 417,300119  | 429,080173  | -817,374654 | 408,350983  | 423,423116  |
| -549,302421 | -286,049103 | -314,590683 | -762,635503 | 421,542240  | 396,026925  | -809,615157 | 435,851931  | 423,051131  |
| -400,193653 | -266,550197 | -323,543881 | -702,225021 | -300,211960 | 409,425441  | -829,733530 | 429,025964  | 421,544067  |
| -547,575580 | -323,271506 | -302,195743 | -677,319634 | -314,646620 | 407,169327  | -716,268560 | 419,481524  | -297,663819 |
| -594,221864 | 391,790288  | -316,235633 | -680,370739 | 419,822934  | -320,178923 | -803,242843 | 428,028581  | 405,825607  |
| -472,952694 | 191,556769  | -293,249770 | -599,760927 | 411,084724  | 212,149025  | -712,878080 | 415,447258  | -307,238599 |
| -635,575620 | 402,250971  | -320,600403 | -706,174420 | 419,469193  | -292,300612 | -786,980778 | 435,168617  | 435,261785  |
| -685,528239 | 451,011626  | 402,445643  | -773,789115 | 442,370612  | 413,387998  | -712,369047 | -308,179041 | 415,999031  |
| -722,238028 | 451,257655  | 415,481706  | -610,641085 | -272,345379 | 425,631471  | -709,024140 | 420,462627  | -293,382804 |
| -480,500237 | 216,866728  | -304,164594 | -699,939458 | 420,404129  | -289,989345 | -820,954718 | 411,672474  | 427,973424  |

Tabla 36. Función de Schwefel.

| N=20             |                  |               | N=50             |               |               | N=100        |               |               |
|------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| F_BEST           | X                | Y             | F_BEST           | X             | Y             | F_BEST       | X             | Y             |
| 1,990597E+0<br>0 | 9,963295E-01     | 9,962005E-01  | 1,800455E-04     | -1,477206E-05 | -9,525272E-04 | 5,777972E-03 | 8,746305E-04  | -5,325567E-03 |
| 1,015592E+0<br>0 | -8,445235E-03    | -9,892380E-01 | 1,449194E-04     | -8,442226E-04 | 1,332639E-04  | 1,139334E-03 | 1,651550E-03  | -1,736455E-03 |
| 8,571183E-04     | -5,112512E-04    | 2,014696E-03  | 1,013848E+0<br>0 | 4,109111E-03  | -9,861023E-01 | 1,305982E-04 | -1,482029E-04 | -7,976971E-04 |
| 2,422769E-04     | 6,255351E-04     | 9,109945E-04  | 1,568171E-04     | -8,882600E-04 | 3,790046E-05  | 4,343346E-03 | 4,660756E-03  | -4,142862E-04 |
| 1,010317E+0<br>0 | 4,441088E-03     | 9,873587E-01  | 2,958101E-04     | -7,927167E-04 | -9,287851E-04 | 9,483530E-04 | 2,057639E-03  | -7,391734E-04 |
| 4,180982E-01     | -4,567826E-02    | -5,928347E-03 | 3,692436E-04     | -2,385216E-04 | -1,343242E-03 | 3,805546E-04 | 1,530604E-04  | -1,376510E-03 |
| 1,724863E-03     | -2,065021E-03    | -2,104763E-03 | 8,177504E-01     | -6,319249E-02 | 1,343988E-02  | 9,120465E-05 | -1,894698E-05 | -6,777617E-04 |
| 1,412904E-01     | 2,460811E-02     | -1,038536E-02 | 3,453111E-03     | -4,170162E-03 | 1,273964E-04  | 1,381875E-01 | 6,578480E-03  | 2,558649E-02  |
| 1,003935E+0<br>0 | 1,001683E+0<br>0 | -1,814432E-04 | 1,047004E+0<br>0 | 9,844064E-01  | -1,229765E-02 | 2,285678E-03 | 2,495471E-03  | -2,300839E-03 |
| 3,110262E-02     | 1,050451E-02     | -6,817314E-03 | 2,484165E-06     | 8,108050E-06  | -1,116053E-04 | 3,863422E-06 | -1,018877E-04 | 9,535490E-05  |

Tabla 37. Función de Rastrigin.

## CRITERIO DE PARADA.

Resultados de GSA realizados para cada uno de los criterios de parada implementados en la sección 3.1.

| JONG         |               |               | SCHWEFEL   |            |            | RASTRIGIN    |               |               |
|--------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| F_BEST       | X             | Y             | F_BEST     | X          | Y          | F_BEST       | X             | Y             |
| 4,318569E-05 | -2,434262E-03 | 6,104102E-03  | -          | -          | -          | 9,968910E-01 | -2,307816E-03 | 9,928575E-01  |
| 5,696645E-05 | 7,299417E-03  | 1,919627E-03  | 700,588481 | 423,611289 | 290,483616 | 01           | 03            |               |
| 2,849050E-05 | 1,193705E-03  | -5,202457E-03 | -          | -          | -          | 9,953566E-01 | -9,955499E-01 | -1,286187E-03 |
| 3,529760E-06 | -1,746936E-03 | 6,913562E-04  | 741,973980 | 425,502194 | 393,058221 | 01           | 01            | 03            |
| 1,197683E-04 | -3,945166E-03 | 1,020803E-02  | -          | -          | -          | 5,146848E-01 | 5,106449E-02  | 2,979780E-03  |
| 2,053579E-03 | -4,017364E-02 | -2,096802E-02 | 718,866095 | 421,646205 | 304,706852 | 01           | 01            | 03            |
| 3,309332E-06 | 6,669227E-05  | -1,817934E-03 | -          | -          | -          | 5,637958E-01 | 9,749674E-04  | 1,375238E-03  |
| 8,736244E-05 | 1,678088E-03  | 9,194915E-03  | 794,581239 | 424,640085 | 402,570215 | 04           | 04            | 03            |
| 4,986371E-05 | -6,160396E-03 | -3,451555E-03 | -          | -          | -          | 2,714244E-01 | 1,152234E-03  | 2,012037E-04  |
| 1,140153E-04 | 1,044612E-02  | -2,212189E-03 | 655,720724 | 443,492463 | 305,093249 | 04           | 03            | 04            |
| 3,309332E-06 | 6,669227E-05  | -1,817934E-03 | -          | -          | -          | 9,492212E-01 | 2,166826E-03  | -2,991815E-04 |
| 8,736244E-05 | 1,678088E-03  | 9,194915E-03  | 459,444525 | 405,806262 | 255,404582 | 04           | 03            | 04            |
| 4,986371E-05 | -6,160396E-03 | -3,451555E-03 | -          | -          | -          | 5,349371E-01 | -5,113959E-02 | 1,017109E-02  |
| 1,140153E-04 | 1,044612E-02  | -2,212189E-03 | 708,275847 | 294,561877 | 426,073932 | 01           | 02            |               |
| 3,309332E-06 | 6,669227E-05  | -1,817934E-03 | -          | -          | -          | 2,075499E-01 | -3,090287E-03 | 9,550007E-04  |
| 8,736244E-05 | 1,678088E-03  | 9,194915E-03  | 686,717728 | 298,443762 | 405,222046 | 03           | 03            |               |
| 4,986371E-05 | -6,160396E-03 | -3,451555E-03 | -          | -          | -          | 1,257620E+00 | 1,067439E-02  | -             |
| 1,140153E-04 | 1,044612E-02  | -2,212189E-03 | 661,446995 | 281,329039 | 415,598562 | 0            | 02            | 1,029782E+00  |
| 3,309332E-06 | 6,669227E-05  | -1,817934E-03 | -          | -          | -          | 1,032626E+00 | -9,987153E-01 | -1,326105E-02 |
| 8,736244E-05 | 1,678088E-03  | 9,194915E-03  | 797,809016 | 407,121384 | 409,531653 | 0            | 01            | 02            |

Tabla 38. Método I criterio de parada.

| JONG         |               |               | SCHWEFEL   |            |            | RASTRIGIN    |               |               |
|--------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| F_BEST       | X             | Y             | F_BEST     | X          | Y          | F_BEST       | X             | Y             |
| 3,074701E-05 | -1,051610E-03 | -5,444366E-03 | -          | -          | -          | 2,498060E-02 | 2,181530E-03  | 1,100929E-02  |
| 3,352305E-04 | -1,613796E-02 | -8,648519E-03 | 710,898603 | 415,612244 | 308,819754 | 02           | 03            |               |
| 3,042797E-05 | 2,509075E-03  | -4,912485E-03 | -          | -          | -          | 1,797859E-03 | 1,106101E-03  | 2,799803E-03  |
| 1,471251E-03 | 2,308490E-02  | -3,063231E-02 | 819,579968 | 413,835129 | 411,175169 | 03           | 03            |               |
| 3,074701E-05 | -1,051610E-03 | -5,444366E-03 | -          | -          | -          | 1,424829E-02 | -7,592996E-03 | -3,765208E-03 |
| 3,352305E-04 | -1,613796E-02 | -8,648519E-03 | 709,838282 | 423,711636 | 294,178896 | 02           | 03            | 03            |
| 1,471251E-03 | 2,308490E-02  | -3,063231E-02 | -          | -          | -          | 6,869382E-04 | 1,617998E-03  | 9,190402E-04  |
| 3,074701E-05 | -1,051610E-03 | -5,444366E-03 | 606,129042 | 277,538191 | 438,591852 | 04           | 03            |               |

|              |               |               |   |            |            |              |               |               |
|--------------|---------------|---------------|---|------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| 3,420465E-05 | 2,224558E-03  | -5,408881E-03 | - | 388,073458 | 410,449321 | 5,940028E-03 | -3,737380E-03 | -3,996788E-03 |
| 7,192146E-05 | -8,441542E-03 | 8,135261E-04  | - | 399,161725 | 415,626921 | 1,767799E-01 | 1,366408E-02  | -2,657256E-02 |
| 2,252724E-06 | -8,228892E-04 | -1,255220E-03 | - | 437,940391 | -          | 7,186198E-03 | 5,104241E-03  | -3,189276E-03 |
| 3,280238E-03 | -5,111016E-02 | 2,584550E-02  | - | 420,206996 | 393,960789 | 7,319863E-02 | -2,404755E-03 | -1,906854E-02 |
| 3,623630E-05 | -5,985463E-03 | 6,407211E-04  | - | 606,571598 | 331,489545 | 411,554484   | 3,521260E-04  | -3,259356E-03 |
| 4,747877E-04 | -1,336624E-02 | -1,720847E-02 | - | 424,584603 | 404,342218 | 1,394135E-04 | 1,666789E-04  | -8,215454E-04 |

Tabla 39. Método II criterio de parada.

En las siguientes figuras se observa la forma cómo evoluciona el valor Fbest para cada uno de los métodos del criterio de parada.

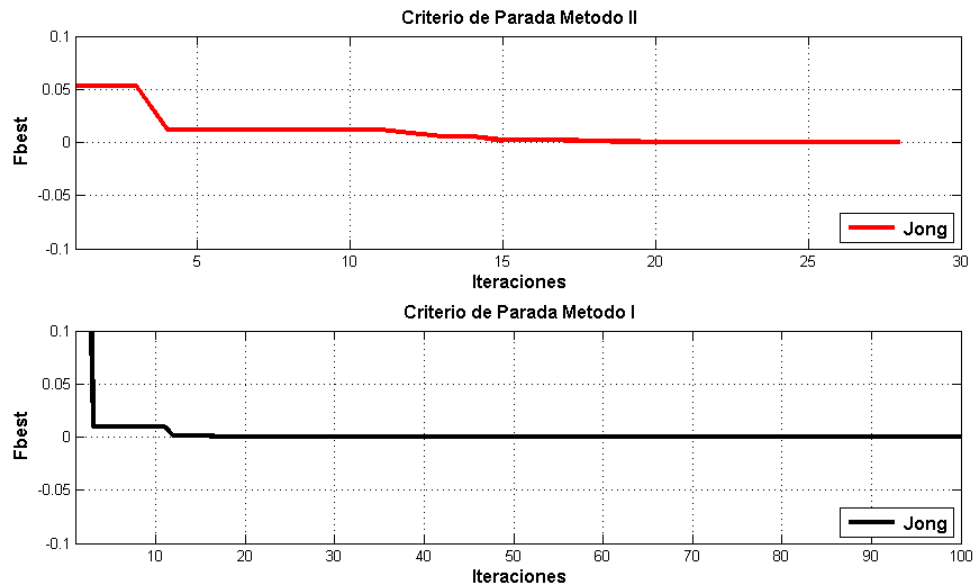


Figura 25. Valor Fbest, criterio de parada función Jong.

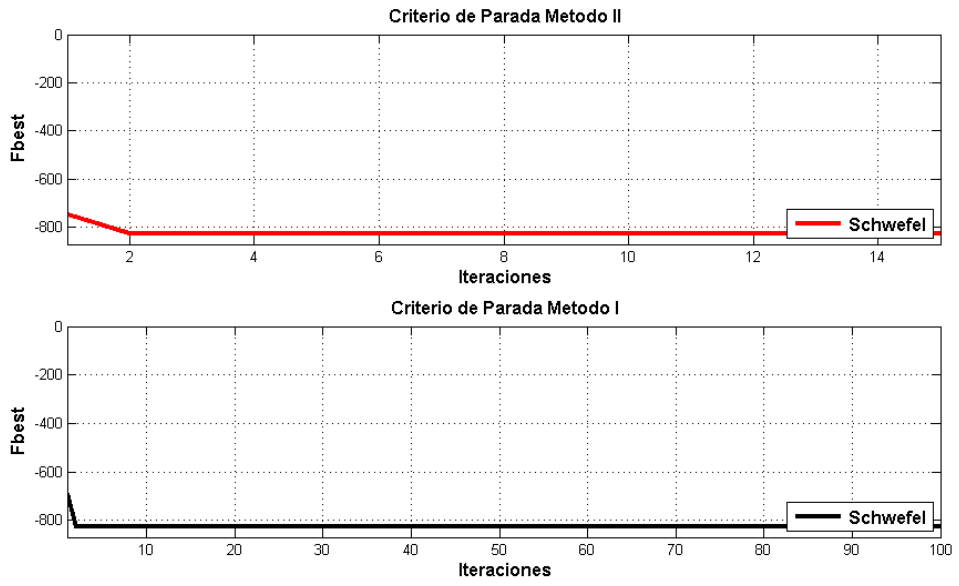


Figura 26. Valor Fbest, criterio de parada función Schwefel.

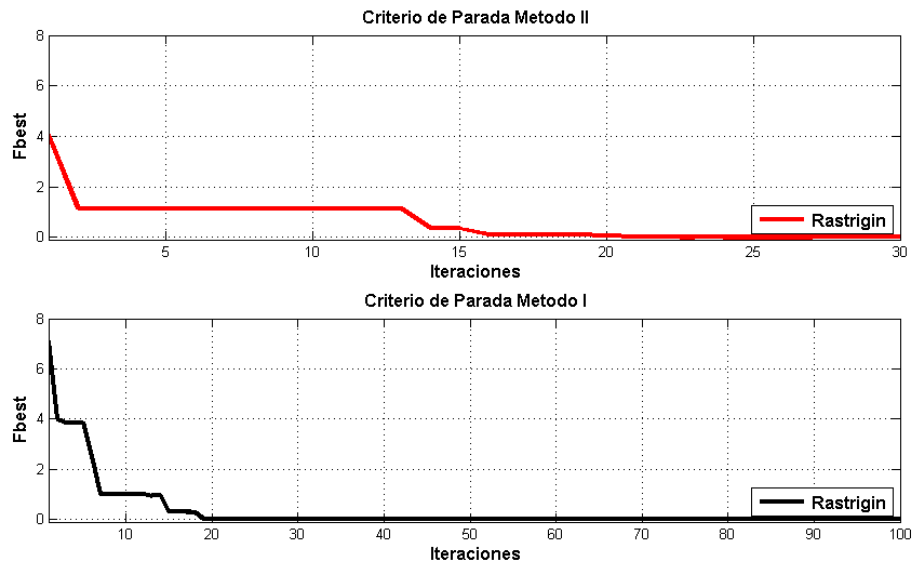


Figura 27. Valor Fbest, criterios de parada función Rastrigin.

## CRITERIO KBEST.

| JONG         |               |               | SCHEWEFEL   |            |            | RASTRIGIN    |               |               |
|--------------|---------------|---------------|-------------|------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| F_BEST       | X             | Y             | F_BEST      | X          | Y          | F_BEST       | X             | Y             |
| 1,015844E-04 | -9,985185E-03 | 1,371301E-03  | -           | -          | -          | 1,800455E-04 | -1,477206E-05 | -9,525272E-04 |
| 9,080989E-06 | -2,582970E-03 | 1,552178E-03  | 827,970180  | 417,300119 | 429,080173 | 1,449194E-04 | -8,442226E-04 | 1,332639E-04  |
| 4,884846E-05 | 5,924399E-03  | -3,708094E-03 | -           | -          | -          | 1,013848E+00 | 4,109111E-03  | -9,861023E-01 |
| 1,100511E-04 | -4,334092E-03 | -9,553363E-03 | 702,225021  | 300,211960 | 409,425441 | 1,568171E-04 | -8,882600E-04 | 3,790046E-05  |
| 2,767381E-04 | 9,989989E-03  | -1,330181E-02 | 677,319634  | 314,646620 | 407,169327 | 2,958101E-04 | -7,927167E-04 | -9,287851E-04 |
| 2,459766E-04 | -1,245802E-02 | -9,527561E-03 | 680,370739  | 419,822934 | 320,178923 | 3,692436E-04 | -2,385216E-04 | -1,343242E-03 |
| 4,285874E-04 | 1,795744E-03  | 2,062432E-02  | 599,760927  | 411,084724 | 212,149025 | 8,177504E-01 | -6,319249E-02 | 1,343988E-02  |
| 1,712599E-03 | -2,848489E-02 | 3,002015E-02  | -706,174420 | 419,469193 | 292,300612 | 3,453111E-03 | -4,170162E-03 | 1,273964E-04  |
| 3,995278E-05 | 6,122241E-03  | -1,571926E-03 | 773,789115  | 442,370612 | 413,387998 | 1,047004E+00 | 9,844064E-01  | -1,229765E-02 |
| 1,096104E-06 | 1,010581E-03  | -2,735524E-04 | 610,641085  | 272,345379 | 425,631471 | 2,484165E-06 | 8,108050E-06  | -1,116053E-04 |

Tabla 40. Kbest\_check=1.

| JONG         |              |               | SCHWEFEL     |              |              | RASTRIGIN    |               |               |
|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| F_BEST       | X            | Y             | F_BEST       | X            | Y            | F_BEST       | X             | Y             |
| 8,834658E-04 | 2,025475E-02 | -2,175341E-02 | -            | -            | -            | 8,561242E-04 | 1,217233E-03  | 1,683357E-03  |
| 1,140618E-05 | 3,220900E-03 | 1,015866E-03  | 8,217080E+00 | 4,097454E+00 | 4,189127E+00 | 1,024977E-04 | -6,580308E-04 | 2,892023E-04  |
| 9,820559E-04 | 2,458098E-02 | -1,943788E-02 | 2            | 2            | 2            | 8,584339E-01 | -4,214634E-02 | -5,082033E-02 |
| 2,424926E-07 | 4,905687E-04 | -4,283696E-05 | 7,875645E+00 | 4,209787E+00 | 4,006918E+00 | 2,340635E-05 | -5,727566E-05 | 3,386736E-04  |

|              |               |               |              |              |              |              |               |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 1,000120E-04 | 5,038557E-03  | 8,638573E-03  | 8,066207E+02 | 4,057127E+02 | 4,254125E+02 | 2,564737E-03 | 1,912009E-03  | 3,045023E-03  |
| 3,986633E-04 | 1,226431E-02  | -1,575595E-02 | 5,517657E+02 | 3,245693E+02 | 3,909072E+02 | 8,215251E-03 | -1,268755E-03 | -6,309091E-03 |
| 3,491935E-06 | -1,438886E-03 | 1,192284E-03  | 6,045620E+02 | 3,905949E+02 | 2,960375E+02 | 3,366539E-04 | -1,170966E-03 | -5,707521E-04 |
| 1,485794E-05 | -2,015180E-03 | 3,285877E-03  | 5,853394E+02 | 3,136796E+02 | 3,030527E+02 | 6,945755E-02 | 1,155532E-03  | 1,868599E-02  |
| 5,190823E-07 | -5,830134E-04 | -4,232938E-04 | 7,144006E+02 | 2,969990E+02 | 4,177819E+02 | 9,952519E-01 | 9,937440E-01  | -3,764767E-05 |
| 1,619319E-03 | 8,491442E-03  | 3,933465E-02  | 8,336683E+02 | 4,157038E+02 | 4,184307E+02 | 7,962780E-04 | -1,510788E-03 | -1,315753E-03 |

Tabla 41.Kbest\_check=0

## CRITERIO DE FRONTERA.

| JONG         |               |               | SCHWEFEL   |            |            | RASTRIGIN    |               |               |
|--------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| F_BEST       | X             | Y             | F_BEST     | X          | Y          | F_BEST       | X             | Y             |
| 2,734015E-04 | -3,190490E-03 | 1,622413E-02  | 606,779082 | 413,147602 | 196,702483 | 9,296884E-04 | 1,966786E-03  | 9,043897E-04  |
| 3,659498E-04 | 8,040325E-03  | -1,735808E-02 | 789,163032 | 425,413625 | 401,553086 | 1,985749E-03 | 4,376087E-05  | -3,163484E-03 |
| 2,802863E-05 | -1,258102E-03 | -5,142549E-03 | 826,751431 | 427,377304 | 427,880629 | 4,092466E-03 | -4,251155E-03 | -1,599046E-03 |
| 2,015395E-04 | -5,762164E-03 | 1,297447E-02  | 717,853391 | 305,715710 | 419,224877 | 1,515760E-05 | -2,153600E-04 | 1,732696E-04  |
| 1,645434E-06 | 6,643289E-04  | 1,097315E-03  | 760,221448 | 432,345830 | 398,516523 | 8,911023E-01 | 1,543453E-02  | 6,568227E-02  |
| 3,326487E-05 | -6,065775E-04 | 5,735585E-03  | 642,352775 | 324,222912 | 408,690818 | 6,877640E-04 | 4,538078E-05  | -1,861363E-03 |
| 4,100313E-04 | 2,007573E-02  | 2,645042E-03  | 806,943751 | 415,895352 | 406,001633 | 7,218540E-05 | -5,348373E-04 | 2,789294E-04  |

|              |              |               |            |            |            |              |               |               |
|--------------|--------------|---------------|------------|------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| 1,244206E-05 | 1,749317E-03 | -3,062997E-03 | 681,469073 | 438,322966 | 300,816166 | 8,366100E-01 | 8,723337E-03  | -6,479390E-02 |
| 9,708364E-06 | 2,678748E-03 | 1,591437E-03  | 810,554844 | 430,265146 | 409,464782 | 7,962893E-03 | -3,756009E-03 | 5,102197E-03  |
| 3,026229E-05 | 1,132856E-03 | -5,383208E-03 | 670,465791 | 406,236660 | 315,778425 | 4,012527E-05 | 5,224899E-05  | -4,466795E-04 |

Tabla 42. Criterio de frontera método I.

| JONG         |               |               | SCHWEFEL   |            |            | RASTRIGIN    |               |               |
|--------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| F_BEST       | X             | Y             | F_BEST     | X          | Y          | F_BEST       | X             | Y             |
| 5,667838E-06 | 1,242087E-03  | 2,031024E-03  | 523,514081 | 231,324508 | 414,004368 | 1,001954E-06 | 6,818083E-05  | -2,004366E-05 |
| 3,113480E-06 | 1,504548E-03  | 9,218542E-04  | 597,490936 | 272,496411 | 432,545770 | 7,254350E-04 | -1,792554E-06 | 1,912227E-03  |
| 5,484188E-07 | -3,682457E-04 | 6,425060E-04  | 712,354661 | 308,960223 | 417,058063 | 3,655414E-04 | -5,675097E-04 | -1,233070E-03 |
| 1,438583E-04 | -3,515444E-03 | 1,146734E-02  | 834,828853 | 415,978251 | 420,784250 | 3,893623E-03 | 3,994498E-03  | -1,915924E-03 |
| 6,070140E-05 | 7,617317E-03  | 1,636423E-03  | 674,352323 | 318,470775 | 410,666632 | 4,171607E-02 | -5,723643E-03 | 1,332732E-02  |
| 1,098183E-05 | 7,639632E-04  | -3,224622E-03 | 692,019897 | 288,453304 | 416,110946 | 1,752773E-04 | 3,671564E-04  | 8,652673E-04  |
| 1,360066E-04 | 1,049712E-02  | 5,081050E-03  | 763,066179 | 409,637110 | 442,732383 | 3,649197E-05 | 1,983943E-04  | -3,802347E-04 |
| 5,128719E-04 | 2,248671E-02  | -2,686932E-03 | 833,906884 | 426,634380 | 421,189690 | 5,712818E-02 | -3,488769E-03 | 1,661428E-02  |
| 1,132029E-05 | 1,889948E-03  | -2,783592E-03 | 594,407255 | 307,446874 | 297,172146 | 2,184028E-06 | -9,691302E-05 | 4,020587E-05  |
| 1,730193E-04 | 4,388218E-03  | -1,240011E-02 | 610,401948 | 420,921984 | 212,865502 | 2,063047E-03 | -1,285701E-03 | 2,957376E-03  |

Tabla 43. Criterio de frontera método II.

## ANEXO B. RESULTADOS DE PRUEBAS DE DISEÑO DE LOS ABSORBEDORES.

A continuación se ilustra los resultados de la metodología en cascada utilizada en los diseños de los absorbedores. En primer lugar se ejecuta GSA 10 veces con materiales aleatorios y de allí se escoge el mejor resultado. En seguida, con el mejor resultado, dejando los materiales fijos se corre el algoritmo 30 veces para los optimizar grosores de cada capa de material.

| Fbest(dB)   | Grosor<br>capa<br>3(mm) | Grosor<br>capa<br>2(mm) | Grosor<br>capa<br>1(mm) | Materiales |    |    |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|----|----|
|             |                         |                         |                         | 4          | 5  | 16 |
| -22,0338317 | 1,61024                 | 1,39608                 | 0,418899                | 4          | 5  | 16 |
| -20,4292769 | 1,96022                 | 1,27198                 | 0,885218                | 4          | 3  | 14 |
| -20,1153833 | 0,891644                | 1,97645                 | 0,684912                | 4          | 4  | 15 |
| -18,4843484 | 1,42396                 | 4,19672                 | 1,58088                 | 3          | 10 | 5  |
| -18,9449496 | 1,07322                 | 1,80029                 | 0,866756                | 4          | 4  | 15 |
| -20,4796292 | 1,43125                 | 1,38293                 | 0,156526                | 5          | 4  | 11 |
| -20,2019912 | 0,678178                | 1,96887                 | 1,20962                 | 2          | 3  | 4  |
| -18,6280709 | 1,99935                 | 4,16571                 | 1,06367                 | 3          | 10 | 5  |
| -19,5094286 | 0,133189                | 1,52559                 | 1,21377                 | 13         | 5  | 4  |
| -19,9551114 | 1,26125                 | 1,87710                 | 0,875523                | 3          | 4  | 16 |

Tabla 44. Absorbedor de tres capas para baja frecuencia.

| Fbest(dB)   | Grosor<br>capa<br>5(mm) | Grosor<br>capa<br>4(mm) | Grosor<br>capa<br>3(mm) | Grosor<br>capa<br>2(mm) | Grosor<br>capa<br>1(mm) | Materiales |    |    |    |    |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|----|----|----|----|
|             |                         |                         |                         |                         |                         | 15         | 10 | 4  | 8  | 14 |
| -22,6549018 | 1,8098                  | 1,1359                  | 1,9805                  | 1,1729                  | 0,73863                 | 15         | 10 | 4  | 8  | 14 |
| -20,4696886 | 1,1863                  | 0,66444                 | 1,8547                  | 1,8475                  | 1,8643                  | 9          | 2  | 7  | 2  | 11 |
| -20,9702768 | 0,22067                 | 1,2203                  | 0,97959                 | 0,78800                 | 1,1113                  | 5          | 5  | 5  | 2  | 14 |
| -20,6154498 | 0,56201                 | 1,3311                  | 0,90647                 | 1,2657                  | 0,94601                 | 11         | 4  | 2  | 11 | 16 |
| -21,1636267 | 1,9174                  | 1,4347                  | 0,66811                 | 1,8979                  | 1,2595                  | 5          | 2  | 1  | 5  | 13 |
| -20,4478493 | 1,8833                  | 0,23747                 | 0,52795                 | 0,66099                 | 0,28002                 | 4          | 5  | 10 | 16 | 4  |
| -20,3786562 | 1,8662                  | 1,6043                  | 0,65250                 | 0,39031                 | 1,1987                  | 4          | 4  | 4  | 16 | 16 |
| -20,1867744 | 0,85402                 | 1,6751                  | 1,1435                  | 1,2284                  | 0,67211                 | 9          | 10 | 4  | 6  | 14 |
| -22,1878075 | 1,8734                  | 1,7652                  | 1,3156                  | 1,3684                  | 1,8825                  | 10         | 8  | 1  | 2  | 11 |
| -23,9491135 | 0,73502                 | 1,9956                  | 1,0302                  | 1,3659                  | 0,71654                 | 12         | 5  | 2  | 15 | 8  |

Tabla 45. Absorbedor de cinco capas para baja frecuencia.

| Fbest(dB)   | Grosor<br>capa<br>3(mm) | Grosor<br>capa<br>2(mm) | Grosor<br>capa<br>1(mm) | Materiales |    |    |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|----|----|
|             |                         |                         |                         |            |    |    |
| -16,8171223 | 1,6817                  | 1,8231                  | 0,50679                 | 4          | 1  | 14 |
| -15,4725553 | 1,6169                  | 1,5136                  | 0,46952                 | 10         | 5  | 16 |
| -14,0443163 | 0,42381                 | 1,7446                  | 0,39389                 | 11         | 5  | 16 |
| -13,6114458 | 1,6978                  | 1,8366                  | 0,46158                 | 5          | 10 | 16 |
| -14,5148834 | 1,6058                  | 1,4516                  | 0,48139                 | 10         | 6  | 15 |
| -13,6082543 | 0,80470                 | 1,7668                  | 0,45305                 | 10         | 4  | 16 |
| -15,7846689 | 1,7020                  | 1,7133                  | 0,50438                 | 13         | 8  | 16 |
| -13,5666364 | 1,9486                  | 0,27339                 | 0,51238                 | 4          | 12 | 16 |
| -20,4355652 | 1,6812                  | 1,7857                  | 0,34698                 | 9          | 6  | 16 |
| -13,4790719 | 1,5765                  | 1,0807                  | 0,40229                 | 13         | 3  | 16 |

Tabla 46. Absorbedor de tres capas para alta frecuencia.

| Fbest(dB)   | Grosor<br>capa<br>5(mm) | Grosor<br>capa<br>4(mm) | Grosor<br>capa<br>3(mm) | Grosor<br>capa<br>2(mm) | Grosor<br>capa<br>1(mm) | Materiales |    |   |    |    |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|----|---|----|----|
|             |                         |                         |                         |                         |                         |            |    |   |    |    |
| -25.1974062 | 1.13956                 | 1.13086                 | 1.38977                 | 1.91775                 | 0.36576                 | 5          | 16 | 6 | 6  | 16 |
| -18,0296779 | 1,03195                 | 1,22965                 | 1,26375                 | 1,98945                 | 0,386863                | 8          | 5  | 4 | 6  | 16 |
| -19,0258808 | 1,57535                 | 1,64117                 | 1,25501                 | 1,58575                 | 0,410145                | 6          | 15 | 7 | 7  | 14 |
| -17,3585831 | 0,710264                | 813334                  | 1,39349                 | 1,42568                 | 0,288653                | 12         | 15 | 8 | 8  | 16 |
| -19,249977  | 1,23204                 | 1,54741                 | 1,32953                 | 0,283839                | 0,427960                | 4          | 3  | 6 | 1  | 14 |
| -18,6092933 | 0,546917                | 1,54692                 | 1,73081                 | 1,59673                 | 0,388622                | 6          | 16 | 7 | 7  | 14 |
| -18,1501839 | 1,39151                 | 0,976248                | 1,35013                 | 0,219253                | 0,307158                | 13         | 7  | 7 | 11 | 16 |
| -19,833936  | 1,01061                 | 1,67226                 | 0,661827                | 1,72944                 | 0,419259                | 13         | 11 | 6 | 6  | 14 |
| -18,8386576 | 1,16283                 | 1,07452                 | 1,25620                 | 0,741381                | 0,396619                | 13         | 13 | 6 | 6  | 14 |
| -19,2951699 | 1,37534                 | 1,05271                 | 0,696703                | 1,75245                 | 0,455514                | 3          | 4  | 3 | 7  | 14 |

Tabla 47. Absorbedor de cinco capas para alta frecuencia.

## ANEXO C. RESULTADOS DEL CAMBIO DE ALFA Y GO.

Las siguientes figuras muestran el resultado de cambiar el valor de alfa en el algoritmo para la función de prueba de Rastrigin y dejando el valor de Go constante ( $Go=100$ ). Las figuras representan el valor de la mejor solución encontrada por el GSA vs las iteraciones realizadas por el mismo. El máximo número de iteraciones es 100 y se utiliza el criterio de parada del método II (ver sección 3.1 ).

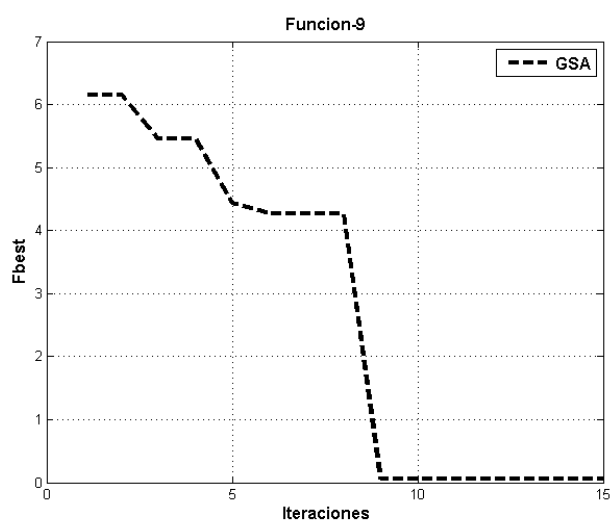


Figura 28. Alfa=20.

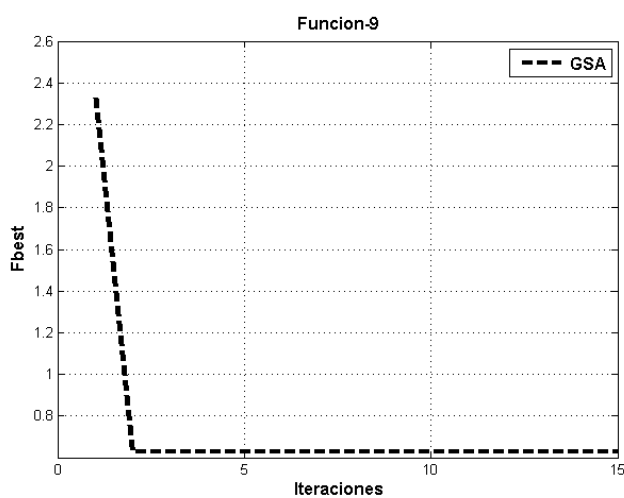


Figura 29. Alfa=1.

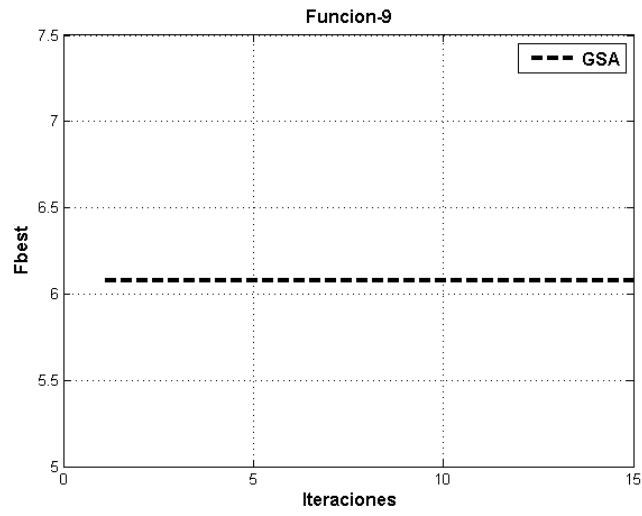


Figura 30. Alfa=inf.

En las siguientes figuras se muestra la variación del parámetro  $G_0$  con alfa constante ( $\alpha=20$ ).

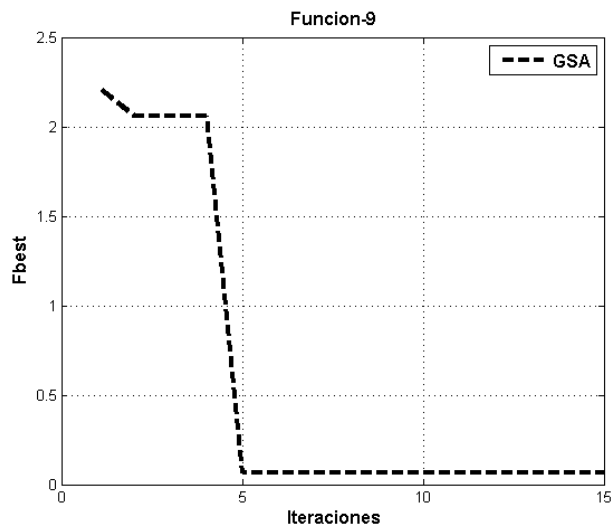


Figura 31.  $G_0=1$ .

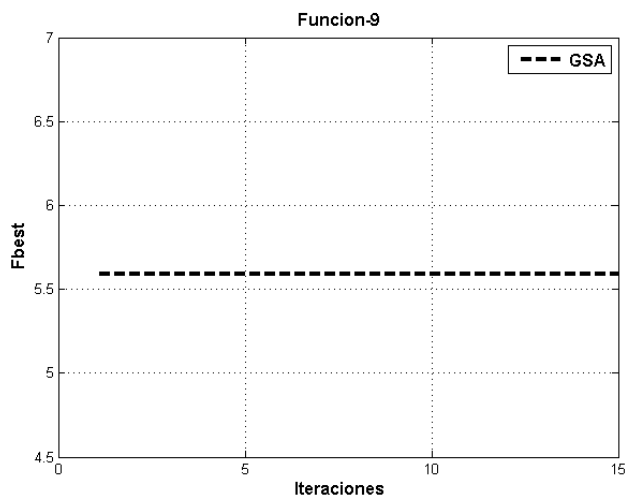


Figura 32. Go=inf.

### ANEXO D. DISEÑOS DE ABSORBEDORES CON GSA.

|                             | GSA diseño 1 |             | GSA diseño 2 |             | GSA diseño 3 |             |
|-----------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|                             | Material     | Grosor (mm) | Material     | Grosor (mm) | Material     | Grosor (mm) |
| Capa 1                      | 16           | 0,830477    | 16           | 0,57732     | 16           | 0,63634     |
| Capa 2                      | 3            | 1,769040    | 5            | 1,46685     | 2            | 0,49975     |
| Capa 3                      | 4            | 1,914183    | 4            | 1,86377     | 11           | 1,18087     |
| Coefficiente Reflexión (dB) | -27,9759289  |             | -24,3785572  |             | -17,216887   |             |
| Grosor total                | 4,5137       |             | 3,90794      |             | 2,31697      |             |

Tabla 48. Diseños para tres capas.

|                   | GSA diseño 5 |             | GSA diseño 6 |             |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|                   | Material     | Grosor (mm) | Material     | Grosor (mm) |
| Capa 1            | 16           | 0,36576     | 9            | 1,701428    |
| Capa 2            | 6            | 1,91775     | 1            | 0,924983    |
| Capa 3            | 6            | 1,38977     | 8            | 1,558248    |
| Capa 4            | 16           | 1,13086     | 2            | 1,971626    |
| Capa 5            | 5            | 1,13956     | 9            | 1,119508    |
| Coefficiente (dB) | -25,1974062  |             | -24,8803     |             |
| Grosor total      | 5,9437       |             | 7,2756       |             |

Tabla 49. Diseños para cinco capas.