

**APLICACIÓN DEL METODO DE OPTIMIZACIÓN POR FUERZA CENTRAL  
(CFO), AL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO ÓPTIMO**

**JORGE ENRIQUE GONZÁLEZ SANDOVAL  
CARLOS JOSÉ BAYONA ACOSTA**

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

**2013**

**APLICACIÓN DEL METODO DE OPTIMIZACIÓN POR FUERZA CENTRAL  
(CFO), AL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO ÓPTIMO**

**JORGE ENRIQUE GONZÁLEZ SANDOVAL**

**CARLOS JOSÉ BAYONA ACOSTA**

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

**DIRECTOR**

**PhD. CARLOS RODRIGO CORREA CELY**

**CODIRECTOR**

**PhD(c) IVAN MAURICIO AMAYA**

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

**2013**

## DEDICATORIA

A Dios a quien le debo la vida; a mi madre por su inmejorable esfuerzo y dedicación; a mi padre porque desde la eternidad me ha dado ejemplo de superación; y, a mis hermanos por su apoyo y motivación.

A Dios porque gracias a él todo esto es posible; a mi madre Nohora Piedad Acosta Mohalem por su constante apoyo, paciencia y amor; a mi padre Rafael Bayona Núñez por sus innumerables consejos; a mi hermano Rafael Bayona Acosta por ser mi ejemplo a seguir y a mi novia Laura Alexandra Ochoa González por su permanente compañía y motivación.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas aquellas personas especialmente a mis maestros, que con su paciencia y enseñanzas, han apoyado y contribuido a mi formación como ingeniero electrónico.

Igualmente, agradezco a los doctores Rodrigo Correa e Iván Mauricio Amaya, quienes con sus incalculables conocimientos supieron orientar mis ideas para la realización y culminación de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>2. RESUMEN .....</b>	<b>16</b>
<b>3. ABSTRACT .....</b>	<b>17</b>
<b>4. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO .....</b>	<b>18</b>
4.1    Planteamiento del problema .....	18
4.2    Objetivo general .....	18
4.3    Objetivos específicos.....	18
<b>5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>20</b>
5.1    Terminología.....	20
5.1.1. <i>Variables principales del programa</i> .....	20
5.2    Algoritmo optimización por fuerza central (CFO).....	21
5.2.1. <i>Modificación al algoritmo (aceleración limitada)</i> .....	25
5.3    Comunicaciones inalámbricas .....	26
5.4    Rango de frecuencias de las comunicaciones inalámbricas .....	26
5.5    Absorbedor electromagnético.....	27
<b>6. FUNCIONES DE PRUEBA.....</b>	<b>33</b>
6.1    Calibración del algoritmo CFO a través de ejemplos ilustrativos con funciones de prueba .....	33
6.1.1. <i>Función de prueba uno</i> .....	34
6.1.2. <i>Prueba dos con función de schwefel</i> .....	40
<b>7. APLICACIÓN DEL ALGORITMO AL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA ÓPTIMO.....</b>	<b>47</b>
7.1    Contraste de resultados .....	49
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>55</b>
<b>9. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>56</b>
<b>10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>
<b>11. ANEXOS.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Factor $F_{rep}$ .....	23
Figura 2. Diagrama de bloques de la implementación de CFO. ....	24
Figura 3. Absorbedor electromagnético multicapa.....	29
Figura 4. Función de prueba 1.....	35
Figura 5. Comportamiento de las sondas, función de prueba 1, con $A_{max} = 0,49e - 0,005t + 0,01$ .....	39
Figura 6. Comportamiento del Best Fitness, función de prueba 1, con $A_{max} = 0,49e - 0,005t + 0,01$ .....	40
Figura 7. Función de prueba 2.....	41
Figura 8. Comportamiento de las sondas función de prueba 2, con $A_{max} = 0,49e - 0,005t + 0,01$ .....	45
Figura 9. Comportamiento del Best Fitness función de prueba 2, con $A_{max} = 0,49e - 0,005t + 0,01$ .....	46
.....	46
Figura 10. Comportamiento del absorbedor electromagnético con CFO original. ....	50
Figura 11. Comportamiento del parámetro $A_{max}$ en la aceleración limitada.....	51
Figura 12. Comportamiento del absorbedor electromagnético con CFO modificado. ....	52
.....	52
Figura 13. Comportamiento del absorbedor electromagnético en el rango de frecuencias de 2 – 8 GHz. ....	54

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Trabajos de grado 2011-2012.....	13
Tabla 2. Parámetros de ejecución para el CFO[13]......	27
Tabla 3. Parámetros de ejecución para el CFO.....	33
Tabla 4. Parámetros de ejecución función de prueba 1.....	35
Tabla 5. Resultados función de prueba 1.....	36
Tabla 6. Resultados función de prueba 1 con aceleración limitada.....	37
Tabla 7. Resultados función de prueba 1 con ajuste en la aceleración limitada....	37
Tabla 8. Resultados función de prueba 1 con propuesta de aceleración limitada.	38
Tabla 9. Mejores resultados función de prueba 1 usando aceleración limitada.....	39
Tabla 10. Parámetros de ejecución para la función de prueba 2.....	41
Tabla 11. Resultados función de prueba 2.....	42
Tabla 12. Resultados función de prueba 2 con aceleración limitada.....	43
Tabla 13. Resultados función de prueba 2 con ajuste de aceleración limitada.....	43
Tabla 14. Resultados función de prueba 2 con propuesta de aceleración limitada. .....	44
Tabla 15. Mejores resultados función de prueba 2 usando aceleración limitada....	44
Tabla 16. Desarrollo analítico funciones de prueba.....	47
Tabla 17. Banco de materiales usados [15]......	49
Tabla 18. Diseños realizados con CFO original.....	51
Tabla 19. Diseños realizados con CFO modificado.....	52
Tabla 20. Diseño propuesto para un rango de frecuencia de 2-8GHz.....	53
Tabla 21. Funciones de prueba.....	61
Tabla 22. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada, utilizando distribución uniforme.....	61
Tabla 23. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada y proceso en cascada, utilizando distribución uniforme.....	62
Tabla 24. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada, utilizando distribución aleatoria.....	62
Tabla 25. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada y proceso en cascada, utilizando distribución aleatoria.....	63
Tabla 26. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada, utilizando distribución uniforme-aleatoria.....	63
Tabla 27. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada y proceso en cascada, utilizando distribución uniforme-aleatoria.....	64
Tabla 28. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t +$ $0,01$ utilizando distribución uniforme.....	64
Tabla 29. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t +$ $0,01$ y proceso en cascada utilizando distribución uniforme.....	65
Tabla 30. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t +$ $0,01$ utilizando distribución aleatoria.....	65
Tabla 31. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t +$ $0,01$ y proceso en cascada, utilizando distribución aleatoria.....	65

Tabla 32. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t + 0,01$ y proceso en cascada, utilizando distribución aleatoria (segunda prueba). ....	66
Tabla 33. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t + 0,01$ y proceso en cascada, utilizando distribución aleatoria (tercera prueba). .....	66
Tabla 34. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t + 0,01$ utilizando distribución uniforme-aleatoria. ....	67
Tabla 35. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t + 0,01$ y proceso en cascada, utilizando distribución uniforme-aleatoria. ....	67
Tabla 36. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t + 0,01$ utilizando distribución aleatoria. ....	68
Tabla 37. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t + 0,01$ utilizando distribución uniforme. ....	68
Tabla 38. Resultados arrojados por el algoritmo con $A_{max} = 0,49e - 0,0003t + 0,01$ utilizando distribución aleatoria-uniforme. ....	69

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Funciones de prueba .....	60
Anexo B: Contraste de resultados .....	61

## GRUPO CEMOS

Línea de trabajo: Modelado y Optimización

La línea de modelado y optimización del grupo CEMOS se encuentra orientada hacia la evaluación de los más importantes algoritmos de optimización y fundamentalmente los basados en la inteligencia artificial y la heurística. Los siguientes son los trabajos de grado que a la fecha tienen como objetivo fortalecer esta línea, dándosele un énfasis a su aplicación en la ingeniería electrónica y eléctrica. (Ver tabla 1)

SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE UN CIRCUITO ELECTRÓNICO COMPUESTO DE ELEMENTOS NO LINEALES MEDIANTE EL OPTIMIZADOR DE FUERZA CENTRAL	ROA, O; RAMIREZ, F
EVALUACION DEL MÉTODO OPTIMIZADOR DE FUERZA CENTRAL FRENTE AL OPTIMIZADOR POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO EN LA SOLUCIÓN DE ECUACIONES NO LINEALES	BARRERO, K; NAVARRO, O
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN CIRCUITO ELECTRONICO NO LINEAL MEDIANTE LA SOLUCIÓN DE SU MODELO CON HARMONY SEARCH	TRASLADINO, O; GONZALES, S
<b>APLICACIÓN DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN POR FUERZA CENTRAL (CFO) AL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO ÓPTIMO</b>	<b>BAYONA, C; GONZALEZ, J</b>
ALGORITMO HIBRIDO DEL SIMPLEX CON EL OPTIMIZADOR DE FUERZA CENTRAL (CFO)	GARCIA, J
PROPUESTA DE ESTRATEGIA PARA LA OBTENCION DE LOS PARAMETROS DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR FUERZA CENTRAL (CFO)	BUITRAGO, J
SOLUCION DE UN SISTEMA DE ECUACIONES NO LINEAL UTILIZANDO LA ESTRATEGIA BASADA EN EL ALGORITMO HARMONY SEARCH	GALEANO, Y
IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE BUSQUEDA GRAVITACIOAL (GSA) PARA EL DISENO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO ÓPTIMO	MIRANDA, A; RUIZ, J
SOLUCION DEL MODELO MATEMATICO DE UN CIRCUITO NO LINEAL EN DC, A TRAVES DE UNA ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN	CRUZ, J
USO DEL HIBRIDO UPSO CON EL SIMPLEX PARA OPTIMIZACION DE FUNCIONES CON RESTRICCIONES EN PROBLEMAS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	CANON, E
INTELIGENCIA COMPUTACIONAL INSPIRADA EN LA CUANTICA, APLICADA AL DISENO DE	HERNANDEZ, M;

COMPENSADORES	CORREDOR, D
OPTIMIZACION PARETO MEDIANTE EL METODO DE ENJAMBRE DE PARTICULAS UNIFICADO EN PROBLEMAS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	QUIROZ, M;
IDENTIFICACION DE PARAMETROS DE UN MOTOR SINCRONO DE IMAN PERMANENTE MEDIANTE EL ALGORITMO DE LA ESPIRAL	RUTTO, A
EL METODO DE COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS Y EL CRITERIO DE MINIMA ENTROPIA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE UN DISIPADOR DE CALOR	AVILA, J
IDENTIFICACION DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE EL METODO DE OPTIMIZACION DE GOTA DE AGUA INTELIGENTE	CARVAJAL, L; DÁVILA, D
POTENCIAL APLICACION DEL ALGORITMO DE GOTAS DE AGUA INTELIGENTES (GAI-IWD) EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA	ARIAS, J
CONTRASTACION DE LOS METODOS DE ENJAMBRE DE PARTICULAS UNIFICADO FRENTE AL MÉTODO COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS, EN LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	PETRO, E; FUENTES, R.
EVALUACION Y COMPARACION ENTRE EL METODO NEWTON RAPHSON Y CENTRAL FORCE OPTIMIZATION PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGAS DE UN SISTEMA DE POTENCIA	VALDERRAMA, M
EVALUACION Y COMPARACION ENTRE LOS METODOS NEWTON RAPHSON Y ARTIFICIAL BEE COLONY (ABC) PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE CARGA DE UN SISTEMA DE POTENCIA	CELIS, J; RINCON, F
EVALUACION Y COMPARACION ENTRE LOS METODOS UPSO Y NEWTON-RAPHSON PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA EN UN SISTEMA DE POTENCIA	PINZON, C; ARDILA, E
DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNETICO MULTICAPA MEDIANTE EL METODO DE LA ESPIRAL	ORTIZ, R; GARCIA, E
SOLUCION DE LAS ECUACIONES QUE MODELAN UN CIRCUITO NO LINEAL DE CORRIENTE DIRECTA MEDIANTE EL MÉTODO DE ESPIRAL	PORTILLA, J

*Tabla 1. Trabajos de grado 2011-2012*

## 1. INTRODUCCIÓN

En el transcurso de los últimos años, se han desarrollado avances científicos que han enfocado su atención en una mejora de la calidad de vida del ser humano; un ejemplo claro se presenta en el campo de la medicina, donde se han desarrollado importantes aportes tales como la penicilina, trasplantes de órganos, marcapasos entre otros [5]. Por otra parte, en el área de la ingeniería eléctrica y electrónica se ha implementado tecnología que se encarga de prevenir los efectos nocivos en la salud que produce la exposición a diferentes tipos de radiaciones u ondas electromagnéticas [6]. Asimismo, se ha manifestado en la sociedad un interés común por la aplicación de métodos de optimización que garanticen la obtención del máximo provecho de los recursos disponibles para un mejor desarrollo en diferentes procesos industriales y en diversos campos de la ciencia.

Uno de los métodos empleados es denominado optimización por fuerza central (CFO), que se basa en la analogía de la cinética de las partículas en un campo gravitacional [1], [2], [7], [8] y puede ser usado tanto en procesos industriales, que utilizan tecnología avanzada, como en campos de diseño y recursos humanos, entre otros. La no utilización de los métodos de optimización (CFO, PSO, GSA, etc.), en tales procesos industriales, genera una serie de perjuicios para la consecución de resultados óptimos; los recursos explotados aunque pueden aprovecharse eficazmente, el proceso realizado sería ineficiente ya que requeriría una mayor demanda de tiempo y por consiguiente de dinero.

Factores como los mencionados (demanda de tiempo y costos de ejecución), han llevado a desarrollar las llamadas técnicas heurísticas (metaheurísticas, determinística), las cuales pueden llegar a encontrar muy buenas soluciones e

incluso en muchos casos óptimas: con un tiempo de ejecución mínimo y con una demanda razonable de recursos. Entre estos métodos se encuentran: Particle Swarm Optimization (PSO) [9] y Ant Colony Optimization (ACO) [10], además del ya citado CFO [7], entre otros.

El CFO fue desarrollado por Richard A. Formato, JD, PhD. y actualmente se encuentra en sus comienzos, pero parece ser una promesa considerable, razón por la que los autores de la presente investigación se interesan en su aplicación para el diseño de un absorbedor electromagnético. Fundamentalmente se investigó la aplicación del algoritmo CFO al diseño de un absorbedor electromagnético multicapa, en el rango de frecuencias de las comunicaciones inalámbricas comprendidas entre 0,8 a 1,9 GHz. Para tal efecto se usó dicho algoritmo debidamente modificado por su mismo creador, cuya nueva versión denominó aceleración limitada; cambio que permitió liberarlo de sus parámetros de ejecución para hacerlo más eficiente [2], [11].

El informe de investigación se distribuye así: en el capítulo 1 se encuentra el planteamiento del problema y los objetivos de la investigación; en el capítulo 2 los fundamentos teóricos del método de optimización, de la distribución del espectro electromagnético de las comunicaciones inalámbricas y del absorbedor electromagnético; en el capítulo 3 las pruebas que demuestran que el algoritmo funciona de manera correcta; en el capítulo 4 se contrastan los resultados obtenidos en esta investigación con los de otras investigaciones previas; en el capítulo 5 las conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente proyecto y por último en el capítulo 6 las recomendaciones.

## 2. RESUMEN

Título: Aplicación del método de optimización por fuerza central (CFO), al diseño de un absorbedor electromagnético óptimo. <sup>1</sup>

Autores: Jorge Enrique González Sandoval y Carlos José Bayona Acosta. <sup>2</sup>

Palabras clave: heurístico, absorbedor electromagnético, coeficiente de reflexión, optimización.

En el presente informe de investigación, se utiliza un algoritmo metaheurístico determinístico, conocido como optimización por fuerza central (CFO), para solucionar problemas matemáticos aplicados a la ingeniería electrónica, con la intención de diseñar un absorbedor electromagnético, capaz de capturar la mayor cantidad de energía que incide sobre él y disipándola en forma de calor, para lo cual, se hace necesario adoptar ciertas características a optimizar, tales como: su dimensión y composición. En este caso, se utilizó la variante conocida como *acceleration clipping*, que en español se traduce aceleración limitada; que permite liberar la técnica de sus parámetros de ejecución, haciéndolo más eficaz [1], [2] al diseño de un absorbedor electromagnético óptimo multicapa, en un rango de frecuencia de comunicación inalámbrica entre 0,8 a 1,9 GHz.

La primera etapa del informe consiste en verificar la efectividad del algoritmo con funciones de prueba [3], para luego aplicarla al diseño de un absorbedor electromagnético. Posteriormente, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos según las técnicas aplicadas [1], [4] y finalmente, se concluye que; aplicando CFO en un proceso en cascada, se pueden encontrar mejores resultados que los ya citados [4], para el rango de frecuencias 0,8 a 1,9 GHz, Asimismo, se propuso un diseño de absorbedor de 3 capas, para el rango de frecuencia de 2 GHz a 8GHz, del cual se obtienen buenos resultados debido a que su capacidad de absorción se encuentra en el mismo rango que un absorbedor de 5 capas [1], lo cual permite un ahorro en material y por ende, en el costo de fabricación.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado.

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

### 3. ABSTRACT

Title: Application of the central force optimization (CFO) method to the design of an optimal electromagnetic absorber.<sup>3</sup>

Authors: Jorge Enrique González Sandoval and Carlos José Bayona Acosta.<sup>4</sup>

Keywords: heuristic, electromagnetic absorber, reflection coefficient, optimization.

In this research report is used a heuristic algorithm known as central force optimization (CFO) to solve applied mathematical problems in electronic engineering. The purpose of this research is design an electromagnetic absorber able to catch most energy incident and dissipate in heat using CFO. For this is necessary optimize some parameters as dimension and composition. In this case acceleration clipping is used to release CFO from its dependency on the run parameters, making it more optimal to the design of an electromagnetic absorber in the frequency range of 0,8 to 1,9 GHz.

As a first step CFO is calibrated using some test functions then is applied to the optimal electromagnetic absorber. After that the results using CFO is compared with the results of others optimization methods.

Finally concludes that CFO as a cascade design obtains better results than other optimization methods in the frequency range of 0,8 to 1,9 GHz. Also a 3-layer absorber design is proposed to perform well in comparison with a 5-layer absorber in the frequency range of 2 to 8 GHz.

---

<sup>3</sup> Grade project.

<sup>4</sup> School: Physicomechanics. Electric, Electronic and the Telecommunications engineering Director: Carlos Rodrigo Correa Celis Codirector: Iván Mauricio Amaya.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

### 4.1 Planteamiento del problema

Al día de hoy existen recomendaciones acerca del rango de exposición a ondas electromagnéticas (OEM) a diferentes frecuencias, que buscan evitar problemas de salud a largo plazo. Sin embargo, el día a día de las personas incluye estar en contacto con equipos que utilizan OEM, por lo que se requieren dispositivos que absorban este tipo de radiación. En la literatura se encuentran propuestas de diseño de un absorbedor electromagnético multicapa en diferentes rangos de frecuencia [1], [4]. A pesar de ello, no se encuentran resultados acerca de un absorbedor electromagnético de tres capas, optimizado a través del algoritmo de fuerza central (CFO), en su variante conocida como *aceleración limitada*, por lo que se escogió abordar este problema.

### 4.2 Objetivo general

Diseñar un absorbedor electromagnético óptimo, aplicando una estrategia de optimización por fuerza central (CFO).

### 4.3 Objetivos específicos

1. Definir la composición, forma y estructura de un absorbedor electromagnético para que opere en el rango de frecuencias de comunicación inalámbrica de 0,8 a 1,9 GHz. (ver capítulo 7)
2. Desarrollar el programa en la plataforma comercial de MATLAB. (ver capítulo 6)

3. Comparar los resultados obtenidos implementando CFO frente a resultados previos utilizando el método de análisis de intervalos así como el algoritmo de enjambre de partículas. (ver capítulo 7)

## 5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 5.1 Terminología

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

#### 5.1.1. Variables principales del programa

**Np:** es el número de sondas encargadas de la búsqueda.

**Nd:** es el número de dimensiones dadas por el problema.

**Nt:** es el número de iteraciones realizadas por el algoritmo.

**Alpha y Beta:** son constantes propias del algoritmo sin ningún valor físico [7].

**Factor de reposición (Frep):** es un valor entre 0 y 1 ajustado por el programador, el cual permite a las partículas regresar al espacio de decisión, dado el caso que estas se ubiquen por fuera de este.

**Amax:** es un valor entre 0,01 y 0,5 recomendado por su creador, un valor de 1 hace alusión al CFO sin su modificación, este parámetro es ajustado por el programador y se encuentra ligado a la aceleración limitada.

**Posicion\_inicial, Posicion\_final:** es el rango de valores para todas las dimensiones en los cuales se va a evaluar la función objetivo (espacio de búsqueda ó decisión).

**Davg:** es la distancia promedio que hay entre la sonda con el mejor máximo global y el resto de sondas.

**Rbest:** son las coordenadas del mejor máximo global para cada una de las dimensiones.

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

**BestFitness:** es el mejor máximo global obtenido al terminar de ejecutar el algoritmo.

**Convergencia:** es uno de los criterios de parada del algoritmo y es el encargado de generar una salida cuando se logra una distancia promedio entre sondas ( $D_{avg}$ ), menor a la definida por el usuario.

**Saturación:** es uno de los criterios de parada del algoritmo y es el encargado de generar una salida cuando la respuesta no mejora después de un cierto número de iteraciones consecutivas.

## 5.2 Algoritmo optimización por fuerza central (CFO)

CFO es un método heurístico, que basa su funcionamiento en la analogía de la cinemática de las partículas en un campo gravitacional, definidas por las leyes de Newton. La primera de ellas es conocida como primera ley de Newton o ley universal de la gravitación, la magnitud de la fuerza de atracción entre dos masas se describe en la ecuación (1), donde  $\gamma$  es la constante gravitacional, y la distancia que separa  $m_1$  de  $m_2$  es  $r$ .

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

Esta fuerza de atracción conlleva a que la masa  $m_1$  experimente una aceleración debida a  $m_2$ , que se expresa en la ecuación (2), donde  $\hat{r}$  es el vector unitario que apunta en la dirección de  $m_2$  desde  $m_1$ .

$$\vec{A}_1 = -\gamma \frac{m_2 \hat{r}}{r^2} \quad (2)$$

El vector posición de una partícula sujeta a una aceleración constante durante un intervalo de tiempo  $(t + \Delta t)$  se presenta en (3), donde  $\vec{R}_0$  y  $\vec{V}_0$  son el vector posición inicial y el vector velocidad inicial respectivamente.

$$\vec{R}(t + \Delta t) = \vec{R}_0 + \vec{V}_0 \Delta t + \frac{1}{2} \vec{A} \Delta t^2 \quad (3)$$

CFO se diseñó con el fin de encontrar el máximo o el mínimo de una función objetivo, definida dentro de un espacio de decisión, representado por (4), donde  $i = 1, \dots, N_d$ , son las dimensiones del problema y  $x_i$  son las variables de decisión.

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max} \quad (4)$$

Es de gran importancia resaltar que CFO no presenta ninguna dificultad a la hora de enfrentarse ante funciones objetivos multimodales o funciones que presenten discontinuidades. La ecuación que representa las características más importantes de CFO, para un espacio multidimensional está consignada en la ecuación (5):

$$\vec{A}_{j-1}^p = G \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{Np} U(M_{j-1}^k - M_{j-1}^p) (M_{j-1}^k - M_{j-1}^p)^\alpha \frac{(\vec{R}_{j-1}^k - \vec{R}_{j-1}^p)}{\|\vec{R}_{j-1}^k - \vec{R}_{j-1}^p\|^\beta} \quad (5)$$

Donde  $G$  es la constante gravitacional,  $N_p$  es el número total de sondas,  $p = 1, \dots, N_p$ ; es decir la sonda actual,  $\beta$  y  $\alpha$  son los exponentes de CFO que no tienen ningún significado físico, pero se recomienda asignarles valores entre 1 y 3 sin que afecte el correcto funcionamiento de CFO,  $\vec{R}_{j-1}^p$  es la posición actual de la sonda  $p$ ,  $M_{j-1}^p = f(\vec{R}_{j-1}^p)$  es conocido como el “fitness”, es el valor de la función objetivo evaluada en la posición de la sonda  $p$ ,  $U(\dots)$  es la función escalón unitario que permite que CFO se comporte como las fuerzas de atracción y no como las fuerzas de repulsión.

Hay ocasiones en que las sondas podrían salirse del espacio de decisión y deberían regresar si lo hacen. Hay muchos métodos de recuperación de sonda, uno muy útil en la convergencia de CFO es el factor de reposición  $F_{rep}$ .

En la figura 1 se visualiza este fenómeno.

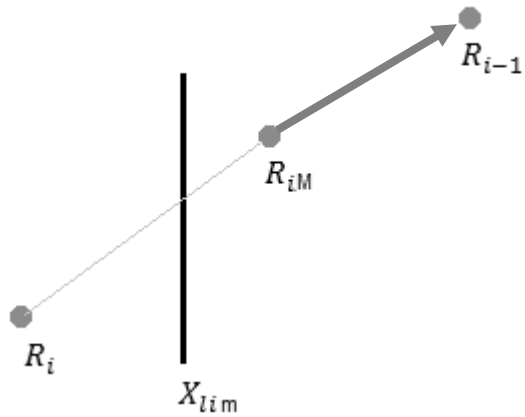
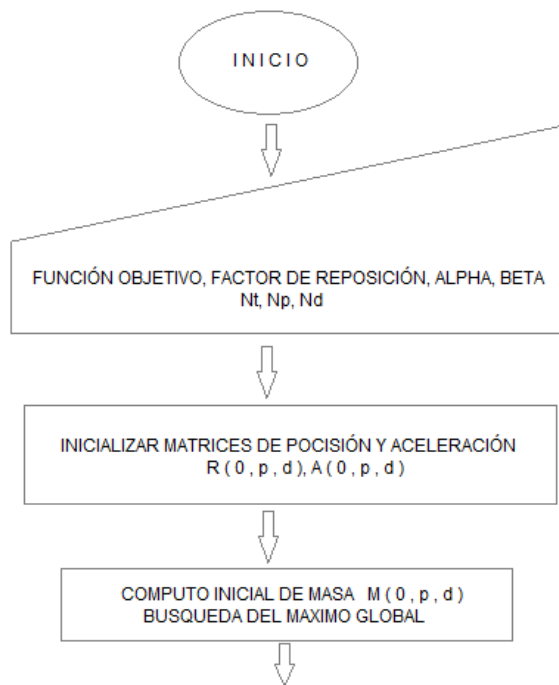


Figura 1. Factor  $F_{rep}$ .

CFO es simple y fácil de implementar en un programa de computador. Los pasos básicos son [7] (ver figura 2):



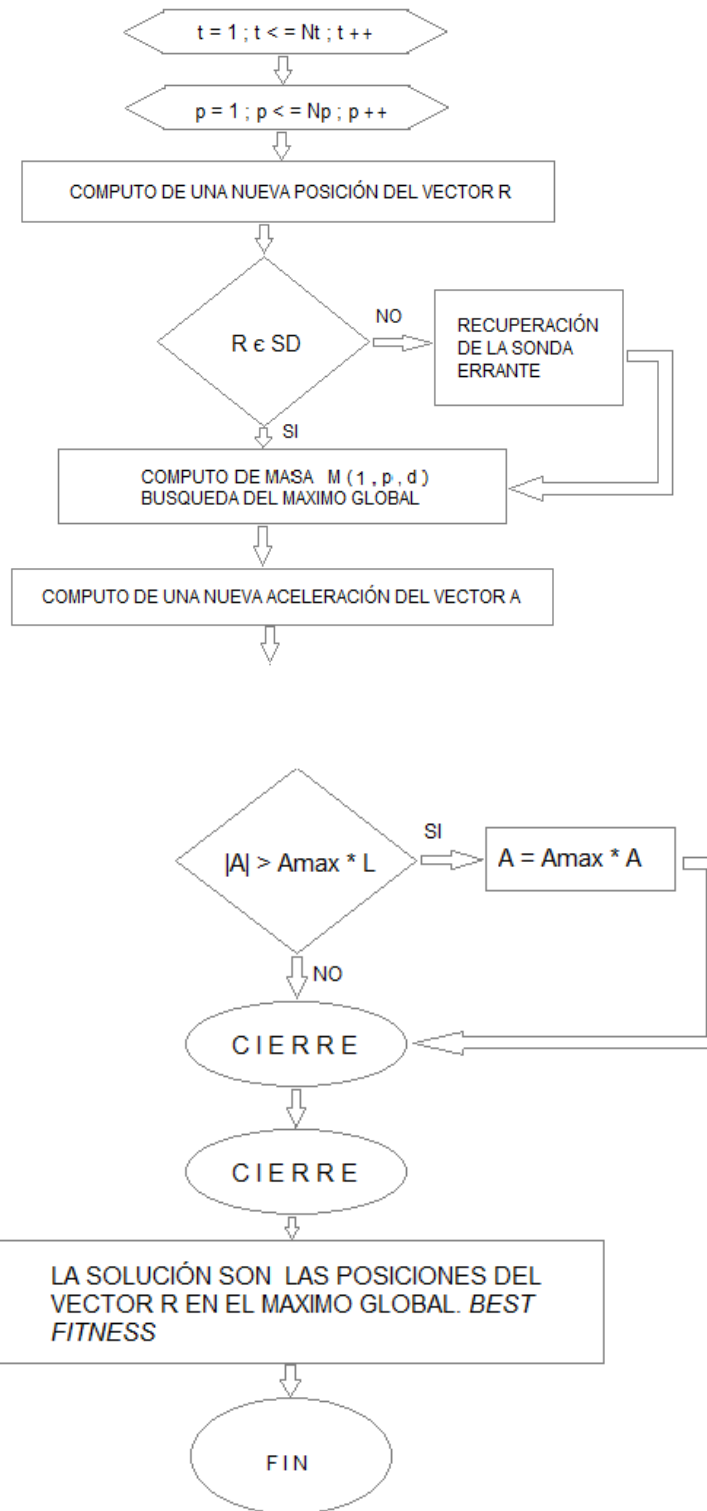


Figura 2. Diagrama de bloques de la implementación de CFO.

1. Calcular la posición inicial de la sonda, el correspondiente “fitness” y asignar la aceleración inicial.
2. Calcular la nueva posición de la sonda basada en el valor previo de la aceleración.
3. Verificar que cada sonda esté localizada dentro del espacio de decisión, haciendo las correcciones necesarias.
4. Actualizar el “fitness” en cada nueva posición de la sonda.
5. Calcular las aceleraciones para el siguiente paso en el tiempo basado en las nuevas posiciones.
6. Repetir todos los pasos para todos los tiempos.

#### 5.2.1. *Modificación al algoritmo (aceleración limitada)*

La aceleración limitada es una nueva modificación para liberar al CFO de su dependencia con los parámetros de ejecución, limitando el movimiento de las sondas para evitar que salgan del espacio de decisión [2].

Cuando la longitud del vector aceleración es mayor a la diagonal principal del espacio de decisión ( $L$ ) multiplicado por el factor  $A_{max}$ , el vector aceleración debe ser acotado, multiplicándolo por el mismo factor  $A_{max}$  (ver ecuación (6)), donde  $L$  está dado por la ecuación (7).

$$\begin{aligned}
 & \text{if } \|A_t^p\| > A_{max} * L \\
 & \quad A_t^p = A_{max} * A_t^p; \\
 & \quad \text{end}
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$L = \sqrt{\sum_{d=1}^{N_d} (R_d^{max} - R_d^{min})^2} \quad (7)$$

En general,  $A_{max}$  es una constante definida por el usuario con un valor entre 0,01 a 0,5. Por defecto se trabaja con un valor de 0,5;  $A_{max} = 1$  hace referencia al CFO original.

### 5.3 Comunicaciones inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas usan medios físicos para transmitir la información, principalmente se basan en fenómenos de naturaleza electromagnética, precisamente ondas electromagnéticas (OEM). Las OEM se producen cuando un campo eléctrico y un campo magnético interactúan entre sí a medida que se propagan en el espacio, dichos campos son perpendiculares entre sí y a su vez perpendiculares a la dirección en que se propaga la OEM.

Las OEM se clasifican según su frecuencia de oscilación o su longitud de onda; en teoría esta frecuencia puede tomar cualquier valor. Este rango de frecuencias se divide en bandas las cuales han sido llamadas microondas, radio, rayos x, etc. [12]

### 5.4 Rango de frecuencias de las comunicaciones inalámbricas

En la tabla 2 se observa cómo está distribuido el espectro electromagnético para las diferentes aplicaciones.

BANDA	SIGNIFICADO	RANGO	APLICACIÓN
VLF	Very Low Frecuency	3 kHz - 30 kHz	Conducción de la electricidad
LF	Low Frecuency	30 kHz - 300 kHz	Conducción de la electricidad, navegación marítima, control de tráfico aéreo
MF	Medium Frecuency	300 kHz - 3 MHz	Radio AM
HF	High Frecuency	3 MHz - 30 MHz	Radio SM
VHF	Very High Frecuency	30 MHz - 300 MHz	Radio FM, TV, Radio dos vías
UHF	Ultra High Frecuency	300 MHz - 3 GHz	TV UHF, Telefonía celular, WLL, Comunicaciones móviles
SHF	Super High Frecuency	3 GHz - 30 GHz	Servicios por Satélite y microondas, MMDS, LMDS
EHF	Extremely High Frecuency	30 GHz en adelante	LMDS
INFRARROJO		300 GHz – 384 THz	WPANs
LUZ VISIBLE		450 THz - 750 THz	Fibra Óptica
ULTRAVIOLETA		789 THz – 30 PHz	Espectrofotometría, Esterilización

*Tabla 2. Parámetros de ejecución para el CFO[13].*

Este proyecto está enfocado en la banda de frecuencia de 0,8 GHz a 1,9 GHz la cual esta designada para las comunicaciones móviles.

### **5.5 Absorbedor electromagnético**

Un absorbedor electromagnético ideal es un dispositivo que atenúa completamente las ondas electromagnéticas que inciden sobre él; esto ocurre debido a las propiedades características que presentan sus componentes. Por tanto, su principal parámetro de manipulación es el coeficiente de reflexión, que depende a su vez de la permeabilidad y permitividad de cada uno de los materiales que lo componen.

Las propiedades del dispositivo lo hacen indispensable en la construcción de cámaras anecóicas, que son utilizadas 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), prevenir interferencias entre las vías de las mismas.

Cabe indicar que el uso generalizado de las comunicaciones inalámbricas (Wireless), ha generado un incremento en la exposición del público a campos electromagnéticos en el rango de los Giga-Hertz (GHz), aunque no se ha demostrado con veracidad los efectos de éstos en la salud humana, se ha logrado recolectar datos que suministran información sobre los posibles efectos, entre los que se encuentran la etiología del cáncer y problemas de compatibilidad electromagnética sobre implantes activos, entre otros [6]. Esto ha llevado a que los absorbedores cobren mayor importancia, reflejándose en las últimas décadas un incremento de los estudios enfocados al mejoramiento del mismo.

Un ejemplo de esquema general de un absorbedor electromagnético multicapa se muestra en la figura 3, donde cada capa está conformada por un material caracterizado por su permitividad ( $\epsilon$ ) y su permeabilidad ( $\mu$ ) relativa, que se describen por las ecuaciones (8) y (9), donde se representa también las tangentes de pérdidas tanto eléctricas como magnéticas respectivamente. La última capa está en contacto con un conductor perfecto.

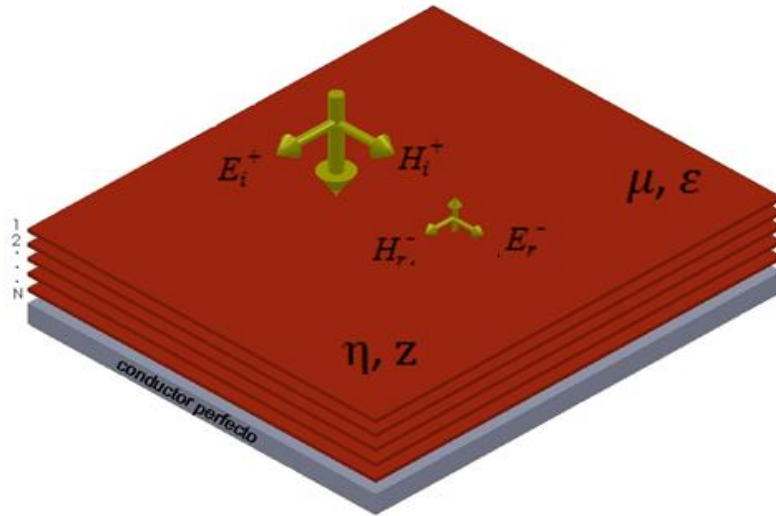


Figura 3. Absorbedor electromagnético multicapa.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' ; \tan(\delta_e) = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (8)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' ; \tan(\delta_m) = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (9)$$

Como se menciona anteriormente, el principal parámetro de manipulación del absorbedor electromagnético es su coeficiente de reflexión, comprendido como la relación que existe entre la energía que incide sobre un material o un medio con discontinuidad de propagación y la energía reflejada por el mismo. Según la teoría de líneas de transmisión, el coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ), se representa matemáticamente con la ecuación (10).

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

Donde  $Z(z)$  es la impedancia de la carga al final de la línea y  $\eta$  es la impedancia intrínseca del medio de propagación.

Los campos eléctricos y magnéticos que interactúan sobre el material se pueden expresar como la suma de los campos incidentes y reflejados [14] (ver ecuaciones 11, 12 y 13):

$$E_x(z) = E_i e^{-\gamma z} \left[ 1 + \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_i} \right] \quad (11)$$

$$H_y(z) = \frac{E_i e^{-\gamma z}}{\eta} \left[ 1 - \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_i} \right] \quad (12)$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu_r \epsilon_r} = \alpha + j\beta \quad (13)$$

El término  $e^{\gamma z}$  es una onda que viaja en dirección  $-z$  e incide sobre la carga, mientras que el término  $e^{-\gamma z}$  representa una onda que viaja en dirección  $+z$ , que es reflejada. La impedancia intrínseca del material se representa con la letra  $\eta$ .

$\gamma$  es la constante de propagación y depende de las permeabilidades y permitividades complejas de cada material. La impedancia total del campo del absorbedor electromagnético es la relación que existe entre el campo eléctrico y magnético (ver ecuación 14).

$$Z(z) = \frac{E_x(z)}{H_y(z)} \quad (14)$$

Teniendo en cuenta (11) y (12), la impedancia queda descrita de la siguiente forma (ver ecuación 15).

$$Z(z) = \frac{E_i e^{-\gamma z} \left[ 1 + \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_i} \right]}{\frac{E_i e^{-\gamma z}}{\eta} \left[ 1 - \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_i} \right]} = \eta \frac{\left[ 1 + \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_i} \right]}{\left[ 1 - \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_i} \right]} \quad (15)$$

El coeficiente de reflexión es la relación entre el campo reflejado y el campo incidente en un material, y se define como (ver ecuación 16).

$$\Gamma(z) = \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_i} \quad (16)$$

Teniendo en cuenta (15) y (16), la impedancia total se expresa de la siguiente forma (ver ecuación 17).

$$Z(z) = \eta \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)} \quad (17)$$

Manipulando algebraicamente la ecuación (17), se puede establecer la siguiente relación. (Ver ecuación 18).

$$\Gamma(z) = \frac{Z(z) - \eta}{Z(z) + \eta} \quad (18)$$

De acuerdo con la teoría de transmisión [14], [15], la impedancia total del campo de la  $k$ -ésima capa de un absorbedor de  $N$  capas está dada por la siguiente relación. (Ver ecuación 19).

$$Z_k = \begin{cases} \eta_k \frac{Z_{k+1} + \eta_k \tanh \gamma_k z_k}{\eta_k + Z_{k+1} \tanh \gamma_k z_k} & k < N \\ \eta_N \tanh \gamma_N z_N & k = N \end{cases} \quad (19)$$

$z_k$  proporciona información del grosor de la  $k$ -ésima capa del absorbedor electromagnético. Puesto que la última capa está en contacto con un conductor perfecto  $k = N$ , la expresión de la impedancia se simplifica, como se observa en la ecuación (19).

Teniendo en cuenta la ecuación (13), la expresión anterior se reduce de la siguiente forma, (Ver ecuación 20).

$$Z_k = \begin{cases} \eta_k \frac{Z_{k+1} + j\eta_k \tan(\omega z_k \sqrt{\mu_{r_k} \epsilon_{r_k}})}{\eta_k + jZ_{k+1} \tan(\omega z_k \sqrt{\mu_{r_k} \epsilon_{r_k}})} & k < N \\ j \eta_N \tan(\omega z_N \sqrt{\mu_{r_N} \epsilon_{r_N}}) & k = N \end{cases} \quad (20)$$

El objetivo de un absorbedor electromagnético es atenuar la mayor cantidad de energía que incide sobre él. Por esta sencilla razón, la función objetivo para el desarrollo de este trabajo de investigación, está en función del coeficiente de reflexión e indica la eficiencia del sistema; donde la impedancia total del campo es la vista por el primer material ( $k = 1$ ), que a su vez depende de la impedancia de las siguientes capas,  $k = 2, k = 3, \dots, k = N$ , y la impedancia intrínseca  $\eta_0$  es la impedancia del espacio libre y es aproximadamente  $\eta_0 = 377 \text{ ohm}$ , todo esto en  $z = 0$ . Por lo tanto la ecuación (18) se reescribe de la siguiente manera: (Ver ecuación 21).

$$R(f) = \frac{Z(f) - \eta_0}{Z(f) + \eta_0} \quad (21)$$

Dado que el diseño de un absorbedor electromagnético debe realizarse sobre una banda de frecuencias específicas, el problema de optimización consiste en minimizar el máximo coeficiente de reflexión; por lo tanto la función objetivo se puede escribir de la siguiente forma [15]: (Ver ecuación 22).

$$F_{obj} = 20 \log(\max |R(f)|, f \in B) \quad (22)$$

Donde  $B$  es el ancho de banda de diseño. Ya que el grosor de cada una de las capas, como los materiales son desconocidos, si se desea diseñar un absorbedor de  $N$  capas, existen  $2N$  parámetros a optimizar.

## 6. FUNCIONES DE PRUEBA

### 6.1 Calibración del algoritmo CFO a través de ejemplos ilustrativos con funciones de prueba

En esta sección se lleva a cabo una serie de pruebas ilustrativas con funciones estándar, con el fin de demostrar la efectividad del método de optimización por fuerza central (CFO), para lo cual se utiliza la plataforma de software Matlab. En la tabla 3 se describe el equipo de cómputo utilizado en la realización de las pruebas y los parámetros relevantes del algoritmo.

Equipo de computo		Parámetros del algoritmo			
Procesador	AMD Athlon(tm) X2 Dual-Core QL-65 2,10 GHz	Número de pruebas	10	Frep	0,9
Memoria RAM	3,00 Gb	Np	80	G	2
Alimentación	Conectado a la red eléctrica	Nd	2	Alpha y Beta	3
Plan de energía	Alto rendimiento	Nt	1000	$A_{max}$	1
					0,01
					0,5
					$0,49e^{-0,005t} + 0,01$

Tabla 3. Parámetros de ejecución para el CFO.

En el análisis de la efectividad del algoritmo se utilizaron diferentes valores de  $A_{max}$ , en primera instancia cuando  $A_{max} = 1$  no se presenta aceleración limitada, puesto que este valor hace referencia al CFO original; cuando  $A_{max} = 0,01$ ,  $0,5$  y  $0,49e^{-0,005t} + 0,01$  hay aceleración limitada, donde  $0,01$  y  $0,5$  representan el mínimo y el máximo valor de  $A_{max}$  recomendado respectivamente.  $A_{max} = 0,49e^{-0,005t} + 0,01$ , es una función exponencial decreciente que se mueve entre

0,5 y 0,01 y fue escogida luego de varias pruebas realizadas, con el ánimo de mejorar el tiempo de cómputo y así volver más eficiente el algoritmo.

Para cada valor de la constante  $A_{max}$  se realizaron 10 pruebas, con la intención de visualizar y comparar los diferentes resultados obtenidos y de esta manera identificar el valor más efectivo en relación al porcentaje de convergencia y al rendimiento en términos del tiempo de cómputo.

Para la selección de resultados se tomó el máximo global como parámetro principal a alcanzar. Dado el caso que existiese una igualdad entre los resultados, se tuvo en cuenta como segunda referencia el tiempo de cómputo, puesto que este parámetro proporciona información acerca de la eficiencia del algoritmo. En las tablas de resultados, un valor de S en la columna de salida significa salida por saturación, C representa salida por convergencia.

#### 6.1.1. *Función de prueba uno*

La siguiente prueba se realiza con una función exponencial decreciente. La función es unimodal, ya que contiene un único máximo en todo el rango, además se caracteriza por ser uniforme y se expresa por la ecuación (23).

$$f(x, y) = e^{-0,1*\sqrt{x^2+y^2}} \quad (23)$$

Al aplicarla en CFO se tuvieron en cuenta los parámetros dados en la tabla 4.

Espacio de búsqueda	Máximo global	Coordenadas máximo global
$-5 \leq [x, y] \leq 5$	$f(x, y) = 1$	$[x, y] = 0$

Tabla 4. Parámetros de ejecución función de prueba 1.

En la figura 4 se observa la gráfica de la función de prueba 1 en 3D y se verifican los parámetros de la tabla 4.

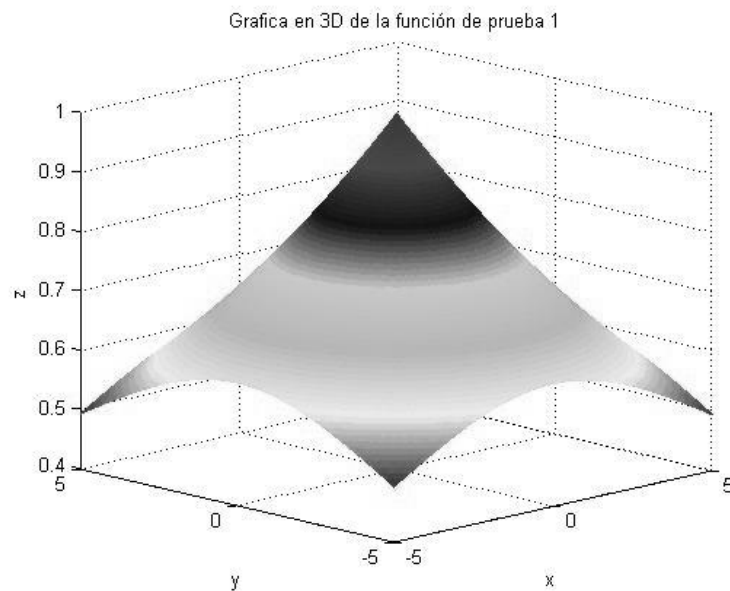


Figura 4. Función de prueba 1.

### **Resultados arrojados por el algoritmo**

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos en la primera prueba con el algoritmo original; el proceso se realiza sin la modificación de la aceleración limitada. Se observa que el máximo global se encuentra de manera eficaz, el cual es alcanzado en un tiempo promedio aproximado de 42,25 [s]. Por otro lado, la salida

por saturación (S) significa que durante una cantidad de pasos de tiempo el algoritmo no encontró una mejor solución o un mejor máximo global.

$f(x,y) = e^{-0.1*\sqrt{x^2+y^2}}$							
PRUEBA	Amax	BESTFITNESS	TIEMPO DE PROCESO	Nt	POSICIÓN		SALIDA
			[s]		X	Y	
1	1	1	43,861633	523	-2,5787E-16	2,0951E-16	S
2	1	1	44,139272	522	-1,1801E-16	1,4464E-17	S
3	1	1	44,272382	522	-4,7194E-16	2,2824E-16	S
4	1	1	44,138303	522	1,1534E-16	4,9751E-16	S
5	1	1	44,088815	522	4,0611E-17	2,8847E-16	S
6	1	1	44,296382	532	-1,9417E-16	-4,3129E-16	S
7	1	1	40,12807	462	-1,2043E-15	-2,4125E-15	S
8	1	1	29,520536	342	-9,8539E-12	4,5336E-12	S
9	1	1	43,623145	517	1,3371E-15	8,4107E-16	S
10	1	1	44,449236	522	4,3593E-16	2,6691E-16	S
PROMEDIO		1	42,2517774	498,6	-9,85E-13	4,53E-13	

*Tabla 5. Resultados función de prueba 1*

La tabla 6 muestra los resultados arrojados por el algoritmo teniendo en cuenta la modificación propuesta para este trabajo de investigación, la aceleración limitada en esta prueba toma el valor de  $A_{max} = 0,01$ , y representa el valor más bajo que puede tomar, para este parámetro [2]. Asimismo, se observa que a pesar que el tiempo promedio aproximado es de 19,35 [s], el resultado no es eficiente; esto se debe a que las partículas no poseen suficiente aceleración para moverse en el espacio de decisión. Al igual que la prueba anterior, la salida por saturación significa que durante una cantidad de pasos de tiempo el algoritmo no encontró una mejor solución o un mejor máximo global.

$f(x, y) = e^{-0,1*\sqrt{x^2+y^2}}$							
PRUEBA	Amax	BESTFITNESS	TIEMPO DE PROCESO	Nt	POSICIÓN		SALIDA
			[s]		X	Y	
1	0,01	0,998974	29,38517	423	0,0103	3,5291E-5	S
2	0,01	1	25,876765	372	5,4281E-7	-1,5735E-8	S
3	0,01	0,983853	3,466985	53	0,1160	0,1142	S
4	0,01	0,999986	16,364821	235	-6,5742E-6	-1,4077E-4	S
5	0,01	0,999969	19,853349	283	-3,0815E-4	6,6643E-8	S
6	0,01	1	20,968971	301	1,0711E-9	-2,4809E-6	S
7	0,01	0,999469	14,234699	204	-0,0053	-4,6051E-6	S
8	0,01	0,999994	15,439606	224	8,4546E-6	-6,0119E-5	S
9	0,01	1	22,963532	329	2,5364E-7	-1,5730E-9	S
10	0,01	1	24,928858	353	-2,0723E-8	2,0398E-10	S
PROMEDIO		0,9982245	19,3482756	277,7	1,21E-02	1,14E-02	

Tabla 6. Resultados función de prueba 1 con aceleración limitada.

La tabla 7 muestra los resultados arrojados por el algoritmo y en esta ocasión  $A_{max}$  toma el valor de 0,5, que corresponde al valor más alto que puede tomar para este parámetro [2]. Se observa una mejora en la eficacia con respecto a la precisión del mismo, con un tiempo del proceso promedio aproximado de 40,52 [s].

$f(x, y) = e^{-0,1*\sqrt{x^2+y^2}}$							
PRUEBA	Amax	BESTFITNESS	TIEMPO DE PROCESO	Nt	POSICIÓN		SALIDA
			[s]		X	Y	
1	0,5	1	41,743354	537	-1,8271E-16	4,6956E-17	S
2	0,5	1	40,590019	523	-4,2951E-17	4,4283E-16	S
3	0,5	1	41,232333	532	-1,9167E-16	-5,5608E-17	S
4	0,5	1	41,564189	533	4,4456E-16	-5,3608E-17	S
5	0,5	1	40,397832	517	-7,4891E-17	-1,7358E-16	S
6	0,5	1	35,262877	453	2,4712E-15	-4,0119E-16	S
7	0,5	1	41,505277	534	3,8859E-16	2,0977E-16	S
8	0,5	1	41,32216	530	3,7431E-16	-2,5131E-16	S
9	0,5	1	40,862651	525	1,0909E-16	-7,6150E-17	S
10	0,5	1	40,753915	526	-2,0977E-16	7,4613E-17	S
PROMEDIO		1	40,5234607	521	3,09E-16	-2,37E-17	

Tabla 7. Resultados función de prueba 1 con ajuste en la aceleración limitada.

Por último, se realiza una prueba especial con un valor de  $A_{max} = 0,49e^{-0,005t} + 0,01$ , este valor es una función exponencial decreciente que fue escogida luego de varias pruebas realizadas, con el ánimo de mejorar el tiempo de proceso y así

volver más eficiente el algoritmo. El tiempo del proceso promedio aproximado es de 34,79 [s], que se observa en la tabla 8.

$f(x,y) = e^{-0,1*\sqrt{x^2+y^2}}$							
PRUEBA	Amax	BESTFITNES S	TIEMPO DE PROCESO	Nt	POSICIÓN		SALIDA
			[s]		X	Y	
1	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	33,662913	468	1,1634E-16	-2,7079E-16	S
2	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	34,733354	491	1,8875E-16	-7,9633E-17	S
3	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	34,402143	479	3,4035E-16	1,2061E-16	S
4	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	34,494377	482	5,5928E-17	9,2813E-17	S
5	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	34,235403	478	-2,5446E-16	4,0348E-17	S
6	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	35,070889	490	1,9769E-16	4,5693E-16	S
7	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	34,541435	481	-2,5871E-16	4,4720E-16	S
8	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	34,473516	482	2,0041E-16	-2,2644E-16	S
9	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	35,727585	502	-1,8413E-16	3,6518E-16	S
10	$0,49\exp(-0,005*t)+0,01$	1	36,539977	519	2,8170E-16	2,4194E-16	S
PROMEDIO		1	34,7881592	487,2	6,84E-17	1,19E-16	

*Tabla 8. Resultados función de prueba 1 con propuesta de aceleración limitada.*

La tabla 9 contiene la mejor prueba para cada uno de los valores de  $A_{max}$ . Esta tabla proporciona una mejor idea de cómo evoluciona el algoritmo para diferentes valores de este parámetro, dando como resultado la validez de la utilización del CFO modificado (aceleración limitada).

$A_{max}$	Eficacia %	Tiempo Promedio	Prueba	Bestfitness	Tiempo del Proceso	Nt	Coordenadas	
							X	Y
		[s]			[s]			
1	100	42,2517774	8	1	29,52054	342	-9,8539E-12	4,5336E-12
0.01	40	19,3482756	6	1	20,96897	301	1,0711E-9	-2,4809E-6
0.5	100	40,5234607	6	1	35,26288	453	2,4712E-15	-4,0119E-16
$0,49e^{-0,005t}+0,01$	100	34,7881592	1	1	33,66291	468	1,1634E-16	-2,7079E-16

Tabla 9. Mejores resultados función de prueba 1 usando aceleración limitada.

En la figura 5 se visualiza como las sondas se van acomodando alrededor del punto que es la solución del problema, mientras que en la figura 6 se puede observar como es el comportamiento del Best Fitness durante las iteraciones realizadas.

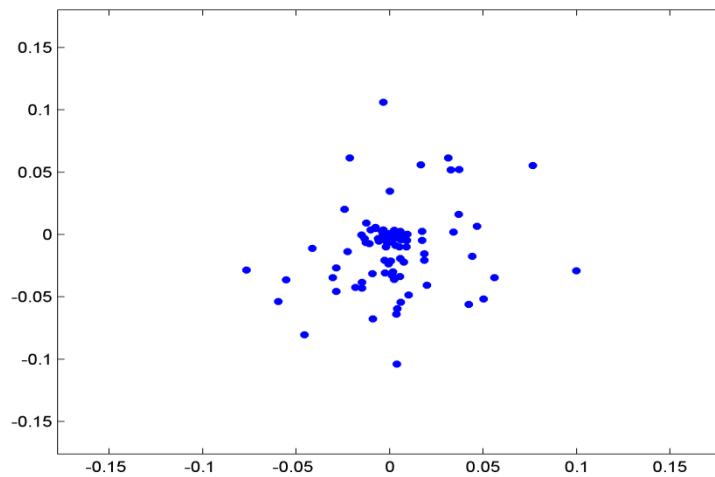


Figura 5. Comportamiento de las sondas, función de prueba 1, con  $A_{max} = 0,49e^{-0,005t} + 0,01$ .

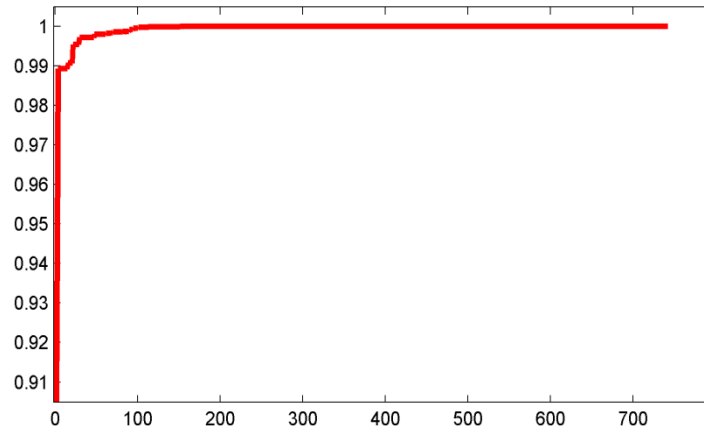


Figura 6. Comportamiento del Best Fitness, función de prueba 1, con  $A_{max} = 0,49e^{-0,005t} + 0,01$ .

A continuación se desarrolla de forma analítica con los valores correspondientes de X e Y que se obtuvieron en el algoritmo de manera matemática, como se muestra en (24) para concluir que el algoritmo funciona de manera correcta.

$$\begin{aligned} f(1,1634e^{-16}, -2,7079e^{-16}) \\ = e^{-0,1\sqrt{(1,1634e^{-16})^2 + (-2,7079e^{-16})^2}} = 1 \end{aligned} \quad (24)$$

### 6.1.2. Prueba dos con función de schwefel

Esta función es multimodal. Se comprende de 1 mínimo global y tres mínimos locales situados de forma equidistante con valores cercanos al global, lo que ocasiona que sea aún más complicada para el algoritmo, debido a que puede caer con facilidad en respuestas erróneas. Su expresión general está dada por la ecuación 25.

Para esta prueba se realizó una modificación en uno de los parámetros acordados al principio de este capítulo, se aumentó el número de partículas de  $N_p = 50$  a

$N_p = 80$ , ya que una población pequeña (50 sondas) podría divergir con facilidad. Las demás características se conservaron constantes.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [-x_i \sin(\sqrt{|x_i|})] \quad (25)$$

Al aplicarla en CFO se tuvieron en cuenta los parámetros dados en la tabla 10:

Espacio de búsqueda	Mínimo global	Coordenadas mínimo global	Dimensiones
$-500 \leq x_i \leq 500,$ $i=1, \dots, N.$	$f(x)$ $= -418,9829 * n$	$x_i = 420,9687,$ $i = 1, 2, 3, \dots, N.$	$f(x, y)$ $= -x \sin(\sqrt{ x })$ $- y \sin(\sqrt{ y })$

Tabla 10. Parámetros de ejecución para la función de prueba 2.

Debido a que CFO encuentra solo máximos globales se debe invertir la función, simplemente multiplicando por -1, esto es:  $f_{obj} = -f_{prueba}$  [3]. En la figura 7 se observa la gráfica de la función de Schwefel original para la prueba 2 en 3D y se verifican los parámetros de la tabla 10.

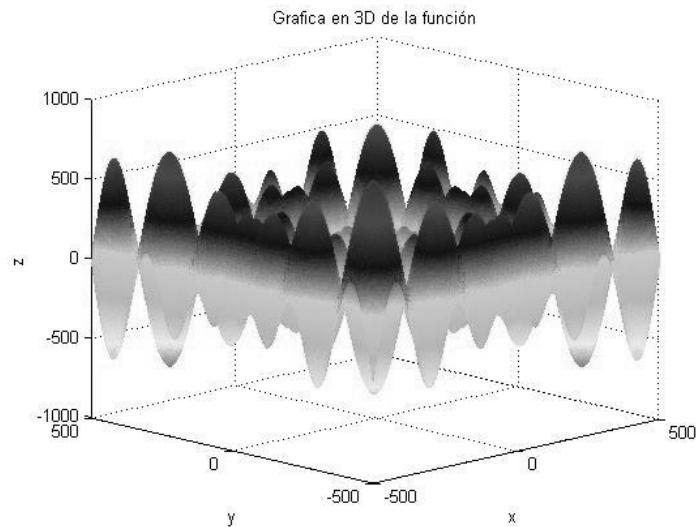


Figura 7. Función de prueba 2.

### Resultados arrojados por el algoritmo

La tabla 11 muestra los resultados obtenidos para la segunda prueba con el algoritmo original. Se puede observar que no se alcanza el máximo global en ninguna de las pruebas realizadas, y que su tiempo promedio es de aproximadamente 29,98 [s]. La salida por saturación significa que durante una cantidad de pasos de tiempo el algoritmo no encontró una mejor solución o un mejor máximo global.

$f(x) = \sum_{i=1}^n [-x_i \sin(\sqrt{ x_i })]$							
PRUEBA	Amax	BESTFITNESS	TIEMPO DE PROCESO	Nt	POSICIÓN		SALIDA
			[S]		X	Y	
1	1	640,725501	18,039592	73	-282,1349	435,9756	S
2	1	739,604471	18,332378	73	413,1823	393,4743	S
3	1	671,65806	18,492554	74	395,8082	393,6356	S
4	1	600,251126	18,660821	74	-300,2168	-303,6639	S
5	1	587,58276	91,940733	383	-302,2478	-292,1331	S
6	1	718,975657	18,353283	73	-302,0899	418,9225	S
7	1	803,986405	18,236784	73	409,4115	409,1870	S
8	1	807,494178	18,355063	73	425,0517	406,0517	S
9	1	659,253931	18,295361	73	-313,3880	401,7563	S
10	1	601,0891	61,126755	261	-302,5186	-302,5247	S
PROMEDIO		683,0621189	29,9833324	123	-1,59E+01	1,96E+02	

Tabla 11. Resultados función de prueba 2.

La tabla 12 muestra los resultados arrojados por el algoritmo teniendo en cuenta la modificación propuesta para este trabajo de investigación. La aceleración limitada, en esta prueba, toma el valor de  $A_{max} = 0,01$ . Se observa que el tiempo del proceso promedio aproximado es de 48,58 [s], y al igual que la anterior prueba el resultado no es eficiente; esto se debe a que las partículas no poseen suficiente aceleración para moverse en el espacio de decisión. La salida por saturación significa que durante una cantidad de pasos de tiempo el algoritmo no encontró una mejor solución o un mejor máximo global.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [-x_i \sin(\sqrt{|x_i|})]$$

PRUEBA	Amax	BESTFITNESS	TIEMPO DE PROCESO		POSICIÓN		SALIDA
			[S]	Nt	X	Y	
1	0,01	837,93987	71,380109	379	420,5164	420,9422	S
2	0,01	718,914259	44,975831	220	420,9650	-300,3229	S
3	0,01	714,776656	36,756934	166	-302,1901	414,8289	S
4	0,01	837,958204	59,360375	314	420,7238	420,9687	S
5	0,01	837,943009	60,830248	319	420,9497	421,3930	S
6	0,01	679,425722	60,786251	281	411,6304	-317,1669	S
7	0,01	620,363442	50,436408	251	202,2972	419,8084	S
8	0,01	712,826026	15,645448	73	390,7740	409,4032	S
9	0,01	837,965774	67,875114	365	420,9687	420,9667	S
10	0,01	807,870094	17,719218	83	418,9853	436,3293	S
PROMEDIO		760,5983056	48,5765936	245,1	3,23E+02	2,75E+02	

Tabla 12. Resultados función de prueba 2 con aceleración limitada.

La tabla 13 muestra los resultados arrojados por el algoritmo, en esta ocasión  $A_{max}$  toma el valor de 0,5. Se observa una mejora notable en la eficacia de este con respecto a su precisión, con un tiempo del proceso promedio aproximado de 66,99 [s].

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [-x_i \sin(\sqrt{|x_i|})]$$

PRUEBA	Amax	BESTFITNESS	TIEMPO DE PROCESO		POSICIÓN		SALIDA
			[S]	Nt	X	Y	
1	0,5	719,52744	67,651197	332	420,9687	-302,5249	S
2	0,5	837,965775	63,795281	315	420,9687	420,9687	S
3	0,5	837,965775	66,863792	334	420,9687	420,9687	S
4	0,5	837,965775	66,801876	334	420,9687	420,9687	S
5	0,5	837,957741	67,508228	336	420,9687	420,7164	S
6	0,5	837,965775	64,171581	324	420,9687	420,9687	S
7	0,5	837,965775	70,567426	356	420,9687	420,9687	S
8	0,5	837,965775	67,698338	337	420,9687	420,9687	S
9	0,5	837,965775	69,574306	345	420,9687	420,9687	S
10	0,5	837,929755	65,275252	313	420,4344	420,9682	S
PROMEDIO		826,1175361	66,9907277	332,6	4,21E+02	3,49E+02	

Tabla 13. Resultados función de prueba 2 con ajuste de aceleración limitada.

Por último se realiza una prueba especial con un valor de  $A_{max} = 0,49e^{-0,005t} + 0,01$ , logrando mejores resultados que los obtenidos anteriormente. El tiempo del proceso promedio aproximado es de 59,14 [s], que se observa en la tabla 14.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [-x_i \sin(\sqrt{|x_i|})]$$

PRUEBA	Amax	BESTFITNESS	TIEMPO DE PROCESO [S]	Nt	POSICIÓN X	Y	SALIDA
1	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	58,352999	304	420,9687	420,9687	S
2	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	59,234417	309	420,9687	420,9687	S
3	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	62,107319	324	420,9687	420,9687	S
4	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	719,52744	55,79925	288	420,9687	-302,5249	S
5	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	57,123657	297	420,9687	420,9687	S
6	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	60,709479	319	420,9687	420,9687	S
7	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	56,349219	292	420,9687	420,9687	S
8	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	62,673028	310	420,9687	420,9687	S
9	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	59,045131	307	420,9687	420,9687	S
10	0,49Exp(-0,005*t)+0,01	837,965775	60,037272	313	420,9687	420,9687	S
PROMEDIO		826,1219415	59,1431771	306,3	4,21E+02	3,49E+02	

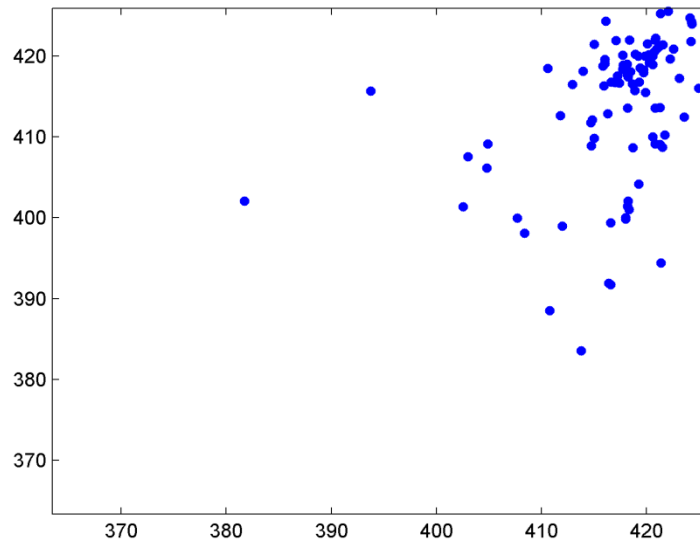
Tabla 14. Resultados función de prueba 2 con propuesta de aceleración limitada.

La tabla 15 contiene la mejor prueba para cada uno de los valores de  $A_{max}$ , esta tabla proporciona una mejor idea de cómo evoluciona el algoritmo para diferentes valores de este parámetro, dando como resultado la validez de la utilización del CFO modificado (aceleración limitada).

$A_{max}$	Eficacia %	Tiempo Promedio [s]	Mejor Prueba	Bestfitness	Tiempo del Proceso [s]	Nt	Coordenadas	
							X	Y
1	0	29,9833324	8	807,494178	18,355063	73	425,0517	406,0517
0.01	10	48,5765936	9	837,965774	67,875114	365	420,9687	420,9687
0.5	70	66,9907277	2	837,965775	63,795281	315	420,9687	420,9687
$0,49e^{-0,005t}+0,01$	90	59,1431771	7	837,965775	56,349219	292	420,9687	420,9687

Tabla 15. Mejores resultados función de prueba 2 usando aceleración limitada.

En la figura 8 se visualiza como las sondas se van acomodando alrededor del punto que es la solución del problema, mientras que en la figura 9 se puede observar como es el comportamiento del Best Fitness durante las iteraciones realizadas.



*Figura 8. Comportamiento de las sondas función de prueba 2, con  $A_{max} = 0,49e^{-0,005t} + 0,01$ .*

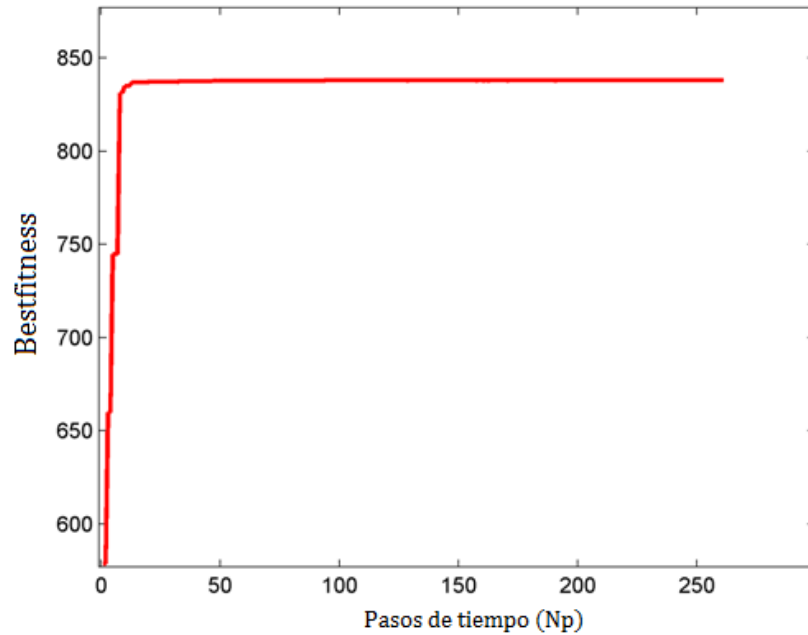


Figura 9. Comportamiento del Best Fitness función de prueba 2, con  $A_{max} = 0,49e^{-0,005t} + 0,01$ .

A continuación se desarrolla de forma analítica con los valores correspondientes a las coordenadas X e Y que se obtuvieron en el algoritmo, como se muestra en la ecuación (26) para concluir que el algoritmo funciona de manera correcta.

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= -(420,9687)\sin\left(\sqrt{|420,9687|}\right) \\
 &\quad - 420,9687\sin\left(\sqrt{|420,9687|}\right) \quad (26) \\
 &= -837,9658
 \end{aligned}$$

En la Tabla 22 (ver anexo A) muestra una comparación de los resultados arrojados por el algoritmo para diferentes funciones multimodales y unimodales que se tomaron como prueba (cuyos resultados no se discuten, por consideraciones de espacio), donde se aprecia cómo evoluciona el algoritmo con los diferentes valores de la aceleración limitada, y se verifica que, para este trabajo de investigación, mejora significativamente los resultados de tasa de convergencia y tiempo promedio en comparación con los otros valores,

destacando que se obtiene la respuesta deseada para el máximo o mínimo global y sus respectivas coordenadas. Hay que mencionar que el algoritmo obtuvo las respuestas por saturación es decir que durante una cantidad de pasos de tiempo no encontró una mejor solución o un mejor máximo global.

En la tabla16 se visualiza como se desarrolla de forma analítica las diferentes funciones de prueba con los valores correspondientes a las coordenadas X e Y que se obtuvieron por el algoritmo.

$f(X) = \sum_{i=1}^n x_i^2 ; X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
$f(5,8537E - 7, -3,1849E - 8) = (5,8537E - 7)^2 + (-3,1849E - 8)^2 = 3,4367E - 13$
$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)]$
$f(-1,1643E - 8, 7,0832E - 9) = 20 + [((-1,1643E - 8)^2 - 10 \cos(2\pi(-1,1643E - 8)))] + (7,0832E - 9)^2 - 10 \cos(2\pi(7,0832E - 9))] = 3,7303E - 14$
$f(x_1, x_2) = a(x_2 - bx_1^2 + cx_1 - d)^2 + e(1 - f) \cos(x_1) + e$ $a = 1, b = \frac{5,1}{4\pi^2}, c = \frac{5}{\pi}, d = 6, e = 10, f = \frac{1}{8\pi}$
$f(-3,1416, 12,2750) = 1(12,2750 - \frac{5,1}{4\pi^2}(-3,1416))^2 + \frac{5}{\pi}(-3,1416) - 6)^2 + 10\left(1 - \frac{1}{8\pi}\right) \cos(-3,1416) + 10$ $= 0,397887$

*Tabla 16. Desarrollo analítico funciones de prueba.*

## **7. APLICACIÓN DEL ALGORITMO AL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA ÓPTIMO**

En esta sección se presentan los resultados de la aplicación del algoritmo CFO modificado (aceleración limitada), para encontrar el diseño óptimo de un absorbedor electromagnético multicapa en el rango de frecuencias de telefonía móvil (0,8 GHz – 1,9 GHz). La respuesta es comparada con los resultados obtenidos con otros tipos de métodos de solución: Particle Swarm Optimization

(PSO) al cual se le realizó una variación que consiste en el método de análisis de intervalos.

El máximo grosor que se tiene en cuenta para cada capa es 2 mm y el algoritmo es ejecutado 10 veces. El número de iteraciones para el algoritmo es 1000. Los valores de los parámetros del CFO para una distribución inicial aleatoria son los siguientes:  $Nt = 10000$ ,  $Np = 20$ ,  $G = 1,7$ ,  $\alpha = 0,6$ ,  $\beta = 0,9$ , y  $Frep = 1$ . En el caso de la aceleración limitada,  $A_{max}$  toma el valor con mejor desempeño registrado en las pruebas de calibración del algoritmo, que corresponde a:  $A_{max} = 0,49e^{-0,005*t} + 0,01$ .

A continuación se define los materiales propuestos por [1], [15], usados para el diseño del absorbedor (ver tabla 17).

Materiales dieléctricos sin pérdidas ( $\mu_r = 1$ )				
Número	$\epsilon_r$			
1	10			
2	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 ( $\mu_r = 1$ )				
$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$				
$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon'}{f^a}$				

$\varepsilon''(f) = \frac{\varepsilon''}{f^b}$				
Número	$\varepsilon'(1\text{GHz})$	$a$	$\varepsilon''(1\text{GHz})$	$b$
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 ( $\varepsilon_r = 15$ )				
$\mu_r = \mu' - j\mu''$				
$\mu'(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2 + f_m^2}$				
$\mu''(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2 + f_m^2}$				
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 17. Banco de materiales usados [15].*

### 7.1 Contraste de resultados<sup>5</sup>

Se diseñó un absorbedor de tres capas ( $N = 3$ ), el cual es optimizado con la intención de minimizar el coeficiente de reflexión en la banda de frecuencia 0,8-1,9 GHz, en tres frecuencias específicas que hacen referencia a las utilizadas por las compañías de telefonía móvil en Colombia (0,85 GHz, 1,8 GHz, 1,9GHz).

Para la creación del absorbedor se desarrollaron pruebas por cada distribución poblacional de partículas, tanto aleatoria como uniforme, e incluso se incluyó una distribución combinada, con el fin de escoger la más favorable para el desarrollo

<sup>5</sup> todas las pruebas que se realizaron para cada una de las diferentes distribuciones y procesos del CFO se encuentran en el anexo B.

del mismo, es decir, de las pruebas realizadas se escogió la mejor, se tomó la combinación de capas que arrojó y se acotó el espacio de decisión, dejando los materiales fijos para cada capa y variando su dimensión de forma aleatoria. Posteriormente, las pruebas fueron repetidas y se tabularon los resultados.

Por otra parte, los parámetros optimizados son 6: el grosor y el material para cada capa. El máximo grosor del absorbedor es de 6 mm y el número del material como se menciona anteriormente es propuesto por [1][4], [15]. La tabla 18 contiene los resultados obtenidos por el algoritmo sin su modificación ( $A_{max} = 1$ ), en donde su comportamiento en el dominio de la frecuencia se representa en la figura 10. La tabla 19 presenta 3 diseños propuestos en esta investigación en el cual se utilizó CFO con aceleración limitada ( $A_{max} = 0,49e^{(-3E-4*t)} + 0,01$ ), donde el comportamiento de esta modificación se representa en la figura 11 y una distribución inicial aleatoria, donde su comportamiento en el dominio de la frecuencia se representa en la figura 12.

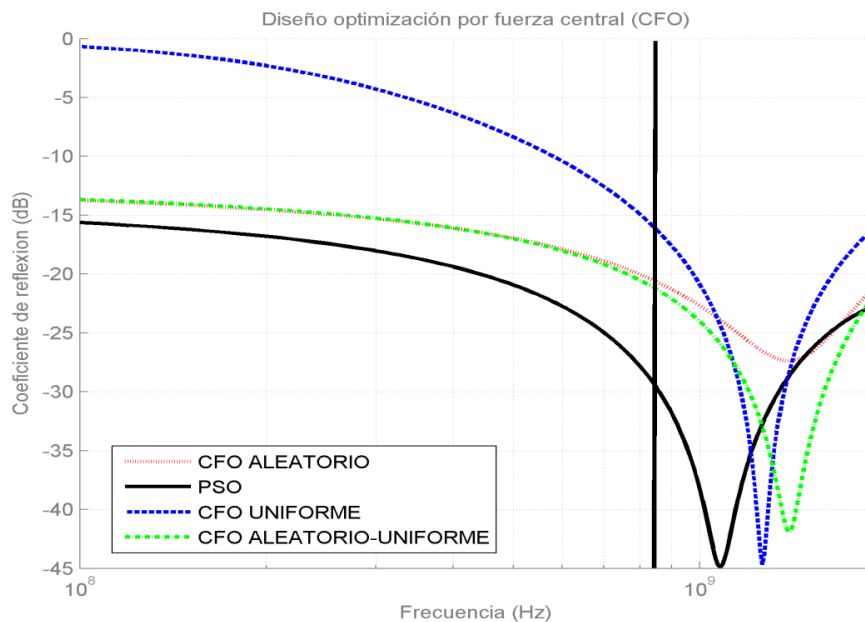


Figura 10. Comportamiento del absorbedor electromagnético con CFO original.

CAPA	CFO MODIFICADO PRIMER DISEÑO (ALEATORIO)		CFO MODIFICADO SEGUNDO DISEÑO (UNIFORME)		CFO MODIFICADO TERCER DISEÑO (ALEATORIO-UNIFORME)		PSO [1]		PSO CON ANALISIS DE INTERVALOS [1]	
	MATERI AL	GROS OR (mm)	MATERI AL	GROS OR (mm)	MATERI AL	GROS OR (mm)	MATERI AL	GROS OR (mm)	MATERI AL	GROS OR (mm)
1	13	0,1521	10	0,778092	4	1,158963	16	0,5998	16	0,6009
2	4	1,6241	10	0,522680	5	0,995507	3	2	3	1,9963
3	5	1,0324	10	1,533071	5	0,805957	4	1,6268	4	1,6326
GROSOR TOTAL	3,1		3,6		4,3		4,2266		4,2298	
MAX. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN (dB)	-20,65		-16,7194		-21,2814		-22,7232		-22,7232	

Tabla 18. Diseños realizados con CFO original.

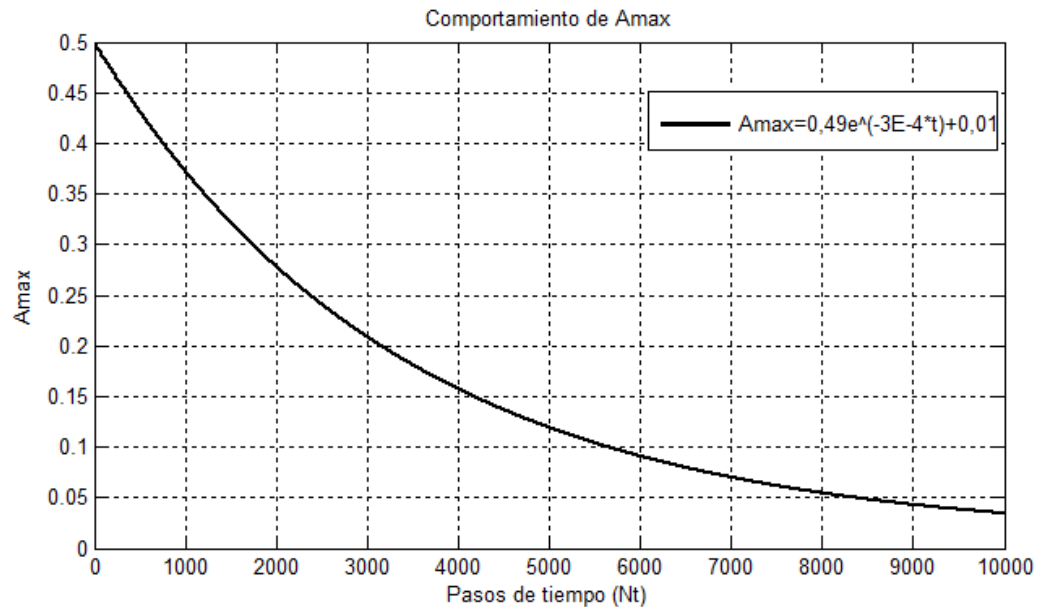


Figura 11. Comportamiento del parámetro  $A_{max}$  en la aceleración limitada.

CAPA	CFO MODIFICADO PRIMER DISEÑO (ALEATORIO)		CFO MODIFICADO SEGUNDO DISEÑO (ALEATORIO)		CFO MODIFICADO TERCER DISEÑO (ALEATORIO)		PSO		PSO CON ANALISIS DE INTERVALOS	
	MATERI AL	GROS OR (mm)	MATERI AL	GROS OR (mm)	MATERI AL	GROS OR (mm)	MATERI AL	GROS OR (mm)	MATERI AL	GROS OR (mm)
1	14	0,491386	16	0,755922	16	0,772281	16	0,5998	16	0,6009
2	4	1,495633	4	1,519143	3	1,559500	3	2	3	1,9963
3	4	1,272189	4	1,462453	4	1,982848	4	1,6268	4	1,6326
GROSOR TOTAL	3,259208		3,737518		4,314629		4,2266		4,2298	
MAX. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN (dB)	-25,639194		-28,7644		-28,488462		-22,7232		-22,7232	

Tabla 19. Diseños realizados con CFO modificado.

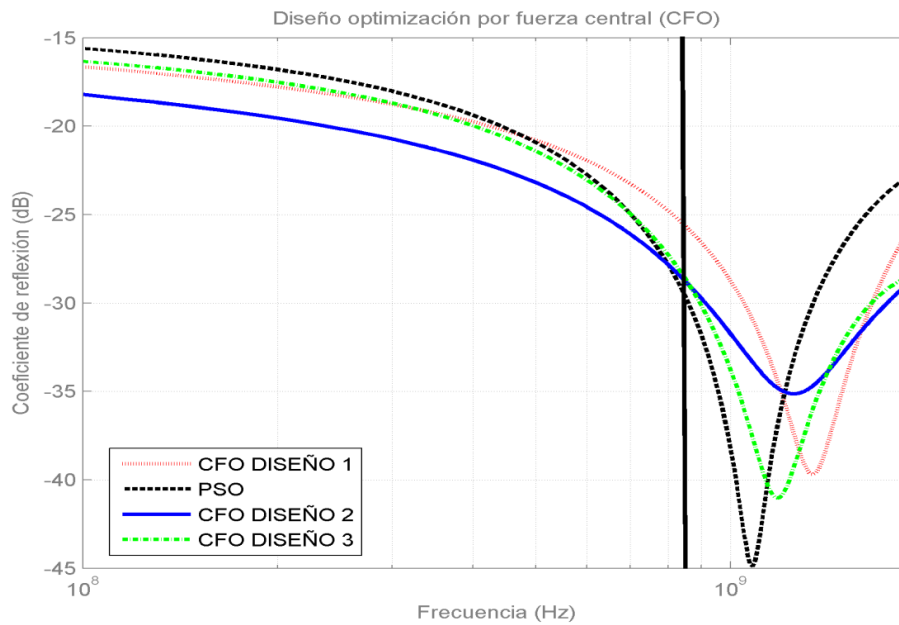


Figura 12. Comportamiento del absorbedor electromagnético con CFO modificado.

Por otra parte, se diseñó un absorbedor de 3 capas ( $N = 3$ ), con la técnica de optimización por fuerza central modificado, ejecutándolo como un proceso en cascada, en el cual se encuentran resultados interesantes con respecto a: la capacidad de absorción del dispositivo en la banda de frecuencia de 2 – 8 GHz, los resultados se muestran en la tabla 20, donde se comparan con investigaciones previas [1] y su comportamiento se describe en la figura 13.

CAPA	CFO PROPUESTO		CFO [1]		DE[1]		GSA[1]		PSO [1]	
	MATER IAL	GROS OR ( mm)	MATER IAL	GROS OR ( mm)	MATER IAL	GROS OR ( mm)	MATER IAL	GROSOR( mm)	MATER IAL	GROSOR( mm)
1	16	0,3941 62	16	0,377	16	0,384	16	0,418	14	0,455
2	6	1,9646 54	6	1,572	6	0,433	6	1,593	6	1,995
3	9	1,8674 91	6	0,991	6	1,143	8	0,485	8	0,322
4	-	-	6	0,377	6	1,446	13	1,366	5	0,986
5	-	-	15	1,425	15	1,454	4	0,986	11	1,128
GROSOR TOTAL	4,22631		4,744		4,860		4,850		4,888	
MAX. COEFICIE NTE DE REFLEXI ÓN (dB)	-22,5420		-25,698		-25,485		-21,952		-23,889	

*Tabla 20. Diseño propuesto para un rango de frecuencia de 2-8GHz.*

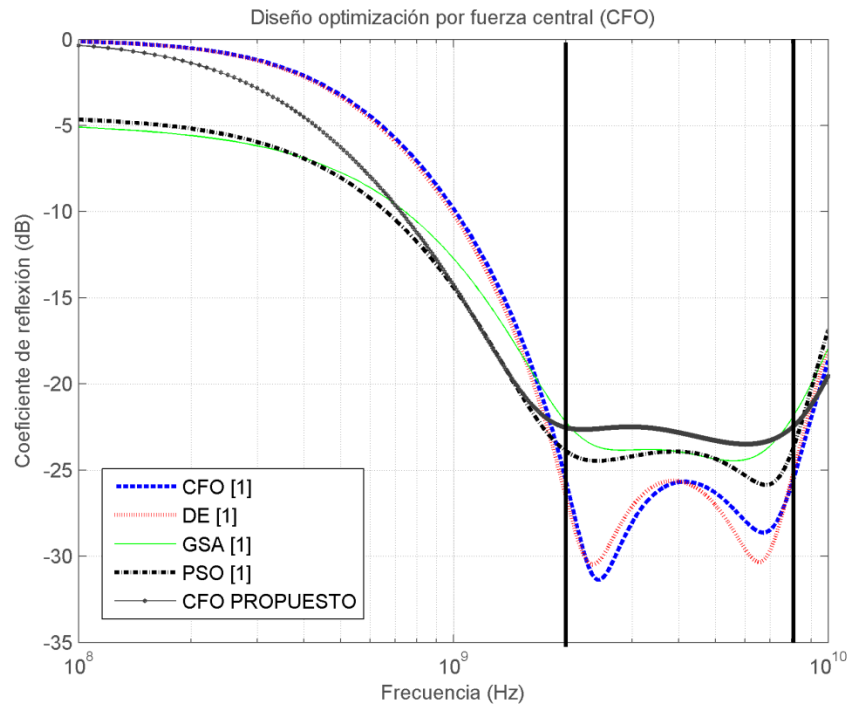


Figura 13. Comportamiento del absorbedor electromagnético en el rango de frecuencias de 2 – 8 GHz.

## 8. CONCLUSIONES

1. Se cumplieron satisfactoriamente todos los objetivos propuestos para este trabajo de investigación.
2. En el presente informe de investigación se llegan a las siguientes conclusiones según los resultados obtenidos:
  - 2.1 Se diseñó un absorbedor electromagnético en el rango de frecuencia de 0,8 GHz a 1,9 GHz, utilizando CFO (sin y con aceleración limitada), y se encontró que:
    - 2.1.1 En el primer caso, las diferentes distribuciones iniciales (uniforme, aleatorio y uniforme-aleatorio), no presentan buenos resultados, ya que el máximo coeficiente de reflexión no es el esperado para un diseño óptimo del absorbedor electromagnético.
    - 2.1.2 En el segundo caso, las diferentes distribuciones iniciales generan resultados satisfactorios. Sin embargo, cuando se usó una distribución inicial aleatoria, no se encuentra el mismo máximo global en cada ejecución, debido a que el problema planteado presenta múltiples dimensiones.
3. Con respecto al diseño del absorbedor electromagnético en el rango de frecuencia de 2 GHz a 8 GHz, se obtiene un diseño que cumple con las características deseadas respecto a la capacidad de absorción, con menor número de capas que las propuestas en investigaciones anteriores [1], lo que ofrece una reducción significativa de recursos de fabricación, y por ende, en costos.

4. Uno de los aportes importantes para éste trabajo de investigación, fue el uso del CFO en cascada, que permitió mejorar los diseños propuestos, al reducir el número de variables del problema. Este proceso se aplica de la siguiente forma:

Se ejecuta un número deseado de pruebas con el algoritmo, luego se toma la mejor prueba arrojada del proceso, para después acotar las dimensiones del problema, donde se fijan los materiales que se obtienen de la mejor prueba y se realiza de nuevo un número de ejecuciones con el grosor de las capas aleatorio.

5. En cuanto al absorbedor electromagnético como tal, y para las frecuencias de trabajo de las compañías de telefonía móvil en Colombia (según los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación), el segundo diseño (descrito en la Tabla 19) es el más favorable, ya que garantiza un mínimo de atenuación aproximado de 28,76 (dB) en todo el rango.

## **9. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

Realizar un estudio detallado de los parámetros del método, para el desarrollo de problemas multidimensionales que garanticen un mejor desempeño para el algoritmo.

Realizar un estudio de las diferentes formas en las que se puede implementar un proceso en cascada, que puedan llevar a obtener un mejor desempeño el algoritmo.

Verificar mediante un proceso en cascada, si es posible mejorar el diseño del absorbedor electromagnético de 5 capas para el rango de frecuencias de 2 GHz a 8 GHz.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. J. Asi and N. I. Dib, "Design of multilayer microwave broadband absorbers using central force optimization," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 26, no. September, pp. 101-113, 2010.
- [2] G. M. Qubati and N. I. Dib, "Microstrip patch antenna optimization using modified central force optimization," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 21, pp. 281-298, 2010.
- [3] M. Molga and C. Smutnicki, "Test functions for optimization needs," *functions for optimization needs*, pp. 1-43, 2005.
- [4] E. Salazar, J. Mora, and R. Correa, "Diseño de absorbedores electromagnéticos óptimos en el rango de frecuencias de las comunicaciones inalámbricas," *Ingeniería y Universidad, enviado*, pp. 1-26.
- [5] A. A. Guillaumet, "Ciencia y calidad de vida," *EEMPI N° 8019 Sagrado Corazón, Venado Tuerto, Santa Fe*, pp. 1-4, 2004.
- [6] P. E. Gil-loyzaga, A. Úbeda Maeso, and F. C. Orejana, "Ondas electromagnéticas y salud," *Medicina*, pp. 1-431, 2001.
- [7] R. A. Formato, "Central force optimization: A new metaheuristic with application in applied electromagnetics," *Progress In Electromagnetics Research, PIER 77*, pp. 425-491, 2007.
- [8] R. A. Formato, "Improved CFO Algorithm for antenna for antenna optimization," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 19, pp. 405-425, 2010.
- [9] R. Poli, J. Kennedy, and T. B. Particle, "Particle Swarm Optimization Slides largely based on : Particle Swarm Optimization ( PSO )," *Computer*, vol. 1, no. 1, pp. 33-57, 2007.
- [10] A. Ostfeld, *Ant Colony Optimization - Methods and applications*, First Edit. InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2011.
- [11] M. J. Asi and N. I. Dib, "Design of multilayer microwave broadband absorbers using central force optimization," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 26, no. September, pp. 101-113, 2010.

- [12] Cosimo D. Stufano, “Comunicaciones Inalámbricas.” [Online]. Available: <http://www.ica.luz.ve/cstufano/CursoDeRedes/Wirelessdoc.pdf> . [Accessed: 30-Jan-2013].
- [13] H. Lara, “Tipos de Antena.” [Online]. Available: [http://www.ensenadamexico.net/hector/it/reporte\\_antenas.php](http://www.ensenadamexico.net/hector/it/reporte_antenas.php). [Accessed: 31-Jan-2013].
- [14] A. Bronwell, “Transmission-Line Analogies of plane electromagnetic-wave reflections,” *IEEE Magazine*, vol. 32, no. 4, pp. 233-241, 1944.
- [15] H. Liu, L. Zhang, Y. Gao, Y. Shen, and D. Shi, “Electromagnetic Wave Absorber Optimal Design Based on Improved Particle Swarm Optimization,” *Kyoto*, pp. 797-800, 2009.

# 11. ANEXOS

## 11.1 Anexo A: Funciones de prueba

$f(X) = \sum_{i=1}^n x_i^2 ; X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$										
rango de búsqueda	Coordenadas máximo o mínimo global	Máximo o mínimo global	A.limitada	% de convergencia	Best Fitness	Tiempo promedio	Posición		Nt	salida
$-5.12 \leq x_i \leq 5.12, i=1, \dots, n.$	$x_i = 0, i = 1, 2, 3, \dots, N$	$f(x) = 0$					x	y		
			1	100	0	15.19132 18	6,695 7E-08	- 4,3055 E-08	207	S
			0.01	60	0	27.71985 52	- 2,729 2E-06	- 8,5729 E-05	398	S
			0.5	100	0	14.79783 98	- 2,451 0E-07	- 5,4485 E-08	205	S
			0.49e <sup>-0.005t</sup> +0.01	100	0	13.49805 89	5,853 7E-07	- 3,1849 E-08	187	S
$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)]$										
$-5.12 \leq x_i \leq 5.12, i=1, \dots, n.$	$x_i = 0, i = 1, 2, 3, \dots, N$	$f(x) = 0$	1	50	0	23,41934 62	- 3,9478 E-09	- 8,1634 E-10	29 4	S
			0.01	10	0	27.3527	1.2145 E-05	8.0456 E-05	37 1	S
			0.5	80	0	24,05425 88	9,3945 E-10	- 3,6426 E-10	30 6	S
			0.49e <sup>-0.005t</sup> +0.01	90	0	19,82324 31	- 3,5981 E-09	1,9088 E-09	25 8	S
$f(x_1, x_2) = a(x_2 - bx_1^2 + cx_1 - d)^2 + e(1 - f) \cos(x_1) + e$ $a = 1, b = \frac{5,1}{4\pi^2}, c = \frac{5}{\pi}, d = 6, e = 10, f = \frac{1}{8\pi}$										
$-5 \leq x_1 \leq 1$	$(x_1, x_2) = (-\pi, g)$	$f(x_1, x_2) = 0.397887$	1	30	-	25,95326	-1,0472	8,9416	35	S

1, $0 \leq x_2 \leq 15$	$(\pi, h),$ $(m, n)$	, 3 minimos			0,3978 87	9			1	
			0.01	0	- 0,3980 79	13.10312 68	3,1478	2,2679	98	S
			0.5	100	- 0,3978 87	23.11444 51	9,4248	2,4750	22 8	S
			$0.49e^{-0.005t} + 0.01$	100	- 0,3978 87	17.25462 4	-3,1416	12,275 0	19 8	S

**Tabla 21. Funciones de prueba.**

Nota:  $g=12.275$ ,  $h=2.275$ ,  $m=9.42478$ ,  $n=2.475$ .

Nota2: los valores mostrados en la tabla 21 fueron calculados con el total de pruebas exitosas para cada una de las diferentes funciones de pruebas.

## 11.2 Anexo B: Contraste de resultados

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,18388537
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,22522829
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,39720927
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,36847902
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,20245415
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,19494732
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,20537756
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,51911073
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,31994976
11,8008304	1,15378151	1,1697479	1,18571429	10	10	10	303	9,14982829

**Tabla 22. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada, utilizando distribución uniforme.**

Nota: los resultados mostrados en la Tabla 22 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Materia 11	Materia 12	Materia 13	Nt	Tiempo (s)
14,5220336	1,40992669	0,41587792	1,22065323	10	10	10	303	11,3695
15,8877222	0,92710003	0,73833558	1,11490557	10	10	10	303	11,2427283

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Materia 1 1	Materia 1 2	Materia 1 3	Nt	Tiempo (s)
16,7194084	0,77809212	0,52268011	1,53307143	10	10	10	303	11,9053283
16,096125	1,24545597	1,41840802	0,1509934	10	10	10	303	11,572121
15,5849837	0,85707065	0,38099966	1,66828937	10	10	10	303	11,6654459
15,8156335	0,91098642	0,85718261	1,10924119	10	10	10	303	11,9666117
15,5960338	1,10975356	0,39191568	1,40329495	10	10	10	303	11,748679
15,9477636	0,3022001	1,23588417	1,25207587	10	10	10	303	11,5206712
15,9740457	1,14062185	1,03577237	0,61809433	10	10	10	303	11,7547059
16,1377799	0,57098341	1,91242972	0,35405757	10	10	10	303	11,6299493

**Tabla 23. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada y proceso en cascada, utilizando distribución uniforme.**

*Nota: los resultados mostrados en la Tabla 36 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.*

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
15,518324	1,3124859	0,3838522	0,8410534	4	11	3	303	10,065726
13,979111	1,1838417	1,1701452	1,5893010	10	6	9	304	9,3176409
16,143242	1,4640130	1,4855565	1,5377820	10	6	10	303	9,4912317
18,979591	0,6613015	0,8918548	1,8089102	16	10	4	303	9,1764653
15,258979	1,5780906	0,7475228	0,9057661	4	4	12	303	9,5878614
16,790847	1,5693060	0,4096318	1,6689690	5	6	3	303	9,7169682
11,687752	0,3857844	1,8284313	1,8018678	11	10	4	303	9,4307692
18,990856	0,1517779	1,4797143	1,4765885	13	4	5	303	9,5525068
14,477804	1,1838979	1,4458445	0,7579513	5	10	8	303	9,2800361
15,123398	1,2265231	1,5119818	1,3821672	10	8	5	303	9,4425336

**Tabla 24. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada, utilizando distribución aleatoria.**

*Nota: los resultados mostrados en la tabla 24 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9GHz.*

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
20,650010	0,1521015	1,6241598	1,0324080	13	4	5	303	12,002786
15,643445	1,0884170	1,8702162	0,7391188	13	4	5	303	11,393936
18,420562	1,1073069	1,8023007	0,4526701	13	4	5	303	11,824059
17,915747	1,1642680	1,2498040	1,0144445	13	4	5	303	12,102555
19,970952	0,6037295	1,2192945	1,4199426	13	4	5	303	11,796431

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
18,354845	0,9451097	1,3754066	1,0726214	13	4	5	303	11,915317
20,296232	0,1895773	1,2548668	1,6626346	13	4	5	303	11,752890
19,700037	0,4789605	1,1407345	1,5386010	13	4	5	303	11,726831
18,997066	0,1176204	1,6167967	1,3105577	13	4	5	303	11,422350
19,312121	0,1655157	1,9708212	0,6223860	13	4	5	303	12,185234

**Tabla 25. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada y proceso en cascada, utilizando distribución aleatoria.**

*Nota: los resultados mostrados en la tabla 25 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.*

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
15,983103	0,2478739	1,3579053	0,8444678	4	4	4	303	9,8175951
14,789346	0,7594680	1,0221565	1,1022004	4	4	4	303	9,7403956
16,889758	0,9363214	1,0066434	1,8190250	3	3	3	303	9,6314126
15,350290	1,8970006	0,3948649	0,9861181	4	5	5	303	9,8698053
<b>20,949510</b>	<b>1,4660420</b>	<b>1,0698100</b>	<b>0,3314990</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>303</b>	<b>9,8685863</b>
18,887962	0,6841261	1,4464055	1,1606552	4	5	5	303	9,8401092
14,890771	0,4357213	0,4773611	1,7138653	10	10	10	303	9,6925468
18,199282	0,6427222	0,8824447	1,958413	3	3	3	303	9,8014961
14,498830	0,4676813	1,9648843	0,2848009	5	5	5	303	9,7738945
20,045119	1,2078017	1,2056852	0,4109741	4	5	5	303	9,8882214

**Tabla 26. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada, utilizando distribución uniforme-aleatoria.**

*Nota: los resultados mostrados en la tabla 26 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.*

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
20,991709	1,1316759	0,3348594	1,4814827	4	5	5	303	11,615969
19,561898	1,2315550	0,2028356	1,6554699	4	5	5	303	11,772337
19,807741	1,7510733	0,8414323	0,1309368	4	5	5	303	11,880745
21,200968	1,3086641	1,3592743	0,2714603	4	5	5	303	11,453543
20,700629	1,5142614	0,9433573	0,2984712	4	5	5	303	11,869401
21,110797	1,1338621	0,2536074	1,5710776	4	5	5	303	11,552440
19,420644	0,8676369	0,8406848	1,4998299	4	5	5	303	11,892686
18,968974	0,7809607	1,1178931	1,0293471	4	5	5	303	12,055364

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
20,496822	1,4747739	0,9325710	0,3480138	4	5	5	303	11,589707
<b>21,281432</b>	<b>1,1590308</b>	<b>0,9958000</b>	<b>0,8060622</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>303</b>	<b>11,368197</b>

**Tabla 27. Resultados arrojados por el algoritmo sin aceleración limitada y proceso en cascada, utilizando distribución uniforme-aleatoria.**

Nota: los resultados mostrados en la tabla 27 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
21,745232	1,5330749	1,3398311	1,5856212	4	5	1	338	9,38414
21,745232	1,5330749	1,3398311	1,5856212	4	5	1	338	9,4691487
21,745232	1,5330749	1,3398311	1,5856212	4	5	1	338	9,0168234
21,745232	1,5330749	1,3398312	1,5856212	4	5	1	338	9,2550302
21,745232	1,5330749	1,3398312	1,5856212	4	5	1	338	9,1671868
21,745232	1,5330749	1,3398311	1,5856212	4	5	1	338	9,1379053
21,745232	1,5330749	1,3398311	1,5856212	4	5	1	338	9,1319804
21,745238	1,5330749	1,3398311	1,5856212	4	5	1	338	9,2511580
21,745232	1,5330749	1,3398311	1,5856212	4	5	1	338	9,2956404
21,745232	1,5330749	1,3398311	1,5856212	4	5	1	338	9,1999448

**Tabla 28. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  utilizando distribución uniforme.**

Nota: los resultados mostrados en la tabla 28 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
21,386429	1,7408761	0,9957237	0,8485424	4	5	1	413	14,737192
21,911325	1,5628227	1,2872682	1,150906	4	5	1	396	14,430048
21,903579	1,5502898	1,304571	1,1395562	4	5	1	535	19,492656
21,559851	1,2465887	1,7176237	0,4313415	4	5	1	311	11,367687
<b>21,944610</b>	<b>1,6514544</b>	<b>1,1722065</b>	<b>1,5324421</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>313</b>	<b>11,497195</b>
21,778020	1,4142856	1,4866862	0,7962665	4	5	1	1001	37,366015
21,856328	1,666478	1,1329435	1,156190	4	5	1	413	15,45746
21,860173	1,5031308	1,3626877	0,9110925	4	5	1	392	14,596576
21,854050	1,5147836	1,345353	0,8831518	4	5	1	428	16,319078
21,745565	1,4195091	1,4650645	0,4939141	4	5	1	321	11,412224

**Tabla 29. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  proceso en cascada utilizando distribución uniforme.**

Nota: los resultados mostrados en la tabla 29 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
24,639194	1,5418098	1,3251749	1,5559300	14	4	4	384	10,944794
20,764829	0,3067409	1,0767283	1,9740496	11	4	3	322	8,9629058
20,502075	1,2634942	0,6452252	1,2400071	5	4	5	356	9,9123429
21,927183	1,7136200	1,075782	1,3366475	4	5	8	350	9,5111751
20,782066	0,6832734	1,4076896	1,2425290	4	5	3	354	9,7354375
27,076021	1,5064297	0,3378226	1,2761839	16	4	4	370	10,398139
25,284188	1,5182868	0,7604976	1,2927759	16	3	4	368	10,294665
21,617441	1,475158	1,4204807	1,3728991	4	5	8	383	10,669122
21,953745	1,6677213	1,1403882	1,2581875	4	5	6	356	9,7794673
21,506607	1,7291239	1,0188061	0,8484422	4	5	6	354	9,6832624

**Tabla 30. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  utilizando distribución aleatoria.**

Nota: los resultados mostrados en la tabla 30 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
22,820266	0,7585062	1,8566298	1,0034697	14	4	4	317	11,901817
25,639194	0,4913865	1,4956331	1,2721892	14	4	4	367	13,552059
25,485470	0,4575281	1,8520578	0,8908981	14	4	4	322	12,061514
24,266995	0,6274049	1,3571866	1,518165	14	4	4	312	11,720347
25,531012	0,5242651	1,6373037	1,1519534	14	4	4	516	19,368386
24,404278	0,4901755	1,8380299	0,9897403	14	4	4	315	11,783483
22,039687	0,5666902	1,5056635	1,1193432	14	4	4	305	11,277228
25,600054	0,4734957	1,4441245	1,3116687	14	4	4	366	13,741281
25,545423	0,5299360	1,075975	1,7143763	14	4	4	568	21,14514
25,189549	0,5214675	1,5801139	1,2254139	14	4	4	327	12,025135

**Tabla 31. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  proceso en cascada, utilizando distribución aleatoria.**

Nota: los resultados mostrados en la tabla 31 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
28,339997	0,8344650	1,7299244	1,3435875	16	4	4	316	11,684514
28,647694	0,8009084	1,4440984	1,5913986	16	4	4	318	11,716387
28,687548	0,7843835	1,8431402	1,1692881	16	4	4	324	11,493076
28,709808	0,7699794	1,542488	1,4565404	16	4	4	324	11,984721
27,120884	0,6700279	1,4090434	1,5399141	16	4	4	335	12,355483
<b>28,764416</b>	<b>0,7559226</b>	<b>1,5191432</b>	<b>1,4624532</b>	<b>16</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>326</b>	<b>12,171999</b>
27,405711	0,872146	1,9220854	1,1225807	16	4	4	315	11,323761
27,713209	0,6894852	1,4299721	1,5190570	16	4	4	314	11,263639
24,96184	1,1065363	1,8786403	1,3113848	16	4	4	321	12,0523
27,680632	0,7517548	1,8879876	1,0377749	16	4	4	312	11,426374

*Tabla 32. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  proceso en cascada, utilizando distribución aleatoria (segunda prueba).*

Nota: los resultados mostrados en la tabla 32 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
<b>28,488462</b>	<b>0,7722819</b>	<b>1,559500</b>	<b>1,982848</b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>330</b>	<b>12,008198</b>
23,801812	0,7861306	1,7970839	1,6158148	16	3	4	304	10,833347
26,457595	0,6702249	1,5950131	1,7915677	16	3	4	593	21,785540
22,149129	0,412133	1,8566970	1,3519146	16	3	4	357	12,805617
28,400974	0,7851412	1,7197725	1,9039946	16	3	4	522	19,276281
28,053871	0,7710858	1,8582747	1,798076	16	3	4	731	26,752271
28,463346	0,7724680	1,6012567	1,9522014	16	3	4	776	28,98295
27,592477	0,8768198	1,6672669	1,9934038	16	3	4	311	11,308205
25,644951	0,6564095	1,4319769	1,8534728	16	3	4	306	11,027741
28,400974	0,7851412	1,7197725	1,9039946	16	3	4	697	25,929290

*Tabla 33. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  proceso en cascada, utilizando distribución aleatoria (tercera prueba).*

Nota: los resultados mostrados en la tabla 33 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
21,609663	1,3534930	0,4287043	1,5199259	4	6	5	380	10,690952
21,280350	1,4810686	1,5734590	1,2668388	4	3	8	347	9,4795834

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
21,814435	1,5915534	1,2461060	1,0420998	4	5	7	361	9,7431024
21,540376	1,2851875	0,5066872	1,1215159	4	5	5	313	8,5483624
21,358288	1,1660113	0,7453468	1,0810864	4	5	5	371	10,305771
21,89651	1,5962163	1,2499720	1,4928361	4	5	2	540	15,295445
<b>21,999602</b>	<b>1,7607305</b>	<b>1,0227423</b>	<b>1,6754622</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>409</b>	<b>11,572854</b>
20,180383	0,9765308	0,9267425	1,9363980	9	6	4	308	8,4173351
21,533990	1,5265528	1,3271474	0,5897147	4	5	6	382	10,375454
19,058524	0,4718339	1,6257485	1,4845592	10	5	3	319	8,5387297

**Tabla 34. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  utilizando distribución uniforme-aleatoria.**

*Nota: los resultados mostrados en la tabla 34 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 0,8 – 1,9 GHz.*

B.F.	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
21,803326	1,4629949	1,4228667	0,9945010	4	5	8	342	12,20884
22,006832	1,7065891	1,0992650	1,6013616	4	5	8	322	11,155996
21,732367	1,4056726	1,4966556	0,8068594	4	5	8	307	11,091439
21,723424	1,6740356	1,150889	1,3525339	4	5	8	317	11,651629
21,73190	1,375383	1,5321768	0,5733973	4	5	8	341	12,307061
21,866754	1,6010367	1,2453411	1,6293279	4	5	8	315	11,205830
22,008112	1,7528091	1,0333894	1,6320442	4	5	8	320	11,585751
21,987216	1,6694415	1,1472148	1,4866471	4	5	8	377	13,39263
<b>22,010553</b>	<b>1,7888000</b>	<b>0,9822531</b>	<b>1,5909482</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>470</b>	<b>16,745254</b>
21,813080	1,4486457	1,4341061	0,7406261	4	5	8	606	21,582523

**Tabla 35. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  proceso en cascada, utilizando distribución uniforme-aleatoria.**

*Nota: los resultados mostrados en la tabla 35 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 2 – 8 GHz.*

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
17,802377	0,3384389	1,8465867	1,3936753	14	6	9	384	8,2347887
15,981542	0,6315817	1,4510169	0,5846032	15	2	13	378	8,1439592
<b>21,281423</b>	<b>0,3941629</b>	<b>1,964654</b>	<b>1,867491</b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>384</b>	<b>8,5308228</b>
16,748233	0,6132516	0,8527823	1,1129513	14	2	13	376	8,1889784
12,176959	0,9807107	0,3536229	1,4380151	8	14	5	336	7,3838933
15,738480	0,5075918	1,6883576	1,3107981	16	3	9	370	7,9815072
16,947803	0,3527536	1,6185574	1,2987850	14	6	9	345	7,5183723
18,011765	0,398836	1,4488927	1,4260074	16	7	9	375	8,3920219
17,045873	0,3862599	1,6816996	1,3367376	14	6	9	330	7,1749184
17,567272	0,6230577	0,5099091	1,1329930	16	2	9	388	8,2659272

**Tabla 36. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  utilizando distribución aleatoria.**

*Nota: los resultados mostrados en la tabla 36 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 2 – 8 GHz.*

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,561487
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,311582
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,385447
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,337934
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,494113
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,468305
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,453859
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,469573
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,377910
20,274154	0,369156	1,715225	1,679261	16	6	9	394	8,298228

**Tabla 37. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  utilizando distribución uniforme.**

*Nota: los resultados mostrados en la tabla 37 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 2 – 8 GHz.*

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
14,897827	0,539775	1,2285524	1,5883337	16	2	4	336	6,860800
<b>20,743257</b>	<b>0,369363</b>	<b>1,7722784</b>	<b>1,6939907</b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>383</b>	<b>8,129614</b>
17,005849	0,353348	1,6027589	1,3132704	14	6	9	386	8,027395
16,774373	0,423209	1,3713130	1,7698855	14	6	10	366	7,547972

B.F	Grosor 1 capa (mm)	Grosor 2 capa (mm)	Grosor 3 capa (mm)	Material 1	Material 2	Material 3	Nt	Tiempo (s)
16,159050	0,473538	1,6321753	1,6911649	14	6	10	372	7,667160
15,406774	0,540438	1,5618009	1,2957911	16	12	11	425	8,655530
17,704453	0,386125	1,7873392	1,2561747	16	8	11	405	8,551448
16,096373	0,334634	1,5007804	1,3856180	14	6	9	345	7,035281
14,765401	0,487054	1,1722746	1,759305	16	12	4	332	6,691663
17,250002	0,367846	1,2432605	1,3762640	16	7	9	382	7,855522

**Tabla 38. Resultados arrojados por el algoritmo con  $A_{max} = 0,49e^{-0,0003t} + 0,01$  utilizando distribución aleatoria-uniforme.**

*Nota: los resultados mostrados en la tabla 38 se obtuvieron con una frecuencia especificada entre 2 – 8 GHz.*