

**OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR  
ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA DE MENOR COSTO UTILIZANDO EL  
ALGORITMO DE LA ESPIRAL**

**OSCAR HORACIO RODRÍGUEZ QUINTERO**

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

**2016**

**OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR  
ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA DE MENOR COSTO UTILIZANDO EL  
ALGORITMO DE LA ESPIRAL**

**OSCAR HORACIO RODRÍGUEZ QUINTERO**

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

**DIRECTOR**

**PhD. CARLOS RODRIGO CORREA CELY**

**CODIRECTOR**

**Ing. EDGAR SNEYDER GARCÍA MORANTES**

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

**2016**

## **DEDICATORIA**

*Quiero dedicarle este trabajo a Dios que me ha dado la vida y fortaleza para terminar este proyecto de investigación, a mi madre por su ayuda y constante cooperación y por apoyarme en los momentos más difíciles, a mis hermanos por estar ahí cuando más los necesité.*

*Oscar Horacio Rodríguez Quintero*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Le agradezco a Dios la realización de este trabajo, a mi madre y hermanos por su apoyo incondicional, al profesor Rodrigo Correa, al ingeniero Edgar García y al profesor Iván Amaya por su orientación durante la ejecución de este trabajo*

*Oscar Horacio Rodríguez Quintero*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO</b> .....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	16
2.1 BREVE MARCO CONCEPTUAL.....	16
2.1.1 DECISIÓN MULTICRITERIO.....	18
2.1.2 TÉCNICAS GENERADORAS DEL CONJUNTO EFICIENTE.....	18
<b>3. EL MÉTODO METAHEURÍSTICO DE LA ESPIRAL</b> .....	19
3.1 ALGORITMO EN DOS DIMENSIONES.....	21
3.1.1 MATRIZ DE ROTACIÓN.....	21
3.1.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE LA ESPIRAL.....	23
3.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CÓMPUTO Y PLATAFORMA MATLAB.....	26
3.1.4 GRAFICAS DE ALGUNAS TRAYECTORIAS EN 2D.....	26
3.2 MÉTODO DE LA ESPIRAL PARA (n) DIMENSIONES.....	31
<b>4. ABSORBEDORES ELECTROMAGNÉTICOS</b> .....	33
<b>5. DISPOSICIÓN EN LA PLATAFORMA DE MATLAB DE LA FUNCIÓN OBJETIVO QUE CARACTERIZA EL ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO</b> .....	38
5.1 BANCO DE MATERIALES.....	38
5.2 FUNCIÓN OBJETIVO.....	40
5.2.1 DISEÑO DE UN ABSORBEDOR DE 3 CAPAS.....	40
<b>6. MODIFICACIÓN DEL ALGORITMO DE LA ESPIRAL</b> .....	44
6.1 CRITERIOS DE FRONTERA.....	46
<b>7. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE LA ESPIRAL EN EL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE TRES CAPAS</b> .....	47
<b>8. BANCO DE MATERIALES CON COSTOS</b> .....	50
8.1 MATERIALES.....	50

8.1.1	MATERIALES AISLANTES O DIELECTRICOS .....	50
8.1.2	MATERIALES DIAMAGNETICOS .....	51
8.1.3	MATERIALES PARAMAGNETICOS .....	51
8.1.4	MATERIALES FERROMAGNETICOS .....	51
8.1.5	LAS FERRITAS .....	52
8.1.6	LOS MATERIALES ANTIMAGNETICOS .....	52
8.2	ASIGNACIÓN DE COSTOS.....	52
<b>9.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO MULTIOBJETIVO .....</b>	<b>55</b>
9.1	OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO .....	55
<b>10.</b>	<b>ANÁLISIS DE DATOS.....</b>	<b>61</b>
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>63</b>
<b>12.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>67</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Métodos de Optimización Global.....	17
Figura 2. Fenómenos de la espiral en la naturaleza.....	20
Figura 3. Espiral Logarítmica.....	20
Figura 4. Rotación en el plano $x_1$ - $x_2$ .....	22
Figura 5. Diagrama de bloques método de la espiral.....	25
Figura 6. Espiral caso (a).....	27
Figura 7. Espiral Caso (b).....	28
Figura 8. Espiral Caso (c). ....	28
Figura 9. Espiral 2D Vista en 3D.....	29
Figura 10. Espiral 2D Convergencia en $(X')$ . $m=25$ . Caso (a). ....	30
Figura 11. Espiral 2D Convergencia en $(X')$ . $m=25$ . Caso (b). ....	30
Figura 12. Ondas producidas al momento de incidir una onda perpendicularmente sobre una superficie plana. ....	34
Figura 13. Esquema general absorbedor de N capas.....	36
Figura 14. Primer diseño: Absorbedor electromagnético de 3 capas. ....	43
Figura 15. Segundo diseño: Absorbedor electromagnético de 3 capas.....	43
Figura 16. Tercer diseño: Absorbedor electromagnético de 3 capas.....	44
Figura 17. Diagrama de bloques Método de la Espiral Implementado. ....	46
Figura 18. Comportamiento del coeficiente de reflexión en el ancho de banda para el diseño de absorbedor de 3 capas. ....	48
Figura 19. Convergencia Diseño Absorbedor de 3 Capas.....	48
Figura 20. Coeficiente de Reflexión RF (50 Ejecuciones).....	49
Figura 21. Comportamiento min ( $F_{Oglobal}$ ) casos 1 y 2 (300 Ejecuciones). ....	58
Figura 22. Comportamiento min ( $F_{Oglobal}$ ) casos 3 y 4 (300 Ejecuciones).....	59
Figura 23. Análisis de Parámetros mediante Pareto .....	61

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características.....	26
Tabla 2. Parámetros para Ilustración.....	27
Tabla 3. Parámetros materiales de prueba.....	39
Tabla 4. Diseño Absorbedor 3 Capas.....	40
Tabla 5. Parámetros.....	42
Tabla 6. Resultados de la Evaluación.....	42
Tabla 7. Diseño de un Absorbedor Electromagnético de 3 Capas.....	47
Tabla 8. Propiedades Absorbedor.....	53
Tabla 9. Parámetros Materiales de Prueba con Costo.....	54
Tabla 10. . Análisis del Algoritmo.....	58

## RESUMEN

**Título:** Optimización multiobjetivo para el diseño de un absorbedor electromagnético multicapa de menor costo utilizando el algoritmo de la espiral.<sup>1</sup>

**Autor:** Oscar Horacio Rodríguez Quintero.<sup>2</sup>

**Palabras Claves:** Absorbedor Electromagnético, Método de la espiral, Optimización, Coeficiente de reflexión, Algoritmo, Costos, Grosor, Capas, Multiobjetivo.

En problemas de optimización multiobjetivo, se plantean dos o más funciones objetivo las cuales, según sea el caso se deben minimizar o maximizar al mismo tiempo, buscando el mejor conjunto de soluciones posible de acuerdo a las especificaciones propuestas. En este caso, el objetivo fue diseñar un absorbedor electromagnético multicapa el cual tiene como prioridad determinar una configuración de materiales y grosores que satisficiera las especificaciones de menor costo y mayor absorción de energía incidente.

Para solucionar estos problemas se pueden usar métodos tradicionales tales como solución analítica, el método del gradiente, mínimos cuadrados, entre otros. Sin embargo, estos tienen un problema el ser muy complejos y quedar atascados en soluciones particulares, evitando así una respuesta óptima. Es por ello que en el presente trabajo de investigación se implementó un método metaheurístico de optimización global conocido como el método de la espiral. El cual es un algoritmo basado en el comportamiento de ciertos fenómenos de la naturaleza como los tornados, y la vía láctea para solucionar dicho problema.

El presente trabajo de investigación se encuentra dividido en tres partes. La primera parte consiste en verificar el funcionamiento del algoritmo propuesto por *kenichi tamura and keiichiro yasuda* conocido como el método de la espiral mediante la reproducción de algunos resultados de su investigación. Posteriormente se procederá a realizar una evaluación del método aplicando a un absorbedor electromagnético de tres capas para verificar su correcto funcionamiento. Finalmente se implementará el método de la espiral en el diseño de un absorbedor electromagnético multicapa multiobjetivo.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad: Físico-Mecánicas Escuela: Ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones.  
Director: Carlos Rodrigo Correa Cely      Codirector: Edgar Sneyder García Morantes

## ABSTRACT

**Title:** multiobjective for designing a multilayer electromagnetic absorber lower cost using the optimization algorithm spiral.<sup>3</sup>

**Author:** Oscar Horacio Rodríguez Quintero.<sup>4</sup>

**Keywords:** Electromagnetic Absorber, Spiral Method, Optimization, reflection coefficient, Algorithm, Costs, Thickness, Layers, Multiobjective.

In multi-objective optimization problems, two or more target functions which arise, as the case may be minimized or maximized while looking for the best set of possible solutions according to the proposed specification. In this case, the goal was to design a multilayer electromagnetic absorber which gives priority to determine a configuration of materials and thicknesses that meets the specifications of lower cost and greater absorption of incident energy.

To solve these problems can be used methods such as traditional analytical solution, the gradient method, least squares, among others. However, they have a very complex problem to be and get stuck in particular solutions, thus avoiding an optimal response. That is why in this research one metaheuristic global optimization method known as the method of the spiral was implemented. Which is an algorithm based on the behavior of certain natural phenomena such as tornadoes, and the Milky Way to solve this problem.

This research is divided into three parts. The first part consists of verifying the operation proposed by Kenichi Tamura and Keiichiro Yasuda algorithm known as the method of the spiral by reproducing some results of their research. Subsequently proceed to an assessment by applying an electromagnetic absorber three layers to verify correct operation method. Finally the method of the spiral will be implemented in the design of a multilayer multiobjective electromagnetic absorber.

---

<sup>3</sup> Bachelor thesis

<sup>4</sup> Faculty: Physicomechanics. School: Electric, Electronic and the Telecommunications Engineering. Advisor: Carlos Rodrigo Correa Cely. Coadvisor: Edgar Sneyder García Morantes.

## INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento de las ondas electromagnéticas en el siglo XIX, estas forman parte de la vida cotidiana del ser humano; inconscientemente el hombre interactúa con ellas, a través de aparatos como radios, televisores, controles remotos, equipos de audio, telefonía y aviación entre otros. Tienen componentes eléctricos y magnéticos; es por ello, que encontramos una gran cantidad de ondas electromagnéticas que se distribuyen en todo lo ancho del espectro a cada momento y es aquí donde radica el problema; la interferencia de ondas aumenta exponencialmente y está afectando el funcionamiento de ciertos dispositivos que son muy sensibles a este fenómeno.

Para minimizar estas interferencias, se crearon los absorbedores electromagnéticos. La investigación, experimentación y estudio de estos instrumentos ha contribuido para mejorar su diseño, funcionamiento y demanda en el mercado.

Un absorbedor electromagnético es un dispositivo que atenúa por completo las ondas electromagnéticas que inciden sobre él. Esto ocurre gracias a las propiedades características que poseen sus componentes.

Los absorbedores electromagnéticos se usan en la mayor parte de las aplicaciones donde se requiere reducir o eliminar la radiación no deseada que puede interferir de manera crítica el funcionamiento de un sistema. Su función es absorber el campo EMI (interferencia electromagnética) generado por la electrónica de alta velocidad de la actualidad. Pueden ser aplicados directamente sin temor a cortocircuitar los circuitos integrados [1].

El tipo de absorbedor más común es el multicapa, el cual está compuesto por varias capas planas de diferentes materiales, su característica de absorción dependerá de las propiedades eléctricas y magnéticas, de los materiales que lo compongan y de su grosor. Por tal motivo es importante que la optimización en su diseño este presente. Ya que permitirá escoger la mejor combinación de materiales y grosores que logren un buen desempeño. Adicionalmente, una reducción en sus dimensiones estará asociada a una reducción en su costo final, lo cual es una ventaja que otorga la optimización.

El diseño de estos absorbedores toma como referencia simulaciones efectuadas con métodos de optimización metaheurísticos los cuales se implementan en distintos software y herramientas computacionales.

Dentro de los métodos de optimización modernos se encuentran los llamados metaheurísticos. Estos no tienen un fundamento matemático riguroso, son soluciones intuitivas y llegan a una buena solución, en términos de cercanía al óptimo global del problema. Mediante ciertas reglas planteadas empíricamente; en este trabajo de investigación se usará el método de optimización de la espiral desarrollado por *kenichi tamura and keiichiro yasuda en el 2011* [7]. El cual se encuentra en sus inicios y, según la revisión hecha al estado del arte, se encuentran pocas aplicaciones [2].

El presente trabajo se distribuye de la siguiente manera: en la sección 1, se presenta la introducción. En la sección 2, se presenta la descripción del trabajo de grado. En la sección 3, los fundamentos teóricos. En la sección 4, el método metaheurístico de la espiral. En la sección 5, teoría de los absorbedores electromagnéticos. En la sección 6, disposición en la plataforma de Matlab de la función objetivo que caracteriza el absorbedor. La sección 7, modificación del algoritmo de la espiral. En la sección 8, la implementación del algoritmo de la espiral en el absorbedor electromagnético de 3 capas. En la sección 9, banco de materiales con la adición de costo. En la sección 10, la implementación del algoritmo de la espiral a un absorbedor electromagnético multicapa para una optimización multiobjetivo. En la sección 11, análisis de datos. En la sección 12, se presentan las conclusiones.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO<sup>5</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 y con diversos tipos de materiales. Sin embargo, el grosor de las capas y el coeficiente de reflexión entran en conflicto; es decir, un absorbedor con capas delgadas tiene 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[3].

Debido a la complejidad que existe a la hora de diseñar un absorbedor electromagnético, se requieren estrategias que faciliten la optimización del proceso, el cual consiste en obtener primero el conjunto de parámetros que describen al sistema y posteriormente, encontrar la mejor combinación de valores para ese conjunto de parámetros. Por tanto para poder diseñar es necesario resolver las ecuaciones que modelan su comportamiento, lo cual es un trabajo muy complejo para ser abordado con los métodos tradicionales. Por ello se implementó la solución utilizando un método metaheurístico.

---

<sup>5</sup> Corresponde a una contribución intelectual consensuada entre el estudiante Oscar Horacio Rodríguez Quintero con el profesor Rodrigo Correa e Edgar Sneyder García Morantes.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un absorbedor electromagnético multicapa de menor costo mediante la estrategia de optimización del algoritmo de la espiral.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Disponer del algoritmo de optimización de la espiral en la plataforma de Matlab.
2. Verificar mediante pruebas con funciones típicas, el correcto funcionamiento del algoritmo de optimización de la espiral.
3. Plantear y optimizar la función objetivo que permita obtener el absorbedor electromagnético multicapa de máxima capacidad de absorción de ondas electromagnéticas que al mismo tiempo sea el de menor costo.

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1 BREVE MARCO CONCEPTUAL**

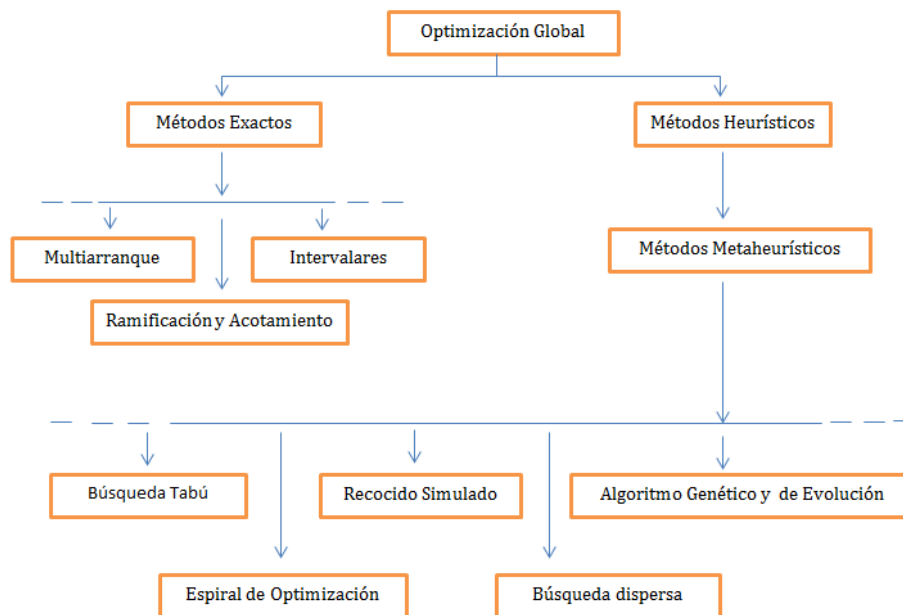
La mayoría de las cosas existentes en nuestro entorno no son infinitas, al no ser infinitas quiere decir que tienen un límite. Esto a su vez indica que al alcanzar dicho límite el elemento deseado desaparece. Con el pasar del tiempo la población aumenta y la búsqueda de recursos se hace primordial, es ahí donde toma fuerza el concepto de optimización el cual se fundamenta en hacer más con menos.

Cuando hablamos de optimizar estamos hablando de la búsqueda de mejores resultados, más eficacia o mayor eficiencia en el desempeño de alguna tarea.

Los métodos de optimización se clasifican en dos clases, la optimización lineal y la optimización no lineal. De la optimización lineal no se hablara en este trabajo ya que esta exclusivamente ligada al análisis y solución de problemas lineales. Los problemas que deseamos abordar son problemas reales y en su mayoría están descritos mediante ecuaciones no lineales. Es ahí donde se enfoca este estudio en el análisis de optimización no lineal.

La complejidad del análisis en la mayoría de los problemas de optimización abrió campo a una nueva rama de técnicas que se desarrollaron buscando resolver este tipo de dificultades, esta rama se denomina heurística. Estas técnicas son una muy buena alternativa, ya que son capaces de generar buenas soluciones aunque no la óptima a problemas complejos con un costo de tiempo razonable. De las técnicas heurísticas nos interesa un subconjunto en particular las denominadas metaheurísticas que son técnicas heurísticas las cuales no poseen una fundamentación matemático muy complejo y llegan a una buena solución en términos de cercanía al óptimo global [24]. La **Figura 1** presenta un esquema.

**Figura 1.** Métodos de Optimización Global.



Ya que la prioridad del proyecto es el desarrollo de una optimización multiobjetivo profundizaremos un poco en su teoría para ver las formas de solucionar este tipo de problemas. Hay tres procedimientos que nos permiten obtener una solución satisfactoria. La teoría de la decisión con incertidumbre o riesgo, la decisión multicriterio y por último la teoría de juegos.

a) la teoría de la decisión con incertidumbre o riesgo, este procedimiento se fundamenta en tomar decisiones de forma aleatoria, luego deja los resultados al azar.

b) la decisión multicriterio, en la que si bien dada una decisión sus consecuencias están perfectamente determinadas, lo que no está definido tan claramente es qué es lo

mejor, existiendo varios objetivos en conflicto.

c) la teoría de juegos, en la que las consecuencias de una decisión no dependen únicamente de la decisión adoptada, sino, también de la que elijan otros jugadores. [9]

De los tres procedimientos mencionados, este trabajo toma como método de solución el descrito por la teoría de decisión multicriterio. A continuación se describe en detalle.

### 2.1.1 DECISIÓN MULTICRITERIO

Un problema de decisión multicriterio posee gran complejidad ya que se debe tomar decisiones para más de una función (quien describe el problema de forma matemática) a la vez.

De forma general un problema de decisión multicriterio vendría formulado de la siguiente forma:

$$\text{opt } z(x) = (z_1(x), z_2(x), \dots, z_p(x)) \quad x \in F \quad (1)$$

Donde  $F$  es el espacio de decisiones o soluciones (si es continuo, se denomina región factible,  $F$  subconjunto de  $R^n$ ). Al conjunto  $z(x)$  se le denomina espacio de objetivos o resultados (en el caso de que sean criterios numéricos  $z(F)$  subconjunto de  $R^p$ ).

### 2.1.2 TÉCNICAS GENERADORAS DEL CONJUNTO EFICIENTE

Son técnicas desarrolladas para facilitar el análisis de problemas multicriterio. Están diseñadas para obtener todo el conjunto de soluciones. Las técnicas más comunes son el método de ponderaciones, el método de restricciones y finalmente el método simplex.

#### 2.1.2.1 MÉTODO DE LAS PONDERACIONES

Este método consiste en multiplicar cada objetivo por un peso ( $\lambda$ ), el valor que posee este peso debe ser no negativo. La combinación de pesos que se usa normalmente debe estar entre (0 y 1), siendo (0) la menor prioridad y (1) el objetivo más importante en el estudio. El conjunto de soluciones se podrá obtener al variar las ponderaciones de los objetivos de estudio.

$$P(\lambda) = \max \sum_{i=1}^p \lambda_i z_i(x) \quad (2)$$

$$x \in F$$

$$\lambda \geq 0$$

Uno de los fundamentos de este método dice que si todos los pesos ( $\lambda$ ) son mayores que cero ( $\lambda_i > 0 \quad \forall i=1, 2, 3, \dots, p$ ) entonces cualquier solución del problema  $P(\lambda)$  será óptima.

Se debe tener en cuenta que es aconsejable normalizar previamente los criterios para facilitar el análisis y evitar la influencia de unidades de los criterios [9].

### 2.1.2.2 MÉTODO DE LAS E-RESTRICCIONES

Este método consiste en seleccionar un objetivo entre el grupo de objetivos que constituyen el problema que se desea optimizar, posteriormente se toman los objetivos restantes y se les incorpora al resto de restricciones del problema.

### 2.1.2.3 MÉTODO SIMPLEX MULTIOBJETIVO

El método Simplex multiobjetivo genera todos los puntos de esquina (corner points) eficientes de un problema multiobjetivo desplazándose para ello de un punto esquina al punto esquina contiguo. En combinación con esta operación de salto de un punto de esquina a otro, el método Simplex multiobjetivo recurre a una subrutina que permite comprobar la eficiencia o no de cada punto obtenido. El método Simplex multiobjetivo trabaja eficientemente sólo con problemas que poseen un número de objetivos inferior a cinco, así como un número de variables y restricciones no superior a cien hallando así todos los puntos extremos eficientes. [9]

## 3 EL MÉTODO METAHEURÍSTICO DE LA ESPIRAL

Es una técnica metaheurística que incorpora un nuevo método de búsqueda multipunto.<sup>6</sup> Fue desarrollada por Kenechi Tamura y Keiichiro Yasura en el 2011, [7]. La optimización por espiral está basada en un fenómeno natural como se observa en la Figura 2 y en la espiral logarítmica ver **Figura 3**.

Este método establece dos estrategias de búsqueda las cuales le permiten realizar un análisis de todo el espacio de soluciones. El primer componente permite una búsqueda de forma extensa y se denomina diversificación como su nombre lo dice se dispersa en todo el espacio ofreciendo un mayor campo de búsqueda y mayores posibilidades de encontrar rápidamente la solución a nuestro problema. El segundo componente permite un análisis minucioso y se denomina intensificación facilitando

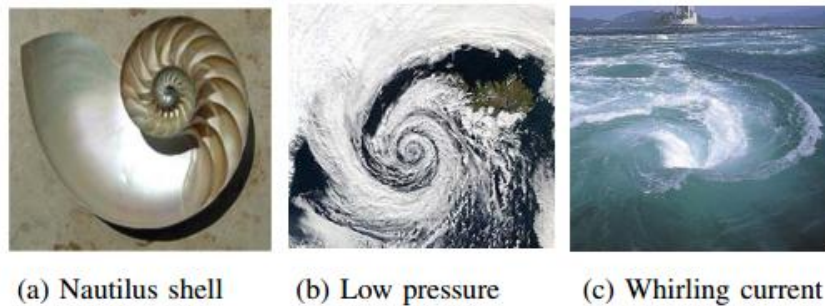
---

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

encontrar mejores soluciones en una región más reducida la cual es establecida en la primera parte por el componente de diversificación.

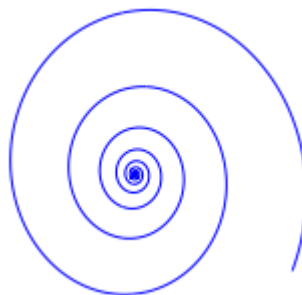
El método de optimización por espiral establece un centro de espiral que se modifica continuamente en cada iteración, partiendo de un criterio que selecciona el valor mínimo obtenido y lo elige como el centro de la próxima rotación. Gracias a esto, la búsqueda explora todo el espacio de soluciones y cuando las diferencias entre los valores mínimos sean casi de cero, el algoritmo se detendrá. Cabe resaltar que el centro de la espiral pasado cierto número de iteraciones será la solución a dicho problema. [7]

**Figura 2.** Fenómenos de la espiral en la naturaleza.



**Fuente:** Tomada de TAMURA, kenichi y YASUDA, keiichiro. Spiral Optimization. A new multipoint search method. En Systems, Man and Cybernetics (SMC). Octubre 2011, p 1.

**Figura 3.** Espiral Logarítmica.



**Fuente:** Tomada de TAMURA, kenichi y YASUDA, keiichiro. Spiral Optimization. A new multipoint search method. En Systems, Man and Cybernetics (SMC). Octubre 2011, p 1.

A partir del desarrollo de esta metaheurística en 2 dimensiones, los autores Kenichi Tamura and Keiichiro Yasuda generalizaron el algoritmo para ofrecer una metaheurística que pueda ser aplicada a 'n' dimensiones [7].

Primero presentaremos el desarrollo del algoritmo de la espiral para dos dimensiones, su metodología y procedimiento para desarrollarlo. Después reproduciremos los resultados para algunos comportamientos gráficos de dicho método para dos dimensiones.

### 3.1 ALGORITMO EN DOS DIMENSIONES

El primer concepto que se aborda es el de matriz de rotación, dado que es una parte fundamental que nos permitirá obtener un mejor entendimiento del desarrollo de este método metaheurístico.

#### 3.1.1 MATRIZ DE ROTACIÓN

Una matriz de rotación es la encargada de convertir un vector a otro mediante la rotación en un eje de coordenadas. Las matrices de rotación definen algebraicamente lo que es una rotación en un espacio considerando un ángulo theta que será en el que está girando. Las matrices de rotación tienen unas propiedades que son importantes:

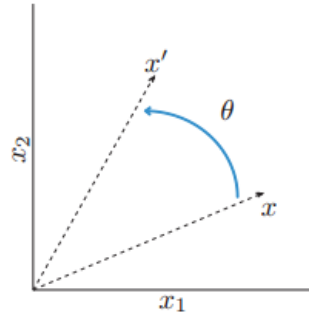
- sus ejes de coordenadas son vectores ortogonales (forman un ángulo de 90 grados entre ellos)
- su determinante es 1
- si se saca la normal de cualquier vector perteneciente a la matriz el resultado es 1 por lo que es una matriz unitaria
- al ser una matriz ortogonal su transpuesta es igual a su inversa

La matriz de rotación se denota de la siguiente manera:

$$R_{1,2}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

En la **Figura 4** se ejemplifica lo que hace una matriz de rotación, una vez proporcionado un ángulo hace que el objeto rote la cantidad de theta grados en una dirección.

**Figura 4.** Rotación en el plano x1-x2.



**Fuente:** Tomada de TAMURA, kenichi y YASUDA, keiichiro. Spiral Optimization. A new multipoint search method. En Systems, Man and Cybernetics (SMC). Octubre 2011, p 1.

Para el caso de que la matriz de rotación sea de  $n=3$ , es decir, 3 dimensiones, podemos encontrar 3 combinaciones diferentes de dicha matriz la cual depende del plano en que se desee rotar

- **Caso1:** Rotación en el plano(x2-x3)

$$R(x, \theta) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ 0 & \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (4)$$

- **Caso2:** Rotación en el plano(x1-x3)

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen } \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (5)$$

- **Caso3:** Rotación en el plano(x1-x2)

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (6)$$

De lo anterior podemos notar que el crecimiento de nuestra matriz a n-dimensiones tomando como eje de rotación nuestro plano (x1-x2) se dará de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 & \dots & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Ya mencionado el concepto de matriz de rotación procedemos a ver como se aplica dicha matriz a la rotación de un punto en el plano (x1-x2) alrededor de (0,0).

### 3.1.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE LA ESPIRAL

Para iniciar describimos la ecuación de rotación:

$$x' = R_{1,2}^{(2)}(\theta) * x \quad (8)$$

Dónde:

$x$ : Es el punto inicial

$x'$ : Será la nueva posición de nuestro punto  $x$

$R_{1,2}^{(2)}(\theta)$  = Es la matriz de Rotación en 2 dimensiones

Aplicando la operación vemos que el resultado será el siguiente:

$$x' = x * \cos(\theta) - y * \text{sen}(\theta) \quad (9)$$

$$y' = x * \text{sen}(\theta) + y * \cos(\theta) \quad (10)$$

Transformando las dos expresiones anteriores a matrices tendríamos:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ \text{sen} \theta & \cos \theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (11)$$

A partir de la definición de esta matriz podemos encontrar la aplicación del método de la espiral, lo que hace es adicionar a esto un factor de convergencia ( $r$ ) el cual varía entre ( $0 < r < 1$ ) para obtener convergencia a un punto, también el ángulo de rotación ( $\theta$ ) quien oscila entre ( $0 < \theta < 2\pi$ ), un valor máximo de iteraciones ( $k_{\max}$ ) y por ultimo un número de puntos de búsqueda ( $m > 2$ ).

- La ecuación que describe el método de la espiral con convergencia a un punto (0,0) en el plano (x1-x2) es:

$$\begin{pmatrix} x'_1 = x(k+1) \\ x'_2 = x(k+1) \end{pmatrix} = r * \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & \cos \theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{pmatrix} = S_2(r, \theta) * x(k) \quad (13)$$

- La ecuación que describe el método de la espiral con convergencia a un punto (x\*) diferente a (0,0) en el plano (x1-x2) es:

$$\begin{pmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{pmatrix} = S_2(r, \theta) * x(k) - (S_2(r, \theta) - I_2)x * \quad (14)$$

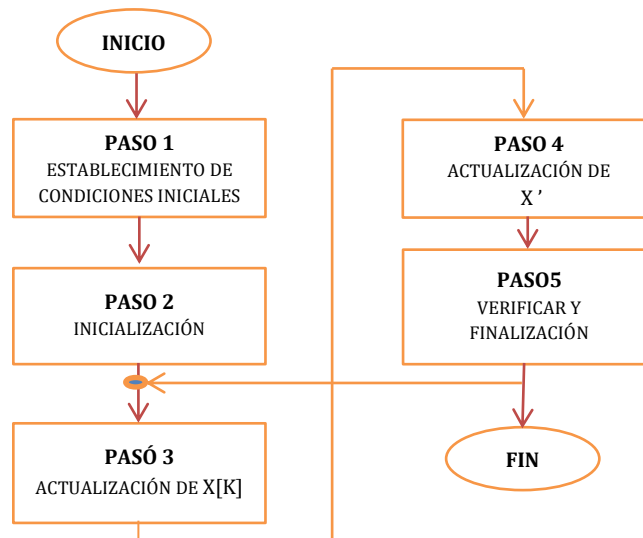
Donde  $I_2$  es la matriz identidad de 2 dimensiones

La parte que se le añade es donde incluimos a (x\*) quien en la ecuación es un valor cambiante que asegura que el centro de rotación de la espiral sea diferente a cero.

$$\begin{pmatrix} x'_1 = x(k+1) \\ x'_2 = x(k+1) \end{pmatrix} = r * \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & \cos \theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{pmatrix} - \left[ r * \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & \cos \theta \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right] * \begin{pmatrix} x_1 * (k) \\ x_2 * (k) \end{pmatrix} \quad (15)$$

Dada la expresión anterior ya podemos describir los pasos que se deben desarrollar para poder implementar el método de la espiral de forma adecuada en dos dimensiones. Esto se puede observar en la **Figura 5**.

**Figura 5.** Diagrama de bloques método de la espiral.



A continuación se presentan de forma detallada cada uno de los pasos para realizar el algoritmo de optimización de la espiral.

### **Paso 0: Preparación**

Seleccionar el número de puntos de búsqueda ( $m$ ), de modo que sea ( $m \geq 2$ ) luego, establecemos el valor de ( $\theta$ ) de manera que ( $0 < \theta < 2\pi$ ), también debemos describir el valor de ( $r$ ) el cual debe estar dado entre ( $0 < r < 1$ ) y por ultimo debemos poner un límite al número de iteraciones mediante una variable ( $k_{max}$ ).

### **Paso 1: Inicialización**

Se establecen los puntos iniciales  $x_i(0) \in \mathbb{R}^2$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  que se encuentren dentro de la región factible del problema. Además debemos establecer el primer centro de la espiral  $x^*$  como  $x^* = x_{i_g}(0)$ ,  $i_g = \arg \min f(x_i(0))$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, m$

### **Paso 2: Actualización $x_i$**

$$x_i(k + 1) = S_2(r, \theta)x_i(k) - (S_2(r, \theta) - I_2)x^*, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (16)$$

### Paso 3: Actualización $x^*$

$$x^* = x_{i_g}(k + 1), i_g = \arg \min f(x_i(k + 1)), i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (17)$$

### Paso 4: Verificación del Criterio de Parada

Si  $k = k_{max}$  se detendrá el algoritmo, terminando el proceso. De lo contrario  $k = k + 1$  y se regresa al **Paso 2**. [7]

#### 3.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CÓMPUTO Y PLATAFORMA MATLAB

Antes de realizar cualquier implementación es importante describir el equipo y la plataforma utilizada para realizar dichos cálculos y simulaciones. En la que se presenta a continuación se dan estas referencias. **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Características.

PROCESADOR	AMD E - 450 1.65GHz
MEMORIA RAM	4 [GB]
ALIMENTACIÓN	120[V] - 60[Hz]
SISTEMA OPERATIVO	Windows Seven - 64 bits
VERSIÓN MATLAB	Mathworks@ Matlab@ 7.0.4

#### 3.1.4 GRAFICAS DE ALGUNAS TRAYECTORIAS EN 2D

A continuación se dispone el algoritmo de la espiral en dos dimensiones en la plataforma de Matlab y se reproducen algunos de los comportamientos gráficos presentados por Tamura y Yasuda [7] en su investigación.

Con el propósito de evaluar el algoritmo, que se implementa en las ecuaciones anteriores, donde se describe el modelo discreto de la espiral de rotación, y para evidenciar los resultados en torno a las ecuaciones, se presentan diferentes gráficas de una trayectoria de espiral, para un total de (m) puntos, con el punto inicial (x1, x2) y punto para convergencia de coordenadas (x1', x2').

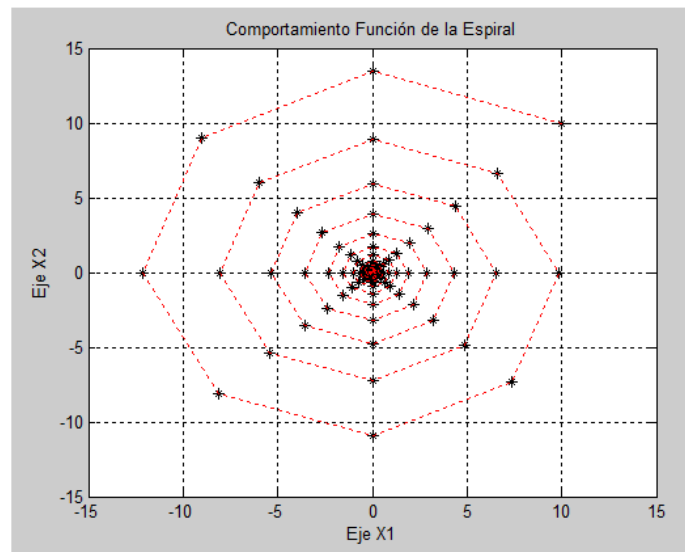
La siguiente **Tabla 2** presenta tres tipos de espirales las cuales tienen un punto inicial de (10,10) y convergerán a el punto (0,0).

**Tabla 2.** Parámetros para Ilustración.

Espirales	Razón de Convergencia	Angulo de Rotación
Caso (a)	$r=0.95$	$\theta= \pi/4$
Caso (b)	$r=0.90$	$\theta= \pi/4$
Caso (c)	$r= 0.95$	$\theta= \pi/2$

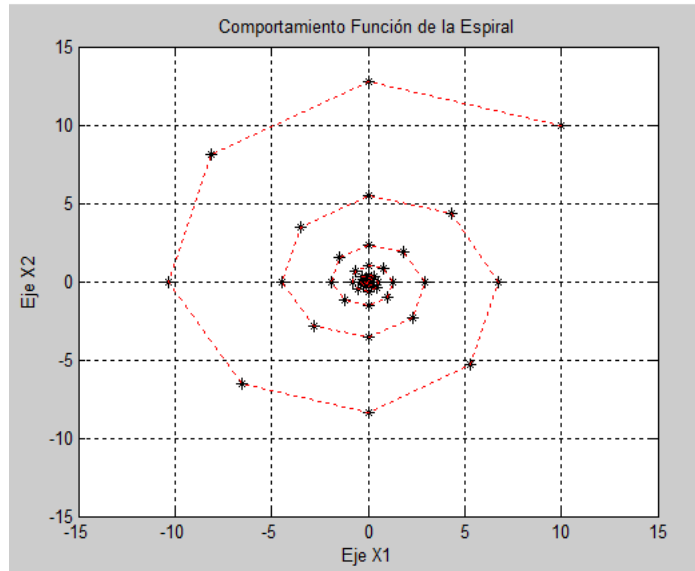
**Caso (a):** En la trayectoria número 1 se encuentra una espiral logarítmica con parámetros de referencia cuya principal característica es que diversifica bien como se observa en la **Figura 6**.

**Figura 6.** Espiral caso (a).



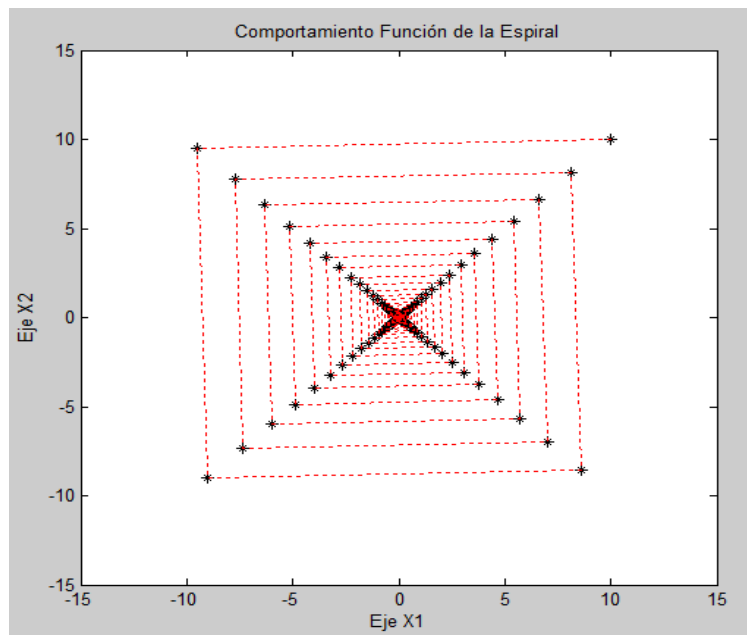
**Caso (b):** En la trayectoria número 2 se encuentra una espiral logarítmica con parámetros de referencia. En este caso, se nota lo importante de la escogencia del parámetro ( $r$ ) para obtener convergencia. Esto se puede observar en la **Figura 7**.

**Figura 7.** Espiral Caso (b).



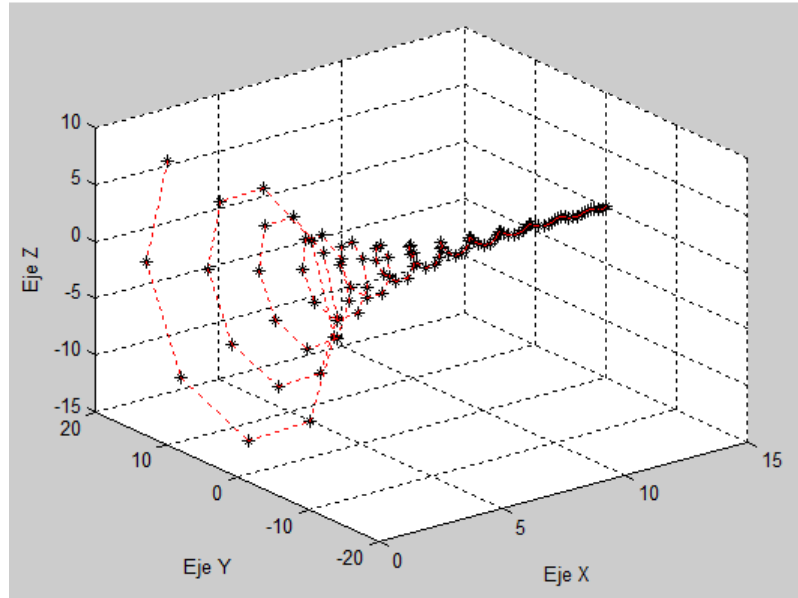
**Caso(c):** En la trayectoria número 3 se encuentra una espiral logarítmica con parámetros de referencia. En esta vemos el cambio de comportamiento drástico al variar tetha. Esto se puede observar en la **Figura 8**.

**Figura 8.** Espiral Caso (c).



En la **Figura 9** se puede observar de una manera más detallada el funcionamiento del algoritmo cuya convergencia es el origen.

**Figura 9.** Espiral 2D Vista en 3D.

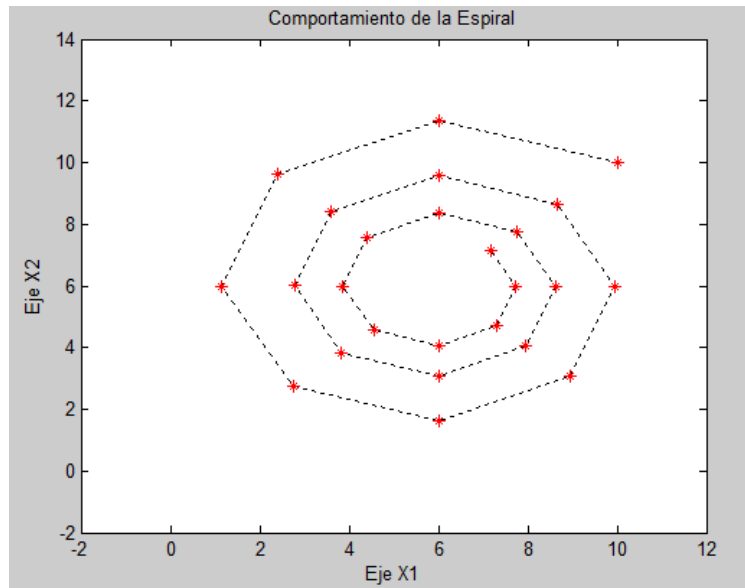


Hasta este punto se ha implementado el método de la espiral de forma exitosa teniendo como punto de convergencia el origen (0,0). Ahora se va a desplazar este punto para observar una convergencia del método a un punto ( $x'$ ), de esta manera se podrá seguir comprobando el funcionamiento de este método mediante la reproducción de los comportamientos del mismo bajo ciertas condiciones específicas ya comprobadas por Tamura y Yasuda [7].

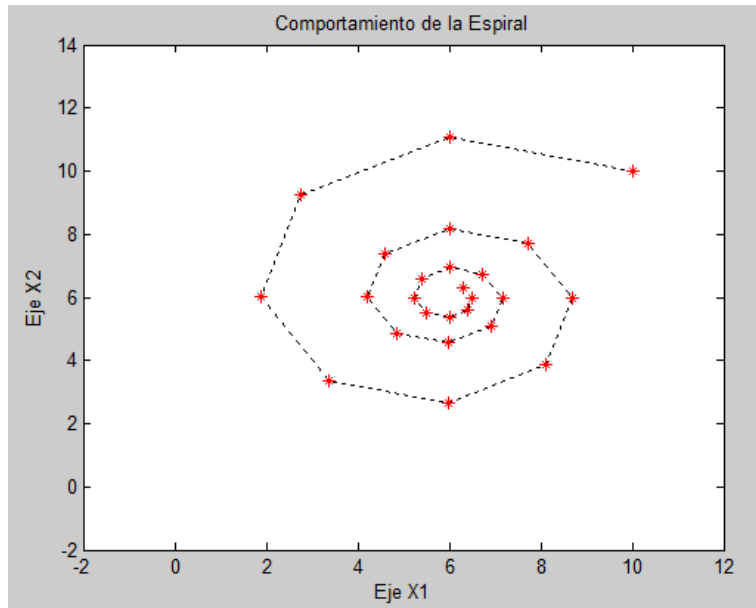
Para ver este comportamiento en la plataforma se deben hacer ciertas modificaciones al algoritmo anteriormente mencionado. Como referencia para esta espiral se tomaron los valores descritos en la **Tabla 2**. Para el caso(a) pero se hizo el siguiente cambio que consta de modificar el punto de convergencia a un nuevo punto ( $x'$ ), disminuyendo el valor de los puntos de búsqueda a ( $m=25$  pasos) como se observa en la **Figura 10**.

Este procedimiento también se aplica al caso (b) con el fin de terminar la comprobación del comportamiento de la espiral para 2D. Esto se observa en la **Figura 11**.

**Figura 10.** Espiral 2D Convergencia en  $(X')$ .  $m=25$ . Caso (a).



**Figura 11.** Espiral 2D Convergencia en  $(X')$ .  $m=25$ . Caso (b).



Después de disponer el algoritmo de la espiral en la plataforma de Matlab para 2D con convergencia en el origen y posteriormente en un punto ( $x'$ ) en forma correcta, se procedió a desarrollar el método de la espiral para ( $n$ ) dimensiones.

### 3.2 MÉTODO DE LA ESPIRAL PARA ( $n$ ) DIMENSIONES

De forma análoga, Tamura y Yasuda [7] presentan el esquema de un algoritmo generalizado para  $n$ -dimensiones, en el cual el carácter multidimensional se aprecia en primera instancia, en los superíndices y subíndices  $n$  de las ecuaciones. Para este modelo  $n$ -dimensional, se establece una matriz de rotación  $R_{i,j}^{(n)}$  de  $n$ -dimensiones, de modo que, en el caso de rotaciones en torno al origen:

$$x(k+1) = r * R^{(n)} * (\theta_{1,2}, \theta_{1,3}, \dots, \theta_{n-1,n}) * x(k) = S_n(r, \theta) * x(k) \quad (18)$$

En donde:

$$R^n(\theta_{1,2}, \theta_{1,3}, \dots, \theta_{n-1,n}) = \prod_{i=1}^{n-1} \left( \prod_{j=1}^i * R_{n-1, n+1-j}^{(n)} \right) \quad (19)$$

La metodología del algoritmo propuesta para  $n$ -dimensiones es:

#### Paso 0: Preparación

Seleccionar el número de puntos de búsqueda ( $m$ ), de modo que sea ( $m \geq 2$ ) luego, Establecemos el valor de ( $\theta$ ) de manera que ( $0 < \theta < 2\pi$ ), también se debe describir el valor de ( $r$ ) el cual debe estar dado entre ( $0 < r < 1$ ) y por último se debe poner un límite al número de iteraciones mediante una variable ( $k_{max}$ ).

#### Paso 1: Inicialización

Se establecen los puntos iniciales  $x_i(0) \in \mathbb{R}^2$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  que se encuentren dentro de la región factible del problema. Además se debe establecer el primer centro de la espiral  $x^*$  como  $x^* = x_{i_g}(0)$ ,  $i_g = \arg \min f(x_i(0))$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, m$

#### Paso 2: Actualización $x_i$

$$x_i(k+1) = S_2(r, \theta)x_i(k) - (S_2(r, \theta) - I_2)x^*, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (20)$$

### Paso 3: Actualización $x^*$

$$x^* = x_{i_g}(k + 1), \quad i_g = \arg \min f(x_i(k + 1)), \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (21)$$

### Paso 4: Verificación del Criterio de Parada

Si  $k = k_{max}$  se detendrá el algoritmo, terminando el proceso. De lo contrario  $k = k + 1$  y se regresa al **Paso 2**. [7]

Se puede observar que los pasos a seguir para el desarrollo del algoritmo en 2 dimensiones y el desarrollo del algoritmo en (n) dimensiones son iguales excepto por:

1. Los vectores  $x_i$  pertenecen a  $R^n$
2. La matriz identidad I pertenece a  $R^n$
3. La matriz de rotación será  $R^n(\theta_{1,2}, \theta_{1,3}, \dots, \theta_{n-1,n})$

Para la determinación de dicha matriz de rotación se debe tener en cuenta que la rotación solo se puede realizar en un plano, es decir, solo se puede realizar una rotación con respecto a dos dimensiones o dos eje ( $x_i - x_j$ ) que pertenecen a las (n) dimensiones del problema. Las demás dimensiones presentes se mantienen constantes.

Lo anterior es lo que se conoce como la rotación en el espacio n-dimensional, *Tamura y Yasuda* [7], proponen en su modelo de la espiral una rotación n-dimensional que permite rotar en todas las dimensiones mediante la combinación de todos los ejes de rotación como se verá en la siguiente ecuación,

$$x(k + 1) = r * R^n(\theta_{1,2}, \theta_{1,3}, \dots, \theta_{n-1,n}) * x(k) \quad (22)$$

Donde

$$R^n(\theta_{1,2}, \theta_{1,3}, \dots, \theta_{n-1,n}) = \prod_{i=1}^{n-1} \left( \prod_{j=1}^i R_{n-1, n+1-j}^n(\theta_{n-i, n+1-j}) \right) \quad (23)$$

Los parámetros como ángulo de rotación, razón de convergencia y número de iteraciones máximas se mantienen. Después de analizar el método la única variación sustancial será la modificación de la matriz de rotación como se ilustra en la ecuación (23) y esto permitirá que se rote en las 'n' dimensiones usando el método de la espiral modificado n-dimensional.

Para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo para (n) dimensiones se realizó la implementación del algoritmo de la espiral en el diseño de un absorbedor electromagnético de tres capas.

#### 4 ABSORBEDORES ELECTROMAGNÉTICOS

Es sabido que los materiales presentan características magnéticas y eléctricas que permiten la caracterización de estos. Estas características son la permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) las cuales se describen en las siguientes ecuaciones.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r'' \quad \text{donde} \quad \tan(\delta_e) = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (24)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j \mu_r'' \quad \text{donde} \quad \tan(\delta_m) = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (25)$$

Donde tenemos que:

$\epsilon_r'$  = Constante dieléctrica

$\mu_r'$  = Componente real de la permeabilidad magnética

$\delta_e$  = Es el ángulo de pérdidas eléctricas

$\delta_m$  = Es el ángulo de pérdidas magnéticas

En la mayoría de estos materiales, tanto la permeabilidad como la permitividad dependerán de la frecuencia de trabajo, por lo cual la menor variación de la misma puede cambiar significativamente las características del material.

La permeabilidad magnética, expresada en H/m, es una medida de la sensibilidad o capacidad del material para interactuar con un campo magnético; es decir, de magnetizarse. La permeabilidad absoluta de un material y relativa al espacio libre, están relacionadas de la siguiente manera.

$$\mu_r = 1 + x_m = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (26)$$

$\mu_r$ : Permeabilidad relativa (adimensional)

$x_m$ : Susceptibilidad magnética (adimensional)

$\mu_0$ : permeabilidad en el espacio libre =  $4\pi 10^{-7}$  (H/m)

Los materiales magnéticos se pueden clasificar de acuerdo con la permeabilidad en tres grupos:

**Diamagnético:**  $\mu_r \approx < 1$

**Paramagnético:**  $\mu_r \approx > 1$

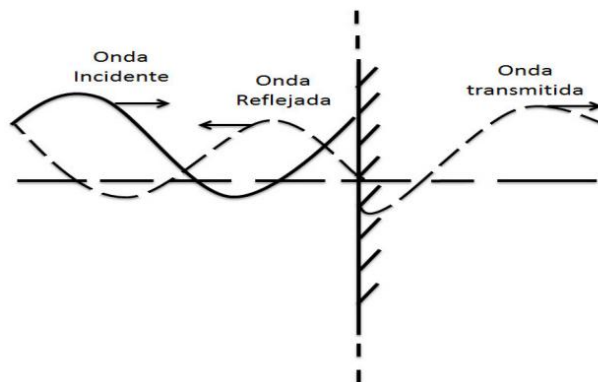
**Ferromagnético:**  $\mu_r \gg 1$

Por otro lado, 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

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

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. **Figura 12**

**Figura 12.** Ondas producidas al momento de incidir una onda perpendicularmente sobre una superficie plana.



**Fuente:** Tomado de ORTIZ GELVES, Rafael Armando; GARCÍA MORANTES, Edgar Sneyder. *Diseño de un absorbedor electromagnético multicapa mediante el método de la espiral*. Tesis de pregrado de Ingeniería Electrónica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013.

$$E_x(z) = E_j e^{-\gamma z} \left[ 1 + \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_j} \right] \quad (28)$$

$$H_y(z) = \frac{E_j e^{-\gamma z}}{\eta} \left[ 1 - \frac{E_r e^{2\gamma z}}{E_j} \right] \quad (29)$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu_r \epsilon_r} = \alpha + j\beta \quad (30)$$

Donde tenemos que:

$E_x(z)$ : es el campo Eléctrico

$H_y(z)$ : es el campo Magnético

$e^{\gamma z}$  = Es una Onda que viaja en dirección  $(-z)$  e incide sobre la carga

$e^{-\gamma z}$  = Es una Onda que viaja en dirección  $(+z)$ , que es reflejada

$\gamma$  = 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 31)

$$Z(z) = \frac{E_x(z)}{H_y(z)} = \eta \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)} \quad (31)$$

Despejando se puede concluir que es posible asociar el comportamiento de las ondas en una línea de transmisión con el de una onda incidente sobre cierto material, por lo cual para obtener el valor de la impedancia total de campo, se recurre a la ecuación de líneas de transmisión y obtenemos la ecuación generalizada para expresar  $Z_k$ .

$$Z_k = \begin{cases} \eta_k \frac{Z_{k+1} + \eta_k \tanh(\gamma_k t_k)}{\eta_k + Z_{k+1} \tanh(\gamma_k t_k)} & k < N \\ \eta_N \tanh(\gamma_N t_N) & k = N \end{cases} \quad (32)$$

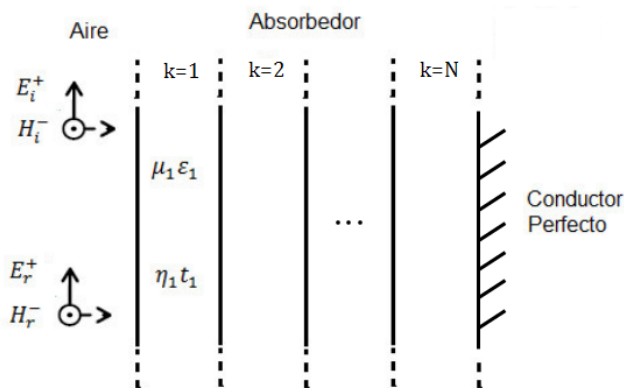
$(t_k)$  Proporciona información del grosor de la k-ésima capa del absorbedor electromagnético.

$(\eta_k)$  Proporciona información sobre la impedancia de la onda de la capa k-ésima

$(\gamma_k)$  Es la constante de propagación

Un gráfico que describe el esquema de un absorbedor multicapa es ver. **Figura 13**

**Figura 13.** Esquema general absorbedor de N capas.



**Fuente:** Tomado de SALAZAR FLÓREZ, Édgar Eduardo; MORA MORENO, Julián Eduardo. *Diseño de absorbedores electromagnéticos óptimos utilizando optimización por enjambre de partículas y análisis de intervalos*. Tesis de pregrado de Ingeniería Electrónica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011.

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,  $k=1, 2, 3, \dots, k=N$ , y la impedancia intrínseca ( $\eta_0$ ). La impedancia intrínseca es la impedancia del espacio libre y es aproximadamente  $\eta_0 = 377 [\Omega]$  todo esto en  $z=0$ . Por lo tanto la ecuación que describe el coeficiente de reflexión será:

$$R(f) = \frac{Z(f) - \eta_0}{Z(f) + \eta_0} \quad (33)$$

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

$$R(f) = \frac{Z_1 - \eta_0}{Z_1 + \eta_0} \quad (34)$$

De acuerdo con la ecuación de líneas de transmisión se obtiene la impedancia del campo total  $Z_1$  así:

$$Z_1 = \eta_1 \frac{Z_2 + j \eta_1 \tan(\gamma_1 t_1)}{\eta_1 + j Z_2 \tan(\gamma_1 t_1)} \quad (35)$$

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

$$Z_k = \begin{cases} \eta_k \frac{Z_{k+1} + j \eta_k \tan(\gamma_k t_k)}{\eta_k + j Z_{k+1} \tan(\gamma_k t_k)} & k < N \\ j \eta_N \tan(\gamma_N t_N) & k = N \end{cases} \quad (36)$$

El diseño del absorbedor está definido como un problema de minimización de la cantidad  $Fobj(1)$  (expresada en dB), dada por:

$$Fobj(1) = 20 \log(\max |R(f)|, f \in B) \quad (37)$$

Donde ( $B$ ) es el ancho de banda del diseño. Al mismo tiempo, los espesores dados en milímetros [mm] deben ser optimizados y se busca que el espesor total del absorbedor sea lo menos posible. Su función objetivo es,

$$Fobj(2) = \sum_{k=1}^N t_k \quad (38)$$

También la finalidad de este trabajo es la optimización del costo en el diseño de los absorbedores por ende su función objetivo será,

$$Fobj(3) = \sum_{j=1}^N \vartheta_j(\mathfrak{A}, \rho, t) \quad (39)$$

Donde  $\vartheta_j(\mathfrak{Z}, \rho, t)$  será una función que dependerá del precio ( $\mathfrak{Z}$ ), del tipo de material ( $\rho$ ) y del espesor ( $t$ )

Estas tres consideraciones de diseño se incorporan en la siguiente función objetivo global para el propósito de la optimización

$$Opt Fobj = 20 \log \left( \max |R(f)|, f \in B \right) + \sum_{k=1}^N t_k + \sum_{j=1}^N \vartheta_j(\mathfrak{Z}, \rho, t) \quad (40)$$

Matemáticamente, la función objetivo anterior busca optimizar el absorbedor electromagnético en un rango de frecuencia particular.

## 5 DISPOSICIÓN EN LA PLATAFORMA DE MATLAB DE LA FUNCIÓN OBJETIVO QUE CARACTERIZA EL ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO

En esta sección 6 se programa en la plataforma de Matlab la primera función objetivo (Ecuación 37) que caracteriza el comportamiento del absorbedor electromagnético y se comprobó el correcto funcionamiento.

### 5.1 BANCO DE MATERIALES

Para realizar el diseño de un absorbedor electromagnético multicapa es necesario tener el conocimiento de los tipos de materiales típicos en el uso de estos elementos. Esto se solucionó utilizando un banco de materiales que había sido propuestos por [22], [23]. Se puede observar en la **Tabla 3**.

Es importante resaltar que estos materiales son ficticios y que tratan de imitar características de materiales reales. Los materiales se encuentran agrupados en 5 subgrupos:

1. Materiales dieléctricos sin pérdidas.
2. Materiales magnéticos con pérdidas, en los que la permeabilidad tiene un modelo que es inversamente proporcional a la frecuencia y esta a su vez depende de los parámetros  $\alpha$  y  $b$  que son exponentes que varían según el material.
3. Materiales dieléctricos con pérdidas, en los que se observa que la permitividad tiene un modelo inversamente proporcional a la frecuencia y esta a su vez se encuentra elevada a los factores y que varían según el material.

4. Materiales magnéticos de tipo relajación, donde se observa un modelo para la permeabilidad un poco más complejo que el anterior, este modelo depende de los parámetros  $\mu_m$  y  $f_m$  que varían según el material.

**Tabla 3.** Parámetros materiales de prueba.

<i>Materiales dieléctricos sin pérdidas</i> ( $\mu' = 1, \mu'' = 0$ )				
1				$\varepsilon' = 10, \varepsilon'' = 0$
2				$\varepsilon' = 50, \varepsilon'' = 0$
<i>Materiales magnéticos con pérdidas</i> ( $\varepsilon' = 15, \varepsilon'' = 0$ )				
	$\mu'(1\text{GHz})$	$\alpha$	$\mu''(1\text{GHz})$	$b$
3	5	0.974	10	0.961
4	3	1	15	0.957
5	7	1	12	1
$\mu = \mu' - j\mu'' \quad \mu'(f) = \frac{\mu'(1\text{GHz})}{f^\alpha} \quad \mu''(f) = \frac{\mu''(1\text{GHz})}{f^b}$				
<i>Materiales Dieléctricos con pérdidas</i> ( $\mu' = 1, \mu'' = 0$ )				
	$\varepsilon'(1\text{GHz})$	$\alpha$	$\varepsilon''(1\text{GHz})$	$b$
6	5	0.861	8	0.569
7	8	0.778	10	0.682
8	10	0.778	6	0.861
$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad \varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon'(1\text{GHz})}{f^\alpha} \quad \varepsilon''(f) = \frac{\varepsilon''(1\text{GHz})}{f^b}$				
<i>Materiales magnéticos del tipo de relajación</i> ( $\varepsilon' = 15, \varepsilon'' = 0$ )				
	$\mu_m$		$f_m$	
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	
$\mu = \mu' - j\mu'' \quad \mu'(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2 + f_m^2} \quad \mu''(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2 + f_m^2}$				
Donde $f_m$ y $f$ están en [GHz]				

**Fuente:** Tomado de HEYONG, Liu; LING, Zhang; YOU GANG, Gao; YUANMAO, Shen y DAN, Shi. Electromagnetic Wave Absorber Optimal Design Based on Improved Particle Swarm Optimization, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto, 2009, pp. 797-800.

## 5.2 FUNCIÓN OBJETIVO

En esta parte del trabajo se implementó en la plataforma de Matlab la función objetivo número uno, que habla del coeficiente de reflexión. A fin de comprobar su funcionamiento de forma correcta, se dispuso la función objetivo en la plataforma Matlab y se analizó el comportamiento gráfico. Haciendo una comparación con los resultados obtenidos en los proyectos de investigación [2], [4], [12], los cuales debieron implementar también dicha función.

### 5.2.1 DISEÑO DE UN ABSORBEDOR DE 3 CAPAS

Dispusimos la función objetivo en la plataforma de Matlab para un rango de frecuencias entre (0,8 - 5,4) [GHz]. Se usaron los diseños de absorbedores electromagnéticos de 3 capas contenidas en la **Tabla 4**, estos diseños se usaron para ver el comportamiento gráfico y de esa manera comprobar la implementación de la función objetivo.

**Tabla 4.** Diseño Absorbedor 3 Capas.

Número de Capas	Diseño de 3 Capas					
	Primer Diseño		Segundo Diseño		Tercer Diseño	
	Material	Grosor[mm]	Material	Grosor[mm]	Material	Grosor[mm]
Capa 1	16	0.5824	16	0.6010	16	0.6870
Capa 2	5	1.7942	3	1.9990	12	1.8225
Capa 3	4	1.91153	4	1.6338	4	1.6800
Grosor Total [mm]	4.2919		4.2338		4.1895	
Max. Coef. Ref [dB]	-21.055		-21.465		-21.174	

**Fuente:** Tomado de SALAZAR FLÓREZ, Édgar Eduardo; MORA MORENO, Julián Eduardo. *Diseño de absorbedores electromagnéticos óptimos utilizando optimización por enjambre de partículas y análisis de intervalos*. Tesis de pregrado de Ingeniería Electrónica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011.

La función objetivo que describe el coeficiente de reflexión del absorbedor electromagnético es la siguiente:

$$Fobj(1) = 20 \log(\max |R(f)|, f \in B) \quad (41)$$

A continuación se presentan los cálculos para determinar la impedancia  $Z_1$ , punto donde la onda comienza a entrar en el absorbedor. Para comprobar los cálculos se usaron los valores del primer diseño contenidos en la **Tabla 4**.

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

$$R(f) = \frac{Z_1 - 377}{Z_1 + 377} \quad (42)$$

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

$$Z_k = \begin{cases} \eta_k \frac{Z_{k+1} + \eta_k \tanh(\gamma_k t_k)}{\eta_k + Z_{k+1} \tanh(\gamma_k t_k)} & k < N \\ \eta_N \tanh(\gamma_N t_N) & k = N \end{cases} \quad (43)$$

Los diseños de la **Tabla 4** fueron elaborados para un absorbedor de 3 capas por tanto el valor de ( $N=3$ ) y la ecuación que describe la impedancia será:

$$Z_3 = \eta_3 \tanh(\gamma_3 t_3) \quad (44)$$

$$Z_2 = \eta_2 \frac{Z_3 + \eta_2 \tanh(\gamma_2 t_2)}{\eta_2 + Z_3 \tanh(\gamma_2 t_2)} \quad (45)$$

$$Z_1 = \eta_1 \frac{Z_2 + \eta_1 \tanh(\gamma_1 t_1)}{\eta_1 + Z_2 \tanh(\gamma_1 t_1)} \quad (46)$$

Para hallar la impedancia  $Z_1$  que describe la impedancia total de campo primero debemos hallar los valores de las impedancias  $Z_2$  y  $Z_3$ , es importante ver de forma detallada cada parámetro para su resolución **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Parámetros.

$\gamma_k = j\omega\sqrt{\mu_r\epsilon_r}$ $k = 1,2,3$	$\mu_r = (\mu'_r - j\mu''_r)\mu_0$	$\epsilon_r = (\epsilon'_r - j\epsilon''_r)\epsilon_0$	$\omega = 2\pi f$	$\eta_k = \sqrt{\frac{\mu_{rk}}{\epsilon_{rk}}}$ $k = 1,2,3$
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [henrys/meter] permeabilidad en el espacio libre		$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ [farads/meter] permitividad en el espacio libre		
Coef Fobj = 20 log  R(f)		$R(f) = \frac{Z_1 - 377}{Z_1 + 377}$		

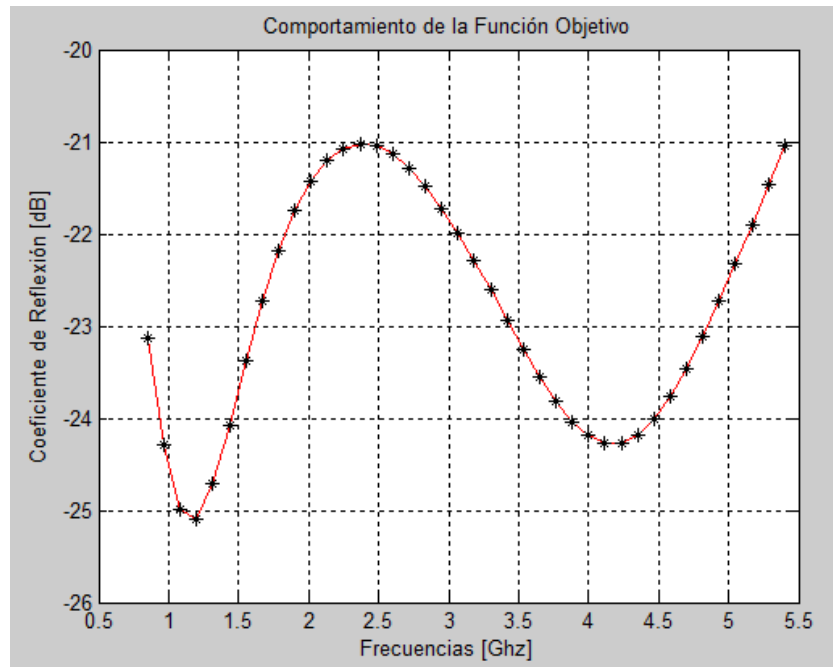
En la **Tabla 6** se pueden observar los valores obtenidos al evaluar las ecuaciones que describen el coeficiente del absorbedor electromagnético usando los parámetros del primer diseño vistos en la **Tabla 4**, comprobando que la disposición de la función objetivo en la plataforma Matlab se hizo de forma adecuada, puesto que los valores obtenidos para el coeficiente de reflexión son iguales a los que se presentan para ese diseño.

**Tabla 6.** Resultados de la Evaluación.

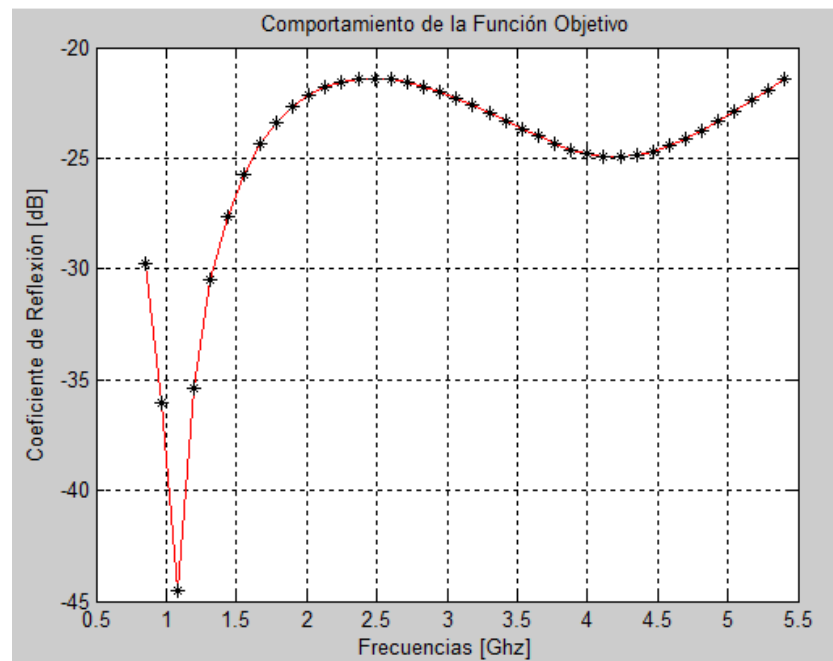
	Capa 3 ( $Z_3$ )	Capa 2 ( $Z_2$ )	Capa 1 ( $Z_1$ )
$\eta$	130.39 - 108.37i	135.29 - 77.708i	315.15 - 171.29i
$t$ [mm]	1.91153	1.7942	0.5824
$\gamma$	488.33 + 587.54i	350.16 + 609.64i	771.86 + 1420.1i
$Z$	184.63 - 89.83i	125.40 - 85.03i	351.70 - 59.68i
Material	4	5	16
$R(f)$	0.0887		
Coef Fobj [dB]	<b>-21.055</b>		

En la **Figura 14** se puede observar el comportamiento grafico del primer diseño del absorbedor electromagnético de 3 capas. En la **Figura 15** se puede observar el comportamiento del segundo diseño y en la **Figura 16** se puede observar el comportamiento del tercer diseño.

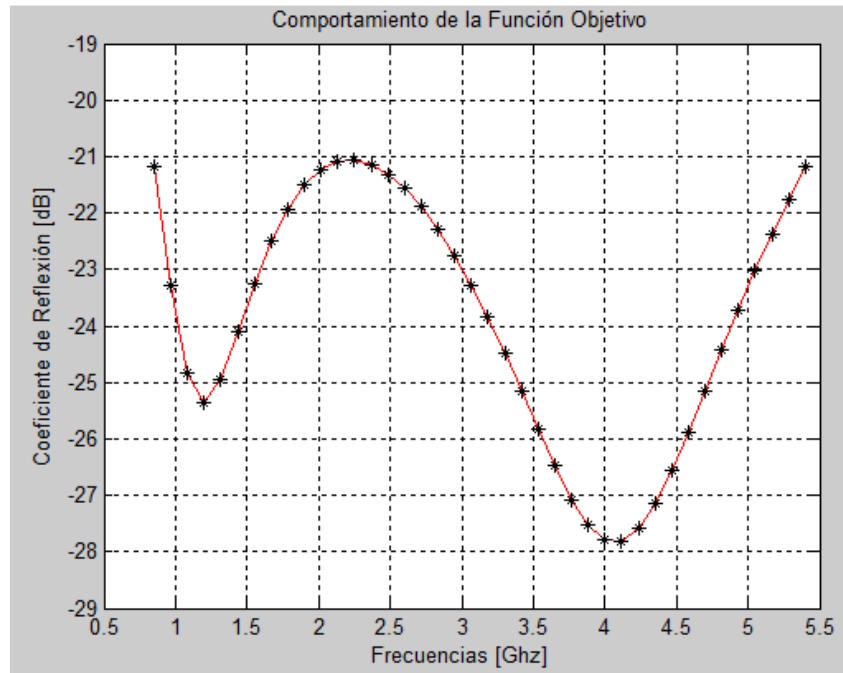
**Figura 14.** Primer diseño: Absorbedor electromagnético de 3 capas.



**Figura 15.** Segundo diseño: Absorbedor electromagnético de 3 capas.



**Figura 16.** Tercer diseño: Absorbedor electromagnético de 3 capas.



Como se pudo observar en las tres figuras anteriores, se logró reproducir los tres diseños de la **Tabla 4**, comprobando el correcto funcionamiento de la función objetivo.

En la siguiente sección, se describe la modificación del algoritmo de la espiral para una función multiobjetivo.

## 6 MODIFICACIÓN DEL ALGORITMO DE LA ESPIRAL

La **Figura 17** es un diagrama de bloques que describe como se aplicará la optimización multiobjetivo para el diseño de un absorbedor electromagnético multicapa de menor costo utilizando el algoritmo de la espiral. Este diagrama consta de 11 bloques y el funcionamiento de los bloques es el siguiente:

**Bloque 1:** Se establecen las condiciones iniciales definiendo el valor (n) del número de espirales a desarrollar, dado que se realizará la implementación para un absorbedor multicapa. También es importante recordar que el problema a abordar es de decisión multicriterio por tanto habrá más de una función objetivo y seleccionamos como técnica generadora del conjunto eficiente el método de las ponderaciones, luego se

deben ponderar las funciones objetivo decidiendo las prioridades en nuestra implementación.

**Bloque 2:** Inicialización del programa

**Bloque 3:** En este punto evaluamos las espirales elegidas con las condiciones iniciales en nuestra función objetivo global que ya está ponderada.

**Bloque 4:** Dependiendo las prioridades elegidas en las condiciones iniciales seleccionadas en el bloque 1, establecemos el *mínimo* ( $\max(R(f))$ ) al evaluar las (n) espirales en nuestra función objetivo global

**Bloque 5:** Después de seleccionar el mínimo procederemos a elegir cuál de las (n) espirales tuvo el mejor comportamiento acatando nuestras expectativas miramos la mejor posicionada en el espacio de soluciones, a esta espiral la denominamos ( $X'$ ) y las espirales que no tuvieron un funcionamiento tan buen se le denomina  $X(k)$ .

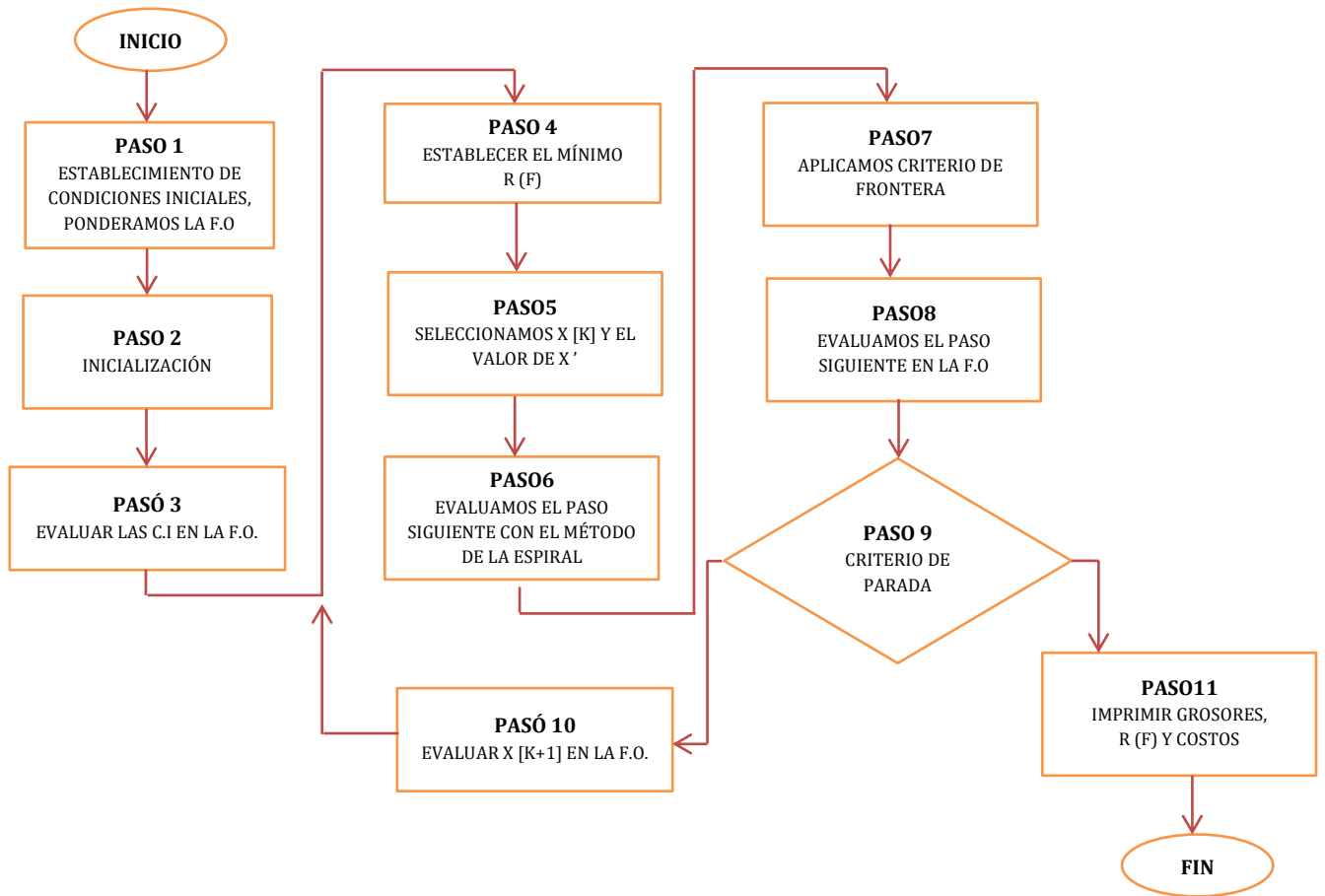
**Bloque 6:** Evaluamos con el método de la espiral de forma que la espiral que nombramos  $X'$  será el eje de rotación y las (n) espiral que llamamos  $X(k)$  serán las que se rotarán buscando una mejor posición en el espacio de soluciones.

**Bloque 7:** En este punto tendremos (n) espirales, la primera elegida como  $X'$  y las otras (n) espirales que corresponde al paso siguiente  $X(k+1)$  que será la nueva posición de  $X(k)$  después de ser evaluada en el algoritmo de la espiral. Ahora dado que esta rotación puede sacar mi espiral del espacio de soluciones debemos aplicar un criterio de frontera que permita devolver la espiral a dicho espacio.

**Bloque 8:** Evaluamos la espiral  $X(k+1)$  en nuestra función objetivo global.

**Bloque 9:** Evaluamos el criterio de parada, si se cumple con las condiciones dadas el programa nos enviará al bloque número 11 para detener el proceso e imprimir los resultados. Si las condiciones no son satisfechas por completo el programa nos envía al bloque número 10 que nos retornará al bloque 4 para continuar con nuestro proceso

**Figura 17.** Diagrama de bloques Método de la Espiral Implementado.



## 6.1 CRITERIOS DE FRONTERA

Las fronteras son los límites de operación del algoritmo. En ciertas ocasiones los elementos (espirales) se salen de los límites establecidos y es necesario devolverlos al espacio de soluciones válido. De la literatura revisada, se evidenció que existen 3 métodos que dan solución a este inconveniente.

- **Método I:** Si las coordenadas de la espiral se encuentran fuera del espacio de soluciones hacemos que estas retornen a él, dándoles de forma aleatoria un valor que este contenido en dicho espacio
- **Método II:** Si las coordenadas de la espiral se encuentran fuera del espacio de soluciones hacemos que estas retornen a él, ubicándoles en la frontera más cercana

- **Método III:** Si las coordenadas de la espiral se encuentran fuera del espacio de soluciones hacemos que estas retornen a él, reflejándolos en la frontera más cercana [2].

Sin embargo, en este trabajo de investigación solo se implementó el método I.

## 7 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE LA ESPIRAL EN EL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE TRES CAPAS

En esta sección, se comprobó el funcionamiento del algoritmo de la espiral en un absorbedor EM de tres capas con el fin de corroborar el correcto funcionamiento del método de la espiral implementado para las n-dimensiones. La función objetivo implementada es la ecuación 37, que describe el coeficiente de reflexión de un absorbedor electromagnético de tres capas.

Las siguientes figuras presentan el comportamiento del coeficiente de reflexión de un absorbedor de 3 capas para un número de 50 ejecuciones del algoritmo.

Los parámetros del Algoritmo fueron:

- $r = 0.99$
- $\theta = 75$
- Número de Espirales = 30
- Número de Frecuencias = 32
- Iter\_Max = 1000.

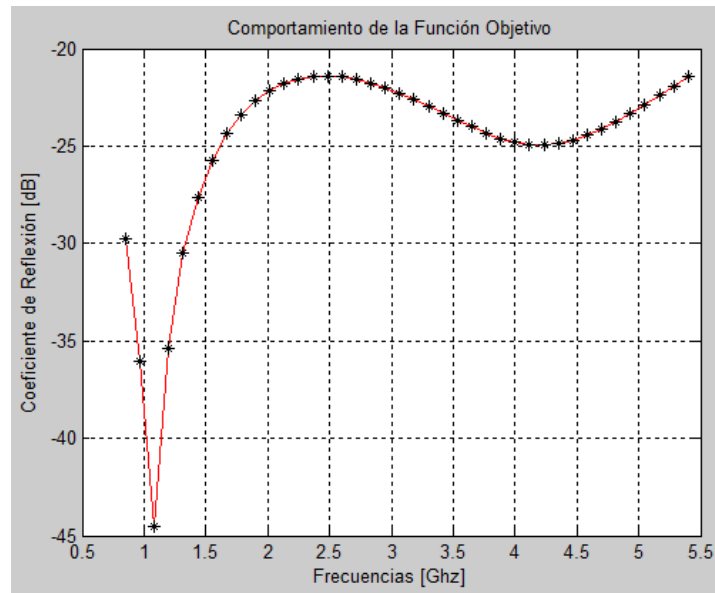
Los resultados se muestran en la **Tabla 7**

**Tabla 7.** Diseño de un Absorbedor Electromagnético de 3 Capas.

<b>Parámetros</b>	<b>Resultados</b>
<i>Materiales Cap1-Cap2-Cap3</i>	16 - 3 - 4
<i>Grosor Total [mm]</i>	4,123
<i>Mejor Coeficiente RF [dB]</i>	-21,2746

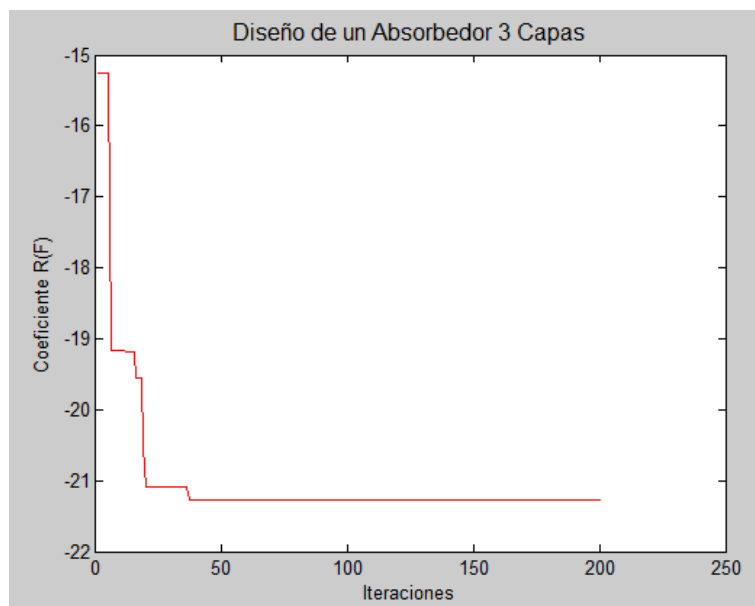
El comportamiento grafico del absorbedor se observa en la **Figura 18**. Donde, el eje X representa la banda de frecuencias que va desde (0.85 a 5.4 [GHz]), y el eje Y representa el coeficiente de reflexión.

**Figura 18.** Comportamiento del coeficiente de reflexión en el ancho de banda para el diseño de absorbedor de 3 capas.



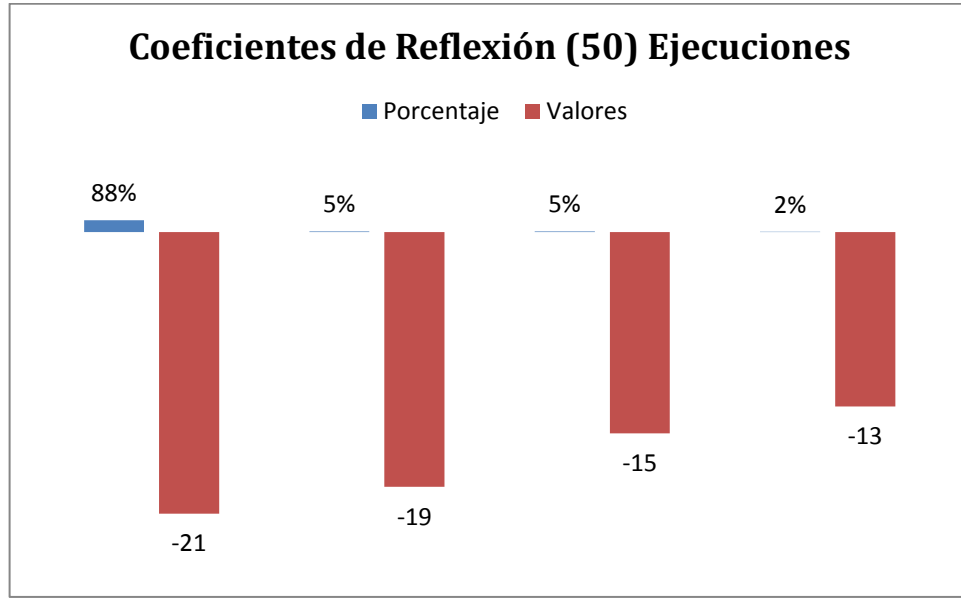
En la **Figura 19** se presenta el gráfico que describe la convergencia del algoritmo de la espiral para el anterior diseño.

**Figura 19.** Convergencia Diseño Absorbedor de 3 Capas.



Finalmente, se presenta un gráfico de barras en la **Figura 20**, que sintetiza en porcentaje los valores obtenidos para los coeficientes a lo largo de las 50 ejecuciones.

**Figura 20.** Coeficiente de Reflexión RF (50 Ejecuciones).



## **8 BANCO DE MATERIALES CON COSTOS**

Hasta el momento ya se tiene el algoritmo para la función multiobjetivo. Sin embargo, aún no se conocen los precios de los materiales que formarán parte del estudio. Por esa razón en esta sección se describirá el procedimiento usado para obtener dichos precios.

### **8.1 MATERIALES**

Lo que buscamos en este proyecto de investigación es implementar el algoritmo de optimización de la espiral de tal forma que permita dar solución a un problema de diseño de un absorbedor electromagnético multicapa de máxima capacidad de absorción de ondas electromagnéticas con el menor costo. En los ítems anteriores sentamos las bases necesarias para alcanzar este objetivo, primero haciendo nuestro el algoritmo de la espiral mediante su disposición en la plataforma Matlab, después comprobando su funcionamiento para n-dimensiones. Posteriormente modificamos el algoritmo y lo implementamos en la función objetivo que describe el funcionamiento del absorbedor electromagnético multicapa de forma exitosa, lo que nos acercó al objetivo final que es la implementación usando optimización multiobjetivo. Para alcanzar este objetivo se deben obtener los costos de los materiales lo cual complementará el desarrollo de esta optimización.

#### **8.1.1 MATERIALES AISLANTES O DIELECTRICOS**

Los buenos aislantes empleados deben reunir cualidades muy variadas, pues están sometidas a tensiones elevadas. Por otro lado, las pérdidas producen una gran cantidad de calor que generalmente se elimina a través del aislante el cual está sometido a temperaturas altas. Entre los principales dieléctricos podemos encontrar aislantes sólidos y líquidos. Entre los sólidos está el algodón, seda, papel impregnado en aceite, micafolium (para conductores y bobinas), presspan, micanitas, asbesto y telas laqueadas (para aislamiento de ranuras), madera y cerámicos (para masas), esmaltes e hilo de vidrio (para alambres) y barnices para impregnar en máquinas. En líquidos tienen importancia el aceite mineral para transformadores y los aceites sintéticos como el *PIRANOL* [25].

### **8.1.2 MATERIALES DIAMAGNÉTICOS**

Los materiales diamagnéticos presentan la particularidad de que los electrones al realizar su movimiento orbital producen un momento magnético neto que tiene el valor cero en ausencia de campo magnético externo alguno. El fenómeno del diamagnetismo se debe principalmente al movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo, y como es de suponer se presenta en todos los materiales, ahora bien este efecto es muy pequeño en la mayoría de los materiales y queda eclipsado por otros efectos más fuertes que se producen en los materiales, estos efectos serán los paramagnéticos y ferromagnéticos. Los materiales que tienen comportamiento diamagnético son el bismuto, cobre, plomo, plata y oro.

### **8.1.3 MATERIALES PARAMAGNÉTICOS**

En estos materiales los momentos magnéticos que se producen con el movimiento de los electrones, no se anulan del todo. Si exponemos estos materiales a un campo magnético externo que actúe sobre ellos, se observará que además de darse un efecto diamagnético débil, el campo externo actuante alinea los momentos moleculares que se producen en el mismo sentido, provocando un aumento de la inducción magnética. Así pues desde el punto de vista macroscópico lo que se aprecia es un aumento de imanación positiva, o lo que es igual una susceptibilidad magnética positiva. Algunos materiales paramagnéticos son el aluminio, magnesio, titanio y wolframio.

### **8.1.4 MATERIALES FERROMAGNÉTICOS**

La propiedad denominada ferromagnetismo depende de la temperatura y para cada material hay un valor denominado temperatura de Curie, por encima de la cual el material se hace paramagnético. Esto ocurre cuando el movimiento térmico es lo suficientemente grande para vencer las fuerzas de alineación. Este tipo de materiales ferromagnéticos presentan las propiedades más útiles desde el punto de vista del magnetismo. Tienen unas imanaciones bastante elevadas aunque se le apliquen campos magnéticos muy débiles. Los elementos ferromagnéticos que se encuentran en la naturaleza son solamente tres: el hierro, el níquel y el cobalto. Entre éstos naturalmente el de mayor uso es el hierro y sus aleaciones con el níquel y el cobalto así como con otros metales (Al, Cu, etc.).

Surgieron otros tipos de aleaciones que se dividen en materiales blandos que pierden fácilmente su magnetismo y materiales duros que pierden difícilmente su magnetismo y que se emplean especialmente en imanes permanentes. Entre éstos materiales destaca el Alnico que es una aleación de aluminio, níquel y cobalto. El permalloy y el numetal tienen una permeabilidad muy elevada. En diferentes equipos de

comunicaciones en cambio se requieren materiales de permeabilidad sumamente constante: se obtuvieron entonces las aleaciones permivar y conpernik.

### 8.1.5 LAS FERRITAS

Las ferritas son materiales no metálicos que responden a la fórmula general  $MeFe_2O_4$ , donde Me representa un metal bivalente. Con las ferritas puede hacerse polvo, que luego mediante procesos metalúrgicos se forman los núcleos de la forma requerida. Estos materiales se emplean para altas frecuencias porque tienen muy alta resistividad y por consiguiente sus pérdidas por corrientes parásitas son prácticamente nulas; también sus pérdidas por histéresis son sumamente bajas. Tienen por lo tanto gran aplicación en electrónica. Se fabrican bajo diferentes nombres, como por ejemplo: Ferroxcube, Ferramic, Ceramag, Crolite, etc.

### 8.1.6 LOS MATERIALES ANTIMAGNÉTICOS

Estos materiales en realidad poseen un ferromagnetismo muy pequeño ( $\mu_r=1.1-1.4$ ) por esa razón se les puede emplear como “Aislantes Magnéticos”, cuando se desea aislar un circuito magnético de otras piezas metálicas. Este es el caso por ejemplo de los pernos de amarre de los núcleos de los transformadores. Las aleaciones antimagnéticas empleadas en la práctica son dos:

El acero al manganeso (12% de manganeso) y el acero níquel. En ciertos casos se le añade un poco de cadmio (3.8%) para mejorar las características mecánicas del acero.

## 8.2 ASIGNACIÓN DE COSTOS

Dada la información anterior procedemos a modificar la **Tabla 3**, que es el banco de materiales de prueba [22], [23]. El método usado para la asignación de los costos se presenta a continuación. En la tabla siguiente podemos ver las pruebas que se realizaron con el fin de obtener el costo para los materiales buscando lograr como resultado la modificación de la **Tabla 3**. Las pruebas realizadas consistieron en implementar un algoritmo que nos permitiera generar la función objetivo que describe el comportamiento del coeficiente de reflexión en el diseño de absorbedores. Gracias a este algoritmo pudimos hacer pruebas para ver la conducta ante diferentes escenarios del coeficiente de reflexión en un absorbedor de tres capas, dado que es el absorbedor de interés en esta investigación. Los escenarios presentados para dichas pruebas fueron extremos ya que usamos el mismo material en cada una de las tres

capas con la modificación del parámetro grosor, de tal manera que lo llevamos al límite el cual equivale a 2[mm] por capa. Los resultados se presentan en la **Tabla 8**.

**Tabla 8.** Propiedades Absorbedor.

<i>MATERIALES</i>	<i>MIN [MAX ( RF ) ]</i>	<i>MEDIA [RF ]</i>	<i>MINIMO[RF]</i>
1, 1, 1	0	-3.375E-16	-1.9287E-15
2, 2, 2	0	-3.495E-16	-1.9287E-15
3, 3, 3	-5.4645	-7.3368	-13.6036
4, 4, 4	-5.6975	-7.0196	-9.4532
5, 5, 5	-6.2254	-7.6184	-10.5249
6, 6, 6	-0.0645	-1.7481	-4.3848
7, 7, 7	-0.0847	-2.2954	-5.9137
8, 8, 8	-0.0535	-1.4097	-3.8507
9, 9, 9	-6.8874	-8.4914	-9.9426
10, 10, 10	-5.5483	-7.1468	-9.7609
11, 11, 11	-6.9324	-8.9190	-10.6815
12, 12, 12	-4.0177	-7.2140	-28.6918
13, 13, 13	-6.2239	-9.32	-11.4732
14, 14, 14	-3.9742	-12.7220	-27.8555
15, 15, 15	-4.6391	-11.8390	-18.8355
16, 16, 16	-2.8091	-13.249	-23.78

Ahora tomamos la **Tabla 3** banco de materiales y la modificamos adicionando unos costos. Para hallar estos costos se tomaron como referencia las características de permitividad y permeabilidad de los materiales que conforman el banco de pruebas e hicimos una búsqueda de materiales con similares propiedades que junto con las pruebas elaboradas en la **Tabla 8** generaron una versión hipotética de los costos de los materiales consignados en la **Tabla 9**.

Para asignar los costos, se tomó como referencia un valor que se determina a partir de las dimensiones del material y es equivalente a una lámina del material [X], entre los elementos modelados en la tabla que van desde [1 al 16] de 1[cm<sup>2</sup>] de área y con un espesor de 0.1 [mm]. La tabla modificada es la **Tabla 9**.

Dada esta investigación se puede ver que la adición a dicho banco de materiales de los costos era muy importante ya que uno de los objetivos de este proyecto es generar el

diseño mediante la simulación en el software Matlab de un absorbedor electromagnético utilizando el algoritmo de optimización de la espiral para múltiples objetivos centrados en encontrar la mejor relación de equilibrio entre el costo, el grosor y el coeficiente de reflexión de dicho absorbedor.

**Tabla 9.** Parámetros Materiales de Prueba con Costo.

<i>Materiales dieléctricos sin pérdidas ( <math>\mu' = 1, \mu'' = 0</math> )</i>					<b>Costos[US\$] Material por [mm] de Grosor</b>
1	$\epsilon' = 10, \epsilon'' = 0$				1.1
2	$\epsilon' = 50, \epsilon'' = 0$				1.5
<i>Materiales magnéticos con pérdidas ( <math>\epsilon' = 15, \epsilon'' = 0</math> )</i>					
	$\mu'(1\text{GHz})$	$\alpha$	$\mu''(1\text{GHz})$	$b$	
3	5	0.974	10	0.961	6.9
4	3	1	15	0.957	7.8
5	7	1	12	1	8.6
$\mu = \mu' - j\mu'' \quad \mu'(f) = \frac{\mu'(1\text{GHz})}{f^\alpha} \quad \mu''(f) = \frac{\mu''(1\text{GHz})}{f^b}$					
<i>Materiales Dieléctricos con pérdidas ( <math>\mu' = 1, \mu'' = 0</math> )</i>					
	$\epsilon'(1\text{GHz})$	$\alpha$	$\epsilon''(1\text{GHz})$	$b$	
6	5	0.861	8	0.569	2.8
7	8	0.778	10	0.682	2.9
8	10	0.778	6	0.861	2.5
$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad \epsilon'(f) = \frac{\epsilon'(1\text{GHz})}{f^\alpha} \quad \epsilon''(f) = \frac{\epsilon''(1\text{GHz})}{f^b}$					
<i>Materiales magnéticos del tipo de relajación ( <math>\epsilon' = 15, \epsilon'' = 0</math> )</i>					
	$\mu_m$		$f_m$		
9	35		0.8		9.5
10	35		0.5		7.0
11	30		1.0		10
12	18		0.5		5.8
13	20		1.5		8.2
14	30		2.5		4.3
15	30		2.0		6.7
16	25		3.5		4.2

$\mu = \mu' - j\mu'' \qquad \mu'(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2 + f_m^2} \qquad \mu''(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2 + f_m^2}$ <p style="text-align: center;">Donde <math>f_m</math> y <math>f</math> están en [GHz]</p>	
--	--

**Fuente:** Adaptado de HEYONG, Liu; LING, Zhang; YOU GANG, Gao; YUANMAO, Shen y DAN, Shi. Electromagnetic Wave Absorber Optimal Design Based on Improved Particle Swarm Optimization, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto, 2009, pp. 797-800.

## 9 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO MULTIOBJETIVO

En esta sección se implementará el algoritmo de la espiral en la optimización multiobjetivo de un absorbedor electromagnético, de tres capas de tal manera que permitirá conocer los costos además del coeficiente y el grosor óptimos en dicho diseño. Para ello definimos en la sección anterior los costos de los materiales del banco de prueba, que permitirán realizar esa adición al proyecto. Por tanto ya no tenemos dos funciones como se veía en las secciones anteriores si no tres funciones objetivo las cuales debemos satisfacer a fin de conseguir nuestro meta.

### 9.1 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

Antes de iniciar esta sección tenemos implementado el absorbedor electromagnético usando el método de la espiral, en este punto nos enfocamos con mayor cuidado ya que se debe hacer la optimización multiobjetivo al diseño del absorbedor por tanto la modificación e implementación de estas características se harán en breve.

Al desarrollar la implementación surgieron varios inconvenientes los cuales fuimos abordando paso a paso, el primero aparece cuando encontramos tres funciones objetivo y necesitamos darles solución al mismo tiempo. La pregunta que surge es: ¿Cuál resolver primero? La respuesta se encontró gracias al método de ponderaciones el cual consiste en multiplicar por un peso no negativo a cada una de las funciones objetivo y luego unir las de tal manera que formemos una función objetivo global que contenga todas las funciones objetivo ya ponderadas, hay que tener presente que para aplicar el método es conveniente haber normalizado previamente los criterios. Ahora bien encontramos un segundo interrogante ¿cómo normalizar los criterios? En esta ocasión la solución aparece mediante el análisis de las ecuaciones las cuales permitieron dilucidar que la normalización se debía hacer utilizando los valores

extremos de cada criterio, iniciando por el coeficiente de reflexión en el que busca un valor ideal que estaría oscilando entre -40[dB], para el criterio del grosor el valor máximo permitido por capa es de 2[mm] por tanto tendremos que el valor que permitirá la normalización debe ser 6[mm], y finalmente los costos estos valores no pueden superar los 600 dólares por diseño de absorbedor por tanto este será el valor que permitirá normalizar los costos de los materiales.

$$Opt Fobj = \lambda_1 * \frac{20 \log(\max |Rf|, f \in B)}{-40[dB]} + \lambda_2 * \frac{\sum_{k=1}^N t_k}{6[mm]} + \lambda_3 * \frac{\sum_{j=1}^N \vartheta_j(\mathfrak{Z}, \rho, t)}{600} \quad (47)$$

Donde  $\lambda_1$  pondera el coeficiente de reflexión,  $\lambda_2$  pondera el espesor y finalmente  $\lambda_3$  el costo.

La comprobación del funcionamiento de este algoritmo de optimización multiobjetivo se hizo mediante la ejecución de 4 pruebas diferentes en las que variamos las ponderaciones de las funciones objetivo adicionando prioridades a cada una de las funciones objetivo en cada caso, además se hizo un análisis de la función usando Pareto.

Se desarrollaron cuatro casos en los que variamos los valores de  $\lambda$  adicionando ponderaciones de la siguiente forma.

**caso1:** los valores asignados fueron ( $\lambda_1 = 0.8$ ,  $\lambda_2 = 0.1$  y  $\lambda_3 = 0.1$ )

**caso2:** los valores asignados fueron ( $\lambda_1 = 0.1$ ,  $\lambda_2 = 0.8$  y  $\lambda_3 = 0.1$ )

**caso3:** los valores asignados fueron ( $\lambda_1 = 0.1$ ,  $\lambda_2 = 0.1$  y  $\lambda_3 = 0.8$ )

**caso4:** los valores asignados fueron ( $\lambda_1 = 0.333$ ,  $\lambda_2 = 0.333$  y  $\lambda_3 = 0.333$ )

Para observar el funcionamiento del algoritmo ante las disposiciones de las ponderaciones se seleccionaron unos parámetros para la conformación de las espirales y se realizaron 300 ejecuciones buscando un comportamiento más estable del proceso.

Los parámetros del Algoritmo fueron:

- $r = 0.99$
- $\theta = 75^\circ$

- Número de Espirales = 30
- Número de Frecuencias=32
- Iter\_Max =1000.

**Caso 1:** ponderaciones ( $\lambda_1 = 0.8$ ,  $\lambda_2 = 0.1$  y  $\lambda_3 = 0.1$ )

En este caso le dimos prioridad al coeficiente de reflexión, asignándole un valor de ponderación de 0.8. Lo que busca esta optimización es minimizar la función multiobjetivo global, pero en este caso el valor del coeficiente de reflexión será el más trascendente en este estudio.

**Caso 2:** ponderaciones ( $\lambda_1 = 0.1$ ,  $\lambda_2 = 0.8$  y  $\lambda_3 = 0.1$ )

El comportamiento que se desarrolla al realizar esta ponderación ira enfocado a la mejora de forma sustancial del espesor de las capas por encima de los demás objetivos.

**Caso 3:** ponderaciones ( $\lambda_1 = 0.1$ ,  $\lambda_2 = 0.1$  y  $\lambda_3 = 0.8$ )

El caso número tres desarrolla la función enfocado en mejorar el costo por encima del espesor y el valor de atenuación del coeficiente de reflexión.

**Caso 4:** ponderaciones ( $\lambda_1 = 0.333$ ,  $\lambda_2 = 0.333$  y  $\lambda_3 = 0.333$ )

El caso número cuatro se hace con el fin de ver el comportamiento cuando no se generan prioridades en ninguna de las funciones objetivo.

**Caso 5:** Análisis de Pareto

Este análisis no tiene en cuenta las ponderaciones, analiza profundamente todas las posibles soluciones y genera como resultado un valor que no se puede mejorar en ningún sentido.

Una vez explicados todos los casos, se procedió a realizar las pruebas y los resultados se presentan en la **Tabla 10**.

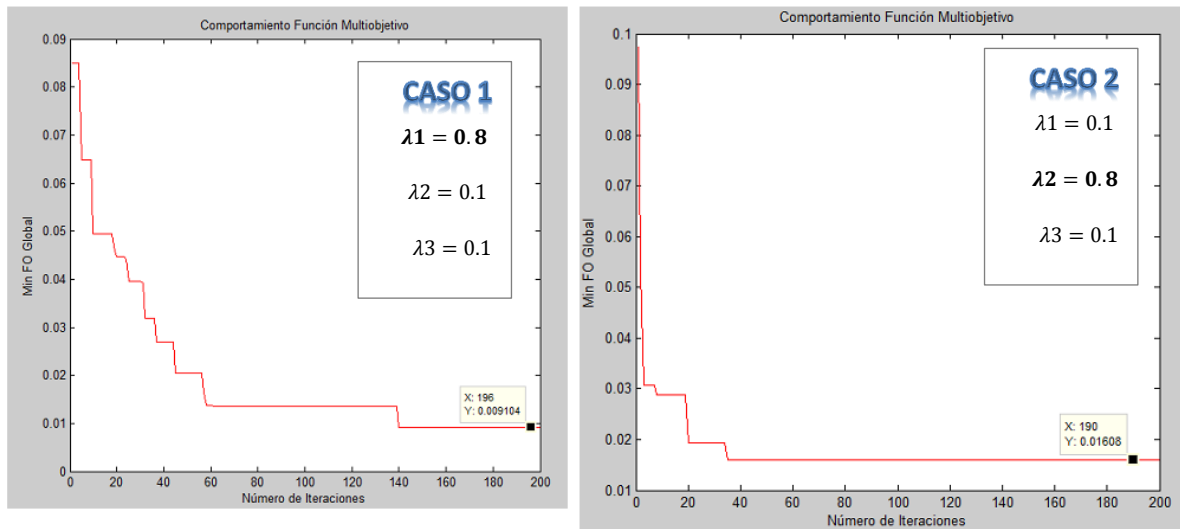
**Tabla 10.** . Análisis del Algoritmo.

PARÁMETROS	PRUEBA 1	Ponderaciones Multiobjetivo $\lambda_1$ $\lambda_2$ $\lambda_3$				PARETO
		CASO 1	CASO 2	CASO3	CASO 4	
Materiales Cap1-Cap2-Cap3	16 - 3 - 4	16 - 12 - 4	16 - 4 - 5	16 - 4 - 10	16 - 4 - 10	16-4-10
Grosor Total [mm]	4,123	4.05	2.635	2.772	2.581	2.513
Coficiente RF [dB]	-21,74	-19.87	-16.35	-16.68	-17.2	-16.14
Costo Total [US\$]	282,46	275	214.68	182.3414	178.77	176.079

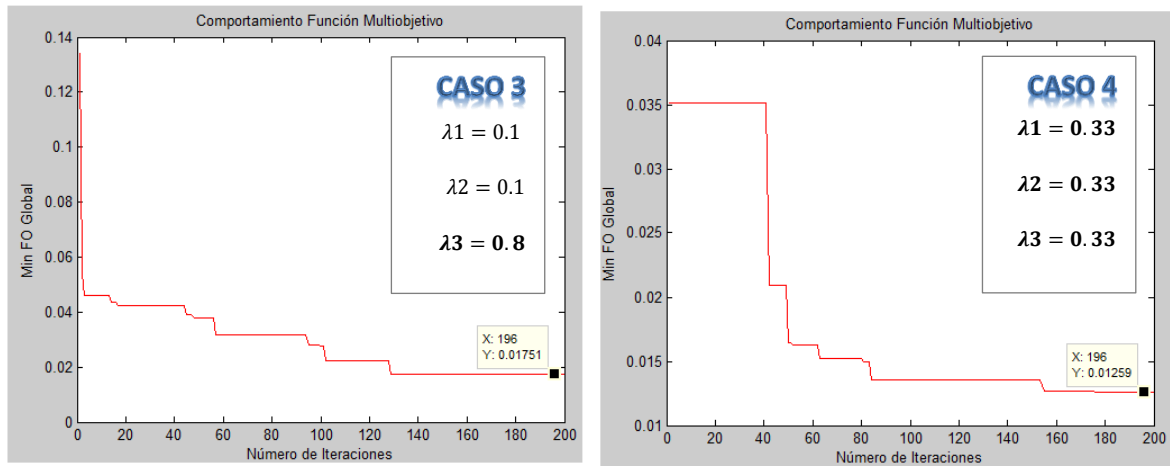
En el análisis de los casos 1 al 4 se obtuvieron los siguientes comportamientos gráficos que expresan la forma como convergió cada solución buscando el mínimo de la función multiobjetivo.

La **Figura 21** posee dos gráficos que muestran el comportamiento de los casos de estudio 1 y 2 donde priorizamos en la convergencia al coeficiente de reflexión y al espesor respectivamente. La **Figura 22** al igual que la anterior tiene dos gráficos y aquí se prioriza en la primer grafica al costo y finalmente en el grafico dos no se le da prioridad a ninguno, buscamos un equilibrio en todo sentido de la función multiobjetivo global.

**Figura 21.** Comportamiento min (FOglobal) casos 1 y 2 (300 Ejecuciones).



**Figura 22.** Comportamiento min (Foglobal) casos 3 y 4 (300 Ejecuciones).



El caso número uno es el primero al que se le dio solución, la prioridad era el coeficiente de reflexión y los resultados, por supuesto estuvieron enfocados a la obtención del mejor valor del coeficiente sacrificando el espesor y los costos finales de la elaboración de dicho diseño. Como resultado final se obtuvo un absorbedor de gran coeficiente de reflexión, que varía el grosor y el costo en sentido ascendente. Posteriormente, se realizaron las pruebas para generar el diseño de un absorbedor electromagnético multicapa que posea el menor espesor posible. Por tanto el coeficiente de reflexión y el costo tendrán una variación sustancial. Dado que al disminuir grosor el costo bajo pero la atenuación disminuyo de forma importante. Se continuó ahora analizando el caso tres que priorizaba los costos por encima de los otros dos objetivos y los resultados como se esperaba, fueron poco eficientes desde el punto de vista de atenuación. Seguidamente se realizaron las pruebas para diseñar un absorbedor que tuviese un equilibrio en todos los objetivos abordados, los resultados obtenidos son muy similares a los que se obtuvieron en el análisis de Pareto.

Finalmente abordamos el caso 5 donde se hizo un diseño de un absorbedor electromagnético utilizando el análisis de Pareto. Fue necesario recordar el concepto de optimalidad, que se sintetiza de la siguiente manera. *“Una alternativa es eficiente(o Pareto óptima) si toda alternativa que proporcione una mejora en un atributo produce un empeoramiento en al menos otro de los atributos.”*. Dado este concepto se procedió al análisis del diseño del absorbedor, fundamentado en los parámetros obtenidos al determinar el punto más importante de la frontera de Pareto que representa el diseño que mejor cumple el criterio de optimalidad. Este punto se denomina el codo de la

función. La determinación del codo de la función nos ofrecerá el punto de equilibrio entre las funciones objetivo analizadas. Ahora, las ecuaciones (48) a (50) se dan con el fin plasmar los resultados de la nube de espirales en un gráfico.

$$Costo = \sum_{i=1}^{300} m1(i) + m2(i) + m3(i) \quad (48)$$

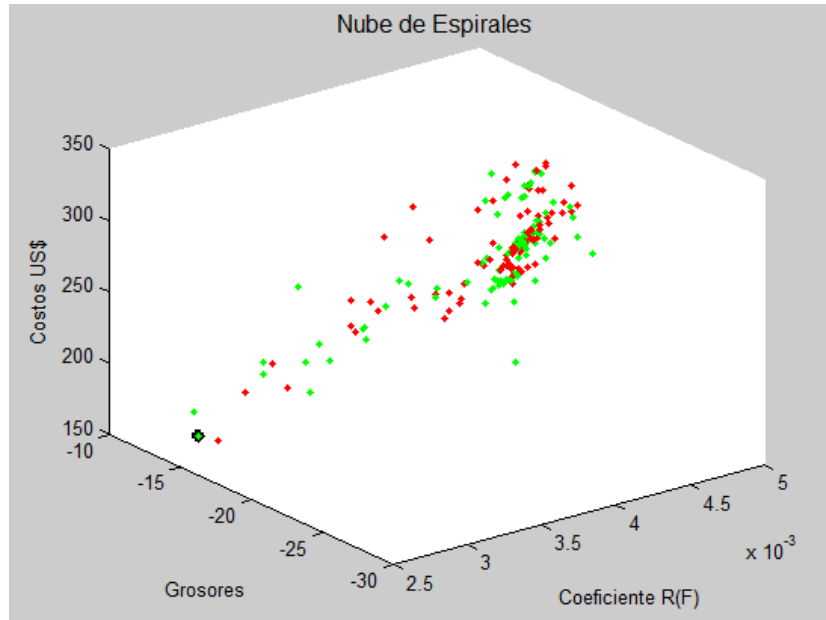
$$Grosor = \sum_{i=1}^{300} g1(i) + g2(i) + g3(i) \quad (49)$$

$$RF = \sum_{i=1}^{300} R1(i) \quad (50)$$

El codo de la función representa la ubicación óptima y por ende el límite de los atributos que no podrá ser mejorado sin afectar algún otro parámetro importante en el diseño de absorbedores.

El grafico **Figura 23** muestra las distancias o ubicaciones de los puntos R(f), costo y grosor al origen (0,0) de la nube de puntos que representan a las espirales. Hay un punto resaltado en negro el cual es el que posee la mejor ubicación posible del espacio de soluciones (es el límite que no podrá ser superado para mejorar una característica del diseño ya que al mismo tiempo se estará causando el deterioro de otra).

**Figura 23.** Análisis de Parámetros mediante Pareto



## 10 ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de los datos se consideró la **Tabla 10**. Los datos ubicados en la columna 2 (Prueba 1) fueron obtenidos con la implementación del método de la espiral en el diseño de un absorbedor electromagnético multicapa usando solo la función objetivo del coeficiente de reflexión. Notamos que la atenuación en este diseño será mayor, dado que desde el inicio solo importaba optimizar este objetivo. Pero al igual el grosor y el costo serán también máximos.

Los datos de la columna 6 (Caso 4) se dan cuando se busca obtener el mayor equilibrio entre los objetivos. Al igual que los datos presentados en la columna 7 donde hicimos el análisis de Pareto que se fundamentó en un concepto similar. Se puede observar que al mantener un equilibrio necesariamente todos los valores tenderán a disminuir buscando mejorar, hasta encontrar un punto que no permita mejorar ningún valor sin empeorar otro.

Los valores extremos en los objetivos se obtuvieron en el análisis del diseño de un absorbedor electromagnético mono-objetivo y en el análisis de Pareto. Siendo el análisis mono-objetivo quien presentó los valores más altos al realizar un diseño y el

análisis de Pareto quien presentó las mejores combinaciones y por ende los valores más bajos al diseñar.

Este proyecto de investigación estuvo enfocado, al estudio, diseño y desarrollo de una estrategia que permitiera realizar optimización multiobjetivo al diseño de un absorbedor electromagnético multicapa utilizando el algoritmo de la espiral. En este sentido los objetivos desarrollados previamente fueron una preparación para realizar este tipo de optimización. Ahora bien si analizamos los datos ubicados en las columnas 3, 4, 5 (Caso 1, 2, 3) notamos a primera vista que los valores obtenidos se encuentran en el rango establecido por los dos diseños, el superior dado por el diseño del absorbedor mono-objetivo y el inferior generado por el diseño de Pareto, lo cual nos da una buena señal, ya que confirmamos que la implementación del algoritmo en el análisis de optimización multiobjetivo se cumplió.

En síntesis, se encontró que es posible hallar diferentes soluciones, solo depende de cómo se ponderen los parámetros en la función multiobjetivo, ya sea si se prioriza el menor grosor, el menor costo o la máxima capacidad de absorción. Sin embargo, si se desea priorizar al máximo una característica en particular, dicha característica se deberá ponderar como 1 y las demás con cero, lo cual reduciría el estudio a un análisis monoobjetivo.

## 11 CONCLUSIONES

1. Se cumplieron satisfactoriamente todos los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación.
2. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que:
  - a. La implementación del método de la espiral se dio de forma adecuada ya que se reprodujeron los resultados obtenidos en [7], verificando su correcto funcionamiento.
  - b. Se comprobó el funcionamiento del algoritmo para (n) espirales mediante la implementación del absorbedor electromagnético multicapa para una función objetivo ya que se logró reproducir los resultados obtenidos por [2], [4] y [12]
  - c. Se obtuvieron 4 diseños de absorbedores EM multicapa y multiobjetivo que cumplieran con las especificaciones de menor costo y menor tamaño. Sin embargo, esto sacrificó el coeficiente de reflexión máximo que se podía obtener de una configuración de tres capas.
  - d. Se encontró una configuración de materiales, grosores y costos que cumplía con el criterio de optimalidad de Pareto

## 12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Digikey - Electronic (2005): "Absorbedores de EMI/RFI" [Documento de Internet Disponible en] <http://www.digikey.com/es/product-highlight/3/3m/emirfi-absorbers>
- [2] R. Ortiz and E. García, "Diseño de absorbedores electromagnéticos multicapa mediante el método de la espiral" Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [3] E. Michielssen, J.-M. Sajer, S. Ranjithan, and R. Mittra, "Genetic algorithm design of Pareto optimal broad band microwave absorbers," IEEE Transaction on Microwave Theory And Techniques, vol. 38, no. 3, pp. 518-525, 1996.
- [4] E. Salazar and E. Mora, "Diseño de absorbedores electromagnéticos óptimos utilizando optimización por enjambre de partículas y análisis de intervalos," Universidad Industrial de Santander, pp. 1-35, 2011.
- [5] Pierre, D. A. (1986), Optimization theory with applications, Dover
- [6] Nash, S. y Sofer, A. (1996), Linear and Nonlinear Programming, McGraw hill.
- [7] K. Tamura and K. Yasuda, "Spiral Optimization", IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, no. 1, pp. 1759-1764, 2011.
- [8] Lara López Adriana (2003): "Un Estudio de las Estrategias Evolutivas para Problemas Multiobjetivo", Instituto Politécnico Nacional México, pp. 1-10,20-23
- [9] Begoña Vitoriano (2007): "Teoría de la Decisión, Decisión con Incertidumbre, y Decisión Multicriterio y Teoría de juegos "Universidad Complutense Madrid, pp. 1-24
- [10] Klaus Mainzer (1996). *Symmetries of Nature: A Handbook for Philosophy of Nature and Science*. Walter de Gruyter. pp. 45, 199-200. ISBN 3110129906.
- [11] Sonja Surjanovic and Derek Bringham (2013): "Librería Virtual de Experimentos y simulaciones": Simon Fraser University. [Documento de Internet Disponible en] <http://www.sfu.ca/~ssurjano/griewank.html>

- [12] J. González and C. Bayona “Aplicación Del Método De Optimización Por Fuerza Central (CFO), Al Diseño De Un Absorbedor Electromagnético Óptimo”, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [13] Wolpert, D. H. y Macready, W. G. (1997), ‘No free lunch theorems for optimization’, IEEE Transactions on evolutionary computation 1(1), 67–82.
- [14] Jang, J., Sun, C. y Mizutan, E. (1996), Neuro-fuzzy and soft computing, Prentice Hall
- [15] Vesterstrom, J. y Thomsen, R. (2004), a comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems, in ‘Proceedings of congress of evolutionary computacion. Vol 2’, IEEE Press, NY, Portland, pp. 1980–1987
- [16] Himmelblau, D. (1972), applied nonlinear optimization, McGraw Hill.
- [17] de Castro, L. N. (2007), ‘Fundamentals of natural computing: an overview’, Physics of Life Reviews 4(1), 1–36
- [18] (Hong-Lin, L;1999; A hybrid AI optimization method appliedto industrial processes; Chemometrics and intelligent laboratory systems)
- [19] de Castro, L. N. y Timmis, J. I. (2003), ‘Artificial immune systems as a novel soft computing paradigm’, Soft Computing (7), 526–544.
- [20] Bejan, A. Entropy Generation Minimization. 1<sup>st</sup> ed. Boca Raton, FL: CRCPress, 1996
- [21] Hyoun, S. ycol.; 1999; Astochastic approachto global optimization of chemicalprocess; Computers & Chemical Engineering
- [22] M. J. Asi and N. I. Dib, “Design Of Multilayer Microwave Broadband Absorbers Using Central Force Optimization,” vol. 26, no. September, pp. 101-113, 2010.
- [23] H. Liu, L. Zhang, and Y. Gao, “Electromagnetic Wave Absorber Optimal Design Based on Improved Particle Swarm Optimization”, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto, pp. 797-800, 2009.

[24] Eddy Mesa Delgado, "Supernova: un algoritmo novedoso de optimización global" Universidad Nacional de Colombia, pp. 3-90, 2010.

[25] Dario Biella Bianchi, "Material de Maquinas Eléctricas", Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Peru, pp 1-30

## BIBLIOGRAFIA

GONZÁLEZ SANDOVAL, Jorge Enrique; BAYONA ACOSTA, Carlos José. *Aplicación Del Método De Optimización Por Fuerza Central (CFO), Al Diseño De Un Absorbedor Electromagnético Óptimo*. Tesis de pregrado de Ingeniería Electrónica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013.

HEYONG, Liu; LING, Zhang; YOU GANG, Gao; YUANMAO, Shen y DAN, Shi. *Electromagnetic Wave Absorber Optimal Design Based on Improved Particle Swarm Optimization*, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto, 2009, pp. 797-800.

ORTIZ GELVES, Rafael Armando; GARCÍA MORANTES, Edgar Sneyder. *Diseño de un absorbedor electromagnético multicapa mediante el método de la espiral*. Tesis de pregrado de Ingeniería Electrónica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013.

SALAZAR FLÓREZ, Édgar Eduardo; MORA MORENO, Julián Eduardo. *Diseño de absorbedores electromagnéticos óptimos utilizando optimización por enjambre de partículas y análisis de intervalos*. Tesis de pregrado de Ingeniería Electrónica. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011.

TAMURA, kenichi y YASUDA, keiichiro. *Spiral Optimization. A new multipoint search method*. En Systems, Man and Cybernetics (SMC). Octubre 2011, p 1.