ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO *SPIRAL MULTIPOINT OPTIMIZATION* CON APLICACIONES EN EL DISEÑO DE FILTROS Y ANTENAS IMPRESAS

GERSON GUILLERMO MOGOLLÓN SANABRIA

HERNANDO MIGUEL QUIROZ RAMÍREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2013

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO *SPIRAL MULTIPOINT OPTIMIZATION* CON APLICACIONES EN EL DISEÑO DE FILTROS Y ANTENAS IMPRESAS

GERSON GUILLERMO MOGOLLÓN SANABRIA

HERNANDO MIGUEL QUIROZ RAMÍREZ

Trabajo de grado para optar al título de

Ingeniero Electrónico

Director

PhD. ERNESTO AGUILERA BERMUDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2013

A nuestras Familias

AGRADECIMIENTOS

Primero y más importante a mi familia, Viviana Mogollón ha sido un fuerte motivo para seguir adelante, a mi madre que me enseño a siempre intentarlo de nuevo, y a mi papá, quizás la persona más noble que conozco, no fui un buen futbolista como algún día esperó, pero al menos me estoy graduando. A mi hermana, Xiomy, que ha sido mi compañera de vida. A doña Lola, por fin se hace grande el menor de sus hijos, y a la nonita Tulia, aunque no en cuerpo, estuvo ahí presente cuidando que todo saliera bien. En general a toda mi familia, nunca han dejado de creer en mí.

A una personita que se ha encargado de ponerle color y sabor a mi vida. La misma que se encarga de hacer que cada momento sea especial.

A nuestro director Ernesto por todo lo nos enseñó, a hacer las cosas bien hechas y en general a mi universidad, la UIS, a todos y cada uno de mis profesores, que han sido importantes para alcanzar este logro, saber lo poco que sé y crear en mí la necesidad aprender cada día más, Al profesor Efrén por toda la colaboración prestada.

A mi compañero, Nando, por las ganas puestas en terminar este trabajo, por haber estado ahí por tanto tiempo.

A mis amigos, Dieguito, Corredor, Rutto, Pamplona, Duván, Migue, El Negro, Sao, Roy, Dávila, Fabito y los que se me escapan, todos los que han estado ahí para dar una mano cuando ha hecho falta.

Gerson Mogollón

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por siempre estar a mi lado y apoyarme en cada paso de mi vida. A mis padres que a pesar de las dificultades hoy ven graduado su primogénito. Diego por ser mi compañero de batallas y estar ahí todos estos los años que compartimos. Silvana por ser mi personita consentida, por regalarme la dicha de ser tío de un niño tan maravilloso que llena de alegría mi existencia.

A Paty que me ha acompañado estos últimos años, compartiendo mis alegrías y tristezas, apoyándome siempre, sé que sin ella mi vida no sería tan especial.

A mi compañero, no hubiese podido escoger uno mejor para finalizar exitosamente esta travesía de ser ingeniero electrónico, gracias Gerson.

A nuestro director Ernesto por los consejos impartidos y su disposición para ayudar, Al profesor Efrén por toda la colaboración prestada.

A mis amigos y amigas, Rutto, Dávila, Corredor, Roy, El Negro, Fabio, Yuyi, Milena y todos aquellos que se me escapan, gracias por estar dispuestos a ayudar en los momentos difíciles.

Hernando Quiroz Ramírez

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 15
1. OBJETIVOS 18
1.1 OBJETIVO GENERAL 18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18
2. MARCO TEÓRICO 19
2.1 “Spiral Multipoint Optimization” 19
2.1.1 Conceptos Bases: Problema de optimización, Heurística. 19
2.1.2 Funcionamiento de “Spiral Multipoint Optimization” 21
2.1.3 Implementación del algoritmo “Spiral Multipoint Optimization” 24
2.2 Pruebas al algoritmo con funciones conocidas 26
2.2.1 Función de Schwefel: 26
2.2.2 Función de Rastrigin: 28
2.2.3 Función de Rosenbrock Valley: 29
2.2.4 Función de Griewank: 31
2.3 Antenas tipo parche 34
2.3.1 Generalidades 34
2.3.2 Modelo 37
2.3.3 Parámetros S 40
3. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE LA ANTENA 44
3.1 Cálculo de dimensiones 44
3.2 Simulaciones 46
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES 49
4.1 Parámetro S_{11} medido en el VNA 49
4.2 Prueba de transmisión y recepción 52
4.3 Comparación de resultados 53
5. CONCLUSIONES 55
RECOMENDACIONES 56
BIBLIOGRAFÍA 57

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Rotación sobre el plano $x1 - x2$ 21
Figura 2 Espiral de tipo diverso 24
Figura 3 Espiral de tipo intenso 24
Figura 4 Función de Schwefel 26
Figura 5 Trayectoria de respuesta del algoritmo 27
Figura 6 Función de Rastrigin 28
Figura 7 Trayectoria de respuesta del algoritmo 29
Figura 8 Función de Rosenbrock 30
Figura 9 Trayectoria de respuesta del algoritmo 31
Figura 10 Función de Griewangk 32
Figura 11 Trayectoria de respuesta del algoritmo 33
Figura 12 Antena de parche 35
Figura 13 Formas representativas de antenas de parche. 36
Figura 14 Longitud física y efectiva de una antena de parche. 37
Figura 15 Líneas de campo 38
Figura 16 Permitividad eléctrica efectiva. 38
Figura 17 Red de n puertos 40
Figura 18 Red de dos puertos 41
Figura 19 Filtro pasa bajas. 42
Figura 20 Acoplador de línea. 42
Figura 21 Parámetro S11 del filtro pasa bajas 43
Figura 22 Parámetros S del branch line coupler 43
Figura 23 Parámetro S_{11} simulado 46
Figura 24 S_{11} simulado antena 9 de Tabla 4. Longitud de línea de alimentación $\lambda/2$ 48
Figura 25 S_{11} simulado antena 9 de Tabla 4. Longitud de línea de alimentación λ 48
Figura 26 Conector SMA 49
Figura 27 Montaje antena con conector 50
Figura 28 Diagrama de conexión 50
Figura 29 ParámetroS_{11} antena 9 Tabla 4. Tamaño de la línea de alimentación $\lambda/2$ 51
Figura 30 Parámetro S_{11} antena 9 Tabla 4. Tamaño de la línea de alimentación λ 51
Figura 31 Canales Wi-Fi 2.4GHz (IEEE 802.11 WLAN) 52
Figura 32 Espectro medido 53
Figura 33 S_{11} medido y calculado antena 9 Tabla 4. Tamaño de la línea de alimentación $\lambda/2$ 54
Figura 34 S_{11} medido y calculado antena 9 Tabla 4.Tamaño de la línea de alimentación λ 54

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Algoritmo *Spiral Multipoint Optimization* 25
Tabla 2 Respuesta del algoritmo a funciones conocidas..... 34
Tabla 3 Algunas aplicaciones de antenas de parche..... 35
Tabla 4 Resultados del algoritmo..... 45
Tabla 5 Resultados de simulaciones 47

RESUMEN

TÍTULO: "ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO *SPIRAL MULTIPOINT OPTIMIZATION* CON APLICACIONES EN EL DISEÑO DE FILTROS Y ANTENAS IMPRESAS".[1]

AUTORES: Gerson Guillermo Mogollón Sanabria, Hernando Miguel Quiroz Ramírez.[2]

PALABRAS CLAVE:

Algoritmo de Optimización, "*Spiral Multipoint Optimization",* Antena tipo parche.

CONTENIDO:

En el siguiente trabajo de grado se aborda el estudio y la implementación del algoritmo "*Spiral Multipoint Optimization"*, método de tipo metaheurístico de búsqueda local, revisión de conceptos previos, verificación de su desempeño por medio de funciones reportadas en la literatura y su uso alternativo en la solución de problemas de minimización, específicamente en el cálculo de las dimensiones del elemento de radiación de una antena rectangular tipo parche sintonizada en una frecuencia de 2.45GHz. El elemento de radiación, también llamado parche, es descrito por un modelo encontrado en la literatura que relaciona su geometría con la frecuencia de resonancia y es solucionado por medio del algoritmo, el cual arrojará diferentes dimensiones apropiadas para el parche. Por medio de un simulador numérico se realiza la selección de los diseños más acertados para proceder a la construcción de la antena sobre un sustrato de fibra de vidrio FR4 de manera similar a un circuito impreso. Adicionalmente se efectúan mediciones en el analizador vectorial y se comparan contra las simulaciones. Por último se presenta una sencilla prueba de trasmisión y recepción para verificar la funcionalidad de los prototipos en la banda Wi-Fi usando el analizador de redes en el modo analizador de espectro.

[1] Trabajo de Grado.

[2] Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Dr. Ernesto Aguilera Bermúdez.

ABSTRACT

TITLE: "STUDY AND IMPLEMENTATION OF *SPIRAL MULTIPOINT OPTIMIZATION* WITH APLICATION IN THE FILTERS AND PRINTED ANTENNAS DESIGN".[3]

AUTHORS: Gerson Guillermo Mogollón Sanabria, Hernando Miguel Quiroz Ramírez.[4]

KEY WORDS:

Optimisation, Heuristic, Metaheuristic, "*Spiral Multipoint Optimization",* Microstrip Patch Antenna, Vector Analyzer.

DESCRIPTION:

The next graduate work addresses the study and implementation of the "Spiral Multipoint Optimization" algorithm, previous concepts, performance verification across known functions and its alternative use in solving minimization problems, specifically in the calculation of the dimensions of a rectangular, micro-strip, patch antenna tuned to a frequency of 2.45GHz. The radiation element is described by a model found in literature and solved using the algorithm, which will yield different appropriate dimensions for the patch. Through a numeric simulator selection, the most accurate values are generated to proceed with the construction of the antenna on a substrate of fiber glass. Lastly, measurements are made in the Vector Analyzer and these are compared against the simulations.

[3] Graduate Work.

[4] Faculty of Physic Mechanical Engineering. School of electric, electronic and telecomunications. Project Director: Phd. Ernesto Aguilera Bermúdez.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los recursos disponibles siempre ha representado una prioridad para el hombre. Particularmente, durante la segunda guerra mundial la necesidad de gestionar los insumos de forma eficiente hizo indispensable la creación de grupos interdisciplinares para resolver problemas de competencia militar. A partir de estas necesidades toma más relevancia el concepto de optimizar, es decir, hacer la mejor elección con respecto a uno o más criterios de un conjunto de elementos disponibles, que en la práctica se traduzcan en tiempos de producción más cortos, menores costos, ganancias máximas, entre otros.

En un entorno real se pueden encontrar infinidad de problemas de optimización, desde geométricos, económicos, organizacionales hasta los más actuales en ingeniería. Uno de los problemas más comunes en electrónica se presenta en la selección del tamaño de los dispositivos en el diseño de circuitos; en éste se deben elegir las dimensiones apropiadas para lograr el mejor aprovechamiento de las materias primas, las cuales deben cumplir también con los requisitos de diseño que usen de manera más eficiente la energía[1].

Como alternativa de solución a problemas de optimización en los cuales los métodos exactos no son efectivos o su aplicación es computacionalmente inviable aparecen los métodos heurísticos que proporcionan una buena solución, no necesariamente exacta y pueden hacerlo en un tiempo razonable. Más allá de los mecanismos heurísticos aparecen los metaheurísticos, éstos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos [2]. A su vez, dentro de los metaheurísticos se encuentran los métodos de búsqueda local, los cuales consideran inicialmente una solución para el problema y la mejoran progresivamente, dentro de este grupo aparece el algoritmo "*Spiral Multipoint Optimization*" [3]. Su estrategia de búsqueda se desarrolla siguiendo una trayectoria espiral hasta llegar a su centro, que corresponde a la solución.

Por otra parte, la comunicación siempre ha jugado un papel fundamental en el progreso del ser humano, desde las técnicas más primitivas hasta las

comunicaciones satelitales de hoy día; el grupo de investigación RADIOGIS (grupo de investigación de la Universidad Industrial De Santander) plantea como aplicación en este campo de interés el diseño, la simulación y la implementación de una antena rectangular tipo parche, cuyo coeficiente de reflexión, también llamado parámetro s_{11}, muestre una frecuencia de resonancia en 2.45GHz mediante el algoritmo de optimización "*Spiral Multipoint Optimization*". La banda de frecuencia alrededor de 2.4GHz toma importancia ya que es usada en teléfonos inalámbricos, telefonía celular, Wi-Fi entre otros. Al igual que en [4] y en [5], donde se encuentran trabajos afines en los que se usan diferentes algoritmos de optimización, en el presente informe se plantea la comparación entre la simulación y los resultados experimentales del parámetro s_{11} en el rango de frecuencia de 1.95GHz hasta 2.95GHz.

Para la construcción de una antena se inicia con la etapa de diseño, en la cual haciendo uso del algoritmo de optimización son calculadas las dimensiones del elemento de radiación para que resuene en la frecuencia deseada. Una vez obtenidos estos resultados son simulados para verificar la validez del diseño y así seleccionar los parches con mejores características para proceder a su implementación.

Como resultado final del proyecto se presenta un código sobre la plataforma MATLAB™ construido mediante comandos elementales del software, principalmente operaciones básicas, ciclos y condicionales al que se le deben ingresar los siguientes parámetros iniciales: ángulo de rotación θ, tasa de convergencia r, número de iteraciones máximas k_{max}, error máximo permisible, un vector que contiene puntos iniciales que limitan la región de búsqueda y deben pertenecer a una región factible de soluciones y la función a optimizar; el código regresa un conjunto de valores que limitan una región pequeña (definida por el valor del error de salida) dentro de la cual se encuentra el valor mínimo de la función[3]. También se presenta un prototipo de antena rectangular tipo parche sobre un sustrato de fibra de vidrio FR4, la cual, mediante el análisis de sus simulaciones, verificaciones teóricas y experimentales, presenta una frecuencia de resonancia en 2.45GHz. Adicionalmente se realiza una prueba sencilla de transmisión-recepción para comprobar la funcionalidad de la antena en la banda de Wi-Fi.

El siguiente trabajo se encuentra distribuido de la siguiente manera: En el capítulo 1 se definen puntualmente los objetivos de acuerdo con el plan de proyecto. En el capítulo 2 se encuentra la implementación del algoritmo sobre la plataforma MATLAB™, se evalúa su desempeño por medio de funciones conocidas en la literatura y se exponen aspectos teóricos acerca de antenas tipo parche. En el capítulo 3 se exponen los criterios usados para el cálculo de las dimensiones del elemento de radiación y la selección de la antena que mejor se ajusta a los requerimientos mediante simulaciones. En el capítulo 4 se muestra como fue realizada la medición de las antenas con el analizador de redes, la comparación de resultados medidos y simulados, adicionalmente es presentada una prueba de transmisión y recepción en la banda de Wi-Fi. En el capítulo 5 son expuestas las conclusiones del trabajo. Finalmente, se presentan las observaciones y recomendaciones para trabajos futuros.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar y sintonizar una antena tipo parche a una frecuencia central de 2.45 GHz mediante la utilización de un algoritmo de optimización: Spiral Multipoint Optimization.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

1. Implementar el algoritmo Spiral Multipoint Optimization en MATLAB™.

2. Verificar el funcionamiento del algoritmo comparando su respuesta con algunos resultados reportados en la literatura científica o con funciones objetivo explicitas cuyos valores sean conocidos.

3. Encontrar las dimensiones óptimas de una antena tipo parche rectangular -usando el algoritmo Spiral Multipoint Optimization- que cumpla la condición de sintonización a una frecuencia central de 2.45GHz necesaria para obtener la mejor absorción.

4. Verificación experimental del funcionamiento de la antena a través de las mediciones tomadas por medio del analizador de redes vectoriales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 “Spiral Multipoint Optimization”

2.1.1 Conceptos Bases: Problema de optimización, Heurística.

Un problema de optimización matemáticamente se define como [1]:

$$mín_{x\in R^n}\, f_0(x)\,,\ \text{sujeto a}\ f_i(x) \le b_i\ ; i = 1, \dots, m.$$

Donde el vector $x = (x_1, \dots, x_n)$ es la variable de optimización del problema, la función $f_0: R^n \to R$ es la función objetivo, las funciones $f_i: R^n \to R, i = 1, \dots, m$ son las funciones de restricción y las constantes $b_1, \dots, b_m$ son los límites o cotas de las restricciones.

Un vector x^* es llamado óptimo, o una solución del problema de optimización, si éste produce el valor más pequeño en la función objetivo y pertenece al conjunto de vectores z que satisface las restricciones: para cualquier z tal que $f_1(z) \le b_1, \dots, f_m(z) \le b_m$, se tiene que $f_0(z) \ge f_0(x^*)$.

Un problema de optimización consiste en hacer la mejor elección posible de un vector en R_n que se encuentran dentro de una región factible. La variable x representa la opción escogida, $f_i(x) \le b_i$ representa la condición que limita las posibles opciones, y el valor efectivo de $f_0(x)$ representa el costo o la utilidad que conlleva la elección de x. Una solución óptima es aquella que tiene un costo mínimo, o una utilidad máxima entre todas las posibles opciones. Este tipo de problemas se denominan lineales si la función objetivo y las funciones de restricción son lineales en las variables de optimización. Si el problema de optimización es no lineal, a éste se le denomina problema de programación no lineal[1].

Uno de los problemas más comunes en electrónica consiste en la selección del tamaño de los dispositivos en el diseño de circuitos. Aquí se deben elegir las dimensiones apropiadas para lograr el mejor aprovechamiento de materias primas. Las variables a optimizar representan: los anchos y longitudes de éstos. Las restricciones representan: los tamaños de los elementos impuestos por el proceso de fabricación, los requisitos de tiempo que aseguran que el circuito puede funcionar de forma fiable a una velocidad especificada, y un límite en el área total del circuito. El problema de optimización consiste en encontrar los tamaños de los

dispositivos que cumplan con los requisitos de diseño (fabricación, tiempo y área) que usen de manera más eficiente la energía[1].

A algunos problemas de optimización se les puede encontrar solución de una manera relativamente sencilla; sin embargo, muchos otros resultan difíciles de resolver. La gran mayoría de los que se encuentran en la práctica están dentro del segundo grupo. "Se puede definir un problema de optimización difícil, como aquel para el cual no se garantiza encontrar la mejor solución posible en un tiempo razonable"[6]. A partir de la gran cantidad de problemas de optimización difíciles que deben ser resueltos, aparece la necesidad de desarrollar nuevos procedimientos que encuentren soluciones buenas, aunque no necesariamente óptimas, donde la rapidez del proceso cobre igual importancia que la solución obtenida. Éste tipo de métodos se denominan heurísticos. Estos procedimientos definen una técnica práctica para resolver, aprender y descubrir a partir de un problema con un resultado no necesariamente óptimo a través de la experiencia. El algoritmo usado en el presente trabajo se clasifica dentro de ésta familia[6].

Además de lo anteriormente expuesto, se opta por el uso de los métodos heurísticos cuando no se conoce ningún método exacto que pueda solucionar el problema, o aunque éste exista, su uso es computacionalmente costoso. Un método heurístico es más flexible que un método exacto, permitiendo la incorporación de condiciones de difícil modelización[6].

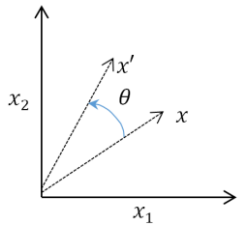
El algoritmo usado se encuentra dentro del subgrupo de los metaheurísticos, tal como indica el prefijo "meta" van más allá de lo heurístico y aparecen cuando éstos no son efectivos. Según [7] "*éstos son métodos de solución que orientan una interacción entre procedimientos de mejora local y estrategias de alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de óptimos locales y realizar una búsqueda robusta en un espacio de soluciones".* Los algoritmos metaheurísticos se clasifican en varios tipos según su manera de trabajo. *"Spiral Multipoint Optimization"* se encuentra dentro de los métodos de búsqueda local. Éstos suponen una solución posible del problema y la mejoran progresivamente, para cada iteración se realiza un movimiento de una solución a otra con mejor valor; el método finaliza cuando, para una solución, no existe ninguna solución posible que la mejore[6] .

2.1.2 Funcionamiento de “Spiral Multipoint Optimization”

A continuación se describe el funcionamiento del algoritmo presentado en *Spiral Optimization –A New Multipoint Search Method*–[8],

Inicialmente se define un punto *x* y un ángulo θ de rotación, este último es la separación en grados (hacia la izquierda) desde el punto *x* hasta el punto *x*’ como se muestra en la Figura 1.

Figura 1 Rotación sobre el plano $x_1 - x_2$



Adaptado de: [8]

Se puede entonces expresar la coordenada a la que rota el punto x como:

$$x' = R(\theta) * x \tag{1}$$

Donde $R(\theta)$ se define como matriz de rotación, llevando la coordenada x a la resultante x', ésta matriz se define para un espacio ortogonal n-dimensional como:

$$R_{i,j}{}^{(n)}(\theta_{i,j}) \coloneqq \begin{array}{c} \\ i \\ \\ j \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccc} i & & & & & & j & & & \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & \ddots & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & Cos(\theta_{i,j}) & & & & -Sin(\theta_{i,j}) & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & \ddots & & & & \\ & & & & & & 1 & & & \\ & & & Sin(\theta_{i,j}) & & & & Cos(\theta_{i,j}) & & \\ & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \end{array} \tag{2}$$

Siendo siempre una matriz cuadrada n-dimensional donde los valores de i y j determinan las posiciones de los senos y cosenos a lo largo de la diagonal principal de la matriz según la rotación bidimensional y/o combinaciones que se desee.

"En general, la rotación de un punto en el sistema de coordenadas ortogonal n-dimensional puede ser representado por la composición de rotaciones bidimensionales definidas en el espacio bidimensional." [8]

Se toma como ejemplo n=3 en donde existen 3 combinaciones de 2 ejes (C_3^2), obteniendo las siguientes matrices de rotación[9]:

$$R_{1,2}{}^{(3)}(\theta_{1,2}) = \begin{bmatrix} Cos(\theta_{1,2}) & -Sin(\theta_{1,2}) & 0 \\ Sin(\theta_{1,2}) & Cos(\theta_{1,2}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(Rotación plano XY)} \quad (2a)$$

$$R_{1,3}{}^{(3)}(\theta_{1,3}) = \begin{bmatrix} Cos(\theta_{1,3}) & 0 & -Sin(\theta_{1,3}) \\ 0 & 1 & 0 \\ Sin(\theta_{1,3}) & 0 & Cos(\theta_{1,3}) \end{bmatrix} \quad \text{(Rotación plano XZ)} \quad (2b)$$

$$R_{2,3}{}^{(3)}(\theta_{2,3}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Cos(\theta_{2,3}) & -Sin(\theta_{2,3}) \\ 0 & Sin(\theta_{2,3}) & Cos(\theta_{2,3}) \end{bmatrix} \quad \text{(Rotación plano YZ)} \quad (2c)$$

El punto inicial *x* puede ser rotado a través del plano XY con $R_{1,2}{}^{(3)}(\theta_{1,2})$, luego rotar en el plano YZ usando $R_{2,3}{}^{(3)}(\theta_{2,3})$, obteniendo $x' = R_{2,3}{}^{(3)}(\theta_{2,3}).\, R_{1,2}{}^{(3)}(\theta_{1,2}).\, x$. Es posible realizar la rotación para un espacio n-dimensional a través de todos sus ejes con una matriz resultado de todas las combinaciones bidimensionales posibles;

$$x(k+1) = rR^{(n)}(\theta_{1,2}, \theta_{1,3}, \dots, \theta_{n-1,n})x(k)$$

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

Así se define 0< $\theta_{i,j}$< 2π como el ángulo de rotación. Ajustando $\theta_{i,j}$ para cada plano es posible mejorar el potencial de búsqueda pero la dificultad de establecer el conjunto de ángulos óptimos resulta inviable. Se determina un $\theta_{i,j} = \theta$ para todo i y j [8].

Para el presente trabajo, que consiste en el diseño de antena tipo parche (ver capítulo 2.3) se usará específicamente el caso bidimensional, el cual se expresa como:

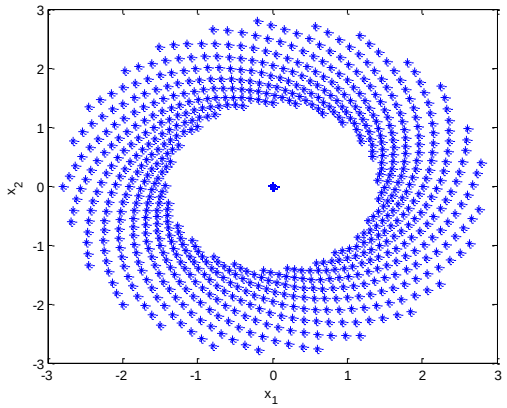
$$R_{1,2}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -sin\,\theta \\ sin\,\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

El parámetro r llamado también velocidad de convergencia determina la rapidez con la cual el punto x se acerca al centro de la espiral u origen en cada iteración (k) dependiendo de su valor, comprendido entre cero y uno (0< r<1), lo hará diversa o intensamente[8].

Dentro de las estrategias de búsqueda metaheurísticas se sostiene que la dinámica del punto debe tener la diversificación en la primera fase (estrategia para encontrar mejores soluciones mediante la búsqueda en una amplia región) y la intensificación en la segunda (estrategia para la búsqueda de mejores soluciones en torno a una buena solución intensamente)[8],[9]. Ambas estrategias se conciben a partir de la modificación de los parámetros r y θ. Entonces, la diversificación en la fase temprana puede encontrar regiones que tienen una alta posibilidad de que existan buenas soluciones como se ve en la Figura 2, y la intensificación en la última etapa puede buscar mejores soluciones en la región que se encuentra en la etapa temprana como se ve en la Figura 3.

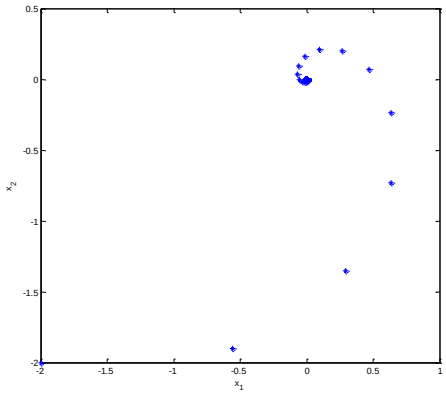
El modelo del espiral implementa esta estrategia de forma nativa mediante el establecimiento arbitrario del centro como un buen punto porque por naturaleza las espirales logarítmicas decrecen exponencialmente hacia el centro.

Figura 2 Espiral de tipo diverso



Fuente: Autores

Figura 3 Espiral de tipo intenso



Fuente: Autores

2.1.3 Implementación del algoritmo “Spiral Multipoint Optimization”

Después de aclarar conceptos y exponer las herramientas necesarias se procede al planteamiento del algoritmo de optimización. Como se muestra en [8], [9] el algoritmo consta de cinco pasos:

Tabla 1 Algoritmo *Spiral Multipoint Optimization*

Algoritmo Spiral Multipoint Optimization

Paso 0 (preparación):

Se seleccionan los parámetros de entrada: número de puntos de búsqueda, el ángulo θ, la tasa de convergencia *r* y el número máximo de iteraciones k_{max}.

Paso 1 (Inicialización):

Selección del punto inicial $x_i(0)$, dentro de una región factible, y se define el punto central, hacia el que rotaran todos los puntos como: $arg\ min\ f(xi(0))$. Donde *arg min* halla la posición sub *i* en la que se encuentra el menor valor que resulta de evaluar cada punto del vector xi en la función.

Paso 2 (Actualizar x_i):

$$xi(k\ +\ 1)\ =\ S_2(r,\theta)xi(k)\ -\ (S_2(r,\theta)\ -\ I2)x^*$$

Aquí se define el punto a rotar como el punto al que se llegó en la iteración anterior.

Paso 3 (Actualizar x^*):

$$x^*\ =\ x_{ig}(k\ +\ 1), ig\ = \arg\min f\big(xi(k\ +\ 1)\big)$$

Al igual que en el paso anterior se define nuevos puntos a rotar, para cada iteración se repite la función *arg min* y se define un nuevo punto hacia el cual rotar.

Paso 4 (Revisión del criterio de término):

$$Si\ k = kmax: terminar$$

Extraído de : [8]

2.2 Pruebas al algoritmo con funciones conocidas

Para probar el funcionamiento del algoritmo del espiral, a continuación éste es puesto a prueba con funciones conocidas en la literatura y sugeridas para algoritmos de optimización[10]. Se realizaron las pruebas con funciones de dos variables debido a que la función de interés pertenece a éste espacio, aunque con modificaciones sencillas en el código, como la matriz de rotación, puede ser ajustado para trabajar en N-dimensiones.

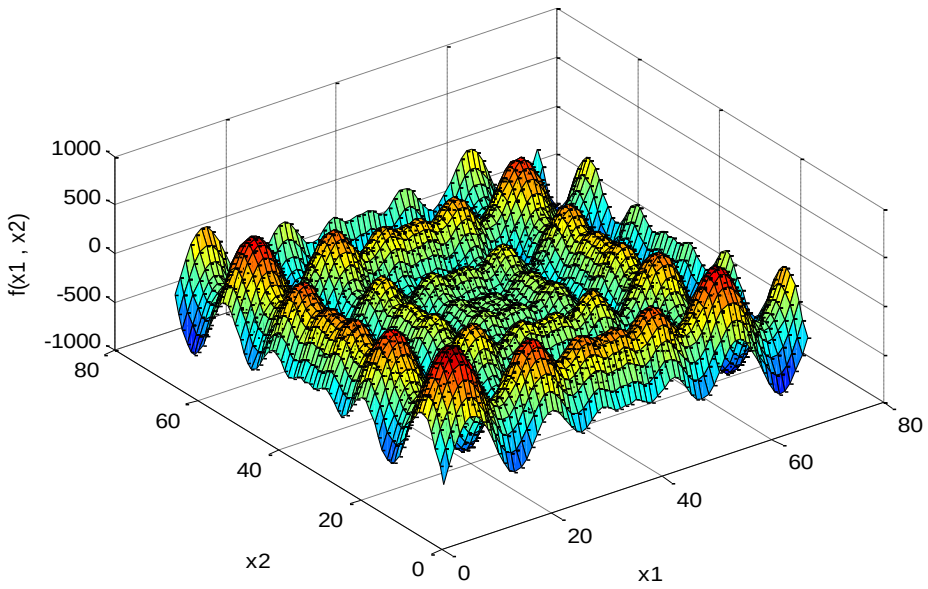
2.2.1 Función de Schwefel:

La ecuación general de la función es:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} [-x_i sin(\sqrt{|x_i|})] \quad (5)$$

Para probar esta función en [10] se sugiere un rango de $-500 \leq x_i \leq 500$. El mínimo global se encuentra en $x_1 = x_2 = 420.9687$. A continuación se muestra en la Figura 4 la función de Schwefel para dos variables generada con MATLAB™:

Figura 4 Función de Schwefel

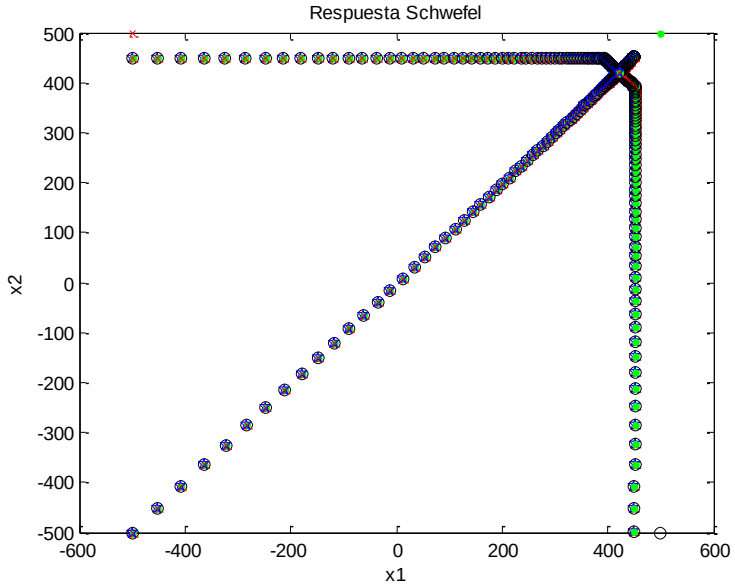


Fuente: Autores

Para aplicar el algoritmo sobre ésta se decidió trabajar con una taza de convergencia $r = 0.95$, un ángulo de $\theta = \pi/10000$, y la región de inicio se fijó como la sugerida en [10] $-500 \leq x_i \leq 500$. El número máximo de iteraciones se fija en 1000 y se establece una condición de salida cuando el valor del error se hace más pequeño que $1 * 10^{-5}$.

El algoritmo responde como se muestra en la Figura 5 Efectivamente busca el valor deseado.

Figura 5 Trayectoria de respuesta del algoritmo



Fuente: Autores

El espiral encuentra en $x_1 = 420.96874$ y en $x_2 = 420.96874$, el error con el que se da la condición de salida es de $6.34804 * 10^{-8}$, y encuentra la solución en 408 iteraciones. El tiempo de ejecución del algoritmo es de 0.124929 segundos. Según [10] la función presenta el mínimo global en $x_1 = 420.9687, x_2 = 420.9687$ por lo que se aprecia que la solución coincide con la sugerida en la literatura.

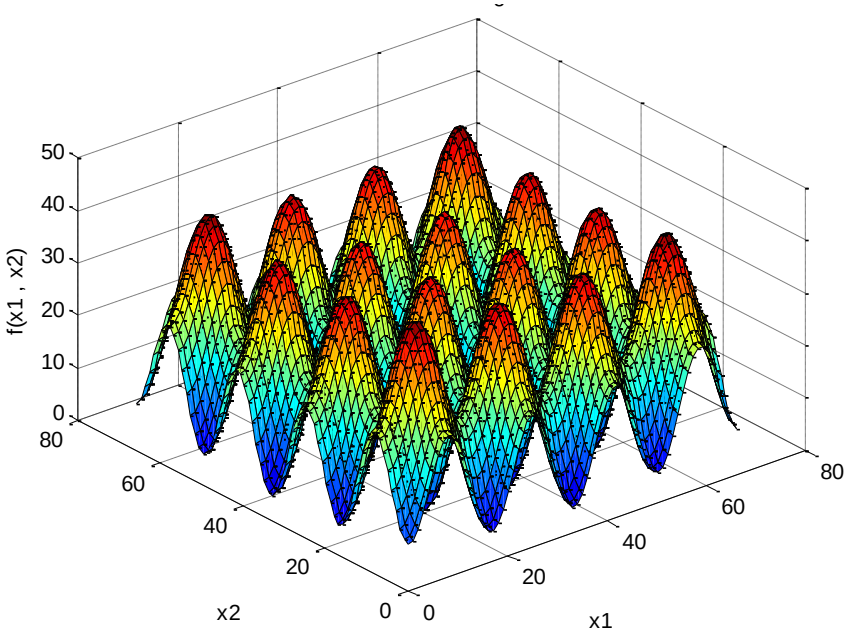
2.2.2 Función de Rastrigin:

La ecuación general de la función es:

$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^{n} [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)] \quad (6)$$

Para probar esta función se sugiere un rango de $-5.12 \leq x_i \leq 5.12$ sugerido en [10]. El mínimo global se encuentra en $x_i = 0$. En la Figura 6 se muestra el gráfico de la función de Rastrigin para dos variables generada con MATLAB™:

Figura 6 Función de Rastrigin

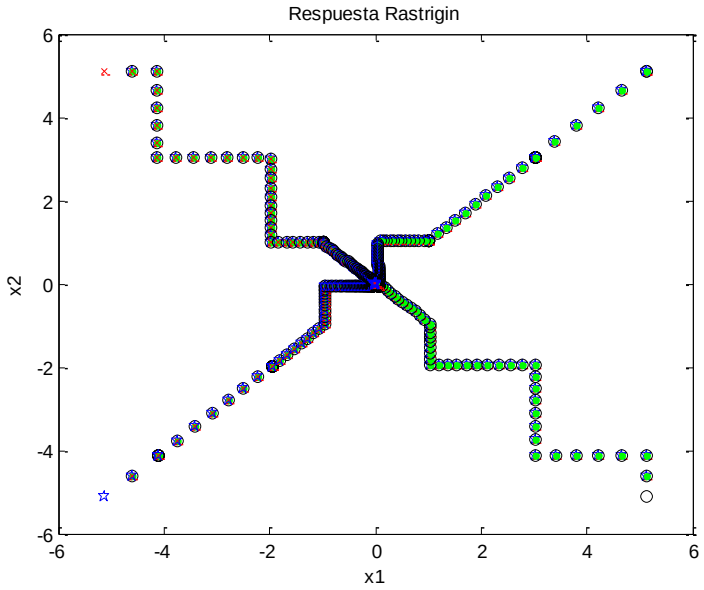


Fuente: Autores

Para aplicar el algoritmo sobre ésta se decidió trabajar con una taza de convergencia $r = 0.95$, un ángulo de $\theta = \pi/10000$, y la región de inicio se fijó como la sugerida en [10] $-5.12 \leq x_i \leq 5.12$. El número máximo de iteraciones se fija en 1000 y se establece una condición de salida cuando el valor del error se hace más pequeño que $1 * 10^{-8}$.

El algoritmo responde como se muestra en la Figura 7 efectivamente busca el valor deseado.

Figura 7 Trayectoria de respuesta del algoritmo



Fuente: Autores

El espiral encuentra en $x_1 = -0.48799 * 10^{-8}$ y en $x_2 = -0.59053 * 10^{-8}$, el error con el que se da la condición de salida es de $9.42956 * 10^{-9}$, y encuentra la solución en 402 iteraciones. El tiempo de ejecución del algoritmo es de 0.17586 segundos. Según [10] la función presenta el mínimo global en $x_i = 0$ por lo que se aprecia que el algoritmo encuentra una solución bastante acertada.

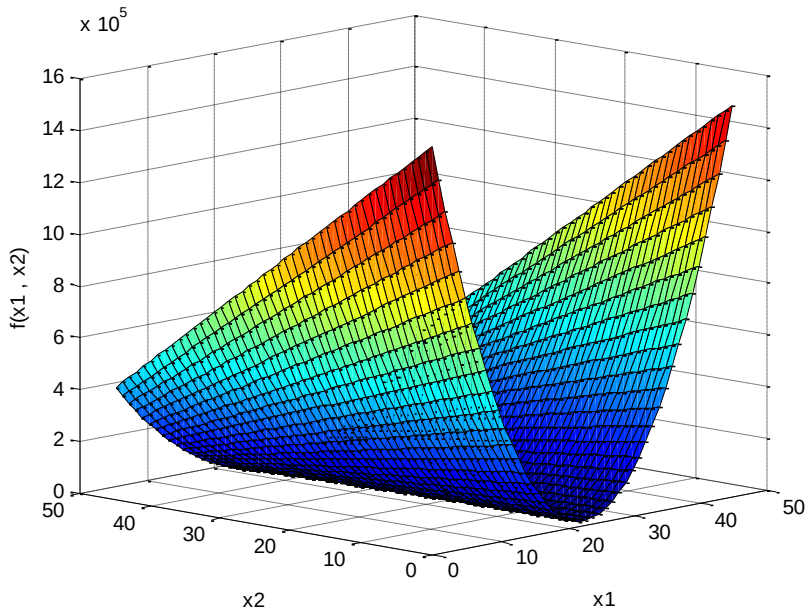
2.2.3 Función de Rosenbrock Valley:

La ecuación general de la función es:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2] \quad (7)$$

Para probar esta función se sugiere un rango de $-2.048 \leq x_i \leq 2.048$ como se ve en en [10]. El mínimo global se encuentra en $x_i = 1$. A continuación se muestra en Figura 8 la función de Rosenbrock para dos variables generada con MATLAB™:

Figura 8 Función de Rosenbrock

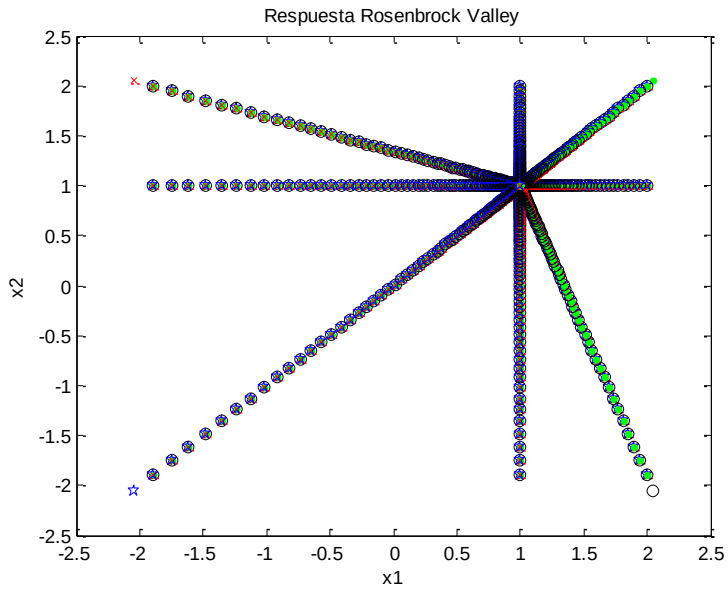


Fuente: Autores

Para aplicar el algoritmo sobre ésta se decidió trabajar con una taza de convergencia $r = 0.95$, un ángulo de $\theta = \pi/10000$, y la región de inicio se fijó como la sugerida en [10] $-2.048 \leq x_i \leq 2.048$. El número máximo de iteraciones se fija en 1000 y se establece una condición de salida cuando el valor del error se hace más pequeño que $1 * 10^{-8}$.

El algoritmo responde como se muestra en Figura 9 efectivamente busca el valor deseado.

Figura 9 Trayectoria de respuesta del algoritmo



Fuente: Autores

El espiral encuentra en $x_1 = \ 1$ y en $x_2 = \ 1$, el error con el que se da la condición de salida es de $9.9637 * 10^{-10}$, y encuentra la solución en 405 iteraciones. El tiempo de ejecución del algoritmo es de 0.066138 segundos. Según [10] la función presenta el mínimo global en $x_1 = 1$, $x_2 = 1$, el desempeño del algoritmo sobre esta función no es el mejor.

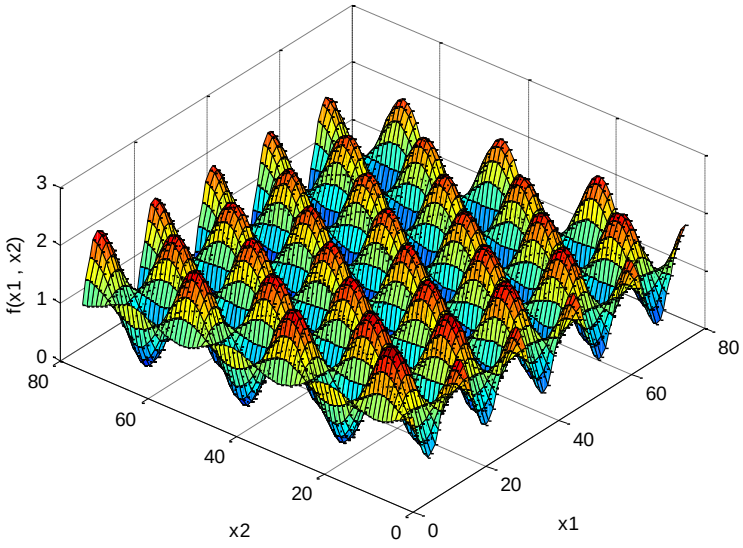
2.2.4 Función de Griewank:

La ecuación general de la función es:

$$f(x) = \frac{1}{4000}\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \prod_{i=1}^{n} \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \qquad (8)$$

Para probar esta función se sugiere un rango de $-600 \leq x_i \leq 600$. El mínimo global se encuentra en $x_i = 0$. A continuación se muestra el gráfico de la función de Griewangk para dos variables generada con MATLAB™:

Figura 10 Función de Griewangk

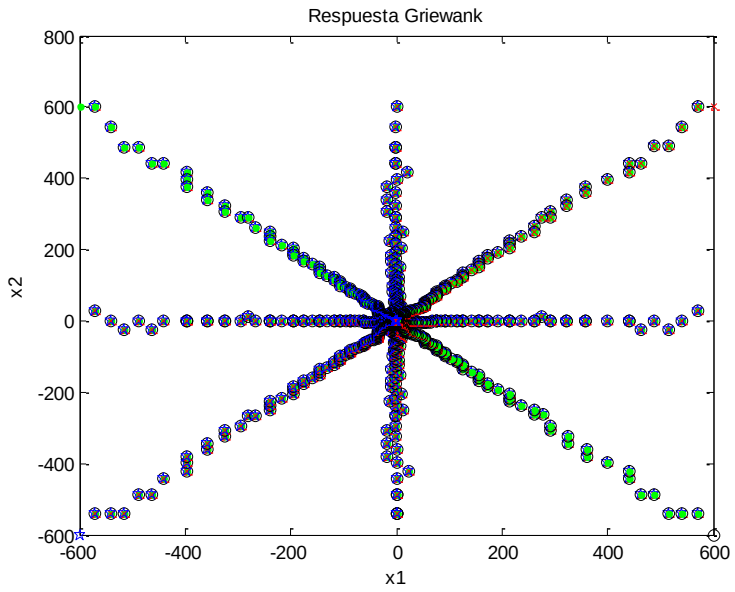


Fuente: Autores

Para aplicar el algoritmo sobre ésta se decidió trabajar con una taza de convergencia $r = 0.95$, un ángulo de $\theta = \pi/10 * 10^{10}$, y la región de inicio se fijó como la sugerida en [1] $-600 \leq x_i \leq 600$. El número máximo de iteraciones se fija en 1000 y se establece una condición de salida cuando el valor del error se hace más pequeño que $1 * 10^{-8}$.

El algoritmo responde como se muestra en Fig. 6. Efectivamente busca el valor deseado.

Figura 11 Trayectoria de respuesta del algoritmo



Fuente: Autores

El espiral encuentra en $x_1 = \ 0.04953 * 10^{-7}$ y en $x_2 = \ 0.00203 * 10^{-7}$, el error con el que se da la condición de salida es de $9.77495 * 10^{-10}$, y encuentra la solución en 495 iteraciones. El tiempo de ejecución del algoritmo es de 0.065863 segundos. Según [10] la función presenta el mínimo global en $x_i = 0$, el desempeño del algoritmo sobre esta función es correcto.

A continuación se recopilan los resultados obtenidos con las funciones de prueba y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Respuesta del algoritmo a funciones conocidas

Función	Mínimos reportados en[10]:	Mínimos encontrados	Iteraciones	Error de salida	Tiempo de ejecución[5] [s]
Schwefel	$X_i = 420.9687$	$x_1 = 420.96874$ $x_2 = 420.96874$	408	$6.348045 * 10^{-8}$	0.124929
Rastrigin	$X_i = 0$	$x_1 = -0.4879 * 10^{-8}$ $x_2 = -0.590 * 10^{-8}$	402	$9.429569 * 10^{-9}$	0.175862
Rosenbrock Valley	$X_i = 1$	$x_1 = 1$ $x_2 = 1$	405	$9.9633 * 10^{-10}$	0.066138
Griewank	$X_i = 0$	$x_1 = 0.0495 * 10^{-7}$ $x_2 = 0.0020 * 10^{-7}$	495	$9.77495 * 10^{-10}$	0.065863

Fuente: Autores

2.3 Antenas tipo parche

2.3.1 Generalidades

Las antenas de microtira, también llamadas antenas de parche, toman importancia inicialmente en aplicaciones de aeronaves, naves espaciales, satélites y misiles debido al poco espacio que usan, la facilidad en su instalación, mantienen un bajo perfil y no afectan el aerodinamismo (véase Tabla 3). Éstas se pueden producir fácilmente en masa como circuitos impresos, la línea de alimentación puede ser fabricada simultáneamente con la estructura de la antena a precios muy bajos y serán tan robustas como la superficie sobre la que sean colocadas, por lo que toman más importancia en la industria de las comunicaciones inalámbricas y aplicaciones móviles. Sus especificaciones de diseño, tal como frecuencia de resonancia, polarización, radiación e impedancia pueden ser cumplidas por medio de modificaciones en la geometría del elemento de radiación[11].

[5] Tiempos de ejecución promedio entre cinco ejecuciones.

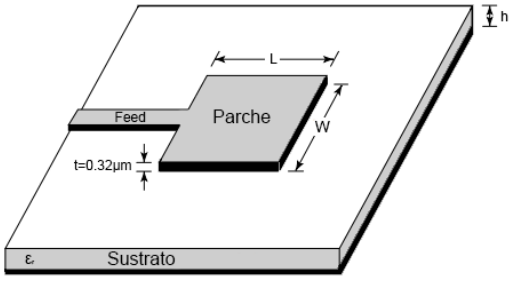
Tabla 3 Algunas aplicaciones de antenas de parche

Plataforma	Sistema
Aeronaves	Radar, comunicaciones, navegación, altímetro, sistemas de aterrizaje.
Misiles	Radar, detonación, telemetría.
Satélites	Comunicaciones, transmisión directa de TV, radares de teledetección, radiómetros.
Barcos	Comunicaciones, radar, navegación.
Vehículos terrestres	Telefonía móvil satelital, Radio móvil.
Otros	Sistemas biomédicos, alarmas contra intrusos.

Extraído de: [12]

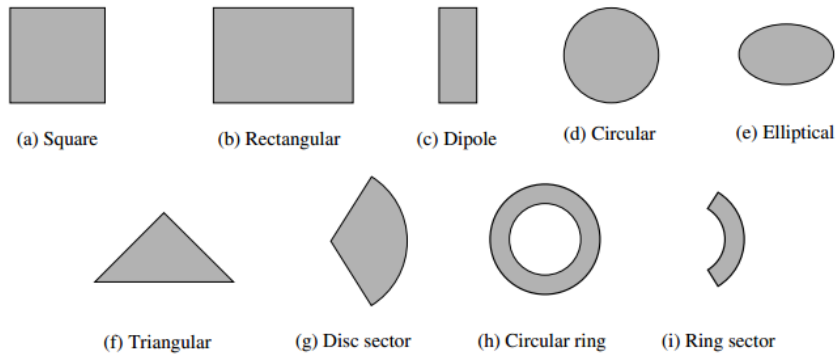
Una antena tipo parche consta de una configuración sencilla. Como se muestra en la Figura 12 ésta está compuesta por un sustrato dieléctrico delgado respecto a la longitud de onda (entre 0.003λ y 0.05λ). Sobre él se coloca un elemento de radiación o también llamado parche, que consiste en una tira metálica muy fina (grosor mucho menor que la longitud de onda en el vacío λ) generalmente de cobre. Sobre la cara opuesta aparece un plano conductor que funciona como plano de tierra. Los elementos de radiación pueden tomar diversas formas como se muestra en la Figura 13, aunque generalmente se usan geometrías bien definidas para simplificar su análisis y la predecir sus características[13].

Figura 12 Antena de parche



Fuente: Autores

Figura 13 Formas representativas de antenas de parche.



Extraído de: [11]

Para el desarrollo del presente trabajo se decidió implementar una antena con elemento de radiación rectangular de cobre (antena rectangular tipo parche). Se opta por este tipo de geometría por que ha sido ampliamente usada en conjunto con métodos de optimización en [5], [14], además de la facilidad relativa en su implementación.

Existen numerosos sustratos que pueden ser usados en el diseño de antenas. En [11] se sugiere el uso de sustratos con permitividad eléctrica entre $2.2 < \varepsilon_r < 12$. Es conveniente usar un sustrato grueso con un valor de permitividad bajo dentro del rango para obtener un buen rendimiento, es decir, alta eficiencia y ancho de banda. Para el diseño y la implementación de la antena se analizaron características de diferentes sustratos, tales como permitividad eléctrica, grosor, disponibilidad y precio. Finalmente se optó por el uso de fibra de vidrio FR4 con las siguientes características: Permitividad eléctrica de 4,4, grosor de la placa 0,8 o 1,6 milímetros, siguiendo la recomendación de [12] expuesta anteriormente se escogió la placa de 1,6 milímetros por último éste se ofrece localmente a un precio asequible.

Se puede alimentar las antenas tipo parche por múltiples formas. Para éste proyecto se decidió trabajar con alimentación mediante microtira (feed line), ver Figura 12. Ésta consiste en una tira del mismo material del parche, mucho más delgada que él. La alimentación por microtira es de fácil fabricación y se modela de manera sencilla. En algunos casos particulares puede afectar el ancho de banda[11]. El largo de la pista se establece a una distancia mayor a $\lambda/4$ del conector para que los modos evanescentes formados por el cambio de modo de

propagación estén suficientemente atenuados. Por medio de la ecuación de impedancia característica (9) es posible calcular el ancho apropiado para la pista para que se ajuste la impedancia de entrada deseada a partir de parámetros del sustrato y del parche [15].

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\varepsilon_r + 1.41}} \ln \frac{5.98h}{0.8w_f + t} \tag{9}$$

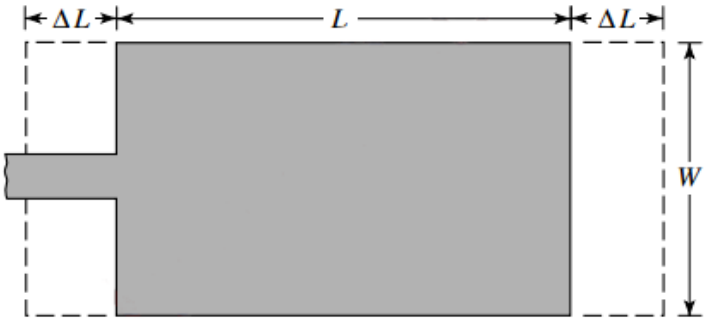
Donde w_f es el ancho de la línea de alimentación, t es el espesor de la línea, h es el grosor del dieléctrico, ε_r es la constante dieléctrica, Z_0 corresponde a la impedancia de espacio libre.

Las dimensiones del plano de tierra se definen mediante las distancias que debe ser incrementado el sustrato hacia el borde del elemento de radiación. Se prueba con distintos criterios que se encuentran en [11],[13] y [16] donde se sugiere trabajar con distancias hacia los bordes de $\lambda/20$, $\lambda/10$, medidas dependientes de la longitud de onda o $3h$, que obedece del grosor del sustrato.

2.3.2 Modelo

Para calcular la longitud del parche es necesario tener en cuenta los campos exteriores a éste, éstos aparecen en el borde del elemento de radiación. Los campos eléctricos no terminan abruptamente en los bordes, por lo que aparecen los "*fringing fields"* los cuales pueden ser representados por dos cavidades de radiación a cada lado, como se ve en la Figura 14, que eléctricamente actúan como un incremento en la longitud del parche. Para el cálculo de la longitud del parche (L) es necesario considerar este efecto ("*fringing factor*") [11].

Figura 14 Longitud física y efectiva de una antena de parche.



Extraído de: [11].

Según [11] para antenas de longitudes de $\lambda/2$ y $\lambda/4$ (donde λ es la longitud de onda propagante) la frecuencia de resonancia está dada por:

$$f_r = \frac{C_0}{2(L + 2\Delta L)\sqrt{\varepsilon_e(W)}} \tag{10}$$

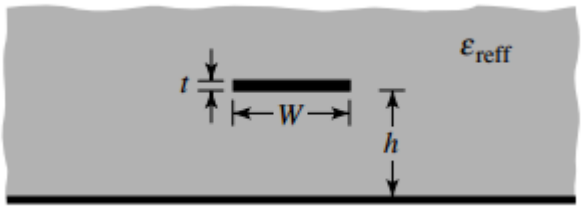
Donde C_0 es la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío, ε_0 y μ_0 corresponden a la permitividad y permeabilidad en el vacío respectivamente, ΔL es el *"fringing factor"* y $\varepsilon_e(W)$ es la constante dieléctrica efectiva teniendo en cuenta la franja de campo exterior (aire) como se ve en la Figura 15. Éste efecto matemáticamente se modela según la ecuación (11) [13], así se puede aproximar la antena sumergida en un material uniforme con permitividad $\varepsilon_e(W)$ como se observa en la Figura 16 [11].

$$\varepsilon_e(W) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \tag{11}$$

Figura 15 Líneas de campo

Adaptado de: [11]

Figura 16 Permitividad eléctrica efectiva.



Extraído de: [11]

La corrección del *"fringing factor"* mostrado en la Figura 11 se efectúa mediante la siguiente expresión[11]:

$$\Delta L = 0.412h\frac{[\varepsilon_e(W)+0.3]\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{[\varepsilon_e(W)-0.258]\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \tag{12}$$

En las ecuaciones (10) a (12) se proporciona una expresión analítica que relaciona la frecuencia de resonancia del parche con sus características geométricas y con el sustrato sobre el que se encuentra. El modelo ha sido previamente usado para abordar problemas similares en [4], [5], [11], [17].

En este trabajo se propone un problema inverso el cual parte de una frecuencia de resonancia y por medio del algoritmo se encuentran dimensiones para el elemento de radiación, lo que nos permite abordar el diseño de la antena como un problema de optimización siendo (13) la función-objetivo a minimizar

$$F(W,L) = |f_{r-deseada} - f_{r-calculada}(W,L)| \tag{13}$$

En donde la frecuencia de resonancia calculada está dada por (14) y la frecuencia de resonancia deseada para el diseño corresponde a 2.45 GHz:

$$f_{r-c} = \frac{C_0}{2\left(\boldsymbol{L}+2*0.412h\frac{\left[\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2\sqrt{1+\frac{12h}{\boldsymbol{W}}}}+0.3\right]\left(\frac{\boldsymbol{W}}{h}+0.264\right)}{\left[\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2\sqrt{1+\frac{12h}{\boldsymbol{W}}}}-0.258\right]\left(\frac{\boldsymbol{W}}{h}+0.8\right)}\right)\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2\sqrt{1+\frac{12h}{\boldsymbol{W}}}}}} \tag{14}$$

Siguiendo con los lineamientos del método de espiral y las condiciones del modelo se establecen las condiciones iniciales (W y L) dentro de la región de búsqueda dada por $0 < W, L < \lambda_o/2$ $(\lambda_0\ longitud\ de\ onda\ en\ el\ vacío)$. Igualmente se establece la condición de error para evaluar la efectividad del algoritmo como:

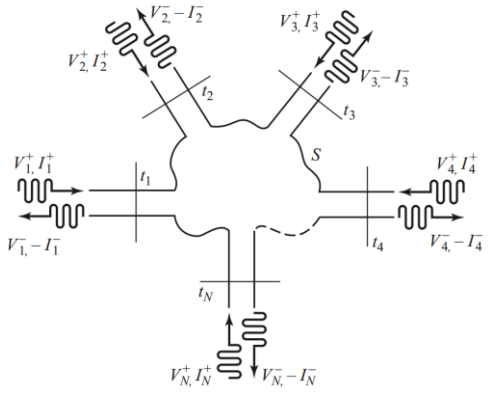
$$error = \frac{|f_{r-deseada} - f_{r-calculada}(W, L)|}{f_{r-deseada}} \quad (15)$$

2.3.3 Parámetros S

La frecuencia de resonancia de una antena puede ser analizada mediante su parámetro s_{11}. Éste pertenece a la matriz de dispersión la cual consiste en un arreglo de $n * n$ donde las posiciones s_{ij} representan la relación entre el puerto i y en puerto j en términos de onda incidente y reflejada.

Al igual que las matrices de admitancia e impedancia en una red de n puertos [Ver figura abajo]*, la matriz de dispersión provee una descripción completa de la red. Mientras las matrices de impedancia y admitancia relacionan tensión y corriente en los puertos, la matriz de dispersión relaciona el voltaje de ondas incidentes y reflejadas. Para algunos componentes y circuitos los parámetros de dispersión pueden ser calculados usando técnicas de análisis de redes o también pueden ser medidos directamente con un analizador de redes vectoriales (VNA)*[18].

Figura 17 Red de n puertos



Extraído de: [18].

Para ilustrar mejor el concepto del S_{11} se considera una red de n puertos con una amplitud de voltaje incidente V_n^+ y un voltaje reflejado V_n^- por el por el puerto n. La

matriz de dispersión se define como la relación entre los voltajes de las ondas incidentes y reflejados, como se muestra en (16).

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \\ S_{N1} & \dots & & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \tag{16}$$

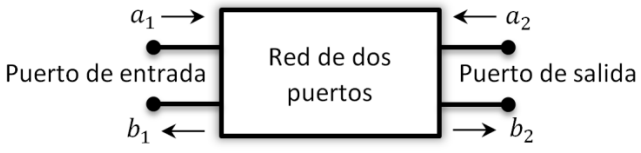
Un elemento específico de la matriz se calcula como:

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \; para \; k \neq j} \tag{17}$$

Entonces S_{ij} es calculado como la relación entre la onda de incidente de voltaje V_j^+ sobre el puerto j y la medida de amplitud de la onda reflejada V_j^- que sale por el puerto i. El parámetro S_{ii} corresponde al coeficiente de reflexión visto desde el puerto i cuando todos los otros puertos terminan en cargas acopladas y s_{ij} es el coeficiente de transmisión desde el puerto j hacia el puerto i cuando todos los otros puertos terminan en cargas acopladas[18].

Se toma como ejemplo la red de 2 puertos que se muestra en la Figura 18 para el cálculo de sus parámetros S, primero se construye la matriz de dispersión (18). Según la definición anterior de parámetros S, su S_{11} es calculado al alimentar por el puerto de entrada (puerto 1) y conectar en el puerto de salida (puerto 2) una carga acoplada por lo que a_2 y b_2 se hacen cero, convirtiendo la (18) en (19).

Figura 18 Red de dos puertos



Fuente: Autores

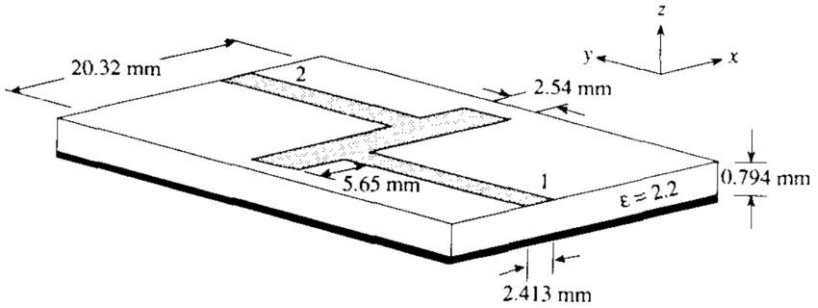
$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$b_1 = S_{11} * a_1 \iff S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (19)$$

Obteniendo como resultado coeficiente entre la onda refleja y la onda incidente en el puerto de entrada (puerto 1) que corresponde con su parámetro S_{11}.

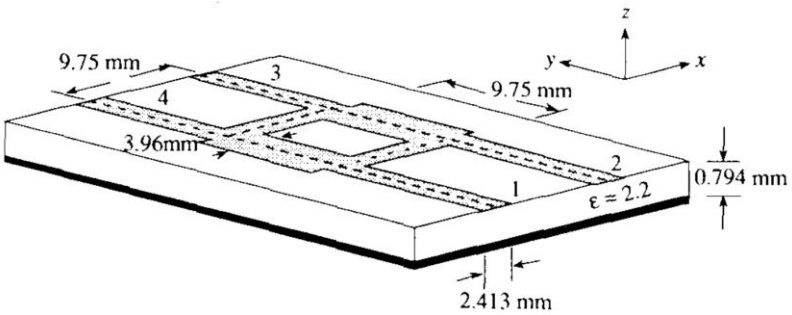
Para comprobar el funcionamiento del simulador numérico y mostrar la importancia del parámetro S_{11} en el diseño de antenas y filtros impresos, se reprodujeron los resultados presentados en [19] donde se muestra el filtro pasa bajos de la Figura 19 y el acoplador de línea de la Figura 20. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 21 y la Figura 22 respectivamente.

Figura 19 Filtro pasa bajas.



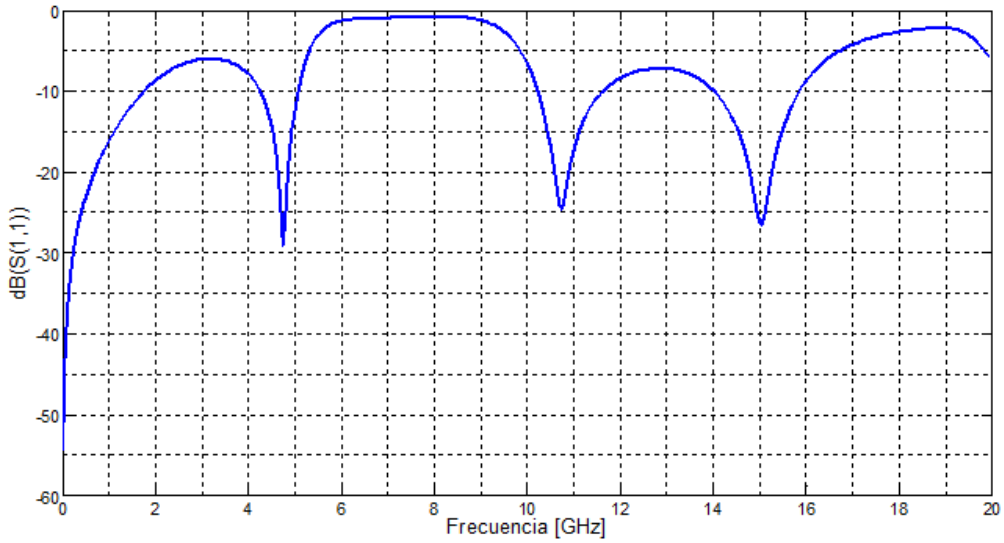
Extraído de [19]

Figura 20 Acoplador de línea.



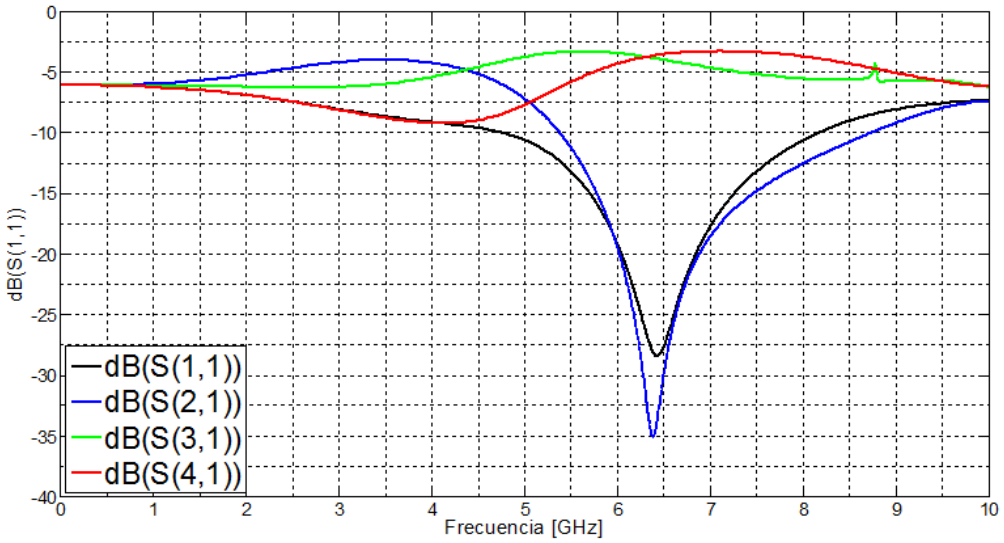
Extraído de [19]

Figura 21 Parámetro S11 del filtro pasa bajas



Fuente: Autores

Figura 22 Parámetros S del branch line coupler



Fuente: Autores

3. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE LA ANTENA

3.1 Cálculo de dimensiones

La frecuencia de resonancia de una antena tipo parche rectangular es calculada con (14). Mediante el uso de esta expresión junto con (13) y el algoritmo "*Spiral Multipoint Optimization*" es posible calcular el largo (L) y el ancho (W) adecuados del elemento de radiación. En la ecuación (13) la frecuencia $f_{r-deseada}$ es establecida en 2.45GHz de acuerdo con los objetivos del proyecto, mientras que el valor de $f_{r-calculada}$ viene dado por (14) la cual tiene como variables parámetros propios del proceso de fabricación del sustrato que son inalterables:

- Permitividad eléctrica $(\varepsilon_r) \approx 4.4$.
- Grosor dieléctrico $(h) \approx 1.6\, mm$.
- Grosor del elemento de radiación $(t) \approx 32\, \mu m$.

Se procede a definir los parámetros requeridos por "*Spiral Multipoint Optimization*" mostrados en el "paso 0" de la Tabla 1. Teniendo en cuenta las pruebas realizadas al algoritmo en el apartado 2.2 se fijó un valor de $r = 0.95$ y se realizaron variaciones en el valor de θ. Por último, como se muestra en el "paso 1" de la Tabla 1 es necesario establecer una región de soluciones factibles dentro de la cual será realizada la búsqueda. Esta región tiene como límite inferior cero, descartando así soluciones que impliquen dimensiones negativas. Según [11] la antena resonará aproximadamente en la frecuencia requerida cuando la longitud (L) de su elemento de radiación sea aproximadamente igual a $\lambda/4$ o $\lambda/2$, por lo que la cota superior está dada por $\lambda_0/2$ (donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío) y valores aleatorios menores que λ para la otra dimensión (W). Es claro que la función (14) no tiene un único par de valores (W) y (L) que hacen que se cumpla la condición de (13), y cada uno de éstos corresponde a las dimensiones de un parche que teóricamente resonará en la frecuencia deseada. En la Tabla 4 se muestran diferentes resultados debido a las variaciones de θ y el vector de condiciones iniciales. El valor del error máximo permisible para la condición de salida se establece en $1 * 10^{-9}$.

Tabla 4 Resultados del algoritmo

N°	θ	W(mm)	L(mm)	f calculado con (14) (GHz)
1	$\pi/100000$	59.591337528046	28.475304411802	2.450000000000004
2	$\pi/50000$	41.763073139728	28.743365386338	2.449999999999984
3	$\pi/10000$	29.804147847833	29.059010727373	2.44999999999999
4	$\pi/5000$	43.545995605123	28.708497853612	2.450000000000040
5	$\pi/1000$	36.481554453728	28.862484233594	2.450000000000001
6	$\pi/100$	50.983902095598	28.585119209446	2.450000000000001
7	$\pi/50$	39.014944023886	28.802113615273	2.449999999999974
8	$\pi/20$	34.730739079688	28.908250544831	2.449999999999964
9	$\pi/2$	57.197440666015	28.503022741801	2.449999999999989

Fuente: Autores

Se aprecia en la cuarta columna de la Tabla 4 que el valor de la longitud del parche (L) efectivamente tiende a $\lambda/4$ para todas las antenas reportadas. En la quinta columna de la misma tabla se aprecia claramente que al evaluar los valores de ancho (W) y (L) del parche encontrados por el algoritmo "*Spiral Multipoint Optimization"* en (14) se llega al valor de la frecuencia deseada.

Después de haber calculado el largo (L) y el ancho (W) del elemento de radiación resta establecer las dimensiones de la línea de alimentación y del plano de tierra. Según [15] [20] para ajustar la impedancia de entrada a 50Ω se usa la ecuación (9).

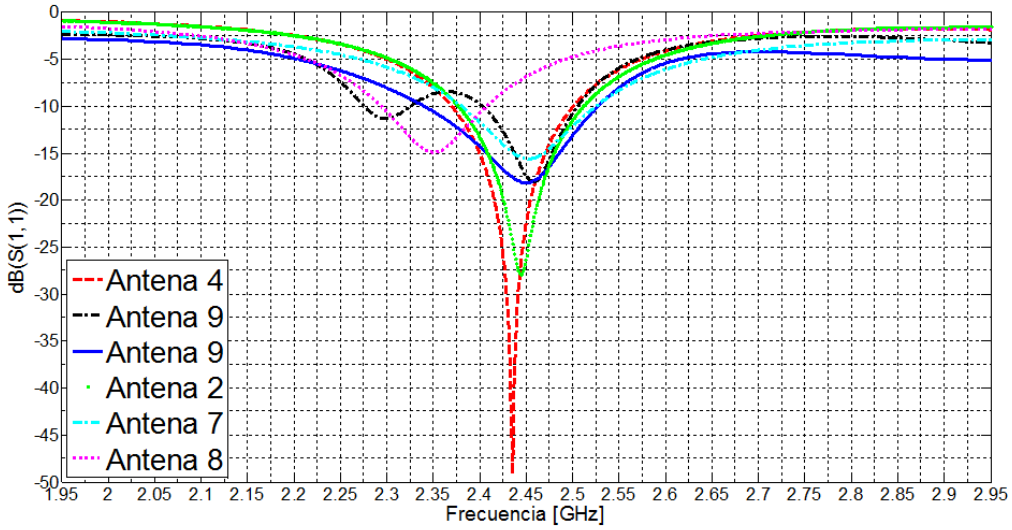
En (9) w_f es el ancho de la línea de alimentación, $t = 0{,}32\mu m$ es el espesor de la línea, $h = 1.6mm$ es el grosor del dieléctrico, $\varepsilon_r = 4{,}4$ es la constante dieléctrica, $Z_0 = 50\Omega$ impedancia de la pista. Éste valor de impedancia es tomado a partir de las exigencias del VNA (*Vector Network Analyzer*), el cual requiere que los elementos que se acoplen estén ajustados a una impedancia de 50Ω. Se obtiene un ancho de pista despejando $w_f = 2.81mm$.

Por último, para calcular las dimensiones del plano de tierra según [13] se debe incrementar hacia cada borde del elemento de radiación una distancia de $\lambda/20$, aproximadamente $6.122mm$. Cabe aclarar que tanto éste incremento como el ancho de la pista no dependen de las dimensiones del parche si no de las características del sustrato y la frecuencia de resonancia, por lo que éstos cálculos son válidos para cualquier antena mostrada en la Tabla 4.

3.2 Simulaciones

Una vez calculadas las dimensiones que se muestran en la Tabla 4 son seleccionadas seis antenas aleatoriamente y con éstas se procede a comprobar que efectivamente la frecuencia de resonancia se encuentra en 2.45GHz por medio de un simulador numérico. Mediante este proceso es posible modelar condiciones que no son tenidas en cuenta en la ecuación (14) tales como efectos de borde de campos, interacción de corrientes, entre otras. Las simulaciones se realizaron en el rango de frecuencia de 1.95GHz hasta 2.95GHz tomando como medida el parámetro S_{11}, los resultados arrojados son mostrados en la Figura 23:

Figura 23 Parámetro S_{11} simulado



Fuente: Autores

Con base a los resultados de las simulaciones presentados en la Tabla 5 se hará la elección de las antenas a ser implementadas.

Tabla 5 Resultados de simulaciones

Antena	W [mm]	L [mm]	Longitud de la línea de alimentación	Incremento hacía el borde[6]	Frecuencia central [GHz]
2	41.7630	28.7433	$3h$	$3h$	2.4435
4	43.5459	28.7084	$3h$	$3h$	2.4350
7	39.0149	28.8021	$\lambda/2$	$3h$	2.4520
8	34.7307	28.9082	$\lambda/4$	$3h$	2.3480
9 (negra)	57.1974	28.5030	$\lambda/2$	$\lambda/20$	2.4580
9 (azul)	57.1974	28.5030	λ	$\lambda/20$	2.4500

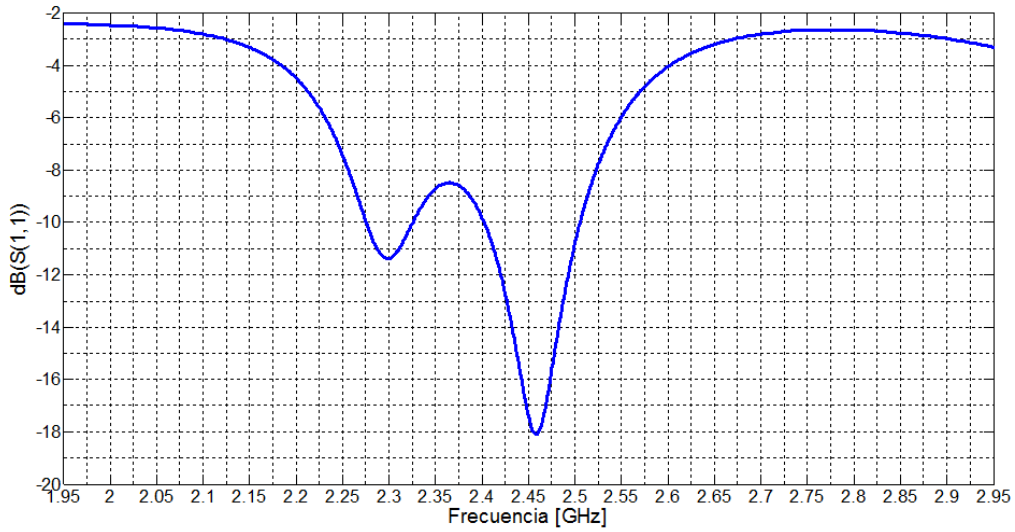
Fuente: Autores

Los valores mostrados en la columna de frecuencia central de la Tabla 5 no son exactamente 2.45GHz debido a condiciones que no son consideradas por el modelo de la ecuación (14). En el literal 2.3.1 se muestran diferentes criterios para definir el tamaño del plano de tierra de la antena, los cuales son probados en simulaciones con distintos elementos de radiación para de escoger el que mejor se ajuste al diseño.

Se decide implementar la antena número 9 de la Tabla 4 con diferentes longitudes de línea de alimentación, debido a que su frecuencia de resonancia es la más cercana a la requerida como se muestra en Tabla 5. Las simulaciones de los modelos escogidos se muestran en la Figura 24 y en la Figura 25.

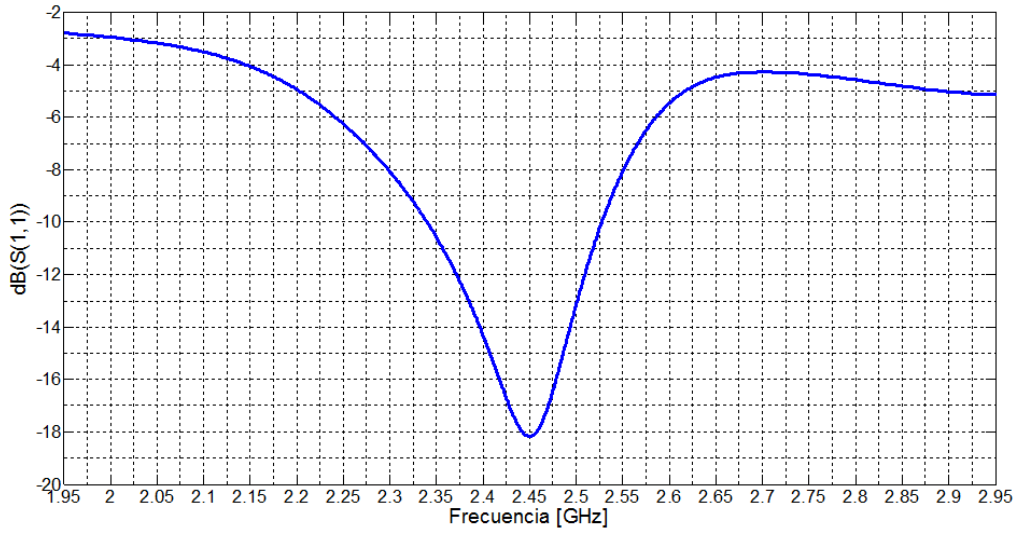
[6] Distancia desde los bordes del parche hasta los bordes del sustrato. Define también las dimensiones del plano de tierra.

Figura 24 S_{11} simulado antena 9 de Tabla 4. Longitud de línea de alimentación $\lambda/2$



Fuente: Autores

Figura 25 S_{11} simulado antena 9 de Tabla 4. Longitud de línea de alimentación λ



Fuente: Autores

En el siguiente capítulo se muestra la implementación de los diseños de antenas seleccionados, para posteriormente realizar una comparación de parámetros medidos y simulados.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Parámetro S_{11} medido en el VNA

Para comprobar la sintonización de las antenas en la frecuencia de diseño se utilizó el VNA (*Vector Network Analyzer*) Rohde Schwarz (R&S®) ZVL6 (Rango de frecuencia hasta 6 GHz), en su modo analizador de redes (*Network Analyzer).* La frecuencia de resonancia de la antena se presenta por medio del diagrama del parámetro s_{11} (véase apartado 2.3.3).

Al final de la línea de alimentación de la antena se colocó un conector SMA con impedancia característica de 50Ω como el mostrado en la Figura 26. Éstos son conectores roscados y se usan principalmente en aplicaciones que implican tecnología de circuitos impresos, tales como antenas o filtros, ya que son de fácil conexión mediante cable coaxial. En la cotidianidad es común encontrar éstos en diversos dispositivos comerciales que trabajan con radiofrecuencia. En la Figura 27 se muestra el acople del conector a la antena, el pin central es conectado a la línea de alimentación y el cuerpo del conector se cortocircuita con plano de tierra en la cara posterior del sustrato.

Figura 26 Conector SMA

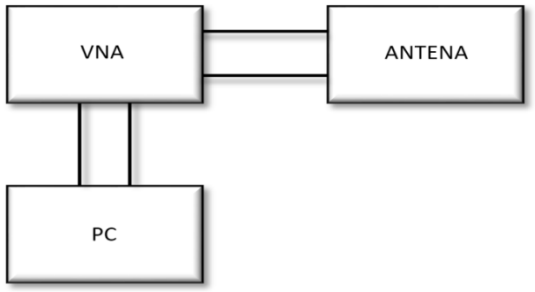
Fuente: Autores

Figura 27 Montaje antena con conector

Fuente: Autores

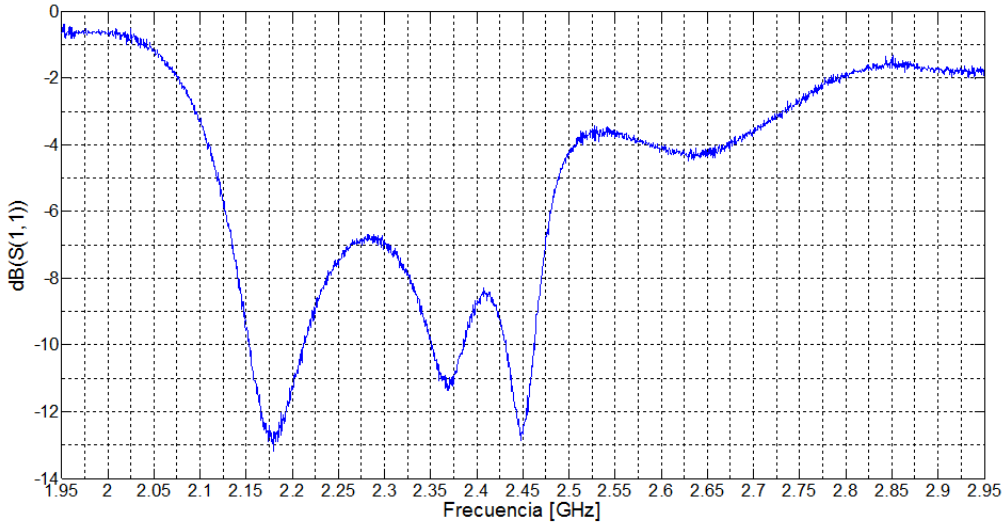
Los diagramas de parámetro s_{11} medidos por el VNA son capturados conectando el analizador de redes por medio de escritorio remoto, de este modo se pueden realizar capturas de pantalla o exportar archivos que contienen los puntos de las gráficas y mediante el uso de la herramienta MATLAB™ puede ser reconstruidas. El diagrama de conexión se muestra en la Figura 28. Los resultados se exponen en la Figura 29 y en la Figura 30.

Figura 28 Diagrama de conexión



Fuente: Autores

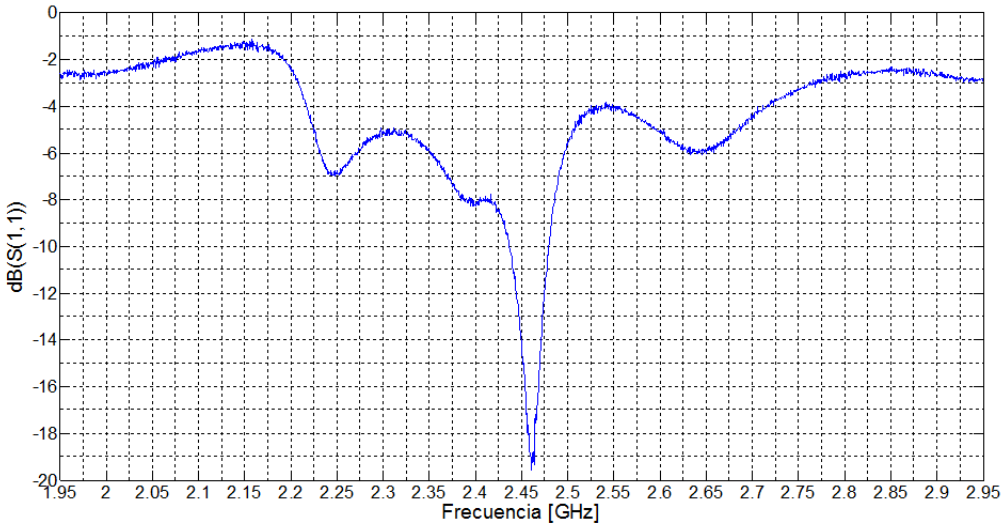
Figura 29 ParámetroS_{11} antena 9 Tabla 4. Tamaño de la línea de alimentación $\lambda/2$



Fuente: Autores

Los picos de resonancia que aparecen en 2.175GHz y 2.375Ghz de la Figura 29 posiblemente se deben a la reflexión de modos evanescentes. Éstos se presentan debidos a que la longitud de la línea de alimentación no es suficientemente larga para atenuarlos antes de llegar al parche. Es claro en la Figura 30 que mediante el incremento del tamaño de la línea se atenúan los modos evanescentes.

Figura 30 Parámetro S_{11} antena 9 Tabla 4. Tamaño de la línea de alimentación λ

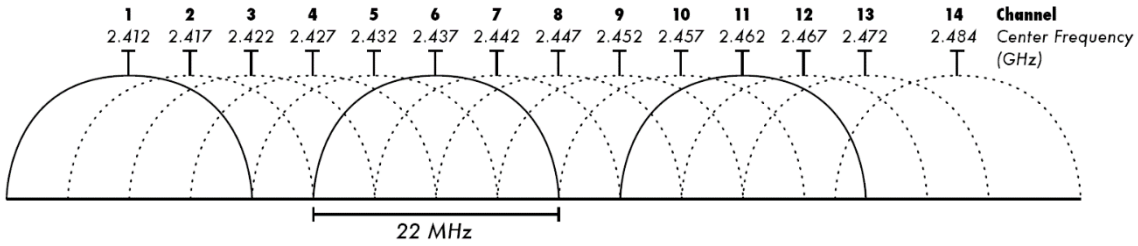


Fuente: Autores

4.2 Prueba de transmisión y recepción

Para probar la funcionalidad de las antenas implementadas en el estándar IEEE 802.11 y aprovechando la disponibilidad del generador de señales de radio frecuencia R&S SMB100A se plantea una prueba de transmisión y recepción en el rango de frecuencias mostrado en la Figura 31.

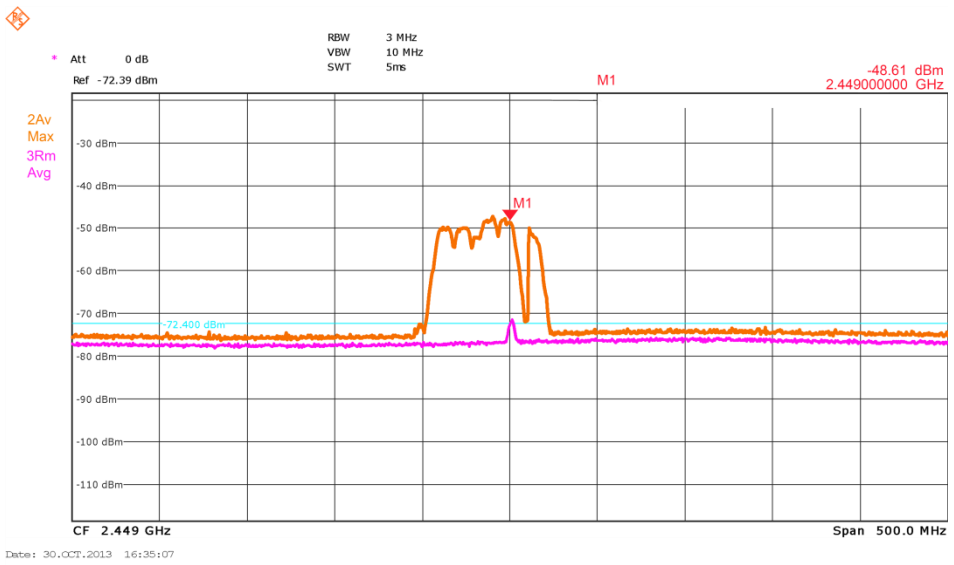
Figura 31 Canales Wi-Fi 2.4GHz (IEEE 802.11 WLAN)



Extraído de: [11]

La antena que presenta mejor desempeño es implementada dos veces, una de ellas se usa para transmitir la señal del generador de radiofrecuencia y la otra se encarga de recibir conectada al analizador de redes Rohde Schwarz (R&S®) ZVL6 en modo analizador de espectro. Los equipos se sitúan a una distancia aproximada de un metro y se procede a generar un pulso en la frecuencia de sintonización 2.45GHz con potencia de $-10dBm$. El espectro captado por el ZVL6 es mostrado en la Figura 32:

Figura 32 Espectro medido



Fuente: Autores

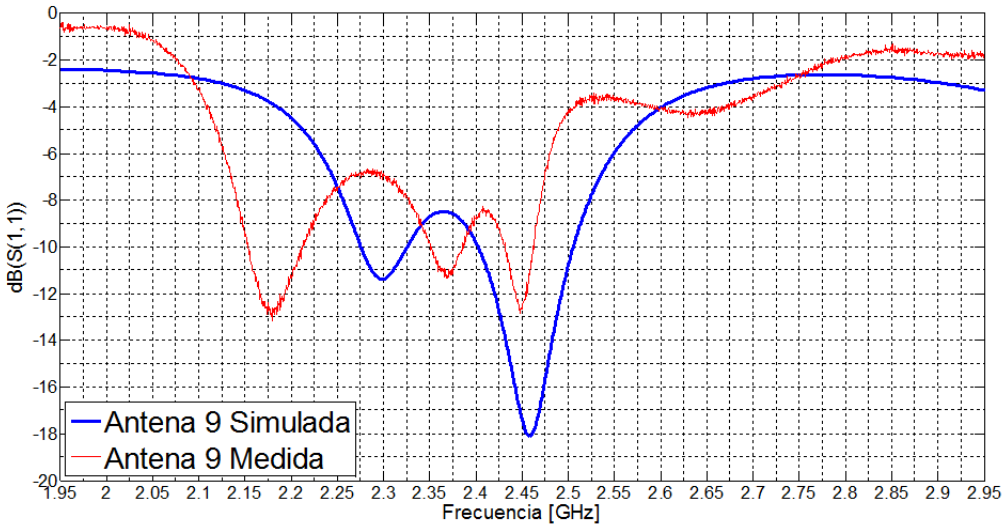
En el espectro mostrado por el analizador (VNA) se observara un pico correspondiente a la señal generada en 2.45 GHz, como se muestra en el trazo rosa Figura 32 (corresponde al valor promedio recibido). Adicionalmente el trazo naranja (corresponde al valor de picos máximos) se hace evidente que la antena está recibiendo otras señales que corresponden a las redes Wi-Fi presentes en el lugar de medición.

4.3 Comparación de resultados

Como se aprecia en la Figura 33 y la Figura 34, el comportamiento medido de las antenas es similar al arrojado por el simulador numérico (reportado en el capítulo 3.2) en términos de frecuencia de resonancia. Las variaciones que se presentan en el valor de la potencia son debidas a perdidas en los cables y conectores.

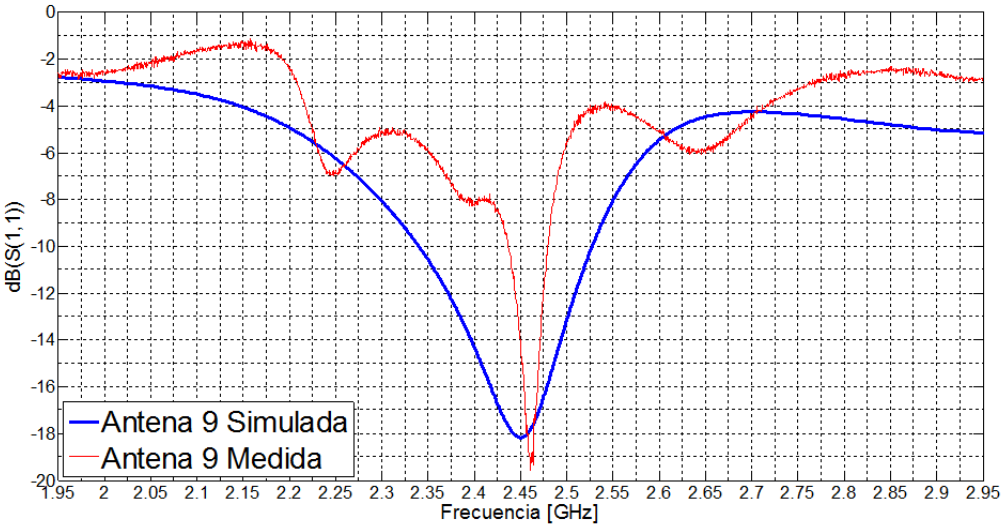
Los diseños presentados son considerados validos pues se presentan picos de resonancia en 2.45GHz o frecuencias muy cercanas que están por debajo de los $-10\ dB$, criterio que se utiliza por presentar valores de energía reflejada inferiores al 10% de la energía alimentada.

Figura 33 S_{11} medido y calculado antena 9 Tabla 4. Tamaño de la línea de alimentación $\lambda/2$



Fuente: Autores

Figura 34 S_{11} medido y calculado antena 9 Tabla 4.Tamaño de la línea de alimentación λ



Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

- En este trabajo se mostró como un algoritmo de optimización de tipo heurístico puede ser usado como una herramienta versátil y flexible para la solución de problemas complejos de optimización en contextos reales, mediante la cual se ahorra una cantidad considerable de recursos computacionales y tiempo.

- Se implementó el algoritmo "*Spiral Multipoint Optimization*" en la plataforma MATLAB™, éste respondió de manera satisfactoria ante funciones de prueba reportadas en la literatura por lo que da confianza para extender su uso en otras aplicaciones, por ejemplo, el diseño de antenas impresas, como se presentó en este trabajo.

- El éxito de "*Spiral Multipoint Optimization*" depende de la región de soluciones factibles que se le ingrese, la cantidad de condiciones iniciales y el valor de los parámetros r y θ escogidos para el desarrollo del problema.

- Mediante el modelo que relaciona la frecuencia de resonancia de una antena rectangular tipo parche con sus dimensiones físicas y el sustrato sobre el que se fabrica, en conjunto con el algoritmo "*Spiral Multipoint Optimization*", se realizó el diseño de una antena rectangular tipo parche de forma práctica, obteniendo resultados similares a los arrojados por el simulador numérico.

- Mediante la prueba de transmisión y recepción se comprobó que las antenas implementadas son funcionales en la frecuencia de diseño así como en los canales del estándar IEEE 802.11.

RECOMENDACIONES

- Para obtener mejores resultados se debe establecer en "*Spiral Multipoint Optimization*" un conjunto de soluciones posibles acotada, o ejecutar el algoritmo repetidamente con condiciones iniciales aleatorias para fijar una región factible más acertada.

- La implementación de antenas debe realizarse en un centro especializado que cuente con maquinaria capaz de garantizar precisión en el proceso de fabricación debido a que pequeñas variaciones en la geometría causan cambios considerables en la frecuencia de resonancia del parche.

- Es necesario para pruebas de transmisión y recepción de radiofrecuencia adquirir o construir una cámara anecoica que garantice la veracidad de las mediciones aislando señales del medio para que éstas no causen interferencia.

- Mediante un software de simulación especializado en aplicaciones de alta frecuencia se hace posible el estudio de mejores y más complejos diseños de antenas y filtros impresos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, 9th ed. Cambridge University Press, 2009.

[2] I. H. Osman and J. P. Kelly, *Meta-Heuristics: Theory and Applications*. Boston: Ed. Kluwer Academic, 1996.

[3] K. Tamura and K. Yasuda, “Primary study of spiral dynamics inspired optimization,” *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 6, no. S1, pp. S98–S100, Nov. 2011.

[4] A. Irianto, A. B. Mutiara, and A. A. Shappe, “Designing and Manufacturing Microstrip Antenna for Wireless Communication at 2 . 4 GHz,” vol. 3, no. 5, pp. 1–6, 2011.

[5] O. T. Altinoz and a. E. Yilmaz, “Calculation of optimized parameters of rectangular patch antenna using gravitational search algorithm,” *2011 Int. Symp. Innov. Intell. Syst. Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 349–353, Jun. 2011.

[6] R. Martí, “Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria,” *Matemàtiques 1(1), 3-62*, pp. 1–60, 2003.

[7] F. Glover and G. Kochenberger, *Handbook Of Metaheuristics*. Kluwer Academics Publishers, 2003.

[8] K. Tamura and K. Yasuda, “Spiral Optimization -A New Multipoint Search Method-,” *978-1-4577-0653-0/11/$26.00 ©2011 IEEE*, no. 1, pp. 1759–1764, 2011.

[9] K. Tamura and K. Yasuda, “Spiral Multipoint Search for Global Optimization,” *2011 10th Int. Conf. Mach. Learn. Appl. Work.*, vol. 2, no. 2, pp. 470–475, Dec. 2011.

[10] M. Molga and C. Smutnicki, “Test functions for optimization needs,” no. c, pp. 1–43, 2005.

[11] C. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 3rd ed. Johan Wiley & Sons, 2005.

[12] D. M. Pozar, “Microstrip Antennas,” *Proc. IEEE*, vol. 80, no. 1, 1992.

[13] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, *Micro Strip Antenna Design Handbook*. Artech Hou, 2001.

[14] V. S. Chintakindi, S. S. Pattnaikt, O. P. Bajpae, S. Devil, S. V. R. S. Gollapudi, and P. K. Pradyumna, “Parameters Calculations of Rectangular Microstrip Patch Antenna using Particle Swarm Optimization Technique,” *978-1-4244-1864-0/07/$25.00 ©2007 IEEE*, pp. 7–10, 2007.

[15] S. Liao, *Microwave Devices and Circuits*, 3rd ed. PRENTICE HALL, 1987.

[16] S. Jensen, “Microstrip Patch Antenna,” 2010.

[17] A. L. S. I, “Design , Simulation and Tests of a Low-cost Microstrip Patch Antenna Arrays for the Wireless,” *Turk j Elec Engin, VOL. 13, NO.1*, vol. 13, no. 1, pp. 93–103, 2005.

[18] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2012, p. 179.

[19] D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra, and J. A. Kong, “Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits,” *Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 7, 1990.

[20] H. R. Kaupp, “Characteristics of Microstrip Transmission Lines,” *IEEE Trans. Electron. Comput.*, no. 2, 1967.