UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA:

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

TEMA:

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA YAGI UDA MEDIANTE EL USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA EL LABORATORIO DE ANTENAS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

AUTOR:

OSCAR ANDRÉS AYALA CHÁVEZ

DIRECTOR:

LUIS GERMÁN OÑATE CADENA

Quito, febrero del 2015

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO DEL TRABAJO DE GRADO

Yo, autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Quito, febrero del 2015

Oscar Andrés Ayala Chávez
C.I. 1716189269

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis en primer lugar a Dios por sus bendiciones, por la fuerza en momentos difíciles para afrontar los retos que nos impone la vida.

A mis padres quienes con su esfuerzo y sacrificio hicieron posible la culminación de una etapa más en mi vida, por la paciencia y la fe puesta en mí, por su amor incondicional, sus consejos y su apoyo.

A mí amada abuelita quien con su amor me impulsa y me da la fuerza y la motivación para seguir siempre adelante y levantarme ante cualquier adversidad.

A mi hermano Eduardo que es mi ejemplo de lucha, a Paúl a quien le deseo éxito en su camino y que la vida te brinde lo mejor, a Karen una dedicatoria especial con mi confianza puesta en ti ya que conozco tu capacidad e inteligencia, muchas gracias por tu cariño y por ser quien eres, te amo mucho.

A mis tíos Santiago y Pilar por su apoyo incondicional, mis primos Kevin y Stephen por su cariño y amistad, a mis amados sobrinos Ismael y Darita quienes son mi luz y mi alegría.

A mi amada novia María Fernanda quien con su amor, su amistad y su apoyo supo motivarme a seguir adelante y no desmayar.

Por último dedico esta tesis a mis compañeros y grandes amigos Naty, Andrés y Christian quienes con su apoyo y amistad hicieron posible culminar esta meta.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecer a la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA por darme las herramientas y conocimientos necesarios para ser un buen profesional.

A mi director de tesis, Ing. Luis Oñate por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia y su guía ha sido la persona que me ha impulsado para que pueda terminar mi carrera con éxito.

También me gustaría agradecer a mis profesores quienes durante toda mi carrera han aportado a mi formación profesional y personal inculcando en mí sus conocimientos y siendo un ejemplo a seguir como personas y profesionales.

Son muchas las personas compañeros y docentes que han formado parte de mi vida profesional a las que deseo agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los distintos momentos que viví al cursar esta extraordinaria carrera.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1 3

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1.1. Problema a resolver 3

1.2. Hipótesis tesis 3

1.3. Objetivos 4

1.3.1. Objetivo general 4

1.3.2. Objetivos específicos 4

1.4. Justificación 4

1.5. Alcances 5

1.6. Metodología de la investigación 6

1.6.1. Investigación bibliográfica 6

1.6.2. Diseño 6

1.6.3. Simulación 7

1.6.4. Documentación 7

CAPÍTULO 2 8

ESTADO DEL ARTE 8

2.1. Estado del Arte 8

2.2. Parámetros de antenas 10

2.3. Algoritmos Genéticos 13

2.4. Antena Yagi Uda 19

2.4.1. Método de los momentos de la ecuación integral de Pocklington para la antena Yagi Uda 22

2.4.2. Patrón del campo lejano 29

2.4.3. Procedimiento de Diseño 32

CAPÍTULO 3 35

DISEÑO Y SIMULACIÓN 35

3.1. Diseño mediante el método tradicional 35

3.1.1. Resultados 37

3.2. Diseño mediante el método de algoritmos genéticos 39

3.2.1. Resultados 45

3.3. Comparación y Análisis 47

CAPÍTULO 4 51

ANÁLISIS DE COSTOS 51

4.1. Costo de diseño y simulación 51

4.2. Costo de desarrollo del software 52

4.3. Costo total del proyecto 52

CONCLUSIONES 53

RECOMENDACIONES 55

LISTA DE REFERENCIAS 57

ANEXOS 60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Software de simulación 4NEC2 60

Anexo 2. 4NEC2X 60

Anexo 3. Método de los Momentos 62

Anexo 4. Código fuente software Matlab 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de radiación en coordenadas polares. 11

Figura 2. Diagrama de radiación en coordenadas planas 11

Figura 3. Diagrama de flujo del Algoritmo Genético..... 19

Figura 4. Configuración típica de una antena Yagi Uda 20

Figura 5. División de un dipolo en M segmentos. 26

Figura 6. Geometría de los elementos parásitos y el elemento activo de una antena Yagi Uda para la formulación del Método de los Momentos. 28

Figura 7. Posición de los dipolos y su separación entre segmentos 28

Figura 8. Curvas de diseño para determinar las longitudes de los elementos de las antenas Yagi-Uda. 33

Figura 9. Antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional y construida en el software de simulación de antenas 4NEC2. 37

Figura 10. Diagrama de ganancia e impedancia de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional obtenido en el software de simulación 4NEC2….37

Figura 11. Diagrama de radiación en coordenadas polares de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional obtenido en el software de simulación 4NEC2… 38

Figura 12. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional obtenido en el software de simulación 4NEC2… 38

Figura 13. Descripción grafica del método de selección por Ruleta. 41

Figura 14. Entrecruzamiento por un punto de corte 42

Figura 15. Selección del tamaño de la población, operadores genéticos y rangos de los elementos en el software 4NEC2X..... 43

Figura 16. Ejecución del algoritmo genético y parámetros obtenidos en el software 4NEC2X…… 44

Figura 17. Antena Yagi Uda de 12 elementos construida en el software de simulación de antenas 4NEC2. 45

Figura 18. Diagrama de ganancia e impedancia de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método de algoritmos genéticos obtenido en el software de simulación 4NEC2… 46

Figura 19. Diagrama de radiación en coordenadas polares de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método de algoritmos genéticos obtenido en el software de simulación 4NEC2..... 46

Figura 20. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método de algoritmos genéticos obtenido en el software de simulación 4NEC2..... 47

Figura 21. Comparación del diagrama de radiación de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional y método de algoritmos genéticos..... 48

Figura 22. Variables establecidas para el diseño de la antena Yagi Uda en el software 4NEC2X.. 60

Figura 23. Herramienta de evolución con Algoritmos Genéticos en el software 4NEC2X.. 61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Optimizado de longitudes no compensadas de los elementos parásitos de antenas Yagi Uda de seis diferentes longitudes. 34

Tabla 2. Rangos de longitudes y espaciamientos propuestos. 48

Tabla 3. Calculo de error entre los resultados obtenidos en la simulación realizada en el software 4NEC2 y los resultados teóricos expuestos en (Balanis, 2005) 49

Tabla 4. Comparación de los parámetros obtenidos por el diseño tradicional y por algoritmos genéticos para una antena Yagi Uda. 50

Tabla 5. Análisis comparativo de los resultados obtenidos por el diseño tradicional y por algoritmos genéticos para una antena Yagi Uda. 50

Tabla 6. Costos de diseño y simulación 51

Tabla 7. Costo de desarrollo de Software 52

Tabla 8. Costo total del proyecto 52

RESUMEN

En el escrito se presenta la optimización por el método de Algoritmos Genéticos, el diseño y la simulación de una antena Yagi Uda, para lo cual se investigó primeramente sobre las antenas, sus características físicas y los parámetros de radiación, también se investigó sobre la antena Yagi Uda, su geometría, sus parámetros de diseño, sus usos y aplicaciones, su importancia dentro del área de las telecomunicaciones, los elementos que la conforman, su función dentro de la geometría de la antena y el método tradicional de diseño basado en la frecuencia de trabajo de donde se obtendrá la longitud de onda y las dimensiones de los elementos de la antena en función de esta, luego se realiza la correspondiente simulación para poder obtener los parámetros de radiación que la caracterizan. Una vez que se diseñó la antena mediante el método tradicional se procedió a buscar información sobre los Algoritmos Genéticos y su aplicación al diseño y optimización de antenas, se analizó como los Algoritmos Genéticos pueden mejorar ciertos parámetros de radiación cambiando las longitudes y distancias de los elementos que forman parte de la geometría de una antena Yagi Uda, se procede a realizar el diseño de la antena mediante software estableciendo los operadores genéticos selección, cruzamiento y mutación para de esta manera obtener la mejor solución global posible, finalmente se procede a simular la antena diseñada mediante Algoritmos Genéticos para obtener sus parámetros de radiación. Con los resultados obtenidos en las simulaciones correspondientes a cada diseño se realiza el análisis comparativo de la antena diseñada por algoritmos genéticos con respecto a la antena diseñada por el método tradicional donde se obtiene como resultados la optimización de los parámetros de ganancia y directividad y un decremento en la relación frontal trasera.

ABSTRACT

In the writing optimization by the method of genetic algorithms, design and simulation of a Yagi Uda, for which it was investigated first on the antennas, their physical characteristics and parameters of radiation occurs, it was also investigated on antenna Yagi Uda, its geometry, its design parameters, its uses and applications, its importance in the telecommunications area, the elements that form, their function within the geometry of the antenna and the traditional design method based on frequency where working wavelength and the dimensions of the antenna elements according to this is obtained, then the corresponding simulation is performed to obtain the parameters that characterize radiation. Once the antenna is designed using the traditional method proceeded to search for information on Genetic Algorithms and their application to the design and optimization of antennas was analyzed as genetic algorithms can improve certain parameters of radiation by changing the lengths and distances of the elements part of the geometry of a Yagi Uda, is determined, the antenna design in software by setting the genetic operators selection, crossover and mutation to thereby obtain the best global solution finally were simulated antenna designed by genetic algorithms for radiation parameters. With the results of simulation corresponding to each design comparative analysis of the antenna designed by genetic algorithms with respect to the antenna designed by the traditional method where the optimization results obtained as parameters gain and directivity and a decrease is performed on the back facing relationship.

INTRODUCCIÓN

Actualmente las antenas Yagi Uda son muy utilizadas en el campo de las telecomunicaciones ya que permiten trabajar a diferentes frecuencias de transmisión y recepción de señales, para el diseño de una antena Yagi Uda se utiliza el método tradicional basado en la frecuencia de resonancia de la antena y por consecuencia la longitud de onda, este método ha logrado que a lo largo de los años sea usada en múltiples aplicaciones ya que permite obtener características de radiación importantes como alta directividad, alta relación frontal trasera y fácil acoplamiento de impedancias por lo que estas antenas han sido objeto de experimentación y análisis exhaustivos. Una de las características fundamentales en la transmisión de señales electromagnéticas es la eficiencia, la misma que en las antenas Yagi Uda está estrictamente ligada a sus dimensiones físicas lo que brinda la posibilidad de realizar mejoras y optimizaciones. La aplicación de métodos numéricos (método de los momentos, métodos modales, etc.) así como los avances en sistemas computacionales y técnicas de programación (algoritmos evolutivos, optimización, etc.) ha permitido obtener mejoras en el desempeño de las antenas Yagi Uda, uno de estos métodos se lo conoce como Algoritmos Genéticos ya que se basa en la teoría evolucionista de Darwin, los principios en los que se basan los algoritmos genéticos son simples, en primer lugar la selección privilegia a los individuos más aptos dentro de una población, los mismos que tendrán mayor probabilidad de reproducirse, los individuos con mayor descendencia tienen mayor probabilidad de transmitir su código genético a las demás generaciones. Por tal razón el objetivo principal de la presente proyecto de grado es investigar la aplicación de los algoritmos genéticos al diseño de antenas específicamente de la antena Yagi Uda y mediante la herramienta de procesamiento de algoritmos genéticos del software de cálculo matemático y simulación de antenas 4NEC2 encontrar la distribución física para la antena Yagi Uda que muestre los mejores parámetros de radiación para una frecuencia de trabajo determinada. Para ello se define el espacio de búsqueda, los operadores genéticos, la función objetivo y las restricciones físicas establecidas en investigaciones expuestas en (Balanis, 2005).

En este proyecto se abarcan temas referentes a las antenas en general, antenas Yagi Uda, Algoritmos Genéticos y su aplicación al diseño de antenas. Para facilitar la

disposición de la información correspondiente a cada tema, los contenidos del presente documento se encuentran organizados en cuatro capítulos:

- En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema donde se analiza el problema que se debe resolver, los objetivos planteados y las metas que se propone alcanzar, la justificación donde se analiza la importancia de este proyecto y su alcance, finalmente se estudia la metodología de investigación que será utilizada para el diseño y desarrollo de este proyecto.

- En el segundo capítulo se analizará el estado del arte obtenido de la investigación de artículos científicos afines al tema del presente proyecto, además se presenta los fundamentos teóricos sobre antenas, parámetros de radiación de las antenas, antenas Yagi Uda, conceptos y términos utilizados en Algoritmos Genéticos, métodos en los que se basa el diseño y simulación de las antenas Yagi Uda tanto por el método tradicional como por Algoritmos Genéticos.

- En el tercer capítulo se presenta el diseño de la antena Yagi Uda mediante el método tradicional basado en la frecuencia de oscilación (longitud de onda) y el método de Algoritmos Genéticos basado en la generación de una población inicial, la misma que mediante operadores genéticos evolucionará hasta obtener la mejor solución posible. Una vez obtenidos los diseños se procederá a simularlos mediante el software 4NEC2 donde se obtendrá los parámetros de radiación de cada antena para finalmente realizar un análisis comparativo entre ambas antenas.

- En el cuarto capítulo se presenta el análisis de costos del proyecto, evaluado en base al costo del software utilizado, el costo por hora del tiempo empleado en el desarrollo de los diseños de la antena Yagi Uda por el método tradicional y el método de Algoritmos Genéticos así como el tiempo empleado en la programación, simulación de las antenas y la obtención de resultados.

- Además esta monografía incluye conclusiones, recomendaciones, referencia bibliográfica y anexos.

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se analiza el problema que se debe resolver, la hipótesis planteada para el desarrollo del mismo, como consecuencia de ello objetivos, justificación y alcance del proyecto y finalmente se estudia la metodología de investigación para el diseño y desarrollo de este proyecto.

1.1. Problema a resolver

Una antena Yagi Uda es usada para transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia, esta antena puede variar sus parámetros de ganancia, ancho de banda y directividad dependiendo de los elementos parásitos que se introduzcan en su diseño, mientras más elementos parásitos se tenga la ganancia aumentará pero disminuirá la impedancia de entrada. La optimización de este tipo de antena es difícil ya que no se puede mejorar uno de sus parámetros de radiación sin afectar a los demás. Se presentará un sistema basado en Algoritmos Genéticos con el cual se pretende perfeccionar todos los parámetros de radiación de la antena o la mayoría de estos tratando de afectar lo menos posible a los demás, dada la importancia de la ganancia dentro de la antena se enfatizará en este parámetro para el proceso de evolución dentro de los Algoritmos Genéticos.

¿Cómo se puede optimizar los parámetros de radiación deseados para una antena Yagi Uda sin afectar su desempeño general?

1.2. Hipótesis tesis

La hipótesis es la siguiente:

Es posible optimizar los parámetros de radiación de una antena Yagi-Uda mediante la aplicación de la teoría de Algoritmos Genéticos al diseño de antenas.

1.3. Objetivos

A continuación se describen el objetivo general y los objetivos específicos de este proyecto.

1.3.1. Objetivo general

Diseñar una antena Yagi Uda mediante el uso de Algoritmos Genéticos y simularla mediante software de simulación especializado en antenas.

1.3.2. Objetivos específicos

Analizar la información bibliográfica con respecto a los Algoritmos Genéticos.

Aplicar los Algoritmos Genéticos como método de optimización en el diseño de antenas.

Diseñar una antena Yagi Uda por el método tradicional.

Simular una antena Yagi Uda diseñada por el método tradicional.

Diseñar una antena Yagi Uda mediante Algoritmos Genéticos.

Simular una antena Yagi Uda diseñada por Algoritmos Genéticos.

Analizar el patrón de radiación, ganancia y directividad obtenidos en las simulaciones tanto de una antena Yagi Uda diseñada por Algoritmos Genéticos como de una diseñada por el método tradicional.

1.4. Justificación

En la actualidad se están usando nuevas herramientas para resolución de problemas con modelos basados en sistemas biológicos tales como las Redes Neuronales y los Algoritmos Genéticos. Los Algoritmos Genéticos son una técnica de búsqueda que ayuda a una formulación matemática y precisa del problema, como un método de optimización son una herramienta poderosa y eficaz para resolver problemas complejos, siempre impulsados a encontrar una solución óptima, incluso un conjunto de soluciones pueden evolucionar y generar una solución global bajo la presión selectiva de la función de aptitud que no es más que valorar a los individuos de una

población, una vez realizada la selección se realizará la combinación o cruce y la mutación que producirá los individuos de la siguiente generación.

Este proyecto tiene por finalidad obtener una base sólida para el estudio de los Algoritmos Genéticos y su aplicación al diseño de antenas. Para esta investigación se enfatizará en la antena Yagi Uda debido a las diversas aplicaciones que tiene dentro del área de las Telecomunicaciones tales como transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia en las bandas de VHF y UHF, así también su uso como repetidores en las bandas de telefonía celular en 800 y 1900 MHz, adicional dependiendo de la longitud de la antena, del número de elementos y la distancia entre estos es posible alterar los parámetros de ganancia, directividad y ancho de banda de la antena, por estas características la antena Yagi Uda será motivo de esta investigación.

Además se obtendrá información acerca de cómo pueden cambiar los parámetros de radiación, ganancia y directividad en una antena Yagi Uda al ser diseñada mediante el método de Algoritmos Genéticos y compararla con una antena Yagi Uda diseñada por el método tradicional. Los resultados de esta investigación servirán a su vez para obtener material de apoyo para el aprendizaje de los estudiantes de la carrera.

1.5. Alcances

Este proyecto realiza lo siguiente:

- Se realizará el diseño de una antena Yagi Uda por el método tradicional.
- Se realizará el diseño de una antena Yagi Uda por el método de algoritmos genéticos.
- Se simulará la antena Yagi Uda diseñada por el método tradicional y por el método de algoritmos genéticos mediante el uso del software de simulación de antenas 4NEC2.
- Se realizará el análisis comparativo de los resultados obtenidos en ambas simulaciones.

Este proyecto no realiza lo siguiente:

- No se crea un software de simulación, se usará uno existente.
- No se construirá las antenas diseñadas por los distintos métodos, se realizará la simulación mediante software.

1.6. Metodología de la investigación

En este subcapítulo se detallarán los pasos que se han planteado para la realización del presente proyecto comenzando por la investigación bibliográfica, seguida del diseño de las antenas, y finalmente la simulación, análisis y documentación del proyecto.

1.6.1. Investigación bibliográfica

Se realizará una investigación sobre las antenas, sus características y parámetros básicos, se enfatizará en los parámetros de radiación de la antena Yagi Uda así como en el método tradicional usado para diseñar este tipo de antena que es la base de este proyecto.

Se investigará también sobre los Algoritmos Genéticos, definiciones, conceptos básicos, tipos de Algoritmos Genéticos y su aplicación al diseño de antenas, para lo cual se indagará sobre los operadores que lo conforman y como se debe aplicar al diseño de la antena Yagi Uda.

Finalmente se investigará sobre el software de simulación 4NEC2, sus funciones y características, adicional se recopilará la información necesaria para el uso de las herramientas que brinda este software y de esta manera graficar la Antena Yagi Uda y como obtener los resultados requeridos para este proyecto en dicho simulador.

1.6.2. Diseño

Se diseñará una antena Yagi Uda para trabajar con una frecuencia central de 187 MHz, ésta frecuencia a sido seleccionada para facilitar el diseño mediante la información proporcionada por (Balanis, 2005) como se muestra en la tabla 1, en la cual se cuenta con las longitudes, distancias, número de directores y los valores de directividad de los diseños del cual se obtiene un punto de partida fiable para los procesos de optimización que se aplicarán en el transcurso del proyecto. Dicha antena será diseñada mediante el método tradicional el mismo que se basa en la frecuencia de operación, obteniendo así la longitud de onda de la señal transmitida y bajo ciertos parámetros ya establecidos se calcula la dimensión de cada uno de sus elementos así como la distancia entre ellos.

Una vez realizado el diseño de la antena Yagi Uda mediante el método tradicional se procederá a realizar el diseño mediante el método de Algoritmos Genéticos.

1.6.3. Simulación

Se realizará la simulación de la antena Yagi Uda diseñada mediante el método tradicional y la diseñada mediante el método de Algoritmos Genéticos, dicha simulación se la realizará en el Software de simulación 4NEC2, el mismo que mostrará los parámetros correspondientes a cada diseño, lo que permitirá realizar el análisis comparativo de cada antena.

1.6.4. Documentación

Se escribirá el texto de la monografía correspondiente al presente proyecto de investigación, cuyo tema es el diseño y simulación de una antena Yagi Uda mediante el método de Algoritmos Genéticos.

Aquí se describirán todos y cada uno de los elementos que formarán parte del presente proyecto, por ejemplo: los diseños realizados por el método tradicional, el diseño por el método de Algoritmos Genéticos y los resultados obtenidos mediante el software de simulación.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se analizará el estado del arte de artículos afines al tema del presente proyecto, además se presentarán los fundamentos teóricos en los que se basa el diseño y simulación de las antenas Yagi Uda tanto por el método tradicional como por Algoritmos Genéticos.

2.1. Estado del Arte

En la actualidad existen artículos publicados en la red cuyos fundamentos teóricos contribuyen al desarrollo de este proyecto, varios de estos tratan sobre los algoritmos genéticos y su aplicación al diseño de varias antenas entre ellas la antena Yagi Uda que será objeto de estudio, a continuación se mencionará algunos de estos artículos.

El artículo mencionado a continuación aporta en la parte introductoria del presente proyecto mostrándonos la importancia y las ventajas del uso de métodos de diseño de antenas como lo son los Algoritmos Genéticos. Los métodos tradicionales de diseño y optimización son útiles, pero debido a que los espacios de búsqueda de incluso antenas simples son complejos, la estimación inicial debe estar cerca del diseño final, por lo que estos métodos tienen una utilidad limitada. Los algoritmos genéticos son capaces no sólo de optimizar el rendimiento de los diseños de antena existentes, sino también de crear nuevos tipos de antenas. Al usar un algoritmo genético es posible preestablecer el rendimiento deseado de una antena y permitir que el mismo evolucione hasta encontrar los parámetros para el diseño que satisfaga los parámetros esperados. Los algoritmos genéticos ni siquiera requieren una estimación inicial, la cantidad de información sobre el diseño que se debe suministrar para obtener un buen resultado es mínima, la mayoría de las optimizaciones de antenas empiezan con un diseño convencional y el algoritmo genético encuentra los parámetros óptimos basados en las características convencionales, por ejemplo, una antena Yagi Uda puede ser optimizada para la máxima ganancia, este enfoque es, sin duda útil, ya que incluso los problemas convencionales son difíciles de optimizar con la mayoría de otros métodos y los diseños optimizados resultantes serán a menudo mejor que cualquier otro encontrado previamente. (Linden, 2002)

Un importante aporte en la aplicación de los algoritmos genéticos al diseño de antenas está dado por el siguiente artículo en el que se usa este método para el diseño de una antena de banda ancha tipo parche en la cual la optimización mediante algoritmos genéticos ha dado un gran potencial en la búsqueda de soluciones no convencionales dentro del ámbito de antenas y electromagnetismo, en este artículo se puede evidenciar las ventajas de la aplicación de este método y los beneficios obtenidos para las antenas de parche. Para el diseño de la antena procedieron con el uso previo de sub-parches en las implementaciones de los algoritmos genéticos, para la placa de referencia de esta antena lo realizan mediante el parámetro de barrido clásico, mientras que para los datos que se procesaran mediante algoritmos genéticos, las dimensiones del sustrato, el plano de tierra y la línea de alimentación serán los mismos. La placa rectangular se sustituye por un conjunto de células de elementos metálicos de 8mmx8mm. Las células se colocan en posiciones dadas por el algoritmo genético y cada elemento metálico del parche radiante se puede cambiar de estado activar o desactivar. Todo el parche se codifica en una cadena de 64 bits los mismos que representan un cromosoma, por lo tanto, existen 264 parches diferentes en el espacio de búsqueda. El proceso de los algoritmos genéticos comienzan con una población de parches generados al azar y, a continuación se modifica la forma de los parches a través de la selección, cruce y mutación de acuerdo a su rendimiento. Para la implementación de los algoritmos genéticos se hace uso del software Matlab y el rendimiento de cada parche generado por el algoritmo genético se evalúa utilizando CST Microwave Studio, el tamaño de la población se establece en 40 y se desarrolló más de 20 generaciones cuyos valores convergen a un máximo de 8,70 GHz, es decir, con la técnica de optimización basada en algoritmos genéticos, el ancho de banda se ha mejorado en un 63 % sobre el parche diseñado con el método tradicional. (Matthias & Max , 2006)

La aplicación de los algoritmos genéticos para el diseño de una antena Yagi-Uda se detalla en el siguiente artículo.

El algoritmo genético se encuentra implementado en el software Direct Pro, la población inicial está compuesta de 128 cromosomas con 11 genes por cromosoma, los genes que conforman cada cromosoma son longitudes y espaciamientos de la antena Yagi Uda, los rangos de estos genes fueron escogidos por estándares de diseño

de este tipo de antenas. Los genes mencionados son sometidos a un proceso de análisis, el mismo que evaluó cada antena de cada una de las generaciones provenientes del algoritmo genético, para posteriormente asignar las aptitudes de los individuos, para las longitudes del elemento reflector y activo se utilizó un rango de 0.3λ a 0.9λ, para los directores y los espaciamientos se utilizó un rango de 0.1λ a 0.6λ, después de analizar cada una de las antenas de la generación inicial, sus parámetros son evaluados por la función objetivo, el individuo que tenga mayor función objetivo es al que se le será asignada mayor aptitud, después de que los individuos son sometidos al proceso de selección, la información genética de cada cromosoma es codificada, en este caso se codificó con números reales. Luego se realiza el cruzamiento por un punto donde se intercambian las colas entre los dos individuos para generar los nuevos descendientes de esta manera ambos descendientes heredan información genética de los padres, después de realizados los cruzamientos se aplica un proceso de mutación en el cual se mantiene la variedad de las poblaciones alterando las características hereditarias (cambios en la información genética de los cromosomas), después del proceso de mutación los individuos son organizados en una nueva población, este proceso se realiza 50 veces, que es el número de generaciones diseñado para que el algoritmo genético converja, una vez obtenidos ambos diseños mediante el método tradicional y el método de los algoritmos genéticos los resultados obtenidos son los esperados donde, se valida la eficacia del método de optimización utilizado para mejorar la ganancia de las antenas Yagi Uda. (De La Asunción López, Zurek Varela, Ripoll Solano, & Hernández Cantillo, 2009)

2.2. Parámetros de antenas

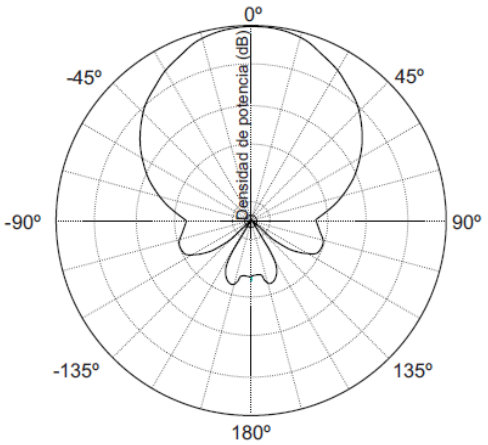
Diagrama de radiación

Según (Balanis, 2005) el diagrama de radiación de una antena se define como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena como una función de las coordenadas espaciales.

Dichas propiedades del diagrama de radiación incluyen la densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, la intensidad de campo, directividad, polarización, la propiedad de radiación de mayor preocupación es la distribución espacial de la energía

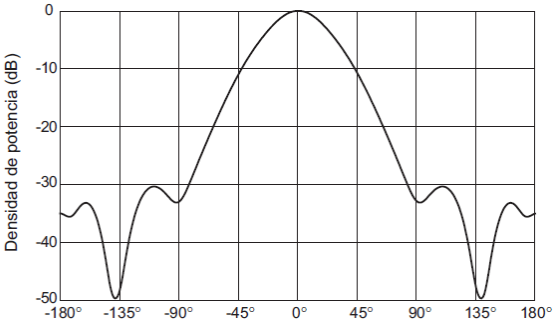
radiada como una función de la posición del observador a lo largo de un camino o superficie de radio constante. (Anguera & Pérez, 2008)

Figura 1. Diagrama de radiación en coordenadas polares.



Fuente: (Cardama Aznar, Romeu Robert, Rius Casals, Jofre Roca, & Ferrando Bataller, 2002)

Figura 2. Diagrama de radiación en coordenadas planas.



Fuente: (Cardama Aznar et al. 2002)

Ganancia

La ganancia de una antena se define como la relación de la intensidad radiada en una dirección dada, a la intensidad de la radiación que se obtendría si la energía entregada a la antena se irradiaba mediante una antena isotrópica. La intensidad de la radiación correspondiente a la potencia isotrópica radiada es igual a la potencia entregada a la antena dividida por 4π (Balanis, 2005).

Directividad

La directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esta misma distancia una antena isotrópica con la misma potencia que la antena transmisora. (Anguera & Pérez, 2008)

También se la puede definir como la relación de la intensidad de radiación en una dirección dada de la antena con la intensidad de radiación media de la antena en todas las direcciones. La intensidad media de radiación es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π. (Balanis, 2005)

Polaridad

La polarización de una onda radiada se define como la propiedad de una onda electromagnética que describe la dirección variable en el tiempo y la magnitud relativa del vector de campo eléctrico, en concreto, la figura trazada como una función del tiempo mediante la extremidad del vector en una ubicación fija en el espacio, y el sentido en el que se traza, como se observa a lo largo de la dirección de propagación. (Balanis, 2005)

Según (Torres Quijije, 2004) la polaridad está dada por la posición de la antena con respecto a la tierra, por lo que, si la antena se encuentra paralela a la tierra radiara horizontalmente y si se encuentra en ángulo recto con respecto a la tierra radiara verticalmente.

Ancho de Banda

El ancho de banda de una antena se define como la gama de frecuencias dentro de la cual el rendimiento de la antena, con respecto a alguna característica, se ajusta a un estándar especificado. El ancho de banda puede ser considerado como la gama de frecuencias, a cada lado de una frecuencia central (por lo general la frecuencia de resonancia para un dipolo), donde las características de antena (tales como impedancia de entrada, patrón, ancho del haz, la polarización, el nivel de lóbulo lateral, la ganancia, la dirección del haz, la eficiencia de radiación) se encuentran dentro de un valor aceptable de los que están en la frecuencia central, por ejemplo, para antenas de

banda estrecha, el ancho de banda se expresa como un porcentaje de la diferencia de frecuencia (superior menos inferior) sobre la frecuencia central del ancho de banda, en este caso un ancho de banda de 5% indica que la diferencia de frecuencia de operación aceptable es 5% de la frecuencia central del ancho de banda. (Balanis, 2005)

Impedancia

La impedancia en un punto específico de la antena está directamente relacionada con el valor de corriente y voltaje en dicho punto, por lo que la impedancia de entrada se define como la impedancia presentada por una antena en sus terminales o la relación de la tensión a corriente en un par de terminales. (Balanis, 2005)

2.3. Algoritmos Genéticos

En este subcapítulo se describe los conceptos, parámetros y operadores que conforman los Algoritmos Genéticos.

Los Algoritmos genéticos son técnicas de búsqueda y optimización inspiradas en el proceso evolutivo de Darwin de selección natural y evolución genética. Los Algoritmos Genéticos como método de optimización constituyen una gran herramienta que permite resolver problemas complejos ya que nos permite obtener la mejor solución global posible. Dentro de los Algoritmos Genéticos una población de soluciones puede evolucionar y brindar una solución global óptima. (Torres Quijije, 2004)

Los algoritmos genéticos se sustentan en dos procesos fundamentales, la representación de las soluciones del problema, los mismos que pueden ser representados como números binarios, naturales o reales; y la ejecución de una serie de operadores inspirados en la teoría de la evolución y en las leyes de la genética con el objetivo de ir mejorando las poblaciones. A breves rasgos los algoritmos genéticos comienzan con un grupo aleatorio de soluciones lo que será denominado como población. Luego, mediante el uso de los operadores genéticos como cruzamiento y mutación, la población va generando descendencia. Posteriormente, se califican las características de cada solución con respecto a la función objetivo que servirá para cuantificar su costo y determinar así su calidad, las soluciones con mayor calidad compiten en un proceso de selección. Finalmente, las soluciones sobrevivientes

quedan como los padres de la siguiente generación y el proceso se repite. (Velásquez Silva, 2013)

2.3.1. Términos empleados en Algoritmos Genéticos

Los términos más usados dentro de la optimización mediante Algoritmos Genéticos son los siguientes:

Genes

El gen es la base del Algoritmo Genético que no es más que una representación codificada de los parámetros de optimización de un individuo. En los algoritmos genéticos las secuencias están compuestas de caracteres, que toman diferentes valores, en el diseño de antenas se puede considerar un gen como un parámetro de la antena tal como el ancho de una capa de substrato, o la longitud de la antena, etc. (Torres Quijije, 2004)

Cromosomas

Un cromosoma es definido como un cordón de genes los mismos que pueden ser codificados como arreglos binarios, números reales o combinaciones de estos dos. (Torres Quijije, 2004)

Población y Generaciones

Una población es un conjunto de cromosomas, la población es la unidad que usa un Algoritmo Genético para hallar una solución óptima. Generación es el término que se utiliza para nombrar a las iteraciones de los Algoritmos Genéticos. (Torres Quijije, 2004)

Padres

En el proceso de optimización se selecciona un par de individuos que pueden ser reemplazados a los cuales se denomina padres. Para seleccionar a los padres se realiza un proceso de importancia probabilística denominada Aptitud. (Torres Quijije, 2004)

Niños

Llamada también descendencia, es el producto de usar operadores genéticos tales como el cruzamiento o recombinación de la información genética de los padres. La recombinación y la selección son dos operaciones fundamentales dentro de la evolución en los Algoritmos Genéticos. (Torres Quijije, 2004)

Mutación

La mutación es un término que hace referencia a la selección agresiva, y que se puede definir como la introducción de material genético que no se encuentra dentro de la población actual. Este método permite evitar las convergencias prematuras de posibles soluciones globales. (Torres Quijije, 2004)

Aptitud

Es una función objetiva que no hace más que definir la meta de la optimización, su función es asignar un valor cuantificable a cada miembro de la población y así acercarse a la posible solución. (Torres Quijije, 2004)

Optimización Local y Global

Según (Velásquez Silva, 2013) se denomina óptimo global a aquel valor más alto, o más bajo dependiendo del caso, que se genera al evaluar los resultados de la población inicial de soluciones bajo una función objetivo y se denomina óptimo local a aquel valor que en su contorno llega a ser el más alto, sin llegar a ser necesariamente un óptimo global de toda la población de soluciones.

Los algoritmos genéticos pueden clasificarse en optimización global y local, la diferencia entre estas técnicas es que en la optimización local son muy dependientes de empezar en un punto específico o suposición inicial mientras que la optimización global es independiente de las condiciones iniciales. (Torres Quijije, 2004)

2.3.2. Desarrollo del Algoritmo Genético

Según (Haupt & Werner, 2007) la información ingresada a la función objetivo y que será objeto de la optimización por este método se denominará cromosoma, el resultado obtenido de la función objetivo es conocida como el costo. Cada cromosoma está

conformado por genes (variables individuales) y un conjunto de cromosomas se lo conoce como población. En este caso se puede representar una población como una matriz en las cuales cada fila corresponde a un cromosoma, cada cromosoma es ingresado a una función objetivo f, el costo asociado a cada cromosoma es calculado por la función objetivo. Este costo determina la aptitud de cada individuo en la población, un bajo costo implica una mayor aptitud.

Los algoritmos genéticos trabajan únicamente con números, pero variables no numéricas como colores se les puede asignar un valor numérico y de esta manera usar los algoritmos genéticos como método de optimización. Estos valores numéricos se los pueden codificar con números binarios o reales para así formar un gen, se debe tener en cuenta que la codificación con números reales implica un número infinito de posibles combinaciones de entrada mientras que la codificación binaria ofrece una cantidad finita.

Para el desarrollo del algoritmo se deben seguir los siguientes pasos:

- Crear una población inicial.
- Evaluar la aptitud de cada miembro de la población.
- Ejecutar la selección natural.
- Seleccionar los miembros de la población que se reproducirán.
- Generar descendencia.
- Seleccionar los miembros que mutaran dentro de la población.
- Repetir el proceso hasta satisfacer la función objetivo.

Representación de las soluciones

Antes de implementar un Algoritmo Genético, resulta fundamental establecer una adecuada representación de las soluciones. Esta representación debe contener toda la información relevante de cada solución. Así, cada variable de decisión constituiría un gen, mientras que cada solución correspondería a un cromosoma. “En general, una representación ha de ser capaz de identificar las características constituyentes de un conjunto de soluciones, de forma que distintas representaciones den lugar a distintas perspectivas y por tanto distintas soluciones.” (Velásquez Silva, 2013)

Generación de la población inicial

El primer paso es generar una población inicial de soluciones sobre la cual empezar a aplicar los operadores de los algoritmos genéticos. Esta población en la mayoría de los casos se la genera aleatoriamente, aunque en ocasiones se incluyen soluciones con cierta información en particular con la finalidad de obtener una convergencia más rápida, pero se corre el riesgo de perder diversidad en la población.

Es muy importante generar la población inicial con la suficiente diversidad, esto permitirá al algoritmo genético explorar zonas más amplias dentro del espacio de búsqueda y de esta manera se puede obtener soluciones globales y evitar la convergencia prematura. (Velásquez Silva, 2013)

Selección natural

Para poder efectuar la comparación de dos o más soluciones debe introducirse una forma de evaluarlas, para ello se debe establecer la función objetivo que es el parámetro con el cual se evaluará la calidad de cada una de las soluciones obtenidas, adicional en caso de ser necesario se deberá establecer restricciones y penalizaciones para de esta manera eliminar a las soluciones menos aptas de acuerdo a la función objetivo. Al realizar la evaluación de cada solución se le establece un valor cuantificable denominado costo, el costo establecerá la calidad de la solución evaluada, de esta manera las poblaciones quedan formadas principalmente por soluciones factibles de alta calidad. (Velásquez Silva, 2013)

Recombinación y cruce

Cruce es la operación genética más importante, corresponde a mezclar la información contenida en los cromosomas de dos soluciones de una población. Con el transcurrir de las generaciones, este operador genético permite rescatar las mejores partes de cada solución. Usando exclusivamente el cruzamiento, para una cantidad infinita de generaciones la población convergería en un solo individuo. Para seleccionar a las soluciones progenitoras, existen varios métodos dentro de los algoritmos genéticos, entre los más utilizados está el método de la rueda de ruleta y la selección por torneo, el primer método consiste en asignar a cada solución una probabilidad de ser elegido padre proporcional a su índice de calidad, mientras que la selección por torneo

consiste en elegir más de dos padres y seleccionar sólo a los dos mejores para que se crucen. (Velásquez Silva, 2013)

Mutación

El operador de mutación realiza modificaciones aleatorias, de esta forma, la mutación aporta diversidad en la población de soluciones, permitiendo una exploración más completa del espacio de búsqueda. El objetivo principal para usar este operador es prevenir la pérdida permanente de un bit, o variable, y así evitar la convergencia prematura. El operador de mutación más sencillo corresponde a cambiar, con una determinada probabilidad, el valor de un bit en caso de que la representación sea binaria. (Velásquez Silva, 2013)

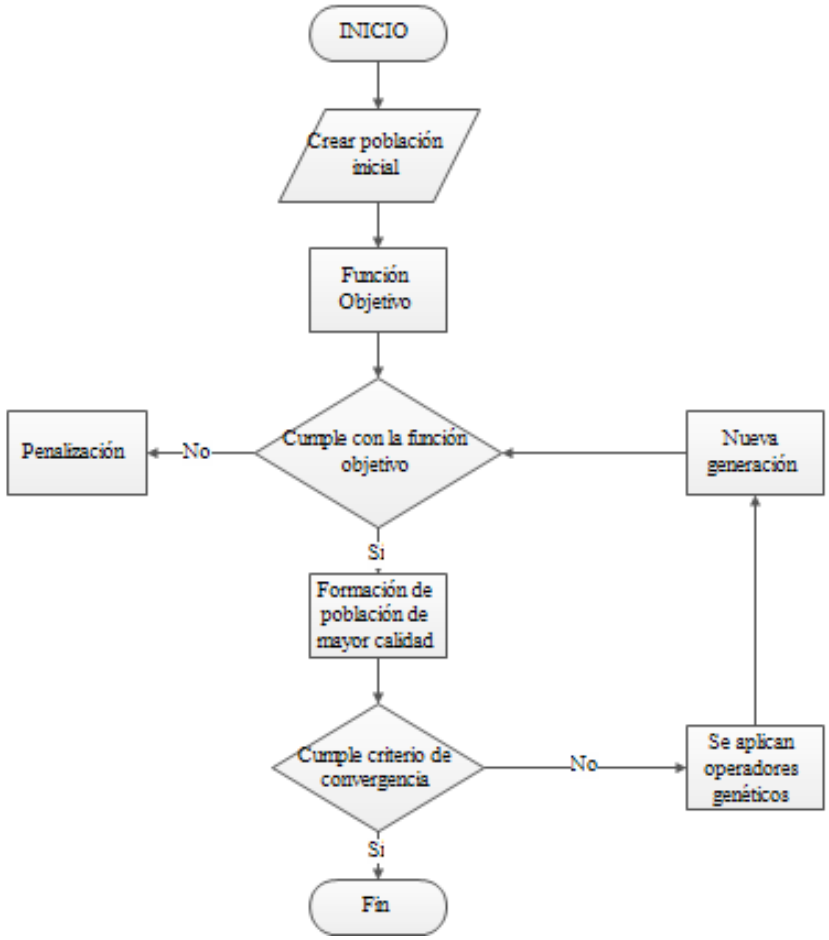
Criterio de convergencia

Se tiene que para un número lo suficientemente grande de iteraciones (generaciones), se espera que el algoritmo converja de modo tal que los elementos de la población sean muy similares entre sí. Para determinar la convergencia o no convergencia de un algoritmo genético se suelen usar las siguientes convenciones:

- Un gen o bit ha convergido cuando el 95% de la población comparte el mismo valor.
- Una población ha convergido cuando todos los genes han convergido.

El análisis de la convergencia del algoritmo puede conducir a la ejecución del operador de refresco para evitar la convergencia prematura o bien a la finalización del algoritmo si el resultado obtenido es satisfactorio. Sin embargo, es práctica común terminar el algoritmo para un número fijo de generaciones, el cual se decide en base al tamaño del espacio de búsqueda y a la rapidez de convergencia. (Velásquez Silva, 2013)

Figura 3. Diagrama de flujo del Algoritmo Genético.



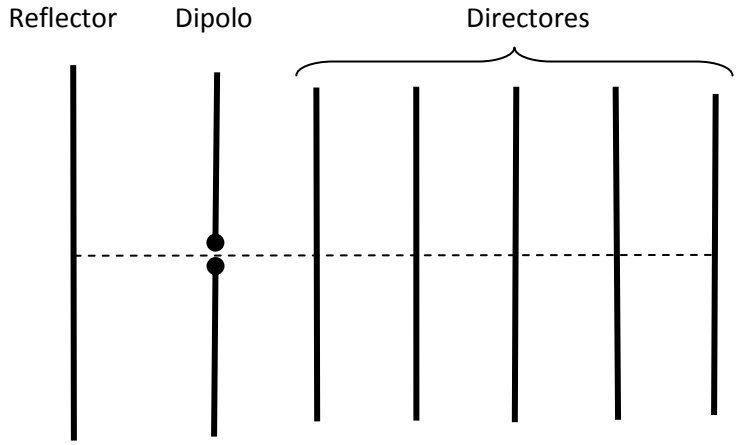
Elaborado por: Oscar Ayala

2.4. Antena Yagi Uda

Este tipo de antena es muy utilizada en aplicaciones de radiodifusión de televisión, estaciones para radio aficionados y enlaces punto a punto que operen dentro de las frecuencias HF (3 – 30 MHz), VHF (30 – 300 MHz) y UHF (300 – 3000 MHz). Estas antenas están conformadas por elementos paralelos conocidos como dipolos, de los cuales uno de ellos es directamente excitado por una línea de transmisión de alimentación mientras que los demás elementos actúan como radiadores parásitos cuyas corrientes son inducidas por acoplamiento mutuo. Al elemento excitado se lo conoce como dipolo activo o radiador, los demás elementos son conocidos como parásitos y que al colocarse en la parte frontal del dipolo tendrán la función de directores mientras los que se encuentran en la parte posterior funcionaran como reflectores.

La configuración más conocida consiste en un elemento activo, un reflector y entre uno y 10 directores como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Configuración típica de una antena Yagi Uda



Fuente: (Cardama Aznar, Romeu Robert, Rius Casals, Jofre Roca, & Ferrando Bataller, 2002)

El elemento resonante (alimentador)

Es el corazón de la antena, en su diseño se determina la polarización y la frecuencia central en la que trabajará la antena. Para un dipolo, la longitud recomendada es de aproximadamente 0.47λ para asegurar una buena impedancia de entrada a una línea 50 ohm de alimentación. (Huang & Boyle, 2008)

El reflector

Ligeramente más largo que el elemento resonante impulsado para forzar a la energía radiada hacia la parte delantera. La separación óptima entre el reflector y el elemento accionado es entre 0,15λ y 0,25λ. La longitud del reflector tiene un gran efecto en la relación frontal trasera y en la impedancia de entrada de antena. (Huang & Boyle, 2008)

Los directores

Por lo general de 10 a 20% más cortos que el elemento resonante, dirigen la radiación hacia la parte delantera. El espaciamiento entre directores esta típicamente entre 0.25λ y 0.35λ, con mayor espacio para las matrices más largas y menor espacio para arreglos más cortos.

La antena Yagi Uda además de su diseño simplificado ofrece un gran desempeño fundamentado en la directividad que puede alcanzar con niveles de impedancia que se pueden adaptar con relativa facilidad a la banda angosta. (Anguera & Pérez, 2008)

Según (Balanis, 2005) para obtener un haz en la dirección del eje de la antena Yagi Uda, los elementos parásitos deben ser de menor longitud que el elemento radiante, normalmente la longitud del elemento radiante es ligeramente inferior a $\lambda/2$, por lo general varía entre $0.45\lambda - 0.49\lambda$, por consiguiente los elementos directores tendrán una longitud considerada entre $0.4\lambda - 0.45\lambda$, cabe mencionar que la longitud de los directores no necesariamente será la misma para todos. La separación entre los directores es típicamente $0,3\lambda$ - 0.4λ, y no es necesariamente uniforme para diseños óptimos, la longitud del reflector es ligeramente mayor que la del radiador y varía entre $0.49\lambda - 0.55\lambda$. Además, la separación entre el elemento activo y el reflector es algo más pequeño que el espacio entre el elemento activo y el primer director, teóricamente la separación óptima es de 0.25λ.

Dado que la longitud de cada director es menor a la longitud del elemento activo, la impedancia de cada uno es capacitiva por lo cual conduce la frecuencia de la señal inducida, de la misma manera la impedancia del reflector es inductiva y las fases de las corrientes se quedan en las fuerzas electromagnéticas inducidas. La eliminación total de las corrientes en los directores y los reflectores no está determinado únicamente por su longitud, sino también por su separación de los elementos adyacentes, por lo tanto, los elementos espaciados adecuadamente con longitudes ligeramente menor a la longitud del elemento activo actúan como directores debido a que forman una matriz con corrientes aproximadamente iguales en magnitud y con desplazamientos de fase progresivos los mismos que reforzarán el campo del elemento activo hacia los directores.

Según lo expuesto en (Balanis, 2005) la distancia y el tamaño del reflector tiene efectos insignificantes en la ganancia directa pero tiene grandes efectos sobre la relación de frontal trasera y la impedancia de entrada. La longitud del alimentador y el radio tiene un pequeño efecto sobre la ganancia hacia delante, pero un gran efecto sobre la ganancia hacia atrás y la impedancia de entrada. Su geometría se elige generalmente para controlar la impedancia de entrada que más comúnmente se hace real (elemento resonante). El tamaño y el espaciamiento de los directores tienen un

gran efecto sobre la ganancia hacia adelante, la ganancia hacia atrás y la impedancia de entrada, y se considera que son los elementos más críticos de la matriz.

El principio operacional de esta antena se basa en su configuración especial (reflector largo y directores cortos). La radiación en la parte trasera parece estar bloqueada y reflejada por el elemento reflector, pero no sólo por este último, también el director produce efectos en la radiación. Las corrientes inducidas se generan en los elementos parásitos y forman una estructura de onda que viaja a la frecuencia deseada. (Huang & Boyle, 2008)

Las principales características de la antena Yagi Uda son las siguientes:

- Ganancia relativa en comparación al dipolo en λ/2 entre 5 dB y 18 dB
- Relación frontal trasera entre 5 dB y 15 dB.
- Impedancia de entrada de unos 300 ohmios, por lo que es necesario el uso de un adaptador de impedancias para poder conectarlas a los cables coaxiales de 50 y 75 Ω. (Cardama Aznar et al. 2002)

2.4.1. Método de los momentos de la ecuación integral de Pocklington para la antena Yagi Uda

El método de la ecuación integral de Pocklington calcula el campo eléctrico radiado por los elementos en la antena Yagi Uda, y determina los corrientes de cada dipolo a partir del campo computado. La distribución de los elementos que componen la antena Yagi Uda se mostró en la figura 4. El presente desarrollo de ecuaciones es realizado en (Balanis, 2005). A partir de la ecuación 1 para el campo total generado por una fuente de corriente radiando en el espacio libre:

(1)

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z')\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}+k^2\right)\frac{e^{-jkR}}{R}dz' = j4\pi\omega\epsilon_o E_z^t$$

Donde

(2)

$$R = \sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}$$

Desde

(3)

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right) = \left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)$$

La ecuación 1 reduce a:

(4)

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z')\frac{\partial^2}{\partial z^2}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)dz' + k^2\int_{-l/2}^{+l/2} I(z')\frac{e^{-jkR}}{R}dz' = j4\pi\omega\epsilon_o E_z^t$$

La primera integral de la ecuación 1 se resuelve:

(5)

$$u = I(z')$$

(6)

$$du = \frac{dI(z')}{dz'}dz'$$

(7)

$$dv = \frac{\partial^2}{\partial z'^2}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)dz' = \frac{\partial}{\partial z'}\left[\frac{\partial}{\partial z'}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)\right]dz'$$

(8)

$$v = \frac{\partial}{\partial z'}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)$$

La ecuación 7 se simplifica a lo siguiente:

(9)

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z')\frac{\partial^2}{\partial z'^2}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)dz'$$
$$= I\,(z')\left[\frac{\partial}{\partial z'}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)\right]\Bigg|\begin{matrix}+l/2\\-l/2\end{matrix} - \int_{-l/2}^{+l/2}\frac{\partial}{\partial z'}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)\frac{dI(z')}{dz'}dz'$$

Se requiere que la corriente en las terminaciones de los dipolos sea 0, I (z'= ± l/2) = 0; bajo esta consideración la ecuación 9 se simplifica, eliminándose el primer término de la derecha:

(10)

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z')\frac{\partial^2}{\partial z'^2}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)dz' = -\int_{-l/2}^{+l/2}\frac{\partial}{\partial z'}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)dz'\,\frac{dI(z')}{dz'}$$

Integrando la ecuación 10 por partes donde:

(11)

$$u = \frac{dI(z')}{dz'}$$

(12)

$$du = \frac{d^2I(z')}{dz'^2}dz'$$

(13)

$$dv = \frac{\partial}{\partial z'}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)dz'$$

(14)

$$v = \frac{e^{-jkR}}{R}$$

La ecuación 10 se resuelve:

(15)

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(z')\frac{\partial^2}{\partial z'^2}\left(\frac{e^{-jkR}}{R}\right)dz' = -\frac{dI(z')}{dz'}\frac{e^{-jkR}}{R}\Bigg|_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} + \int_{-l/2}^{+l/2}\frac{d^2I(z')}{dz'^2}\frac{e^{-jkR}}{R}dz'$$

Cuando (15) sea sustituido por el primer termino de (4) se reduce a

(16)

$$-\frac{dI(z')}{dz'}\frac{e^{-jkR}}{R}\Bigg|_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} + \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}}\frac{d^2I(z')}{dz'^2}\frac{e^{-jkR}}{R}dz' = j4\pi\omega\epsilon_{\mathrm{o}}E_z^t$$

Para dipolos con diámetros pequeños, la corriente en cada elemento puede ser aproximada por una serie finita de sinusoidales. De esta manera, la corriente en el dipolo n puede ser planteada por una serie de Fourier como se indica en la siguiente ecuación:

(17)

$$I_n(z') = \sum_{m=1}^{M} I_{nm}\cos\left[(2m-\mathrm{l})\frac{\pi z'}{I_n}\right]$$

Las corrientes de cada elemento n en el modo m están representadas por Inm. En la ecuación 16 se introduce el término 17 evaluándolo en su primera y segunda derivada.

Como resultado la ecuación 16 se reduce a:

(18)

$$\sum_{m=1}^{M} I_{nm}\left\{\frac{(2m-\mathrm{l})\pi}{l_n}\sin\left[(2m-\mathrm{l})\frac{\pi z'_n}{l_n}\right]\frac{e^{-hkR}}{R}\Bigg|_{-\frac{l_n}{2}}^{\frac{l_n}{2}} + \left[k^2 - \frac{(2m-\mathrm{l})^2\pi^2}{l_n^2}\right]\right.$$
$$\left.\times\int_{-l_n}^{+l_n}\cos\left[(2m-\mathrm{l})\frac{\pi z'_n}{l_n}\right]\frac{e^{-jkR}}{R}dz'_n\right\} = j4\pi\omega\epsilon_{\mathrm{o}}E_z^t$$

De la ecuación anterior, como el coseno es una función par, esta se puede reducir para que los límites de integración sea solo la mitad superior, así se tiene:

(19)

$$\sum_{m=1}^{M} I_{nm}\left\{(-1)^{m+1}\frac{(2m-1)\pi}{l_n}G_2\left(x,x',y,y'/z,\frac{l_n}{2}\right)+\left[k^2-\frac{(2m-1)^2\pi^2}{l_n^2}\right]\right.$$
$$\left.\times\int_0^{l_n}G_2(x,x',y,y'/z,z_n')\cos\left[\frac{(2m-1)\pi z_n'}{l_n}\right]dz_n'\right\}=j4\pi\omega\epsilon_0E_z^t$$

Donde

(20)

$$G_2(x,x',y,y'/z,z_n')=\frac{e^{-jkR}}{R_-}+\frac{e^{-jkR}}{R_+}$$

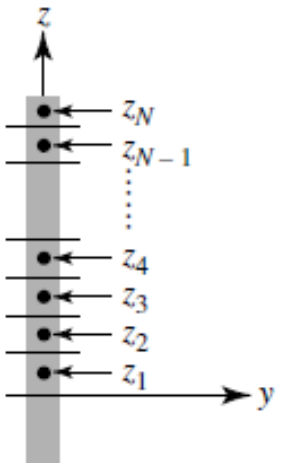
(21)

$$R_\pm=\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+a^2+(z\pm z')^2}$$

N= número total de elementos

R±, representa la distancia del centro de cada dipolo hasta el centro de otro dipolo.

Figura 5. División de un dipolo en M segmentos.



Fuente: (Castillo Almeida & Quirós Vinueza, 2009)

La ecuación integral (19) es válida para cada elemento, y se asume que el número de modos de corriente M es el mismo para cada elemento. Para aplicar el Método de los Momento para resolver la ecuación integral (19), cada elemento se subdivide en M segmentos.

En cada elemento, que no sea el elemento activo, el análisis se realiza en el centro del mismo, y requiere que Et z de la ecuación (19) se anula en cada punto de cada segmento, es decir, Etz (z = zi) = 0, como se muestra en la figura 6.

En el elemento activo el análisis se realiza en la superficie del mismo, y requiere que Et z de la ecuación (19) se anule en el punto M-1, a pesar de que existen modos de m, y que excluye el segmento de la alimentación, como se muestra en la figura 6. Esto genera M-1 ecuaciones.

La ecuación Mth en el elemento de alimentación es generada por la restricción de que la corriente normalizada para todos los modos m en el punto de alimentación (Z'= 0) del elemento alimentador t es igual a la unidad, o

(22)

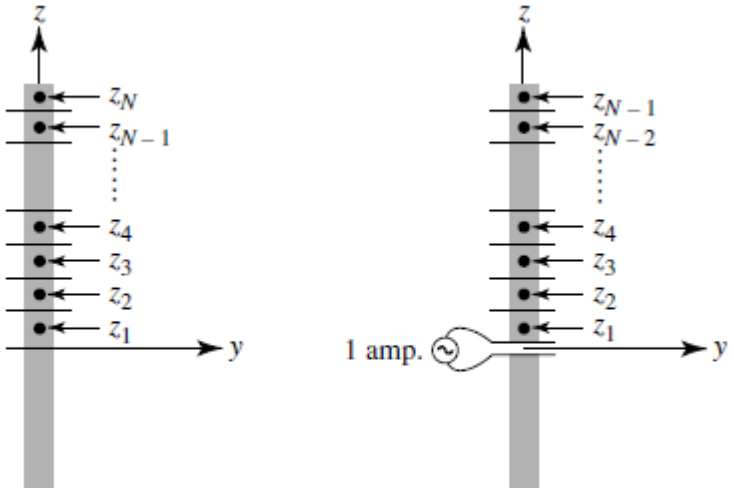
$$\sum_{m=1}^{M} l_{nm}(z' = 0)\Big|_{n = N} = 1$$

Basado en el procedimiento anterior, un sistema de ecuaciones lineales se genera teniendo en cuenta la interacción de:

- Cada modo en cada segmento de cable con cada segmento en el mismo cable.
- Cada modo en cada segmento de cable con cada segmento en los otros cables.

Este sistema de ecuaciones lineales se resuelve a continuación para encontrar los coeficientes complejos de amplitud de la distribución de corriente en cada cable como se representa por (17). Esto se demuestra en una matriz de tres elementos (un director, un reflector, y el elemento activo) con dos modos en cada cable.

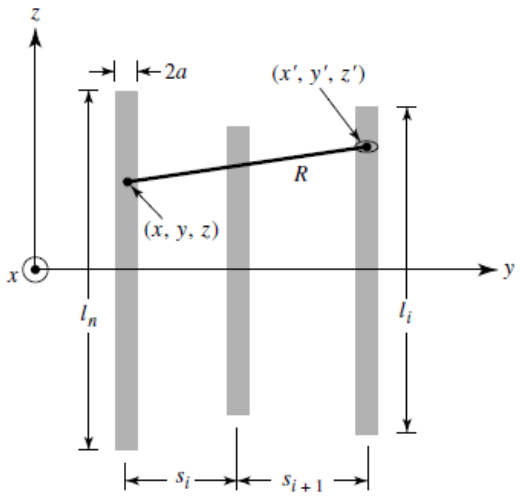
Figura 6. Geometría de los elementos parásitos y el elemento activo de una antena Yagi Uda para la formulación del Método de los Momentos.



Fuente: (Balanis, 2005)

La ecuación (19) es la que se utiliza para obtener los coeficientes de las corrientes complejas sobre cada dipolo. Si existen M modos por elemento y N número de elementos, se crean M incógnitas por elemento y se necesita N x M ecuaciones. Esto se logra igualando a cero la ecuación del campo Ei en los valores Zm elegidos, como se muestra en la figura 5. Por lo tanto, hay N x M coeficientes de corriente en cada ecuación. En este punto se observa una interacción total entre todos los elementos, la figura 7 muestra la interacción entre dos elementos determinado por una distancia R.

Figura 7. Posición de los dipolos y su separación entre segmentos.



Fuente: (Castillo Almeida & Quirós Vinueza, 2009)

A partir de los coeficientes obtenidos, el cálculo de las corrientes de los dipolos se la realiza ingresando un valor de voltaje de alimentación en el dipolo activo, por lo general, normalizado a 1.

2.4.2. Patrón del campo lejano

El patrón del campo lejano es la radiación de la antena en distancias alejadas de la posición de la antena. . El presente desarrollo de ecuaciones es realizado en (Balanis, 2005). El campo lejano Eθ generado por los M modos del elemento n esta descrito en la siguiente ecuación:

(23)

$$E_{\theta n} \simeq j\omega A_{\theta n}$$

Donde,

(24)

$$A_{\theta n} \simeq -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} sin\theta \int_{-I_n/2}^{+I_n/2} I_n e^{jk(X_n \sin\theta \cos\emptyset + Y_n \sin\theta \sin\emptyset + Z'_n \cos\theta)} dZ'_n$$

$$\simeq -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} sin\theta \left[e^{jk(X_n \sin\theta \cos\emptyset + Y_n \sin\theta \sin\emptyset)} \int_{-I_n/2}^{+I_n/2} I_n e^{jkZ'_n \cos\theta} dZ'_n \right]$$

A partir de la ecuación anterior, se debe tomar en cuenta que los dipolos en la antena Yagi Uda están ubicados sobre el eje y; por lo tanto, la distancia xn no existe, es cero. El campo generado total es la suma de todas las contribuciones como se muestra a continuación:

(25)

$$E_\theta = \sum_{n=1}^{N} E_\theta = -j\omega A_\theta$$

(26)

$$A_\theta = \sum_{n=1}^{N} A_{\theta n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r}\sin\theta \sum_{n=1}^{N}\left\{ e^{jk(x_n \sin\theta\cos\emptyset + y_n \sin\theta \sin\emptyset)} \times \left[\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz'_n \cos\theta} dz'_n\right]\right\}$$

La corriente de cada dipolo en la ecuación 17, se reemplaza en la segunda integral de la ecuación 26 de la siguiente manera:

(27)

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz'_n \cos\theta} dz'_n = \sum_{m=1}^{M} I_{nm} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} \cos\left[\frac{(2m-1)\pi z'_n}{l_n}\right] e^{jkz'_n \cos\theta} dz'_n$$

Partir de la ecuación anterior, se puede observar que el coseno es una función par, por lo tanto los límites de la integral se reducen a la mitad superior, la ecuación siguiente muestra lo previamente mencionado:

(28)

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz'_n \cos\theta} dz'_n = \sum_{m=1}^{M} I_{nm} \int_{0}^{+l_n/2} 2\cos\left[\frac{(2m-1)\pi z'_n}{l_n}\right] \times \left[\frac{e^{jkz'_n \cos\theta} + e^{-jkz'_n \cos\theta}}{2}\right] dz'_n = \sum_{m=1}^{M} I_{nm} \int_{0}^{+l_n/2} 2\cos\left[\frac{(2m-1)\pi z'_n}{l_n}\right] \times \cos(kz'_n \cos\theta)\, dz'_n$$

Se conoce la siguiente identidad trigonométrica,

(29)

$$2\cos(\alpha)\cos(\beta) = \cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)$$

De la identidad anterior, la ecuación 28 se transformaría en lo siguiente:

(30)

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz'_n \cos\theta} dz'_n$$

$$= \sum_{m=1}^{M} I_{nm} \int_0^{+l_n/2} \cos\left[\frac{(2m-1)\pi}{l_n} + k\cos\theta\right] z'_n dz_n \text{ u}$$

$$+ \int_0^{+l_n/2} \cos\left[\frac{(2m-1)\pi}{l_n} - k\cos\theta\right] z'_n dz_n$$

De las integrales más comunes se tiene:

(31)

$$\int_0^{+l_n/2} \cos[(b \pm c)z] dz = \frac{\alpha}{2} \frac{\sin\left[(b \pm c)\frac{\alpha}{2}\right]}{(b \pm c)\frac{\alpha}{2}}$$

En la ecuación 30 se reemplaza las integrales con el resultado de la ecuación 31, como se muestra a continuación:

(32)

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz'_n \cos\theta} dz'_n = \sum_{m=1}^{M} I_{nm} \left[\frac{\sin(Z^+)}{Z^+} + \frac{\sin(Z^-)}{Z^-}\right] \frac{l_n}{2}$$

(33)

$$Z^+ = \left[\frac{(2m-1)\pi}{l_n} + k\cos\theta\right] \frac{l_n}{2}$$

(34)

$$Z^- = \left[\frac{(2m-1)\pi}{l_n} - k\cos\theta\right] \frac{l_n}{2}$$

Finalmente, el campo total eléctrico se puede expresar como:

(35)

$$E_\theta = \sum_{n=1}^{N} E_\theta = -j\omega A_\theta$$

(36)

$$A_\theta = \sum_{n=1}^{N} A_{\theta n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \sum_{n=1}^{N} \left\{ e^{jk(x_n \sin\theta \cos\emptyset + y_n \sin\theta \sin\emptyset)} \times \sum_{m=1}^{M} I_{nm} \left[\frac{\sin(Z^+)}{Z^+} + \frac{\sin(Z^-)}{Z^-} \right] \right\} \frac{I_n}{2}$$

Esta ecuación se encuentra en su forma integral, de esta manera ya se puede implementar en un programa computacional para resolver cualquier tipo de diseño. Al plantear y resolver la ecuación 35, se puede determinar los patrones de radiación, la ganancia frente espalda, la directividad, impedancia de entrada y el ancho del haz a mitad de potencia.

2.4.3. Procedimiento de Diseño

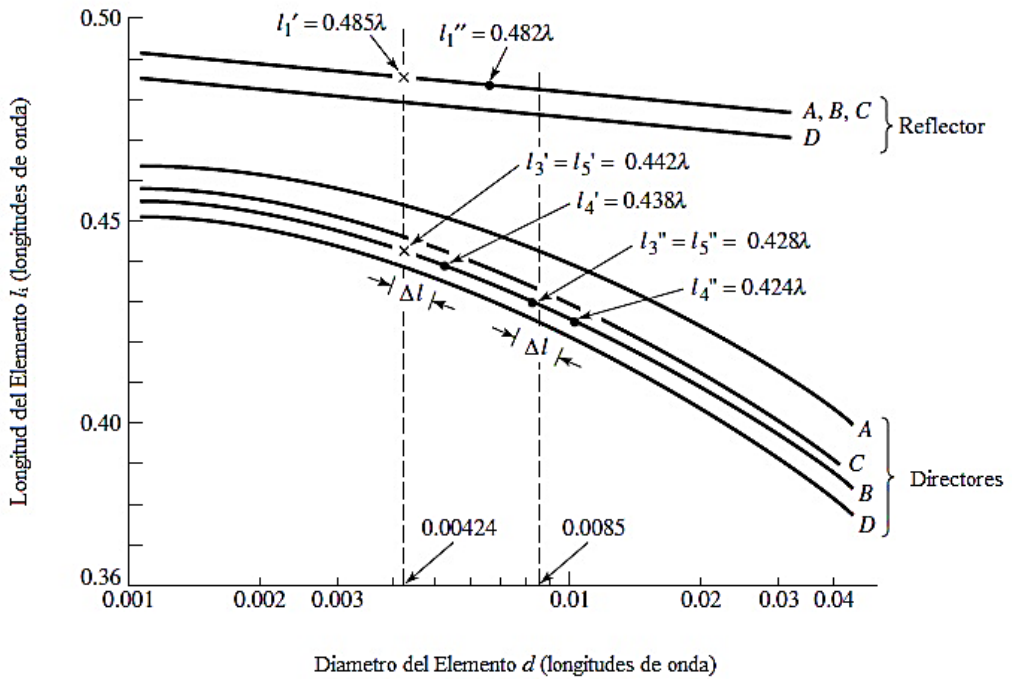
En términos generales, las antenas Yagi Uda tienen baja impedancia y ancho de banda relativamente estrecho, por lo que puede lograrse mejoras a expensas de otros parámetros (directividad, ganancia, etc.). La longitud y los diámetros de los elementos, así como su respectiva separación permitirá determinar las características óptimas, puesto que hay tantas variables, el diseño óptimo de una antena Yagi Uda es una tarea complicada. (Huang & Boyle, 2008)

Varios documentos se han publicado los mismos que proporcionan una gran cantidad de datos obtenidos de las investigaciones experimentales llevadas a cabo, las mismas que permiten obtener parámetros tales como el diámetro del elemento parásito, la longitud de cada elemento, las distancias entre elementos, etc. Un procedimiento de diseño paso a paso se ha establecido en la determinación de los parámetros geométricos de una matriz de la antena Yagi Uda para una directividad óptima. (Balanis, 2005)

Los gráficos encontrados en (Balanis, 2005) sólo se pueden utilizar para el diseño de antenas con longitudes totales, es decir, desde el elemento reflector hasta el último director, de 0.4, 0.8, 1.2, 2.2, 3.2, y 4.2λ con directividad de 7.1, 9.2, 10.2, 12.25, 13.4, y 14.2dB, respectivamente, y con una relación de diámetro a longitud de onda de 0,001 a 0,04 λ. Aunque los gráficos no abarcan todos los diseños posibles, dan cabida a peticiones más concretas. El elemento conductor utilizado para derivar los datos fue un dipolo plegado de longitud λ/2, y las mediciones se llevaron a cabo en frecuencia de 400 MHz.

Los datos mostrados en la tabla 1 son muy útiles para los diseños de antena prácticos, cabe señalar que el diámetro del elemento se fija en 0.0085λ, si esta condición no se puede cumplir en la realidad, se debe hacer pequeños cambios en la longitud del elemento y las curvas de diseño relevantes.

Figura 8. Curvas de diseño para determinar las longitudes de los elementos de las antenas Yagi Uda.



Fuente: (Balanis, 2005)

Tabla 1. Optimizado de longitudes no compensadas de los elementos parásitos de antenas Yagi Uda de seis diferentes longitudes.

d/λ=0,0085 S12=0,2λ		Dimensión de la Antena Yagi-Uda [λ]					
		0,400	0,800	1,200	2,200	3,200	4,200
Longitud del Reflector (l1/λ)		**0,482**	**0,482**	**0,482**	**0,482**	**0,482**	**0,475**
Longitud de los directores, λ	l3	0,442	0,428	0,428	0,432	0,428	0,424
	l4		0,424	0,420	0,415	0,420	0,424
	l5		0,428	0,420	0,407	0,407	0,420
	l6			0,428	0,398	0,398	0,407
	l7				0,390	0,394	0,403
	l8				0,390	0,390	0,398
	l9				0,390	0,386	0,394
	l10				0,390	0,386	0,390
	l11				0,398	0,386	0,390
	l12				0,407	0,386	0,390
	l13					0,386	0,390
	l14					0,386	0,390
	l15					0,386	0,390
	l16					0,386	
	l17					0,386	
Separación entre directores Sn/λ		0,2	0,2	0,25	0,2	0,2	0,308
Directividad Relativa dB		7,1	9,2	10,2	12,3	13,4	14,2
Curva de diseño		A	B	B	C	B	D

Fuente: (Balanis, 2005)

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y SIMULACIÓN

Para el diseño a ser analizado mediante el método convencional y el método de algoritmos genéticos se analizará en la frecuencia de 187 MHz.

3.1. Diseño mediante el método tradicional

Para lo cual el procedimiento de diseño se realizará usando las longitudes y separaciones de cada uno de los elementos que fueron encontradas en estudios teóricos y prácticos expuestos en (Balanis, 2005), se procederá a probar cada uno de estos diseños hasta hallar un diseño óptimo

Diseño de una antena Yagi Uda por el método tradicional con una frecuencia de operación de 187 MHz.

$$fo = 187\ MHz$$

(37)

$$\lambda = \frac{c}{fo}$$

$$\lambda = Longitud\ de\ onda$$

$$c = Velocidad\ de\ la\ luz\ 3x10^8\ \frac{m}{s}$$

$$fo = Frecuencia\ de\ resonancia$$

(38)

$$\lambda = \frac{3x10^8}{187x10^6} = 1.604\ m$$

Para este diseño se usará como elemento activo un dipolo λ/2, usando las longitudes sugeridas en (Balanis, 2005) las mismas que se pueden observar en la tabla 1 se obtiene:

Reflector: 0.482 λ = 77,33 [cm]

Dipolo: 0.5 λ = 80,22 [cm]

Director 1: 0.432 λ = 69,30 [cm]

Director 2: 0.415 λ = 66,58 [cm]

Director 3: 0.407 λ = 65,29 [cm]

Director 4: 0.398 λ = 63,85 [cm]

Director 5: 0.390 λ = 62,57 [cm]

Director 6: 0.390 λ = 62,57 [cm]

Director 7: 0.390 λ = 62,57 [cm]

Director 8: 0.390 λ = 62,57 [cm]

Director 9: 0.398 λ = 63,85 [cm]

Director 10: 0.407 λ = 65,29 [cm]

Separación Dipolo-Reflector: 0.2 λ = 32,08 [cm]

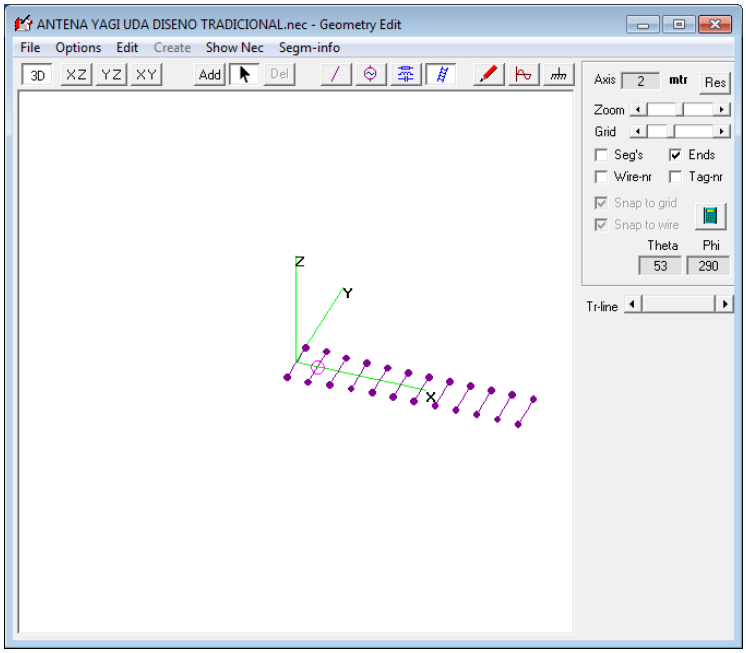
Separación Dipolo-Director: 0.2 λ = 32,08 [cm]

Separación entre directores: 0.2 λ = 32,08 [cm]

Una vez que se obtienen las longitudes y espaciamientos de cada uno de los elementos que conforman la antena Yagi Uda se procede con su simulación mediante el uso del software de simulación de antenas 4NEC2, con el cual se obtiene los diagramas de radiación, ganancia y directividad tanto en coordenadas planas, esféricas y espaciales.

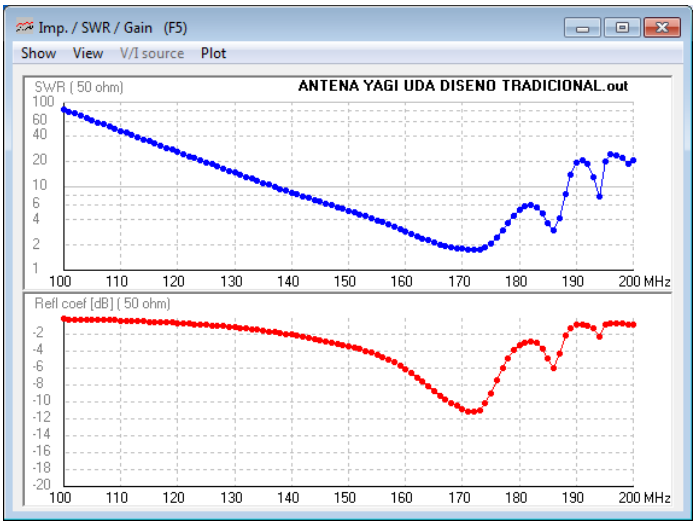
3.1.1. Resultados

Figura 9. Antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional y construida en el software de simulación de antenas 4NEC2.



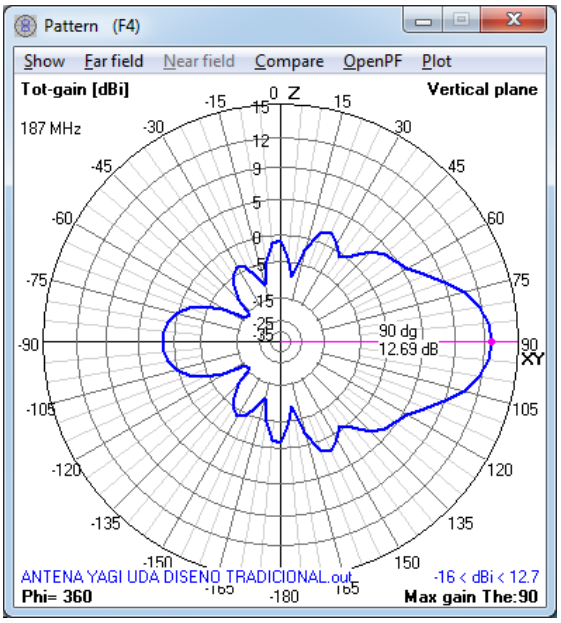
Elaborado por: Oscar Ayala

Figura 10. Diagrama de ganancia e impedancia de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional obtenido en el software de simulación 4NEC2.



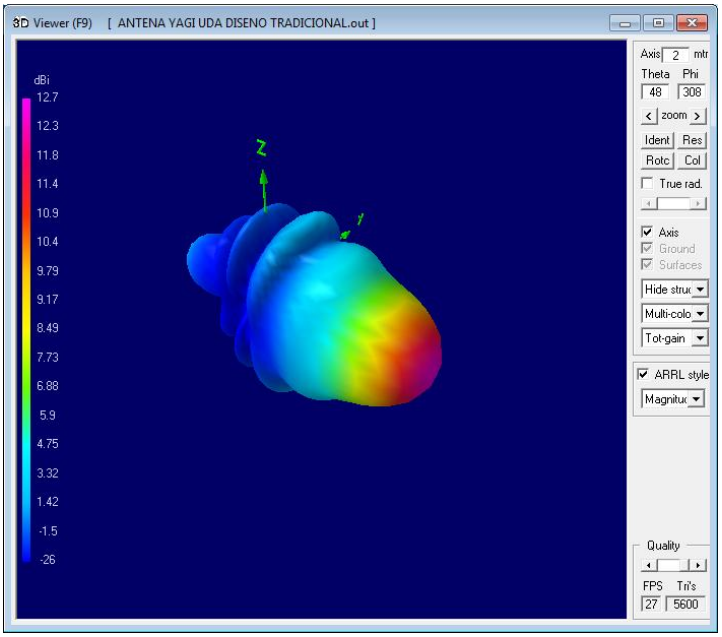
Elaborado por: Oscar Ayala

Figura 11. Diagrama de radiación en coordenadas polares de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional obtenido en el software de simulación 4NEC2.



Elaborado por: Oscar Ayala

Figura 12. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional obtenido en el software de simulación 4NEC2.



Elaborado por: Oscar Ayala

Para obtener los resultados numéricos se ingresará los parámetros de longitudes y espaciamientos de la antena Yagi Uda diseñada por el método tradicional en el software programado en Matlab, código fuente se lo puede observar en el anexo 4, el programa fue tomado de (Balanis, 2005) al cual se hizo pequeñas modificaciones para poder ser compilado en la versión 11 del software Matlab.

Una vez compilado el programa los resultados obtenidos son los siguientes:

-3dB ancho del haz en el plano E = 35.87 grados

-3dB ancho del haz en el plano H = 39.09 grados

Relación Frontal-Trasera en el plano E = 12.7338 dB

Relación Frontal-Trasera en el plano H = 12.7332 dB

Ganancia = 12.69 dB

3.2. Diseño mediante el método de algoritmos genéticos

Población inicial

La población inicial está compuesta por 50 cromosomas (posibles soluciones) con 23 genes (variables) cada uno, los genes que conforman cada cromosoma corresponde a las longitudes y espaciamientos de cada elemento que constituye la antena, los rangos escogidos para los genes están dados por estándares de diseño de las antenas Yagi Uda definidos en (Balanis, 2005), por lo que, para los elementos que la constituyen se establece un rango de [0.1 λ - 0.8 λ].

Codificación

Para poder realizar el proceso de diseño por este método es necesario codificar cada cromosoma, usualmente se codifican en sistema binario para su posterior tratamiento con los operadores genéticos y se vuelven a decodificar a decimal a la hora de evaluar la función objetivo.

En el caso de estudio de este trabajo en concreto los parámetros de los que depende el diseño de la antena Yagi Uda se codifican mediante el sistema decimal y se ordenan de la siguiente forma:

$$Poblacion = \begin{bmatrix} cromosoma\ 1 \\ \vdots \\ cromosoma\ n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} gen\ 1 & \cdots & gen\ 1m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ gen\ n & \cdots & gen\ nm \end{bmatrix}$$

Evaluación

Después de analizar cada una de las antenas de la generación inicial, sus parámetros son evaluados por la siguiente función objetivo (De La Asunción López et al. 2009):

Donde:

(39)

$$f(D, FTB) = 0.8\, G + \ 0.2\, FTB$$

G: Ganancia

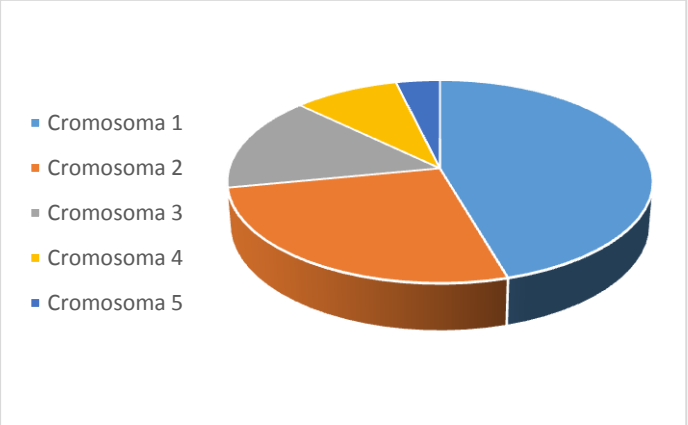
FTB: Relación Frontal-Trasera

El individuo que se acerque más a la función objetivo es al que se le asignara mayor aptitud. En algunos casos la puntuación no depende de un solo parámetro, sino que se debe tener en cuenta los factores que intervienen en el proceso de optimización, para este proyecto los parámetros a tener en cuenta serán los de relación frontal trasera y ganancia, por lo tanto será necesario crear una función que asigne esta puntuación teniendo en cuenta los parámetros mencionados. La correcta elección de la función que asigna la puntuación es de vital importancia para el buen funcionamiento y convergencia del algoritmo. La puntuación determina los cromosomas que se van a reproducir, por lo tanto los que van a transmitir parte de su información genética a próximas generaciones, donde los individuos con mayor aptitud tienen la mayor probabilidad de ser escogidos y aquellos que no, serán descartados. Una vez que cada cromosoma tiene una puntuación otorgada, se crea una nueva población.

Selección

Es la forma de escoger a miembros de la población de forma proporcional a la puntuación de cada individuo. El procedimiento de selección que se usará en este proyecto es la denominada selección por ruleta, donde la puntuación total de la población se representa por el área total y se asigna una porción de la ruleta a cada individuo correspondiente al costo otorgado por la función objetivo, esto no garantiza que el miembro con mayor puntuación vaya a reproducirse, simplemente que tiene mayor probabilidad de hacerlo. Repitiendo este método se seleccionan todos los cromosomas que se van a reproducir. Es un método aleatorio, por lo que preserva diversidad genética y favorece para que las características de los mejores individuos pasen a la siguiente generación, ya que los que tengan mayor puntuación tienen más probabilidad de ser elegidos.

Figura 13. Descripción grafica del método de selección por Ruleta.



Elaborado por: Oscar Ayala

Entrecruzamiento

El entrecruzamiento consiste en el intercambio de material genético entre dos cromosomas, es el principal operador genético.

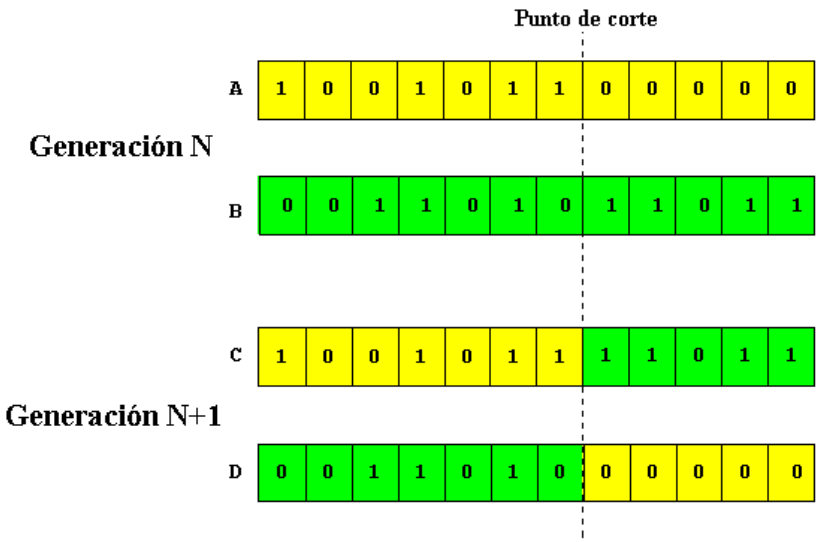
Se aplica el entrecruzamiento sobre dos miembros de la población seleccionados por el método de la ruleta, este operador genético es el encargado de mezclar la información genética de los cromosomas seleccionados. La función objetivo se encarga de que solo

los cromosomas con buena información genética se perpetúen y de esta manera vayan formando una buena solución global.

El entrecruzamiento se puede llevar a cabo de varias maneras, el método usado en este proyecto es el de un único punto de cruce cuyo procedimiento es relativamente simple:

1. Se selecciona un punto aleatorio a lo largo de la longitud del cromosoma.
2. Se cortan a los dos padres por ese punto.
3. Se crean los dos hijos intercambiando las partes de cada cromosoma.

Figura 14. Entrecruzamiento por un punto de corte.



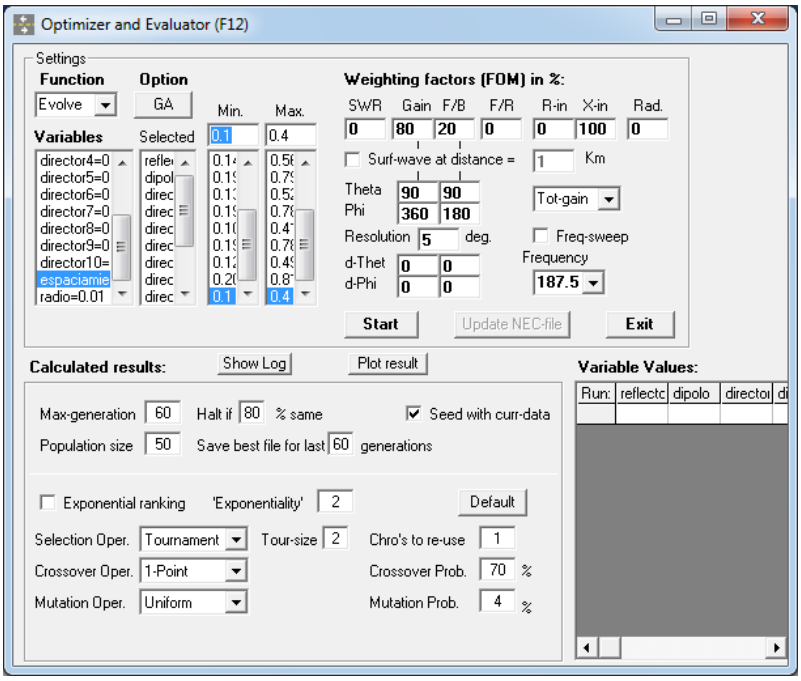
Fuente: (Gabal Lanau, 2010)

En este caso se escoge una tasa de entrecruzamiento de 0,7. Esto quiere decir que la probabilidad de que se aplique el entrecruzamiento es el 70% del total de la población dentro de cada generación y una probabilidad de mutación del 4%, éstos valores son tomados como referencia de (Velásquez Silva, 2013) ya que garantizan diversidad en la población lo que permitirá obtener la mejor solución global.

Para este diseño se usará la herramienta de optimización del software 4NEC2X que se lo puede observar en el anexo 2, para lo cual se ingresa los parámetros correspondientes a la antena diseñada por el método tradicional para su procesamiento mediante operadores genéticos, esto permite tener un diseño con resultados conocidos y de esta manera garantizar que la optimización presente mejores características luego

de la ejecución del algoritmo genético, se escoge la población inicial, generaciones y operadores según lo especificado al inicio del subcapítulo 3.2 como se observa en la figura 15, adicional se establece los rangos propuestos en la tabla 2 para cada elemento de la antena optimizada.

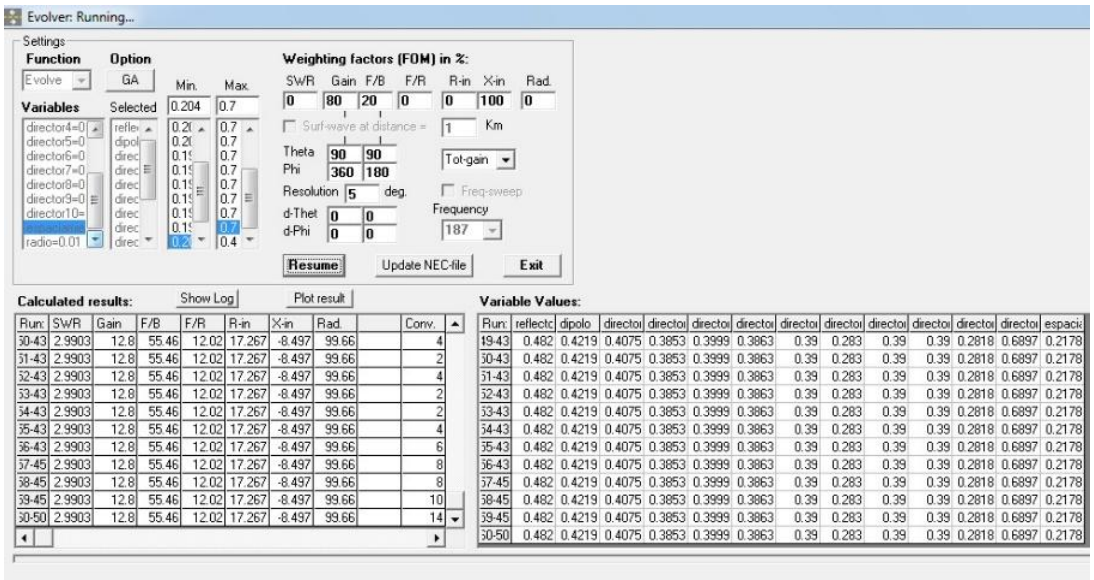
Figura 15. Selección del tamaño de la población, operadores genéticos y rangos de los elementos en el software 4NEC2X.



Elaborado por: Oscar Ayala

Una que se inicializa la optimización mediante algoritmos genéticos en la herramienta 4NEC2X el tiempo de convergencia del algoritmo genético es de 1405 segundos y se presentan los resultados obtenidos en cada una de las 60 generaciones previamente establecidas donde se puede validar la evolución de las soluciones al avanzar el número de iteraciones como se observa en la figura 16.

Figura 16. Ejecución del algoritmo genético y parámetros obtenidos en el software 4NEC2X.



Elaborado por: Oscar Ayala

Una vez que el algoritmo ha convergido los parámetros obtenidos son los siguientes:

Reflector: 0.440575 λ = 83,42 [cm]

Dipolo: 0.5 λ = 77,33 [cm]

Director 1: 0.432 λ = 69,30 [cm]

Director 2: 0.421983 λ = 66,58 [cm]

Director 3: 0.282731 λ = 65,29 [cm]

Director 4: 0.398 λ = 63,85 [cm]

Director 5: 0.261194 λ = 62,57 [cm]

Director 6: 0.39 λ = 62,57 [cm]

Director 7: 0.208762 λ = 62,57 [cm]

Director 8: 0.39 λ = 62,57 [cm]

Director 9: 0.24796 λ = 62,57 [cm]

Director 10: 0.407 λ = 62,57 [cm]

Separación Dipolo-Reflector: 0.2 λ = 32,08 [cm]

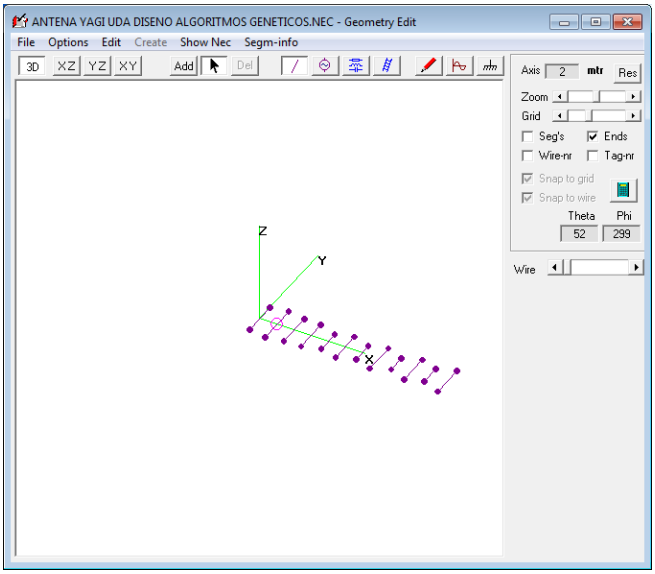
Separación Dipolo-Director: 0.2 λ = 32,08 [cm]

Separación entre directores: 0.2 λ = 32,08 [cm]

Con las longitudes y espaciamientos de cada uno de los elementos que conforman la antena Yagi Uda diseñada mediante Algoritmos Genéticos se procede con su simulación y se obtiene los diagramas de radiación, ganancia y directividad.

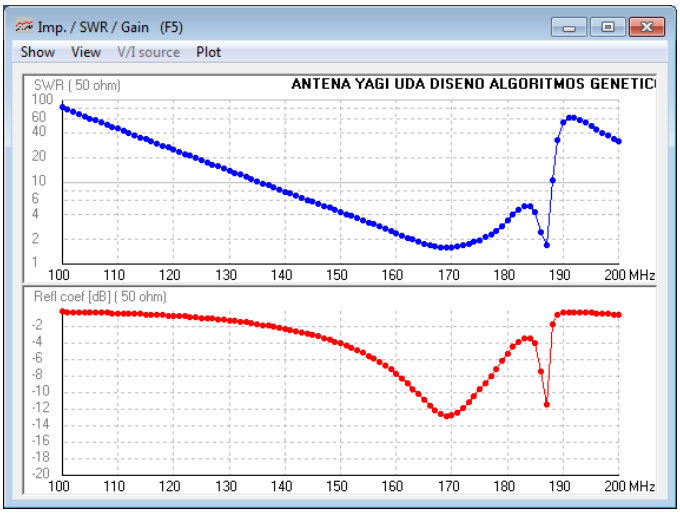
3.2.1. Resultados

Figura 17. Antena Yagi Uda de 12 elementos construida en el software de simulación de antenas 4NEC2.



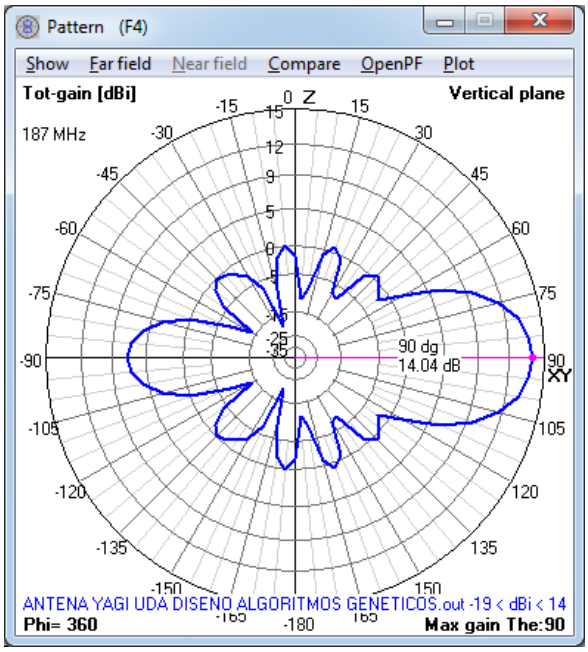
Elaborado por: Oscar Ayala

Figura 18. Diagrama de ganancia e impedancia de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método de algoritmos genéticos obtenido en el software de simulación 4NEC2.



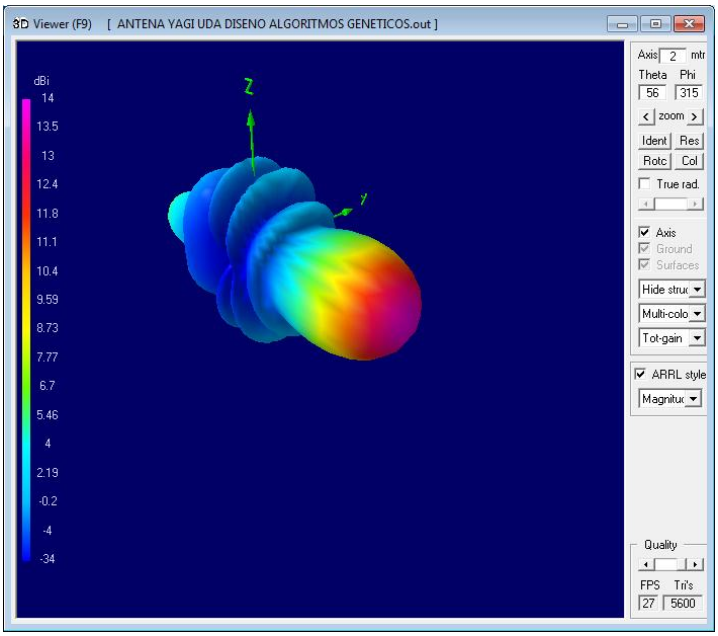
Elaborado por: Oscar Ayala

Figura 19. Diagrama de radiación en coordenadas polares de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método de algoritmos genéticos obtenido en el software de simulación 4NEC2.



Elaborado por: Oscar Ayala

Figura 20. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método de algoritmos genéticos obtenido en el software de simulación 4NEC2.



Elaborado por: Oscar Ayala

De igual manera para obtener los resultados numéricos se ingresara los parámetros de longitudes y espaciamientos de la antena Yagi Uda diseñada por el método de algoritmos genéticos en el software Matlab.

Una vez compilado el programa los resultados obtenidos son los siguientes:

-3dB ancho del haz en el plano E = 31.59 grados

-3dB ancho del haz en el plano H = 33.35 grados

Relación Frontal-Trasera en el plano E = 11.8927 dB

Relación Frontal-Trasera en el plano H = 10.8856 dB

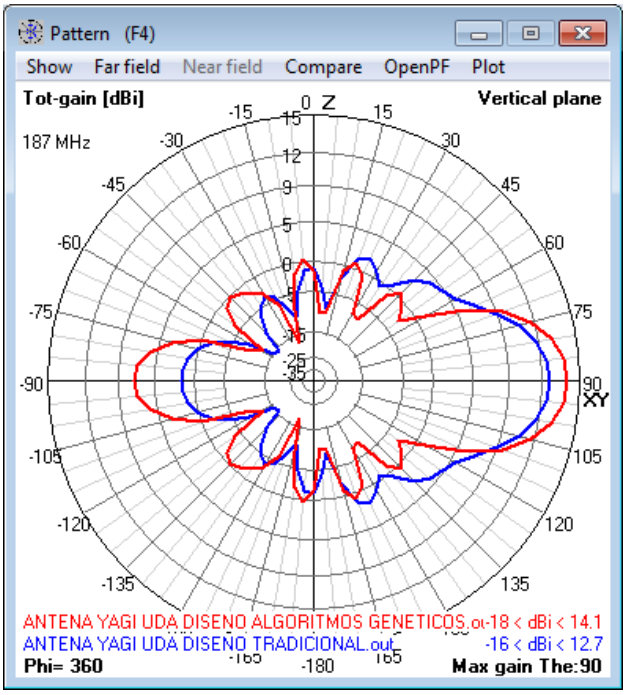
Ganancia = 14.04 dB

3.3. Comparación y Análisis

Una vez realizados los diseños y simulaciones de las antenas Yagi Uda por el método tradicional y por el método de algoritmos, y una vez que se ha obtenido los resultados

gráficos y numéricos de los parámetros de radiación de cada una de las antenas se procede a realizar un análisis comparativo de estas con la finalidad de validar la optimización realizada.

Figura 21. Comparación del diagrama de radiación de la antena Yagi Uda de 12 elementos diseñada por el método tradicional y método de algoritmos genéticos.



Elaborado por: Oscar Ayala

Según lo encontrado en (Balanis, 2005) se obtiene parámetros básicos de diseño en donde para cada elemento que constituye una antena Yagi Uda se tiene un rango expresado en función de la longitud de onda como se observa en la tabla 2, de igual manera luego de varias pruebas realizadas se ha podido observar que alterando los rangos teóricos se pudo obtener mejores resultados en la optimización por lo que en la tabla 2 se presenta una comparación de la propuesta de diseño encontrada en (Balanis, 2005) y la propuesta de diseño que es aporte de este proyecto de tesis.

Tabla 2. Rangos de longitudes y espaciamientos propuestos.

Parámetros	Propuesta de Balanis	Propuesta Tesis
Longitud de dipolo	[0.47 – 0.49] λ	[0.46 – 0.5] λ
Longitud de directores	[0.4 – 0.45] λ	[0.4 – 0.5] λ
Diámetro de los elementos	D <<< λ	D <<< λ

Longitud de reflector	[0.5 – 0.6] λ	[0.5 – 0.7] λ
Espaciamiento entre dipolo y reflector	[0.2 – 0.5] λ	[0.05 – 0.15] λ
Espacio entre directores	[0.3 – 0.4] λ	[0.1 – 0.3] λ

Elaborado por: Oscar Ayala

La optimización para este proyecto consiste en encontrar la mejor distribución (longitudes y espaciamientos) de los elementos que constituyen la antena Yagi Uda que permitan obtener la mejor ganancia y relación frontal trasera posible. El propósito de la función objetivo establecida en el subcapítulo 3.2 es encontrar el equilibrio entre dichos parámetros para encontrar la mejor estructura radiante por lo que se estableció como parámetro prioritario a la ganancia y en segundo lugar la relación frontal trasera.

Se realiza la comparación de los resultados obtenidos en pruebas experimentales expuestas en (Balanis, 2005) y el software de simulación 4nec2, con la finalidad de validar que los resultados obtenidos en el software que será utilizado para la optimización en este proyecto concuerden con los resultados teóricos esperados y de esta manera poder estimar el error promedio de los cálculos y así obtener un valor confiable y preciso.

Tabla 3. Calculo de error entre los resultados obtenidos en la simulación realizada en el software 4NEC2 y los resultados teóricos expuestos en (Balanis, 2005)

Parámetros	**Balanis [A]**	**4NEC2X [B]**	**% error estimado**	
Directividad (dB)	12.01	12.69	$\frac{B-A}{A} \times 100\ \%$	0.047 %
Relación Frontal-Trasera(dB)	11.79	12.98		1.07 %

Elaborado por: Oscar Ayala

Una vez que se ha comprobado que para los mismos diseños, es decir mismos parámetros de frecuencia, número de elementos y distribución física de estos, obtenemos resultados semejantes entre lo teórico y el software 4NEC2 que será usado para el diseño del presente proyecto, se procede a hacer pruebas de optimización teniendo como parámetros de diseño la frecuencia de operación de la antena 187 MHz la misma que se constituye de doce elementos (reflector, dipolo y diez directores). Se obtiene lo siguiente:

Tabla 4. Comparación de los parámetros obtenidos por el diseño tradicional y por algoritmos genéticos para una antena Yagi Uda.

Parámetros	Diseño por el Método Tradicional	Diseño por Algoritmos Genéticos
Frecuencia de operación [MHz]:	187	187
Número de directores:	10	10
Población :	-	50
Diámetro de los elementos [λ]:	0.01	0.01
Número de generaciones:	-	60
Longitud de reflector [λ]:	0.482	0.440575
Longitud de dipolo [λ]:	0.5	0.5
Longitud del director 1 [λ]:	0.432	0.432
Longitud del director 2 [λ]:	0.415	0.421983
Longitud del director 3 [λ]:	0.407	0.282731
Longitud del director 4 [λ]:	0.398	0.398
Longitud del director 5 [λ]:	0.390	0.261194
Longitud del director 6 [λ]:	0.390	0.390
Longitud del director 7 [λ]:	0.390	0.208762
Longitud del director 8 [λ]:	0.390	0.390
Longitud del director 9 [λ]:	0.398	0.24796
Longitud del director 10 [λ]:	0.407	0.407
Separación reflector-dipolo [λ]:	0.2	0.2
La separación dipolo-director 1 [λ]:	0.2	0.2
La separación entre directores [λ]:	0.2	0.2
Resultados - parámetros de radiación		
Ganancia [dB]:	12.69	14.04
Relación Frontal Trasera [dB]:	12.7332	10.8927
Impedancia de entrada [Ω]:	32.1+59.3i	13.4+22.1i

Elaborado por: Oscar Ayala

Tabla 5. Análisis comparativo de los resultados obtenidos por el diseño tradicional y por algoritmos genéticos para una antena Yagi Uda.

Parámetros	Diseño Balanis[A]	Diseño Tesis [B]	% diferencia comparativa	
Directividad [dB]	12.69	14.04	$\frac{B-A}{A} \times 100\ \%$	10.63 %
Relación Frontal-Trasera[dB]	12.7332	11.8927		-6.60 %

Elaborado por: Oscar Ayala

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se analiza los costos de: diseño de ingeniería, desarrollo de software y el costo total que alcanzó el proyecto de investigación.

4.1. Costo de diseño y simulación

A continuación se especifica los costos de diseño del diseño y simulación de una antena Yagi Uda por el método tradicional y por el método de algoritmos genéticos., especificando el valor por cada hora de servicios prestados, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 6. Costos de diseño y simulación

Descripción	**Cantidad (personas)**	**Tiempo (horas)**	**Precio. Cada Hora. $**	**Precio. Total del Trabajo. $**
Diseño de la antena Yagi Uda por el método tradicional.	1	20	5.625	112.5
Simulación de la antena Yagi Uda por el método tradicional.	1	10	5.625	56.25
Diseño de la antena Yagi Uda por el método de Algoritmos Genéticos.	1	100	5.625	562.5
Simulación de la antena Yagi Uda por el método de Algoritmos Genéticos.	1	10	5.625	56.25
TOTAL				**787.50 $**

Elaborado por: Oscar Ayala

4.2. Costo de desarrollo del software

Los costos analizados para el desarrollo del software de diseño y simulación de una antena Yagi Uda, especificando el valor por cada hora de servicios prestados, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 7. Costo de desarrollo de Software

Descripción	**Cantidad (personas)**	**Tiempo (horas)**	**Precio. Cada Hora. $**	**Precio. Total del Trabajo. $**
Programación en Matlab.	1	10	5.625	56.25
Desarrollo de diseños en el software de simulación 4NEC2X	1	50	5.625	281.25
TOTAL				**337.50 $**

Elaborado por: Oscar Ayala

4.3. Costo total del proyecto

A continuación se describe el costo total del diseño y simulación de la antena Yagi Uda desarrollado en este proyecto, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 8. Costo total del proyecto

DESCRIPCIÓN	**COSTO**
DISEÑO Y SIMULACIÓN	787.50 $
DESARROLLO DE SOFTWARE	337.50 $
TOTAL	**1125.00 $**

Elaborado por: Oscar Ayala

CONCLUSIONES

- Se revisó la información bibliográfica con respecto a los algoritmos genéticos, al diseño de la antena Yagi Uda por el método tradicional y la aplicación de los Algoritmos Genéticos al diseño de antenas, se simuló los diseños obtenidos para obtener los parámetros de radiación, directividad y ganancia. Se diseñó una antena Yagi Uda por el método tradicional obteniendo como resultados de ganancia=12.69dB, directividad=12.01dB y relación frontal trasera=12.7332 dB, luego se realizó el diseñó por el método de algoritmos genéticos donde se obtuvo como resultados de ganancia=14.04 dB, directividad=13.98dB y relación frontal trasera=10.8927.

- Al realizar el análisis comparativo de las antenas Yagi Uda diseñadas por el método tradicional y por el método de algoritmos genéticos se observa cambios en el parámetro de la ganancia donde la antena diseñada por el método de algoritmos genéticos presenta una mejora del 10.63% con respecto a la diseñada por el método tradicional, esto se debe que los algoritmos genéticos al optimizar las longitudes y espaciamientos de los dipolos, éstos acoplan de mejor manera sus fases permitiendo que la corriente aumente de manera progresiva en cada director que por ende mejora la ganancia.

- Al comparar el parámetro de directividad se obtiene que a -3dB el ángulo en el plano E disminuye en 4.28 grados y en el plano H disminuye 5.74 grados por lo que la antena es más directiva al ser diseñada por el método de algoritmos genéticos con respecto a la diseñada por el método tradicional, debido a que los algoritmos genéticos optimizan la longitud y espaciamientos de los dipolos que conforman la antena Yagi Uda, lo que permite optimizar el ancho de banda asignado para una aplicación específica.

- Con respecto a la relación frontal trasera con el método de diseño por algoritmos genéticos se obtiene un decremento del 6.60%. en comparación con la antena diseñada por el método tradicional, lo que indica una pérdida de

potencia en la dirección de radiación de la antena, pero esto no afecta en la operación de la antena diseñada por el método de algoritmos genéticos ya que se ve compensada con el aumento de la ganancia y directividad.

RECOMENDACIONES

- Crear una base de datos con la mayor cantidad de parámetros de diversas antenas con la finalidad de disminuir el tiempo de procesamiento, el tiempo de convergencia del algoritmo genético y obtener mejores soluciones, pero se debe mantener valores aleatorios para de esta manera garantizar la diversidad de la población y no caer en óptimos locales.

- Establecer los operadores genéticos como el número de generaciones, el tamaño de la población inicial y la tasa de mutación y cruzamiento estipulados en éste proyecto dentro del software de simulación 4NEC2X para disminuir el tiempo de convergencia y mantener una adecuada diversidad de los individuos dentro de la población.

- Comprobar los resultados obtenidos en la simulación mediante el uso del software encontrado en (Balanis, 2005) el mismo que se muestra en el anexo 4 de este proyecto para tener una mejor apreciación de los resultados obtenidos al diseñar una antena Yagi Uda mediante el método de Algoritmos Genéticos.

- Se recomienda que para la optimización mediante algoritmos genéticos, en la función objetivo se mantenga la prioridad otorgada en éste proyecto al parámetro de la ganancia de la antena y que el segundo parámetro sea escogido según las características deseadas de acuerdo a la aplicación que se le dará a la antena pudiendo escoger cualquier parámetro de radiación como la directividad, relación frontal trasera, impedancia de entrada, etc.

- Aplicar otras técnicas de optimización al diseño de antenas tales como redes neuronales y algoritmos de enjambre de abejas para mejorar el diseño de una antena Yagi Uda y comparar los resultados obtenidos con el análisis realizado en este proyecto.

- Aplicar las técnicas de algoritmos genéticos a la optimización de otros elementos importantes dentro del campo de las telecomunicaciones como son las líneas de transmisión, micro ondas, fibra óptica, propagación de señales electromagnéticas, etc.

LISTA DE REFERENCIAS

Anguera, J., & Pérez, A. (2008). La Salle Campus Barcelona. Obtenido de La Salle Campus Barcelona: http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook_teoria_antenas.pdf

Balanis, C. A. (2005). Antenna theory analysis and design. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Cardama Aznar, Á., Romeu Robert, J., Rius Casals, J. M., Jofre Roca, L., & Ferrando Bataller, M. (2002). ANTENAS. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL.

Castillo Almeida, J. R., & Quirós Vinueza, I. A. (2009). Desarrollo de software para el diseño de antenas Yagi-Uda y Reflector de Esquina. Quito: Universidad San Francisco de Quito.

De La Asunción López, E. C., Zurek Varela, E. E., Ripoll Solano, L. A., & Hernández Cantillo, J. E. (7 de Mayo de 2009). Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Obtenido de Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal: http://www.redalyc.org/pdf/750/75012333010.pdf

Gabal Lanau, M. (2010). Agrupaciones adaptativas y algoritmo genético.

Haupt, R. L., & Werner, D. H. (2007). Genetic Algorithms in Electromagnetics. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Huang, Y., & Boyle, K. (2008). Antennas from theory to practice. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

Linden, D. S. (2002). University of Birminghan. Obtenido de University of Birminghan: http://www.cs.bham.ac.uk/~wbl/biblio/gecco2002/RWA167.pdf

Matthias , J., & Max , A. (1 de Enero de 2006). Dublin Institute of Technology. Obtenido de Dublin Institute of Technology: http://arrow.dit.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1012&context=engschececon

Torres Quijije, A. I. (2004). Estudio y metodología de diseño de antenas usando algoritmos genéticos . Quito: Escuela Politecnica Nacional.

Velásquez Silva, J. (2013). Optimización del diseño de antenas Yagi-Uda usando Algoritmos Genéticos. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

ANEXOS

Anexo 1. Software de simulación 4NEC2

NEC2 (Código numérico electromagnético) es un código computacional por medio del cual se puede analizar las propiedades electromagnéticas de las antenas y otras estructuras radiantes, este software de simulación presenta una interfaz interactiva para el usuario la misma que permite observar el comportamiento electromagnético de una estructura. El software 4NEC2 es una herramienta de simulación en 3D de campos electromagnéticos de onda completa que integra simulación y visualización en un ambiente interactivo y de fácil manejo para el usuario donde se puede modelar estructuras en 3D. 4NEC2 se basa en la solución numérica de ecuaciones integrales para las Corrientes inducidas (Ecuación de Pocklington), este método sirve para la resolución de problemas electromagnéticos y obtener resultados fiables en la simulación.

Los resultados que podremos obtener en este software especializado en simulación electromagnética son los siguientes:

- Cantidad del campo electromagnético, campos irradiados cercanos y lejanos.
- Impedancias y constantes de propagación.
- Resonancias de la estructura.

A continuación las acciones que deberá realizar el usuario para proceder con la simulación.

- Crear un proyecto y construir la geometría de la antena.
- Establecer las unidades de medición (metros, pulgadas, longitud de onda)
- Seleccionar el tipo de medio deseado, por defecto se establece en Espacio Libre.
- Asignar una fuente de voltaje en el elemento radiante o activo.
- Ejecutar la validación de geometría y compilar el programa.

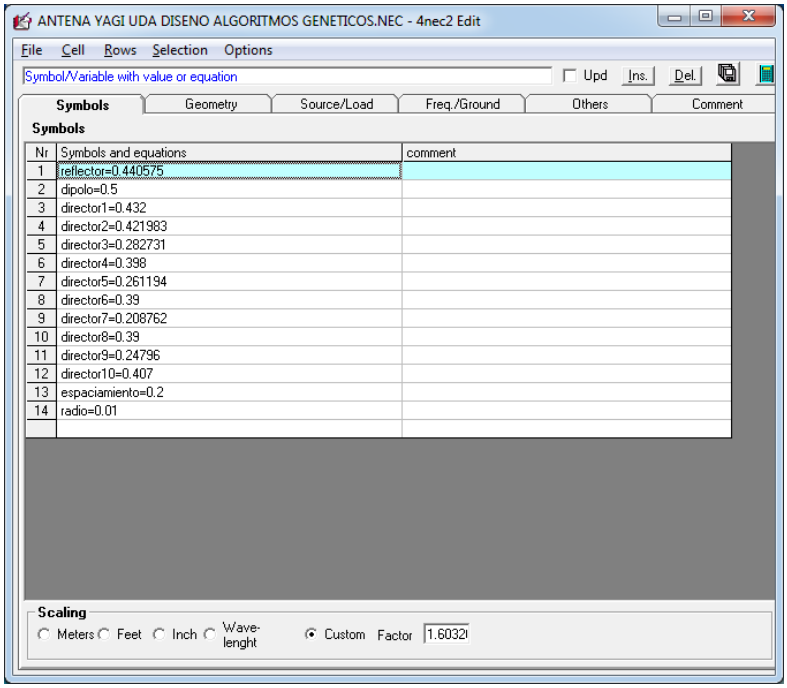
Anexo 2. 4NEC2X

4NEC2X es una extensión del software 4NEC2 que brinda la posibilidad de evolucionar las soluciones mediante el uso de Algoritmos Genéticos, permite elegir los operadores genéticos necesarios para una convergencia global partiendo de una población inicial aleatoria a la que se suma la antena modelada previamente.

La codificación se la realiza en números reales, se puede seleccionar el operador de selección (ruleta, torneo, aleatorio, etc.), cruzamiento (uniforme, un punto, dos puntos, etc.), mutación, también se puede definir el tamaño de la población inicial, el número de iteraciones y el criterio de convergencia así como la probabilidad de ejecución de los operadores genéticos mencionados anteriormente.

Para la ejecución del algoritmo genético se debe establecer las variables que conformaran cada individuo de la población por lo que en la construcción de la geometría de la antena se debe establecer cada elemento y espaciamiento en una variable independiente como se muestra en la figura 20.

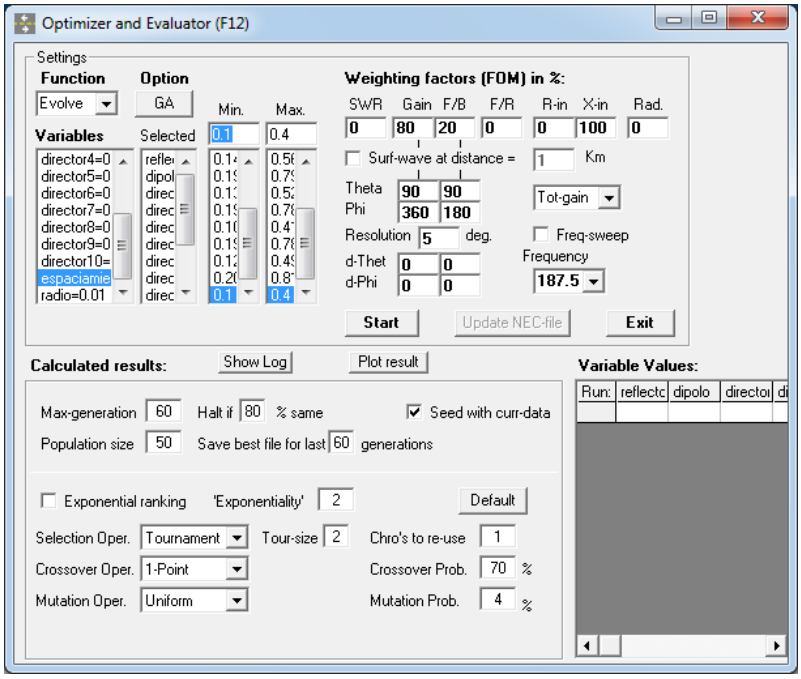
Figura 22. Variables establecidas para el diseño de la antena Yagi Uda en el software de simulación 4NEC2X.



Elaborado por: Oscar Ayala

A continuación se ingresa en la herramienta de evaluación y se procesará la antena mediante algoritmos genéticos, para ello se selecciona las variables y seleccionamos el o los parámetros que deseamos optimizar como se muestra en la figura 21.

Figura 23. Herramienta de evolución con Algoritmos Genéticos en el software de simulación 4NEC2X.



Elaborado por: Oscar Ayala

Anexo 3. Método de los Momentos

El método de los momentos es un procedimiento general para resolver ecuaciones lineales. Para esto debemos considerar la siguiente ecuación no homogénea [5].

(40)

$$F(g) = h$$

Donde F es un operador lineal, h es conocido, y g es la función a determinarse. Así, se puede expandir a la función g en una serie de funciones $g1, g2, g3, \ldots$ en el dominio de F como una combinación lineal de N términos que puede ser escrita de la siguiente manera:

(41)

$$g(z') \cong a_1 g_1(z') + a_2 g_2(z') + \cdots + a_N g_N(z') = \sum_{n=1}^{N} a_n g_n(z')\ w$$

Donde a_n son constantes desconocidas y $g_n(z')$ son llamadas las funciones de expansión o funciones base.

Se asume que un producto interno apropiado $< g, h >$ ha sido determinado para el problema. Ahora se requiere definir un set de funciones peso, o funciones de prueba, $w_1, w_2, w_3 \ldots$ en el rango de F, y tomar el producto interno de la ecuación (a.2) con cada w_m. El resultado es:

(42)

$$\sum_{n=1}^{N} a_n < w_m, Fg_n > = < w_m, h >$$

Con $m = 1, 2, 3, \cdots, N$. Este set de ecuación puede ser escrito en forma de matriz como:

(43)

$$[Z_{mn}]\,[I_n] = [V_m]$$

Donde

(44)

$$Z_{mn} = \begin{bmatrix} < w_1 F g_1 > & < w_1 F g_2 > & \cdots \\ < w_2 F g_1 > & < w_2 F g_2 > & \cdots \\ \vdots & \vdots & \cdot \end{bmatrix}$$

(45)

$$I_n = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

(46)

$$V_m = \begin{bmatrix} < w_1, h > \\ < w_2, h > \\ \vdots \end{bmatrix}$$

La matriz Zmn no es singular y su matriz inversa $[Zmn - 1]$ existe. Los coeficientes In pueden ser encontrados en la solución de (a.4).

Es de suma importancia escoger las funciones bases de manera correcta, para que esta pueda anticipar de cierta forma el resultado final y el trabajo computacional sea mínimo. Para esto se dividen en dos clases de funciones. La primera consiste en funciones de subdominio, mientras que la segunda clase consiste en funciones de dominio completo. (Castillo Almeida & Quirós Vinueza, 2009)

Anexo 4. Código fuente software Matlab

```
function [costo] = fitness22(individuo)   %     declarar variables globales

global mmax nmax z rho n2 nmode l

[ind, gen] = size(individuo);

mmax = 30;

nmax = 30;
```

% ingreso de longitudes de elementos, separaciones entre elementos (la variable yp define la distancia absoluta del arreglo en el eje y, desde el reflector hacia el ultimo director, alpha es el radio de los elementos.

% nota: todas las variables deben ser ingresadas en función de la longitud de onda

% número de modos establecido en la variable m, por procesamiento se ha establecido un número de modos=8.

```
m=8;
```

% número de elementos de la antena Yagi, se establece en 12, 10 directores, 1 reflector y 1 dipolo.

```
n=11;
```

% Ingreso de las separaciones y longitudes de los elementos de la antena Yagi

```
%     ingreso de longitudes de los directores

for ia=1:ind

    for ja=1:10

    a = 1;

    while a <= (n-2)

        b = individuo(ia,ja);
```

```
            l (a) = b;
        a = a + 1;
    end
    end
    for ja=11
% Ingreso de la longitud del reflector
b =  individuo(ia,ja);
l (n-1) = b;
    end
 for ja=12
%    ingreso de la longitud del elemento activo
b =  individuo(ia,ja);
l (n) = b;
 end
%     ingreso de las separaciones de los elementos de la antena Yagi
% Separación entre el elemento activo y el primer director
 for ja=13
b =  individuo(ia,ja);
s_1 = b;
 end
%     separación entre directores
```

```
 for ja=14:(gen-1)
    a = 2;
    while a <= (n-2)
        b =  individuo(ia,ja);
            s (a) = b;
  a = a + 1;
    end
    s (1) = s_1;
 end
%     separación entre el elemento activo y el reflector
 for ja=gen
    b = individuo(ia,ja);
    s (n-1) = b;
 end
% radio de los elementos se establece en 0.0085
b=0.0085;
alpha = b;
fid1 = 0;
fid2 = 0;
%     Inicio de los cálculos
a = 1;
```

```
while a <= (n - 2)
    yp (a) = a * s (a);
    a = a + 1;
end
yp (n-1) = - s (n-1);
yp (n) = 0;
res = 0;
g2 = 0;
index = 0;
dz = l / (2 * m - 1);
eta = 120 * pi;
mu = 4 * pi * 10 ^ (-7);
c = 3 * 10 ^ 8;
k = 2 * pi;
rtod = 180 / pi;
dtor = pi / 180;
a = zeros (m * n, m * n);
b = 1:(m*n);
b = b * 0;
inm = zeros (n, m);
i = 1;
```

```
while i <= (m * n)
    ifact = floor ((i - 1) / m);
    n1 = ifact + 1;
    imode = i - ifact * m;
    z = (m - imode) * dz (n1);
    j = 1;
    while j <= (m * n)
        jfact = floor ((j - 1) / m);
        n2 = jfact + 1;
        nmode = j - jfact * m;
        if (n1 == n2)
            rho = alpha;
        else
            rho = yp (n1) - yp (n2);
        end
        ll = 0;
        ul = l (n2) / 2;
        res = sinteg (ul, ll, 10);
        len = l (n2) / 2;
        g2 = kernel (len);
        f2m = nmode * 2 - 1;
```

```
        a (i, j) = eta / (j * 8 * pi ^ 2) * ((f2m * pi / l (n2)) * (-1) ^ (nmode + 1) * g2 + ...
                    (k ^ 2 - f2m ^ 2 * pi ^ 2 / l (n2) ^2) * res);
        j = j + 1;
    end
    i = i + 1;
end
i = zeros (1, m * (n - 1));
j = ones (1, m);
a (m * n, :) = [i j];
b (m * n) = 1;
isize = n * m;
[a, iperm, pivot] = ludec (a, isize);
b = lusolv (a, isize, iperm, b);
ncut = 0;
i = 1;
while i <= n
    j = 1;
    while j <= m
        inm (i, j) = b (j + ncut);
        j = j + 1;
    end
```

```
    ncut = ncut + m;
    i = i + 1;
end.
ncut = 0;
ml = 1;
while ml <= 2
    if (ml == 1)
        phi = 90 * dtor;
        max = 181;
    else
        phi = 270 * dtor;
        max = 180;
    end
    icount = 1;
    while icount <= max
        theta = (icount - 1) * dtor;
        if (theta > pi)
            phi = 270 * dtor;
        end
        ezp = 0;
        i = 1;
```

```
        while i <= n
            izp = 0;
            j = 1;
            while j <= m
                mode = j;
                len = l (i);
                ang = theta;
                izp = izp + inm (i, j) * (zminus (ang, len, mode) + zplus (ang, len, mode));
                j = j + 1;
            end
            aexp = k * yp (i) * sin (theta) * sin(phi);
            ezp = ezp + l (i) * exp (j * aexp) * izp;
            i = i + 1;
        end
        etheta (ncut + icount) = j * c * mu / 8 * sin (theta) * ezp;
        icount = icount + 1;
    end
    ncut = ncut + max;
    ml = ml + 1;
end
emax = 10 ^ (-12);
```

```
abs_etheta = abs (etheta);

arg = max (abs_etheta);

if arg > emax

    emax = arg;

end

i = 1;

while i <= 361

    theta = i - 1;

    arg = abs (etheta (i));

    if ((arg/emax) > (10 ^ (-6)))

        eth (i) = 20 * log10 (arg / emax);

    else

        eth (i) = -120;

    end

    %fprintf (fid1, ' %12.4f%12.4f\n', theta, eth (i));

    i = i + 1;

end

e_plane = eth;

eftob = - eth (271);

i = 91;

while i <= 270
```

```
    eth (i) = eth (i) + 3;
    i = i + 1;
end
i = 91;
while i <= 270
    theta = i-1;
    if (eth (i) == 0)
        e3d_bw = 2 * ((i - 1) - 90);
        i = 300;
    elseif ((eth (i - 1) > 0) & (eth (i) < 0))
        e3d_bw = 2 * (- eth (i) / (eth (i) - eth (i - 1)) + (i - 1) - 90);
        i = 300;
    end
    i = i + 1;
end
theta = 90 * dtor;
max = 361;
icount = 1;
while icount <= max
    phi = (icount - 1) * dtor;
    ezp = 0;
```

```
    i = 1;
    while i <= n
        izp = 0;
        j = 1;
        while j <= m
            mode = j;
            len = l (i);
            ang = phi;
            izp = izp + inm (i, j) *(zminus (ang, len, mode) + zplus (ang, len, mode));
            j = j + 1;
        end
        aexp = k * yp (i) * sin (theta) * sin(phi);
        ezp = ezp + l (i) * exp (j * aexp) * izp;
        i = i + 1;
    end
    etheta (icount) = j * c * mu / 8 * sin (theta) * ezp;
    icount = icount + 1;
end
emax = 10 ^ (-12);
abs_etheta = abs (etheta);
arg = max (abs_etheta);
```

```
if (arg > emax)
    emax = arg;
end
i = 1;
while i <= 361
    phi = i - 1;
    arg = abs (etheta (i));
    if (arg / emax) > (10 ^ (-6))
        eth (i) = 20 * log10 (arg / emax);
    else
        eth (i) = - 120;
    end
    i = i + 1;
end
h_plane = eth;
hftob = - eth (271);
i = 1;
while i <= 181
    eth (i) = eth (i) + 3;
    i = i + 1;
end
```

```
i = 91;
while i <= 270
    phi = i - 1;
    if (eth (i) == 0)
        h3d_bw = 2 * ((i - 1) - 90);
        i = 300;
    elseif (eth (i-1) > 0) & (eth (i) < 0)
        h3d_bw = 2 * (- eth (i) / (eth (i) - eth (i - 1)) + (i - 1) - 90);
        i = 300;
    end
    i = i + 1;
end
theta = 90 * dtor;
phi = 90 * dtor;
az = 0;
i = 1;
while i <= n
    izp = 0;
    j = 1;
    while j <= m
        mode = j;
```

```
        len = l (i);
        ang = theta;
        izp = izp + inm (i, j) *(zminus (ang, len, mode) +zplus (ang, len, mode));
        j = j + 1;
    end
    aexp = k * yp (i) * sin (theta) * sin (phi);
    az = az + l (i) * exp (j * aexp) * izp;
    i = i + 1;
end
umax = 3.75 * pi * abs (az) ^ 2 * sin (theta) ^ 2;
prad = scint2 (0, pi, 0, 2 * pi, n, m, inm, yp);
d0 = 4 * pi * umax / abs (prad);
%fprintf (fid, '\n   relacion frontal - tracera = %12.4f  db\n', hftob);
%fprintf (fid, '\n   directividad = %16.3f  db\n', 10 * log10 (d0));
diferencia=(hftob./12)+(10 * log10 (d0))*individuo(ia);
costo=diferencia.*(-1);
end
function ans = sinteg (ul, ll, no)
gauss = [-0.0950125098376370 , -0.2816035507792590
         -0.4580167776572270 ,  -0.6178762444026440
         -0.7554044083550030 , -0.8656312023878320
```

```
        -0.9445750230732330 , -0.9894009349916500
         0.0950125098376370 , 0.2816035507792590
         0.4580167776572270 , 0.6178762444026440
         0.7554044083550030 , 0.8656312023878320
         0.9445750230732330 , 0.9894009349916500];
legend = [0.1894506104550680 , 0.1826034150449240
         0.1691565193950020 , 0.1495959888165770
         0.1246289712555340 , 0.0951585116824930
         0.0622535239386480 , 0.0271524594117540
         0.1894506104550680 , 0.1826034150449240
         0.1691565193950020 , 0.1495959888165770
         0.1246289712555340 , 0.0951585116824930
         0.0622535239386480 , 0.0271524594117540];
del = (ul - ll) / (2 * no);
sum = 0;
j = 1;
while j <= no
   s = ll + (2 * j - 1) * del;
   i = 1;
   while i <= 16
      x = s + gauss (i) * del;
```

```
        sum = sum + legend (i) * ff (x);

        i = i + 1;

    end

    j = j + 1;

end

ans = sum * del;

function value = ff (x)

global z rho n2 nmode l

k = 2 * pi;

rminus = sqrt (rho ^ 2 + (z - x) ^ 2);

rplus = sqrt ( rho ^ 2 + (z + x) ^ 2);

f2m = nmode * 2 - 1;

value = (exp (-j * k * rminus) / (4 * pi * rminus) + ...

         exp (-j * k * rplus) / (4 * pi * rplus)) * ...

        cos (f2m * pi * x / l (n2));

function g2 = kernel (zp)

global z rho

k = 2 * pi;

rminus = sqrt (rho ^ 2 + (z - zp) ^ 2);

rplus = sqrt (rho ^ 2 + (z + zp) ^ 2);

g2 = exp (-j * k * rminus) / (4 * pi * rminus) + ...
```

```
    exp (-j * k * rplus) / (4 * pi * rplus);

function value = zminus (th, lg, nm)

k = 2 * pi;

f2m = 2 * nm - 1;

arg1 = (f2m * pi / lg - k * cos (th)) * (lg / 2);

if (arg1 == 0)

   value = 1;

else

   value = sin (arg1) / arg1;

end

function value = zplus (th, lg, nm)

k = 2 * pi;

f2m = 2 * nm - 1;

arg2 = (f2m * pi / lg + k * cos (th)) * (lg / 2);

if (arg2 == 0)

   value = 1;

else

   value = sin (arg2) / arg2;

end

function value = fxz (theta, phi, n, m, inm, yp)

global l
```

```
k = 2 * pi;

az = 0;

i = 1;

while i <= n

    izp = 0;

        j = 1;

    while j <= m

        mode = j;

        len = l (i);

        ang = theta;

        izp = izp + inm (i, j) * (zminus (ang, len, mode) + zplus (ang, len, mode));

        j = j + 1;

    end

    aexp = k * yp (i) * sin (theta) * sin (phi);

    az = az + l(i) * exp (j * aexp) * izp;

    i = i + 1;

end

u = 3.75 * pi * abs (az) ^ 2 * sin (theta) ^ 2;

value = sin (theta) * u;

function [a, iperm, scal] = ludec (z, n)

i = 1;
```

```
while i <= n
    zmax = 0;
    j = 1;
    while j <= n
        caz = abs (z (i,j));
        if (caz > zmax)
            zmax = caz;
        end
        j = j + 1;
    end
    scal (i) = 1 / zmax;
    i = i + 1;
end
%    crout's algorithm.
j = 1;
while j <= n
    i = 1;
    while i <= (j - 1)
        k = 1;
        while k <= (i - 1)
            z (i, j) = z (i, j) - z (i, k) * z (k, j);
```

```
        k = k + 1;
    end
    i = i + 1;
end
zmax = 0;
i = j;
while i <= n
   k = 1;
   while k <= (j - 1)
       z (i, j) = z (i, j) - z (i, k) * z (k, j);
       k = k + 1;
   end
   test = scal (i) * abs (z (i, j));
   if (round ((test - zmax) * 10 ^ 8) > 0)
       imax = i;
       zmax = test;
   end
   i = i + 1;
end
if (j ~= imax)
    k = 1;
```

```
        while k <= n
            temp = z (imax, k);
            z (imax, k) = z (j, k);
            z (j, k) = temp;
            k = k + 1;
        end
        scal (imax) = scal (j);
    end
    iperm (j) = imax;
    if (j ~= n)
        i = j + 1;
        while i <= n
            z (i, j) = z (i, j) / z (j, j);
            i = i + 1;
        end
    end
    j = j + 1;
end
a = z;
function b = lusolv (z, n, iperm, v)
i = 1;
```

```
while i <= n
    temp = v (iperm (i));
    v (iperm (i)) = v (i);
    j = 1;
    while j <= (i - 1)
        temp = temp - z (i, j) * v (j);
        j = j + 1;
    end
    v (i) = temp;
    i = i + 1;
end
i = 1;
while i <= n
    ii = n - i + 1;
    temp = v (ii);
    j = ii + 1;
    while j <= n
        temp = temp - z (ii, j) * v (j);
        j = j + 1;
    end
    v (ii) = temp / z (ii, ii);
```

```
    i = i + 1;
end
b = v;
function res = scint2 (x1, x2, z1, z2, n, m, inm, yp)
r = [0.0950125098 , 0.2816035508
     0.4580167777 , 0.6178762444
     0.7554044084 , 0.8656312024
     0.9445750231 , 0.9894009350
     -0.9894009350 , -0.9445750231
     -0.8656312024 , -0.7554044084
     -0.6178762444 , -0.4580167777
     -0.2816035508 , -0.0950125098];
w = [0.1894506105 , 0.1826034150
     0.1691565194 , 0.1495959888
     0.1246289713 , 0.0951585117
     0.0622535239 , 0.0271524594
     0.0271524594 , 0.0622535239
     0.0951585117 , 0.1246289713
     0.1495959888 , 0.1691565194
     0.1826034150 , 0.1894506105];
sx = 0.5 * (x2 + x1);
```

```
dx = 0.5 * (x2 - x1);

sz = 0.5 * (z2 + z1);

dz = 0.5 * (z2 - z1);

tt = 0;

j = 1;

while j <= 16

    z  = sz + dz * r (j);

    ss = 0;

    i = 1;

    while i <= 16

        x  = sx + dx * r (i);

        ss = w (i) * fxz (x, z, n, m, inm, yp) + ss;

        i = i + 1;

    end

    s = dx * ss;

    tt = s * w (j) + tt;

    j = j + 1;

end

res = dz * tt;

%  end of the sint2 function
```