

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

Optimización del diseño de antenas Yagi-Uda usando Algoritmos Genéticos

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Jhoel Velásquez Silva

ASESOR: Ing. A. Carlos Alcócer

Lima, Julio del 2013

Resumen

El ser humano desde siempre ha tenido la necesidad innata de comunicarse en cualquier lugar y en cualquier momento. Esto ha impulsado un desarrollo asombroso en el área de las telecomunicaciones y especialmente en los últimos 30 años, en los cuales se han logrado tales avances en esta área de la ingeniería que a esta etapa de la historia de la humanidad se le ha denominado como la “era de las comunicaciones”.

Hace más de un siglo que Hertz demostró la posibilidad de enviar ondas electromagnéticas de un punto al otro vía inalámbrica. Menos de una década después, Marconi puso en marcha la primera comunicación transatlántica dando origen al negocio de las telecomunicaciones [1].

En los últimos treinta años, gracias al avance de los computadores y al perfeccionamiento de las técnicas numéricas se han producido mejoras significativas en los parámetros de desempeño de las antenas, debido a que se han podido implementar dichos métodos para estructuras muy complejas. En la actualidad existen diversos programas de análisis de antenas basados en estos métodos, los cuales han contribuido al avance de las telecomunicaciones [1].

En el presente trabajo de investigación se expone los fundamentos electromagnéticos aplicados a antenas y su implementación computacional; posteriormente se explicara los fundamentos teóricos de optimización teniendo como técnica principal a los algoritmos genéticos. A partir de esto se propone un diseño para la solución óptima de desempeño para antenas Yagi.

El desarrollo del diseño del sistema de optimización se expone en 4 capítulos. En el primero, se aborda la teoría de antenas; en el segundo, se expone a los algoritmos genéticos; en el tercero, se explica el diseño de optimización y sus restricciones; finalmente, en el cuarto, se realizan las pruebas de simulación para demostrar el funcionamiento adecuado y esperado.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título	: Optimización del diseño de antenas Yagi-Uda usando Algoritmos Genéticos
Área	: Comunicaciones
Asesor	: Ing. A. Carlos Alcócer
Alumno	: Jhoel Velásquez Silva
Código	: 20042214
Fecha	: 13/12/2012

Descripción y Objetivos

Gracias al avance de las comunicaciones, al desarrollo computacional y al perfeccionamiento de las técnicas numéricas se han producido mejoras significativas en el diseño de los parámetros y desempeño de antenas. Actualmente, se usan programas que aplican diferentes técnicas de procesamiento para llegar a soluciones óptimas ahorrando tiempo y material.

En esta tesis se hará una exposición de los fundamentos matemáticos de la teoría electromagnética; posteriormente se expondrá los algoritmos genéticos como propuesta de optimización. Estos algoritmos están basados en la representación de las soluciones del problema mediante cadenas de variables y en la ejecución de una serie de operadores inspirados en la teoría de la evolución y en las leyes de la genética para ir mejorando el conjunto de soluciones.

El objetivo general es implementar un programa computacional que utiliza a los algoritmos genéticos como técnica principal de optimización del diseño de antenas Yagi-Uda. Este algoritmo consiste en encontrar una distribución física de la antena que genere la mejor distribución radiante para una frecuencia determinada, para ello se definen el espacio de búsqueda (soluciones factibles), los operadores genéticos (cruzamiento y mutación), un indicador de calidad (función objetivo) y las restricciones del problema. Cabe resaltar que el alcance de la presente tesis es el diseño e implementación óptima de un programa computacional más no construcción física de la antena.

El desarrollo del diseño del sistema de optimización demanda conocimiento de teoría electromagnética, técnicas computacionales y fundamentos de optimización considerando las restricciones del sistema planteado. Finalmente se realizan pruebas de simulación para demostrar el funcionamiento adecuado y esperado.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Optimización del diseño de antenas Yagi-Uda usando Algoritmos Genéticos

Índice

Introducción

1. Descripción de Antenas Yagi-Uda.
2. Optimización mediante algoritmos genéticos.
3. Modelamiento de la programación del diseño de antenas Yagi-Uda.
4. Resultados experimentales - Conclusiones.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Índice general

Introducción	1
1. Descripción de Antenas Yagi-Uda	3
1.1. Antenas	3
1.2. Parámetros Básicos	4
1.2.1. Parámetros de Impedancia	4
1.2.2. Diagrama de radiación de una antena.	6
1.2.3. Intensidad de radiación. Directividad y ganancia	9
1.3. Antenas Yagi-Uda	10
1.4. Método de los Momentos	11
1.4.1. Planteamiento	11
1.4.2. Ecuación Integral de Pocklington	12
1.4.3. Método de los momentos aplicado a un filamento de alambre	15
2. Optimización mediante algoritmos genéticos	20
2.1. Introducción	20
2.2. Métodos de búsqueda y optimización.	20
2.3. Métodos de optimización metaheurística	21
2.3.1. Algoritmos evolutivos y algoritmos genéticos	22
2.4. Algoritmos Genéticos	23
2.4.1. Conceptos generales	23
2.4.2. Representación de las soluciones	24
2.4.3. Generación de la población inicial	25
2.4.4. Evaluación de las soluciones	26
2.4.5. Recombinación y cruce	27
2.4.6. Mutación	28
2.4.7. Selección y reemplazo de los elementos de la población	29
2.4.8. Otros operadores	29
2.4.9. Criterio de convergencia	29

3. Modelamiento de la programación del diseño de antenas Yagi-Uda	31
3.1. Introducción	31
3.2. Características del modelo	32
3.2.1. Modelo propuesto	32
3.2.2. Información de entrada del modelo	32
3.2.3. Salida del modelo	33
3.3. Función objetivo	33
3.4. Implementación del modelo usando AG	34
3.4.1. Variables de decisión y Restricciones de operación	34
3.4.2. Representación de soluciones	35
3.4.3. Estructura del algoritmo genético	36
3.4.4. Generación de la población inicial	36
3.4.5. Evaluación de las soluciones	38
3.4.6. Proceso de creación de descendencia	38
3.4.7. Operador de cruzamiento	39
3.4.8. Operador de mutación	40
3.4.9. Competencia y recambio generacional	40
3.4.10. Criterio de finalización	41
3.5. Algoritmo implementado	41
3.6. Conclusiones	42
4. Resultados experimentales	43
4.1. Ensayos de conformidad	43
4.1.1. Ensayos – restricciones físicas	43
4.1.2. Ensayos – función objetivo	44
4.1.3. Ensayos – parámetros radiantes	45
4.2. Pruebas de Optimización	46
4.3. Aportes	50
Conclusiones Generales	55
Recomendaciones para trabajos futuros	57
Bibliografía	58

Índice de figuras

Figura 1.1: Esquema de una antena de transmisión	4
Figura 1.2: esquema de antena transmisora	5
Figura 1.3: Distintas representaciones del diagrama de radiación	8
Figura 1.4: Elementos de una antena Yagi	10
Figura 1.5: Alambre delgado de alta conductividad a lo largo del eje Z	13
Figura 1.6: Modelos teóricos de un alambre Delgado	14
Figura 1.7: Aproximación escalonada de una distribución de corriente	17
Figura 2.1: Representación binaria	25
Figura 2.2: Representación entera	25
Figura 2.3: Representación real	25
Figura 2.4: Cruzamiento en un punto	27
Figura 2.5: Cruzamiento en dos puntos	28
Figura 2.6: Cruzamiento uniforme	28
Figura 3.1 (a)-(b): Ganancia versus número de elementos	35
Figura 3.2: Estructura matricial de la solución candidata	36
Figura 3.3: Estructura del algoritmo genético propuesto	37
Figura 3.4: Espacio de búsqueda	38
Figura 3.5: Proceso de creación de descendencia	39
Figura 3.6: Operador de cruzamiento	39
Figura 3.7: Operador de mutación aleatoria	40
Figura 4.1: Evolución de Población y Evolución de la Función Objetivo Vs Iteraciones	48
Figura 4.2: ROE Vs Frecuencia	48
Figura 4.3: Relación Frontal-Trasera Vs Frecuencia	49

Índice de tablas

Tabla 2.1: Comparación entre los sistemas naturales y la terminología de los algoritmos genéticos	22
Tabla 2.2: Etapas principales de un algoritmo genético	24
Tabla 4.1: Restricción según Blanis y restricción en la tesis propuesta	44
Tabla 4.2: Comparativo - parámetros radiantes para 100 MHz	45
Tabla 4.3: Comparativo entre software QY4® Vs Tesis para 100 MHz	46
Tabla 4.4: Comparativo - prueba de optimización para 145.84MHz	47
Tabla 4.5: Comparativo entre software QY4® Vs Tesis para 145.84MHz	49
Tabla 4.6: Comparativo entre propuestas y aportes	54



Introducción

Las primeras predicciones teóricas de la existencia de ondas electromagnéticas fueron hechas por Maxwell en 1864. Éstas no fueron detectadas experimentalmente hasta que Hertz en 1886 construyó una fuente radiante resonante formada por dos placas metálicas conectadas a una bobina inductiva y un sistema receptor formado por una espira abierta, demostrando así la posibilidad de enviar este tipo de ondas de un punto a otro vía inalámbrica. Menos de una década después, Marconi puso en marcha la primera comunicación transatlántica dando origen al negocio de las telecomunicaciones.

El último impulso en el diseño de antenas se ha dado desde los años 60 hasta ahora con las comunicaciones de espacio profundo y comunicaciones vía satélite. La introducción de las computadoras, técnicas de programación (algoritmos evolutivos, optimización metaheurística, etc.) y la aplicación masiva de métodos numéricos (Método de los Momentos, Métodos Modales, etc.) ha producido mejoras significativas en los parámetros de desempeño, permitiendo analizar y sintetizar nuevas antenas de estructuras muy complejas y optimizarlas para cada aplicación.

Un tipo de antena muy utilizada debido a su simplicidad y facilidad de construcción, es conocido con el nombre de Antena de Alambre Delgado. Dicha estructura es producto de moldear uno o más buenos conductores en una forma tubular y con un diámetro pequeño comparado con su longitud total.

Infinidad de veces se han propuesto modificaciones y adiciones a este tipo de estructuras produciendo cada vez más novedosos y sorprendentes tipos, entre las cuales se pueden mencionar las antenas en forma recta, circular, en forma de V y entre las estructuras más complejas se puede mencionar las antenas helicoidales, antenas periódicas, logarítmicas y antenas Yagi.

Las antenas Yagi también conocidas con el nombre Yagi-Uda en honor al investigador S. Uda y al profesor H. Yagi, quienes experimentaron con éste tipo de antenas, han sido muy utilizadas en aplicaciones tales como recepción de señales de TV en las

bandas de VHF y UHF, y en repetidores en las bandas de telefonía celular. Estas antenas son estructuras fabricadas con múltiples elementos, donde cada elemento tiene su propia distribución de corriente [4].

Cabe resaltar que este tipo de Antenas también permite tener características de radiación importantes como una emisión o recepción directiva en cierta región del espacio (alta directividad), una baja radiación (o recepción) de ondas en la parte trasera de la antena (relación frontal-trasera) y una facilidad de acoplamiento (impedancia y relación de onda estacionaria). Estas antenas han sido objeto de un extenso y exhaustivo análisis y experimentación.

Uno de los aspectos prioritarios en la operación de un sistema de comunicación inalámbrica usando antenas Yagi es la eficiencia de operación al transmitir y recibir señales electromagnéticas. Esto está supeditado a factores electromagnéticos y físicos por tal motivo éste tipo de antenas es susceptible a mejoras y optimizaciones.

Por tal razón el objetivo general de la presente tesis es investigar, proponer e implementar un programa computacional que, por una parte, utiliza a los Algoritmos Genéticos como técnica principal de optimización; éste algoritmo consiste en encontrar una distribución física de la antena que genere la mejor distribución radiante en una frecuencia determinada, para ello se definen el espacio de búsqueda (soluciones factibles), los operadores genéticos (cruzamiento y mutación), un indicador de calidad (función objetivo). Y, por otra parte, al Método de los Momentos como método matemático en el campo electromagnético, el cual estima las densidades de corriente eléctrica impresa e inducida a partir de los parámetros de la estructura física y la frecuencia de operación.

Por otro lado, también, se debe tomar en cuenta las restricciones tanto físicas como eléctricas, véase acápite 3.4.1., que den una mayor confiabilidad de resultados en la implementación del diseño propuesto.

Finalmente se realizan pruebas de simulación para demostrar el funcionamiento adecuado y esperado, respetando las características propias de la antena Yagi y sus respectivas restricciones.

1. Descripción de Antenas Yagi-Uda

1.1. Antenas

El “Institute of Electrical and Electronics Engineers” (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1983).

Las formas de las antenas son muy variadas, y todas ellas tienen como común denominador ser una transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y el espacio libre, a la vez que distribuye la energía radiada en las distintas direcciones con un cierto carácter direccional, que dependerá de la aplicación concreta. Por ejemplo en radiodifusión o comunicaciones móviles se querrá radiar sobre la zona de cobertura de forma omnidireccional, mientras que en radioenlaces fijos interesará una radiación direccional. Si se estudia la antena en recepción, toda antena es capaz de captar energía del espacio, absorberla y entregarla al receptor [2].

Las dos funciones básicas de una antena son las de *transmitir* y *recibir*. Estas funciones imponen para cada aplicación condiciones particulares sobre:

- Capacidad de irradiar o recibir en una determinada dirección (direccionalidad).
- Frecuencia o banda de frecuencias de trabajo
- Niveles de potencia que debe soportar.
- Eficiencia de la antena.

Estas características, y en particular el carácter directivo y la banda de frecuencia de trabajo, van a imponer la existencia de una gran variedad de tipos de antenas; como las Yagi-Uda.

1.2. Parámetros básicos

Los parámetros de una antena son los que permiten especificar el funcionamiento de las mismas, y son susceptibles de ser medidos. En este documento, se van a definir parámetros de tipo circuital, parámetros de tipo direccional, y parámetros específicos para transmisión o para recepción. Aplicando el principio de reciprocidad se establece una equivalencia entre ambas situaciones [2].

1.2.1. Parámetros del impedancia

Los parámetros más importantes que caracterizan una antena como si se tratara de un circuito son: la impedancia de entrada, la resistencia de radiación y el rendimiento [2].

- a) La impedancia de entrada: se define como la relación entre la tensión en sus bornes, de la antena, y la intensidad de corriente que la atraviesa por ella. En general es un número complejo que varía con la frecuencia, tanto su parte real como imaginaria, puesto que las dimensiones eléctricas de la misma varían con cuando lo hace la frecuencia. La parte real se denomina resistencia de la antena y la parte imaginaria, reactancia de la antena; ver Figura 1.1.

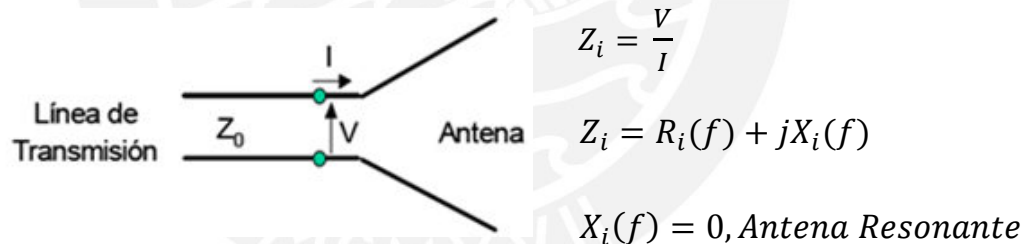


Figura 1.1: Esquema de una antena de transmisión [2]

- b) La resistencia de radiación: se define como la relación entre la potencia total radiada por una antena y el valor eficaz de la corriente en sus terminales de entrada elevada al cuadrado (1.2.a). Se debe tomar en cuenta que también dependerá básicamente de la longitud de la antena, de la frecuencia y de la velocidad de propagación que condicionara la longitud de onda.

En transmisión la antena, desde el punto de vista circuital, se puede sustituir por una impedancia de carga igual a su impedancia de entrada. Esta impedancia se conecta al generador a través de la línea de transmisión, ver Figura 1.2. Cuando se alimenta la antena con una tensión V_g se genera una distribución de corriente (fijada por las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de contorno) que produce una radiación electromagnética caracterizada por los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} , y en definitiva la radiación de una potencia P_{rad} al espacio libre.

La parte real de la impedancia de entrada de la antena transmisora (R_{iT}) es la suma de dos componentes (1.1): la resistencia de pérdidas y la resistencia de radiación (1.2).

$$R_{iT} = \text{Re}[Z_{iT}] = R_{per} + R_{rad} \quad (1.1)$$

$$R_{rad} = 2 \frac{P_{rad}}{|I|^2} \quad (1.2.a)$$

$$R_{per} = 2 \frac{P_{dis}}{|I|^2} \quad (1.2.b)$$

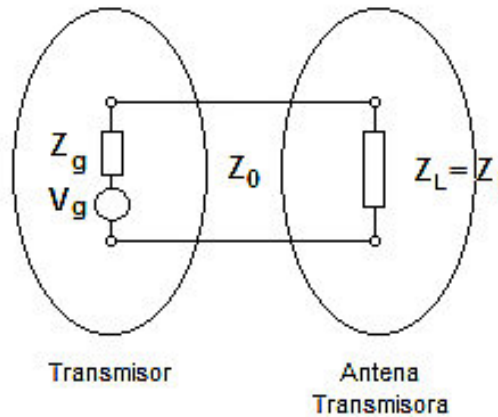


Figura 1.2: esquema de antena transmisora [2]

- c) El rendimiento de radiación de una antena: se define como el cociente entre la potencia radiada por la antena (P_{rad}) y la potencia entregada por el transmisor

a la antena (P_{ET}), esto es la potencia que la antena acepta de la disponible del transmisor. Por lo tanto, este cociente va a ser igual al cociente entre la resistencia de radiación y la resistencia de entrada (1.3).

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{ET}} = \frac{R_{rad}}{R_{per} + R_{rad}} \quad (1.3)$$

- d) Además para altas frecuencias, en lugar de definir la impedancia de entrada, se definen otra serie de parámetros más fácilmente medibles, como son el coeficiente de reflexión (1.4), relación de ondas estacionarias (ROE) (1.5) y pérdidas de retorno (P.R.) (1.6). Éstas últimas se definen como el cociente entre la potencia de la onda reflejada y la potencia de la onda incidente, y se suelen expresar en decibelios. Para el análisis de esta tesis se toma como referencia un relación de ondas estacionarias (ROE) menor a 1.5 para garantizar el funcionamiento de la antena y a partir de este parámetro estimar el ancho de banda.

$$\Gamma_T = \frac{Z_{iT} - Z_g}{Z_{iT} + Z_g} \quad (1.4)$$

$$ROE = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|} \quad (1.5)$$

$$P.R. (dB) = 10 \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} = 20 \log |\Gamma_T| \quad (1.6)$$

1.2.2. Diagrama de radiación de una antena

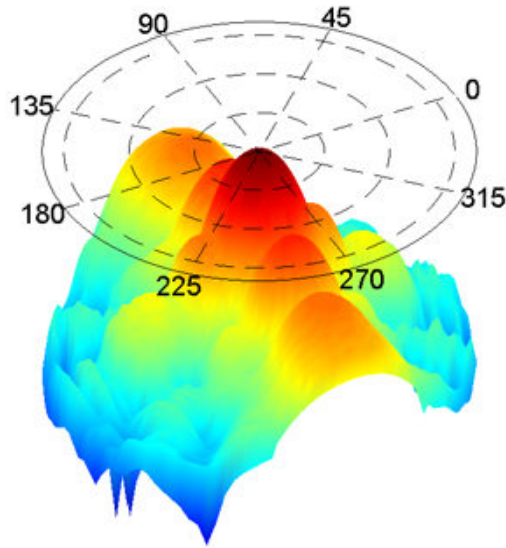
Una antena no radia del mismo modo en todas las direcciones del espacio, sino que según su geometría, dimensiones o forma de excitación es capaz de orientar la energía en determinadas trayectorias específicas. El diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades direccionales de radiación de una antena en el espacio [2]. Los tipos de diagramas son muchos y se clasifican de estas maneras:

- Según la magnitud a representar:
 - Diagramas de campo.
 - Diagramas de potencia.
- Según se normalice o no:
 - Diagramas absolutos.
 - Diagramas relativos.
- Según las coordenadas respecto a las que se representa el campo:
 - θ y φ .
 - u, v .
- Según el tipo de representación gráfica:
 - Tridimensionales 3D.
 - Diagramas 2D.

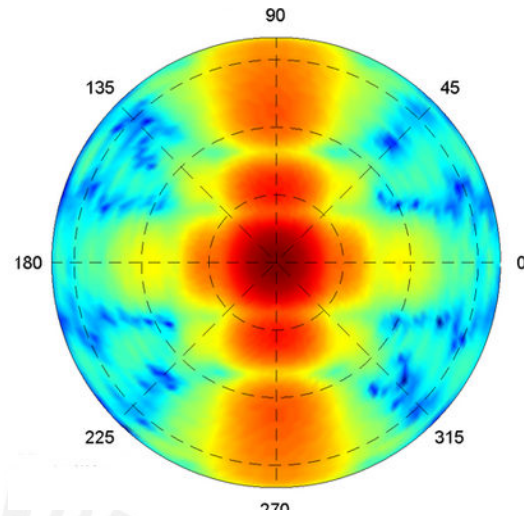
Para antenas directivas y polarización lineal suele bastar con conocer los cortes de los diagramas de los planos E y H.

Además Todos estos cortes del diagrama de radiación se pueden representar en los formatos polar y cartesiano

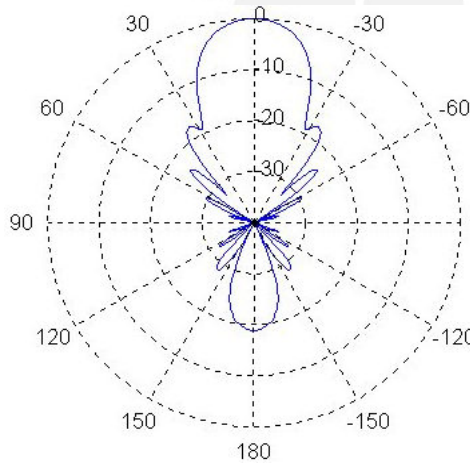
En la Figura 1.3 se muestran ejemplos de representaciones de diagramas de radiación.



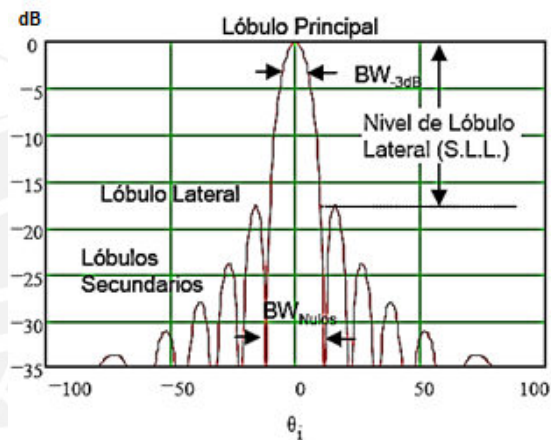
(a) Diagrama de radiación 3D en coordenadas u, v normalizados en dB



(b) Diagrama de radiación 3D en coordenadas u, v normalizados en dB



(c) Corte del Diagrama de radiación de campo en polares y normalizados



(d) Corte del Diagrama de radiación de campo en cartesianas y normalizados en dB

Figura 1.3: Distintas representaciones del diagrama de radiación

Parámetros del diagrama de radiación:

Se definen una serie de parámetros, que son los que habitualmente se utilizan para especificar el comportamiento de una antena. Los lóbulos que se suelen definir son:

- Principal.
- Secundarios.
- Laterales.
- Posteriores

Una vez definidos los lóbulos se determinan los siguientes parámetros (figura 1.3 d.):

- Nivel de lóbulos secundarios.
- Ancho del haz principal a -3 dB.
- Ancho del haz principal entre nulos.
- Relación frontal-trasera, véase [2], [8].

1.2.3. Intensidad de radiación, directividad y ganancia

La intensidad de radiación representa la capacidad que tiene una antena de radiar la energía en dicha dirección (1.7) y está definida por:

$$U(\theta, \phi) = \frac{\langle S(r, \theta, \phi) \rangle dA}{d\Omega} = r^2 \langle S(r, \theta, \phi) \rangle \quad (1.7)$$

La directividad se define como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación de una antena isótropa que radiará la misma potencia total [8].

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{isotropia}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} = 4\pi r^2 \frac{\langle S(r, \theta, \phi) \rangle dA}{P_{rad}} \quad (1.8)$$

La ganancia de potencia se define de forma equivalente a la ganancia directiva pero considerando la potencia entregada a la antena por el transmisor (P_{ET}) en lugar de la potencia radiada.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{ET}} = 4\pi r^2 \frac{\langle S(r, \theta, \phi) \rangle}{P_{ET}} \quad (1.9)$$

El rendimiento se define como:

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{ET}} = \frac{R_{rad}}{R_{per} + R_{rad}} = \frac{G(\theta, \phi)}{D(\theta, \phi)} = \frac{G_0}{D_0} \quad (1.10)$$

1.3. Antenas Yagi-Uda

Los elementos de los que están compuestas las antenas Yagi son filamentos de alambre (dipolos) entre los cuales hay un elemento activo y varios elementos parásitos que se clasifican en reflectores y directores. Estas antenas son estructuras fabricadas con múltiples elementos, donde cada uno de ellos tiene su propia distribución de corriente y estos se encuentran organizados de forma que la energía que irradia la antena se concentre en una sola dirección.

El elemento activo o excitador es el elemento que se encuentra conectado a la red de alimentación y los parásitos reciben energía a través de éste, ver Figura 1.4.

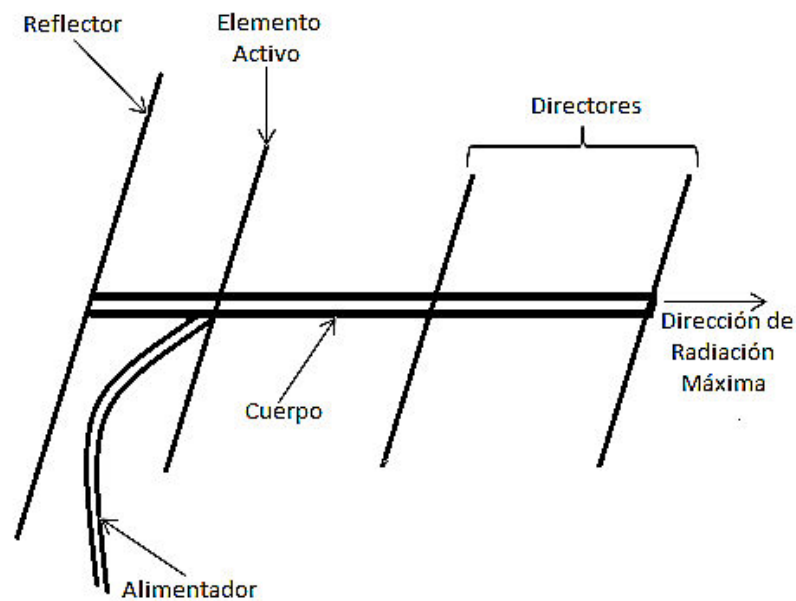


Figura 1.4: Elementos de una antena Yagi [4]

Normalmente, el elemento reflector es alrededor de 5% más largo que el componente activo, mientras que el primer elemento director es aproximadamente 5% más corto que el mismo componente activo. Cada director adicional se hace alrededor de un 5% más corto que el director anterior. En el capítulo 3 veremos los valores óptimos de los espacios entre los elementos para antenas Yagi de varios elementos [4].

1.4. Método de los Momentos (MoM)

1.4.1. Planteamiento

Existen numerosos problemas físicos conducen a ecuaciones integro-diferenciales que pueden expresarse de la forma:

$$Lu = v \quad (1.11)$$

Aquí “ u ” es un elemento desconocido de un espacio de funciones U , “ v ” es un elemento conocido (prefijado) de un espacio de funciones V (que puede coincidir con U) y L es un integro-diferencial de U en V . La ecuación (1.11) estará completada con algún tipo de condición de contorno aplicable a “ u ” [3].

En general, “ u ” constituye la respuesta del sistema físico considerando una excitación “ v ”, el operador L representa los fenómenos físicos que relacionan excitación y respuesta junto a datos tales como geometría del sistema.

En problemas electromagnéticos, la función “ v ” representa magnitudes de tipo corrientes, potenciales y campos tanto eléctricos como magnéticos con valores impuestos al sistema (condiciones de contorno) y la función “ u ” suele representar corrientes, densidades de carga, etc. Para mayor información véase [18].

1.4.2. Ecuación Integral de Pocklington.

Dada una antena compuesta por un filamento conductor (alambre) a lo largo del eje z , una forma genérica para una ecuación integral describiendo una antena como esta es:

$$-\int I(z')K(z, z')dz' = E^i(z) \quad (1.12)$$

El kernel $K(z, z')$ depende de la formulación de la ecuación integral usada.

Los problemas radiación electromagnética siempre pueden ser expresados como una ecuación integral de la forma general (ecuación 1.12) con el término de una fuente no homogénea en la derecha y el término desconocido dentro de la integral [4].

El Método de los Momentos (MoM) es un proceso de solución para aproximar una ecuación integral, como la ecuación 1.12, con un sistema de ecuaciones algebraicas lineales simultáneas en términos de la corriente desconocida $I(z')$. Entonces, una vez se conoce la corriente, el proceso para hallar el patrón de radiación y la impedancia de entrada es directo [4].

Una de las ecuaciones integrales más comunes en el tratamiento de antenas de alambre es la derivada por Pocklington en 1897. Ésta le permitió mostrar que la distribución de corrientes en alambres delgados es aproximadamente sinusoidal y se propaga muy cerca a la velocidad de la luz. Para derivar esta ecuación se considera que el alambre presenta una conductividad σ , rodeado de espacio libre (μ_0, ϵ_0) como se muestra en la Figura 1.5 (a). Cuando la conductividad del alambre es alta (por ejemplo, cobre) la corriente queda prácticamente confinada a la superficie del alambre. El modelo equivalente para el alambre se convierte en el de la Figura 1.5 (b), donde la corriente en el alambre es reemplazada por una corriente superficial [4].



(a) Alambre de alta conductividad con densidad de corriente J .

(b) Modelo equivalente de superficie con densidad corriente superficial J_s en el espacio libre.

Figura 1.5: Alambre delgado de alta conductividad a lo largo del eje z [5]

Cuando el radio del alambre es mucho menor que la longitud de onda ($a \ll \lambda$), se asume que solamente están presentes corrientes a lo largo del eje z .

A partir de la condición de Lorentz y teniendo en cuenta que el vector del campo eléctrico, el campo eléctrico en z a lo largo del alambre sería [4]:

$$E_z = -j\omega A_z - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (1.13)$$

De esta manera se llega a la contribución total al campo eléctrico es la integral sobre el volumen de la corriente:

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iiint \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z, z') \right] J dv' \quad (1.14)$$

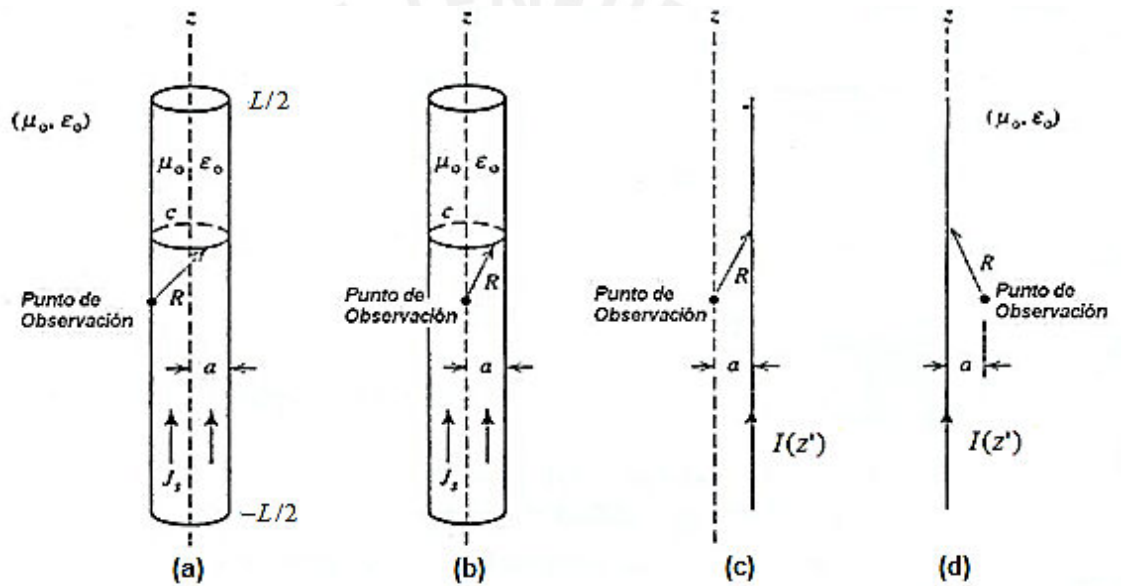
O, para el caso de corrientes superficiales:

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \oint_c \int_{-L/2}^{L/2} \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z, z') \right] J_s dz' d\phi' \quad (1.15)$$

Para $a \ll \lambda$, la distribución de corrientes es casi uniforme con respecto a ϕ' , y la ecuación 1.15 se reduce a una integral de línea de corriente. Así:

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z'^2} + \beta^2 \psi(z, z') \right] I(z') dz' \quad (1.16)$$

Hay que notar que la fuente equivalente $I(z')$ que consta de una línea de filamento está localizada a una distancia a del punto de observación como se puede ver en las Figuras 1.6 (c) y 1.6 (d) y también que no se ha asumido que el alambre sea infinitamente delgado.



- (a) Alambre con densidad superficial de corriente J_s equivalente y punto de observación en la superficie
- (b) Alambre con densidad superficial de corriente J_s y punto de observación en el eje del alambre
- (c) Fuente de filamento de línea equivalente para la situación en (b)
- (d) Representación alternativa de (c)

Figura 1.6: Modelos teóricos de un alambre delgado [5]

De acuerdo con el principio de la equivalencia de la superficie [5], se puede denotar la cantidad E_z en la ecuación 1.16 como el campo de dispersión E_z^s . Es decir, E_z^s es el campo radiado en espacio libre por la corriente equivalente $I(z')$. El otro campo presente es el campo incidente E_z^i . En la superficie de un alambre perfectamente conductor y también al interior de éste, la suma de los componentes tangenciales del campo de dispersión y del campo incidente debe ser cero. De aquí, $-E_z^s = +E_z^i$, y usando la ecuación 1.16 se obtiene lo siguiente [4].

$$\frac{-1}{j\omega\epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} I(z') \left[\frac{\partial^2 \psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \psi(z, z') \right] dz' = E_z^i(z) \quad (1.17)$$

Lo cual es el tipo de ecuación integral derivada por Pocklington y es la forma generalmente usada, hay que notar que en la ecuación el término desconocido $I(z')$ aparece solamente dentro de la integral.

En la siguiente sección se ilustrará como una ecuación integral, como la 1.17, es resuelta por medio del método de los momentos y señalar como el proceso es análogo al sistema de ecuaciones de red de Kirchhoff.

1.4.3. Método de los momentos aplicado a un filamento de alambre

Un sistema de N ecuaciones de red de *Kirchhoff* se representa de la siguiente manera:

$$\sum_{n=1}^N I_n Z_{mn} = V_m \quad m = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1.18)$$

Ahora, se resolverá la ecuación integral numéricamente escribiendo N ecuaciones con N incógnitas de la misma forma que se haría si se estuviese resolviendo un problema de un circuito con N mallas o N nodos [4].

Escribiendo la ecuación 1.18 de la siguiente manera:

$$-\int_{-L/2}^{L/2} I(z')K(z, z')dz' = E_z^i(z) \quad (1.19)$$

El primer paso para resolver esta ecuación es aproximando la corriente desconocida, por una serie de funciones expansión conocidas F_n de tal forma que:

$$I(z') = \sum_{n=1}^N I_n F_n(z') \quad (1.20)$$

donde los I_n 's son coeficientes de expansión complejos y son desconocidos. Para analizar el problema de la forma más simple posible se asume que las funciones expansión son un conjunto de funciones pulso ortogonales dadas por

$$F_n(z') = \begin{cases} 1 & \text{para } z' \text{ en } \Delta z'_n \\ 0 & \text{para el resto} \end{cases} \quad (1.21)$$

La expansión en términos de funciones pulsos es una aproximación escalonada de la distribución de corriente en el alambre, donde el alambre es dividido en N segmentos de longitud $\Delta z'_n$, como se ve en la Figura 1.7.

Substituyendo la ecuación 1.20 en la ecuación 1.19 se obtiene:

$$-\int_{-L/2}^{L/2} \sum_{n=1}^N I_n F_n(z')K(z_m, z')dz' \approx E_z^i(z_m) \quad (1.22)$$

donde el subíndice m en z_m indica que la ecuación integral está siendo aplicada en el segmento m . Hay que notar que el lado izquierdo es solo aproximadamente igual al lado derecho porque se ha reemplazado la distribución de corriente actual con una distribución aproximada. Sustituyendo la ecuación 1.21 en la ecuación 1.22 resulta:

$$-\sum_{n=1}^N I_n \int_{\Delta z'_n} K(z_m, z') dz' \approx E_z^i(z_m) \quad (1.23)$$

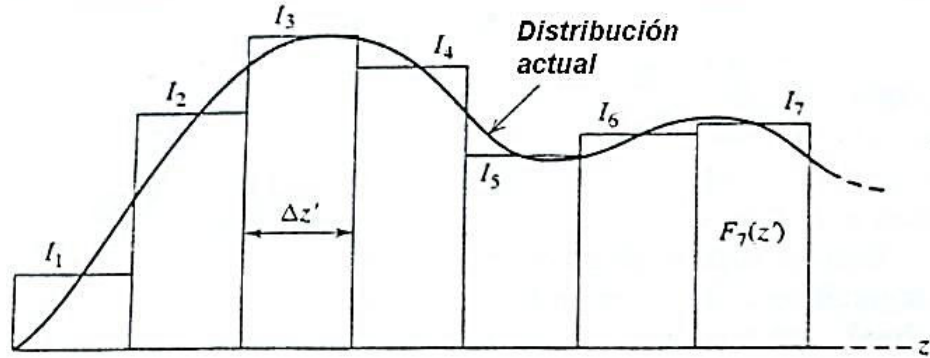


Figura 1.7: Aproximación escalonada de una distribución de corriente [5]

Por conveniencia, se toma

$$f(z_m, z'_n) = - \int_{\Delta z'_n} K(z_m, z') dz' \quad (1.24)$$

Así, las ecuaciones 1.20 y 1.21 reemplazadas en 1.19 producen

$$\begin{aligned} - \int_{-L/2}^{L/2} I(z') K(z_m, z') dz' &\approx I_1 f(z_m, z'_1) + I_2 f(z_m, z'_2) + \dots \\ \dots + I_n f(z_m, z'_n) + \dots + I_N f(z_m, z'_N) &\approx E_z^i(z_m) \end{aligned} \quad (1.25)$$

Una interpretación física de esta ecuación se da a continuación:

El alambre se divide en N segmentos (este dato se tendrá en cuenta en la implementación del código que se verá en el Capítulo 3), cada uno de longitud $\Delta z'_n = \Delta z'$, teniendo la corriente como una constante desconocida sobre cada segmento. En el centro del m -ésimo segmento, la suma de los campos de dispersión de todos los N segmentos se establece igual al campo incidente en el punto z_m . El campo incidente es un campo conocido que surge a partir de una fuente localizada en

la antena o a partir de una antena localizada a una gran distancia (recepción). Si se requiere una representación de $I(z')$ más precisa se deben usar segmentos más cortos y, por lo tanto, un N mayor, mayores tanto cantidades de cálculos como tiempos de ejecución [4].

La ecuación 1.25 conduce a

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m \quad (1.26)$$

Donde en este caso

$$Z_{mn} = f(z_{mn}, z'_n) \quad (1.27)$$

y

$$V_m = E_z^i(z_m) \quad (1.28)$$

Hay que notar que se ha alcanzado el objetivo de reducir el problema electromagnético a la ecuación 1.26, la cual es idéntica a la formulación de la red de la ecuación 1-24. Sin embargo, en problemas de electromagnetismo es necesario calcularla.

Para hallar las N incógnitas I_n 's se debe generar un sistema de N ecuaciones. Para obtener estas N ecuaciones se debe escoger un z_m diferente para cada ecuación. Es decir, se debe evaluar la ecuación integral en N puntos del alambre, este proceso se llama *point matching*, el cual es un caso especial del método de los momentos más general.

La aplicación de *point-matching* en N puntos genera el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 I_1 f(z_1, z'_1) + I_2 f(z_1, z'_2) + \dots + I_N f(z_1, z'_N) &= E_z^i(z_1) \\
 I_1 f(z_2, z'_1) + I_2 f(z_2, z'_2) + \dots + I_N f(z_2, z'_N) &= E_z^i(z_2) \\
 \vdots & \\
 I_1 f(z_N, z'_1) + I_2 f(z_N, z'_2) + \dots + I_N f(z_N, z'_N) &= E_z^i(z_N)
 \end{aligned} \tag{1.29}$$

el cual escrito en forma matricial queda:

$$\begin{bmatrix} f(z_1, z'_1) & f(z_1, z'_2) & \dots & f(z_1, z'_N) \\ f(z_2, z'_1) & f(z_2, z'_2) & \dots & f(z_2, z'_N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(z_N, z'_1) & f(z_N, z'_2) & \dots & f(z_N, z'_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_z^i(z_1) \\ E_z^i(z_2) \\ \vdots \\ E_z^i(z_N) \end{bmatrix} \tag{1.30}$$

O en la notación compacta:

$$[Z_{mn}][I_n] = [V_m] \tag{1.31}$$

Donde Z_{mn} y V_m vienen dados en las ecuaciones 1.27 y 1.28 respectivamente.

Aquí el subíndice m se refiere al punto de observación (en el centro del segmento m) en el cual la m -ésima ecuación es válida. El segundo subíndice, n , es el subíndice del punto de la fuente ya que este se encuentra asociado con el campo producido por el n -ésimo segmento o la n -ésima fuente.

La solución para la corriente en la ecuación matricial 1.31, se obtiene de la esta manera:

$$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m] \tag{1.32}$$

Donde $[Z_{mn}]^{-1}$ es la inversa de la matriz $[Z_{mn}]$. Una vez hallada la corriente, se puede proceder a determinar la impedancia de entrada y el patrón de radiación.

2. Optimización mediante algoritmos genéticos

2.1. Introducción

Para enfrentar un problema de optimización, primero se tiene que modelar el problema. Para eso, se tiene que definir el espacio de búsqueda (conjunto de todas las soluciones factibles), establecer algún tipo de indicador que permita comparar una solución con otra (función objetivo) y definir las restricciones del problema. El modelo elegido dependerá de estas características [6].

Luego, se tendrá que fijar un modelo para poder explorar dentro de todo el espacio de búsqueda para encontrar una solución óptima. Este criterio es denominado método de optimización. Se nombrará algunos métodos de optimización y búsqueda en el ítem 2.2.

La forma clásica de atacar estos problemas no ha sido muy ventajosa al resolverse de manera exacta y en tiempos razonables. Ello ha dado pie a nuevas técnicas propias del ámbito de la inteligencia artificial. Estas técnicas son denominadas metaheurísticas, que son técnicas con alto grado de eficiencia con respecto al tiempo de cómputo y certeza de solución.

2.2. Métodos de búsqueda y optimización

La optimización da lugar a un proceso de búsqueda a través del cual se pretende encontrar la mejor solución posible para un problema. Este método se refiere al proceso en sí y no al hecho de encontrar una solución. Estos métodos se pueden clasificar en tres grupos principales: los basados en la programación matemática (métodos de gradiente), los enumerativos y los de búsqueda aleatoria. Para mayor información véase [6].

2.3. Métodos de optimización metaheurística

Los métodos de optimización tomaron renombre en los ochentas, pero sus ideas fueron implantadas mucho antes. Los cuales no eran traducibles fácilmente a algoritmos útiles pues no existía un potencial de cálculos como el actual.

Estas técnicas, propias del ámbito de la inteligencia artificial, se inspiran en procesos de optimización naturales, como la teoría de la evolución, el templado de metales o el comportamiento de las colonias de hormigas, entre otros [6].

El interés de los investigadores del área es el de diseñar métodos generales que sirvan para resolver clases o categorías de problemas. Debido a que estos métodos generales sirven para construir o guiar el diseño de métodos que resuelvan problemas específicos se les ha dado el nombre de metaheurísticos. Los profesores Osman y Kelly (1995) introducen la siguiente definición [6]:

“Los procedimientos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son ni efectivos ni eficientes. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de: inteligencia artificial, evolución biológica y mecanismos estadísticos” [27].

Estos métodos son de gran utilidad para resolver problemas de optimización combinatoria muy difíciles cuyo modelo matemático no puede ser formulado fácilmente, como es el caso de la optimización de antenas Yagi-Uda utilizado en esta tesis.

En la literatura (y principalmente en Internet) es posible identificar varias técnicas de optimización metaheurística: búsqueda tabú, templado simulado, algoritmos evolutivos (algoritmos genéticos inclusive), entre otros.

2.3.1 Algoritmos evolutivos y algoritmos genéticos

Los algoritmos evolutivos se basan en la idea que la evolución es un proceso de optimización que puede ser simulado en un computador, y en que mediante la emulación de sus mecanismos (principalmente cruzamiento, mutación, competencia y reproducción) pueden resolverse problemas de optimización.

Sistema Natural	Algoritmo Genético
Cromosoma	String
Gen	Característica, carácter o detector
Alelo	Valor Característico
Locus	Ubicación dentro del string
Genotipo	Estructura
Fenotipo	Conjunto de parámetros, estructura decodificada
Epístasis	No linealidad

Tabla 2.1: Comparación entre los sistemas naturales y la terminología de los algoritmos genéticos [23]

Además de los algoritmos genéticos, existen otras técnicas basadas en el concepto de la evolución vista como un proceso natural de optimización. La programación evolutiva y sus estrategias se pueden ver con más detalle en [19], [21], [22], [26]. Las diferencias entre estos procedimientos y los algoritmos genéticos están dadas por los mecanismos evolutivos que emplean y la forma en que éstos se implementan. A este conjunto de métodos basados en la idea de la evolución suele denominarseles algoritmos evolutivos. Algunos principios biológicos que han sido utilizados por los algoritmos genéticos (y evolutivos en general) son [6]:

- La evolución opera en los cromosomas y no en los individuos a los que representan.
- La selección natural es el proceso por el que los cromosomas con "buenas estructuras" se reproducen más a menudo que los demás.

- En el proceso de reproducción tiene lugar la evolución mediante operadores genéticos que actúan sobre los cromosomas de los progenitores. Llamamos cruzamiento o recombinación a este proceso en el que se forma el cromosoma del descendiente. También son de tener en cuenta las mutaciones que pueden alterar dichos códigos.
- La evolución biológica no tiene memoria en el sentido de que en la formación de los cromosomas únicamente se considera la información del período anterior.

Por ser los algoritmos genéticos la técnica base usada en esta Tesis para realizar la programación de antenas Yagi-Uda, serán analizados más adelante.

2.4. Algoritmos Genéticos

2.4.1. Conceptos generales

Los Algoritmos Genéticos (AG) fueron introducidos por John Holland en la década de los setenta, inspirándose en el proceso de mejoramiento y adaptación progresiva de poblaciones de individuos a su entorno que se observa en la evolución natural de los seres vivos [6].

Los AG se sustentan en dos ideas principales: la representación de las soluciones del problema mediante “strings” (usualmente binarios, naturales o reales), en la presente tesis se utilizara la representación por números reales; y la ejecución de una serie de operadores inspirados en la teoría de la evolución y en las leyes de la genética para ir mejorando conjuntos de soluciones (poblaciones).

En términos globales, los AG comienzan con un grupo aleatorio de soluciones (población). Luego, mediante alteraciones aleatorias de las soluciones (cruzamiento y/o mutación), la población va generando descendencia. Posteriormente, se miden las características de cada solución con respecto a la función objetivo y a las restricciones. De acuerdo a su ‘adaptación al ambiente’, compiten en un proceso de selección. Finalmente, las soluciones sobrevivientes quedan como los padres de la siguiente generación y el proceso se repite, como puede verse en la Tabla 2.2.

Así, empezando desde una generación inicial de soluciones candidatas, se producen generaciones avanzadas con individuos que resultan progresivamente mejores a sus progenitores.

Los AG son algoritmos de optimización metaheurística de características robustas, puesto que son utilizables en problemas en que la función objetivo o las restricciones no pueden ser expresadas en forma explícita, o bien presentan no linealidades o discontinuidades extremas. Además, trabajan bien tanto en problemas multimodales como de alta dimensionalidad [6].

Paso 1	Elección aleatoria de población de soluciones
Paso 2	Mutación y/o cruzamiento aleatorio de elementos de la población
Paso 3	Evaluación de calidad de soluciones
Paso 4	Competencia entre soluciones y eliminación de aquellas de baja calidad a través de algún criterio de selección
Paso 5	Si se cumple criterio de convergencia, finalizar. Si no, volver a paso 2

Tabla 2.2: Etapas principales de un algoritmo genético [6]

2.4.2. Representación de las soluciones

Antes de implementar un AG, resulta fundamental establecer una adecuada representación de las soluciones. Esta representación debe contener toda la información relevante de cada solución. Nótese que las operaciones del AG dependerán del tipo de representación, por lo que una elección condiciona a la otra. La representación de las soluciones juega un papel similar a la información cromosómica en los sistemas biológicos. Así, cada variable de decisión constituiría un gen, mientras que cada solución correspondería a un cromosoma.

Aunque los primeros años el tipo de representación más usado era siempre binario, debido a que se adapta perfectamente al tipo de operaciones y el tipo de operadores que se utilizan en un algoritmo genético. Sin embargo, las representaciones binarias no son siempre efectivas por lo que se empezaron a utilizar otro tipo de representaciones. En general, una representación ha de ser capaz de identificar las

características constituyentes de un conjunto de soluciones, de forma que distintas representaciones dan lugar a distintas perspectivas y por tanto distintas soluciones. Podemos considerar tres tipos básicos de representaciones [7]:

- *Representación binaria*: Cada gen es un valor 1 ó 0.

1	0	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---

Figura 2.1: Representación binaria

- *Representación entera*: Cada gen es un valor entero.

2	5	3	-1	7	4
---	---	---	----	---	---

Figura 2.2: Representación entera

- *Representación real*: Cada gen es un valor real.

3.14	2.7	3	0	-1.5	7.9
------	-----	---	---	------	-----

Figura 2.3: Representación real

2.4.3. Generación de la población inicial

El primer paso de los AG es generar una población inicial de soluciones sobre la cual empezar a aplicar los operadores genéticos. Esta población suele generarse aleatoriamente, aunque en ocasiones se incluyen soluciones con algún material cromosómico en particular. En general asegura una convergencia más rápida, pero se corre el riesgo de perder diversidad en la población [6].

Un aspecto importante a considerar en esta etapa es que la población tenga la suficiente diversidad, de modo que pueda explorar zonas más amplias del espacio de búsqueda. Así se pueden obtener soluciones más cercanas al óptimo global (se define en el acápite 2.4.4) y evitar la convergencia prematura.

2.4.4. Evaluación de las soluciones

Con el objeto de ser capaces de comparar dos o más soluciones, debe introducirse una forma de evaluar las soluciones, basándose en la función objetivo y en las restricciones del problema. A la evaluación de cada solución se le suele denominar calidad (*fitness* en inglés) [6].

Para controlar la factibilidad de las soluciones, al índice de calidad puede sumársele un factor de penalización proporcional a la violación de cada restricción. Este factor de penalización puede ser constante o ir ajustándose en la medida que transcurren las generaciones.

Así, en la medida que las generaciones transcurren, las soluciones no factibles se van descartando y las poblaciones quedan formadas principalmente por soluciones factibles de alta calidad.

Nótese que los algoritmos genéticos son capaces de trabajar eficientemente tanto con soluciones factibles como con aquellas que no lo son, lo cual ofrece importantes ventajas comparativas en problemas con espacios de búsqueda muy complejos, como es el caso de la optimización de antenas Yagi-Uda.

Para entender mejor la evaluación de las soluciones se define lo siguiente:

“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” [fuente propia].

“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” [fuente propia].

2.4.5. Recombinación y cruce

La recombinación o 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, una opción es usar la técnica denominada rueda de ruleta, la cual consiste en asignar a cada solución una probabilidad de ser elegido padre proporcional a su índice de calidad, para mayor información véase [19].

Además de la rueda de ruleta, existen otras alternativas para elegir a las soluciones progenitoras, tales como la selección por torneo (la cual es más simple de implementar) o la selección por residuo estocástico. La selección por torneo consiste en elegir más de dos padres y seleccionar sólo a los dos mejores para que se crucen.

Una vez elegidos los padres, existen distintos operadores de cruzamiento que se pueden aplicar. Para un análisis comparativo de los distintos operadores de cruzamiento, véase [20]. Algunos de los más usados son:

- Cruzamiento en un punto:

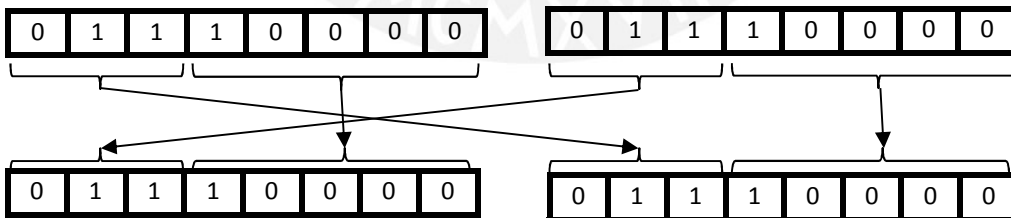


Figura 2.4: Cruzamiento en un punto

- Cruzamiento en dos puntos:

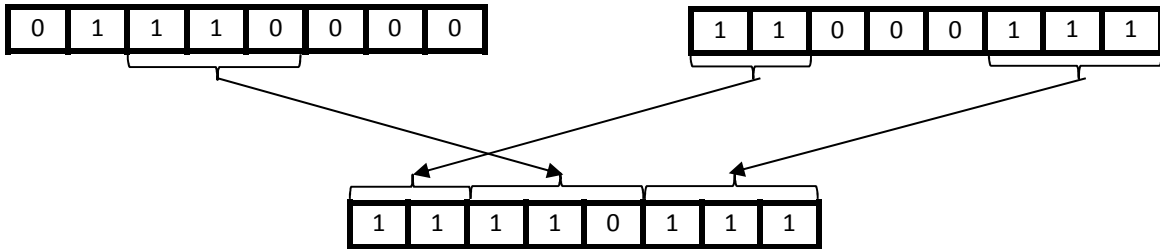


Figura 2.5: Cruzamiento en dos puntos

- Cruzamiento uniforme:

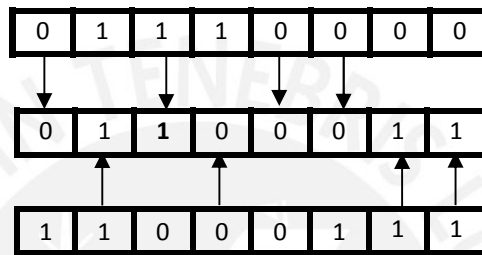


Figura 2.6: Cruzamiento uniforme

Existen también operadores de cruzamiento más complejos que nacen como producto de combinar y aleatorizar las técnicas anteriores. También, se debe considerar el tipo de representación. Estos operadores pueden aprovecharse de las características propias del problema que se quiere resolver para producir buenas soluciones en cada generación y mejorar el comportamiento del algoritmo.

2.4.6. Mutación

El operador de mutación realiza modificaciones aleatorias en strings elegidos al azar. De esta forma, la mutación aporta diversidad en la población de soluciones, permitiendo una exploración más completa del espacio de búsqueda. Desde otro punto de vista, el motivo principal para usar este operador es prevenir la pérdida permanente de un bit, o variable, determinado y así evitar la convergencia prematura permitiendo escapar de óptimos locales [19].

El operador de mutación más sencillo corresponde a cambiar, con una determinada probabilidad, el valor de un bit (en caso de ser un string binario). La aplicación de este operador correspondería a moverse desde una esquina del hipercubo a una vecina. Esto permite explorar hiperplanos que con el uso exclusivo del operador de cruzamiento podrían quedar inexplorados.

Cabe señalar que es perfectamente factible llevar a cabo mutaciones de otra índole que se adapten mejor a las particularidades del problema bajo análisis.⁴

2.4.7. Selección y reemplazo de los elementos de la población

La evolución tiene lugar en los cromosomas, que son quienes concentran en forma codificada la información de un ser vivo. Esta información varía entre distintas generaciones. Aquellos individuos con mejor material genético tendrán mejores posibilidades de adaptarse y sobrevivir en un medio hostil y cambiante. Es lo que se conoce como selección natural.

Los AG toman de la naturaleza este concepto de la sobrevivencia del más apto a través de un proceso de competencia entre los elementos de la población. En consecuencia, los individuos de la nueva población de soluciones (la nueva generación) corresponderán a aquellas soluciones que hayan sobrevivido al proceso de selección [6].

2.4.8. Otros operadores

Además de los operadores genéticos denominados canónicos (cruzamiento y mutación), es posible definir otros operadores que permiten explorar el espacio de búsqueda de mejor manera. Algunos de estos operadores son: *Inversión*, *Reparación de soluciones*, *Elitismo*, *Refresco*, *Operadores especialmente creados* [6].

2.4.9. Criterio de convergencia

En el caso de strings (representaciones) binarios, Holland en 1975 formuló el denominado *Teorema de Esquemas* para analizar la convergencia de los AG.

Este teorema se basa principalmente en considerar que un string es un representante de una clase de equivalencia o esquema, reinterpretando la búsqueda en lugar de entre strings, entre esquemas. El teorema de esquemas prueba que la población converge a esquemas que cada vez son más parecidos, y en el infinito a un único esquema.

Para mayor información respecto al teorema de esquemas, véase [22], [19], [23] y [24].

En consecuencia, tenemos 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 AG se suelen usar las siguientes convenciones [20]:

- 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 [6].

3. Modelamiento de la programación del diseño de antenas Yagi-Uda

3.1. Introducción

El presente capítulo presenta el modelamiento para la programación del diseño de antenas Yagi-Uda. Así, se hará uso de la teoría del Método de los Momentos y a partir de sus resultados analizar la función objetivo para posteriormente implementarlo usando teorías de optimización metaheurísticas, específicamente teoría de algoritmos genético.

Se enumerarán y explicarán los supuestos considerados. Estos supuestos se formularon tomando en cuenta los parámetros de diseño y características de las antenas, y específicamente de las Yagi-Uda, estudiados en la literatura.

En la sección 3.4 se elabora detalladamente el diseño de un sistema basado en algoritmos genéticos para implementación y simulación del modelo de optimización de una antena Yagi-Uda propuesto en esta tesis.

Teniendo claramente especificados los supuestos, se procede a construir el modelo. Se formulara una definición de las características básicas y necesarias para hablar de un diseño y/o modelo óptimo que cumpla con los requerimientos para esta aplicación.

Ahora bien, para entender los alcances del problema abordado por esta Tesis, se tomará en cuenta la siguiente definición de trabajo.

Definición:

“La Optimización del diseño de antenas Yagi-Uda, usando Algoritmos Genéticos, consiste en determinar la mejor estructura radiante que nos proporcione la mejor característica de Directividad y Relación Frontal-Trasera; así como la estructura física de los elementos que conforman la antena (activo, reflector y directores), de forma que satisfaga los requerimientos de una aplicación específica y cumplimiento de las restricciones de construcción (tanto radiantes como físicas)” [fuente propia].

Junto con esto se detallarán tanto la información de entrada necesaria como la salida que se espera una vez que se lleve a cabo la implementación y la simulación computacional del modelo.

3.2. Características del modelo

3.2.1. Modelo propuesto

El objetivo principal del modelo propuesto en la presente tesis es principalmente la optimización de la mejor distribución de los elementos físicos que componen este tipo de antenas (alimentador, directores, reflectores) para obtener la mayor directividad y relación frontal-trasera. La formulación matemática del problema de optimización se centra la solución del Método de los Momentos (MoM) que en el diseño implementado devendrá en función objetivo.

Así, considerando una aplicación específica, el modelo propuesto procesa la información de entrada, lleva a cabo un algoritmo de optimización (Algoritmo Genético en particular), obteniendo como resultado distribuciones físicas de elementos, directividad, relación delante-atrás, diagramas de radiación y distribución de corrientes (en esta tesis vamos a dejar de lado el cálculo de la impedancia por no ser tan significativo en la solución).

3.2.2. Información de entrada del diseño

Los parámetros principales de entrada serán:

- Frecuencia de diseño (f)
- Longitud de Onda (λ)
- Número de elementos (un alimentador, un reflector, directores).

La relación entre frecuencia (MHz) y longitud (metros) de onda es:

$$\lambda = 300/f \quad (3.1)$$

También se puede considerar cambios en los parámetros de entrada del diseño implementado, tales como: diámetro de dipolos (metros), número de nodos del análisis de antenas aplicado en MoM, cantidad de individuos en la población y número de interacciones generacionales.

3.2.3. Salida del modelo

Los parámetros de salida serán:

- Directividad
- Diagramas de radiación
- Relación de onda estacionaria ROE
- Diagrama ROE vs frecuencia
- Relación Frontal-Trasera
- Diagrama de Relación Frontal-Trasera vs frecuencia
- Distribución de elementos físicos
- Tamaño de antena.

3.3. Función objetivo

La Función Objetivo (FO) corresponderá a la evaluación en la búsqueda de la maximización de la Directividad y de la Relación Frontal-Trasera obtenidos por el Método de los Momentos (MoM). La formulación matemática del Método de los Momentos se vio en el capítulo 1.4 el cual se implementó computacionalmente como una rutina del modelo propuesto para determinar los parámetros de radiación. Los coeficientes de dichos parámetros se obtuvieron al hacer pruebas de cálculo con el software propuesto el cual se detalla más adelante en el acápite 4.1.2.

Los parámetros son evaluados por la siguiente función objetivo:

$$F(D, FTB) = D + \frac{1}{11.5} FTB \quad (3.2)$$

Dónde:

D: Directividad

FTB: Relación Frontal-Trasera

3.4. Implementación del modelo usando AG

Se vio en capítulos anteriores, que el diseño de una antena corresponde a aquella que nos de cómo resultado, indiferentemente de la distribución física de sus elementos, el mejor parámetro de ganancia (numéricamente el mayor) y relación frontal-trasera, en menor importancia. Los coeficientes que le asignamos a estos dos valores se muestran en estudios realizados anteriormente, ver [9].

Usando los métodos tradicionales tomaría mucho tiempo encontrar el óptimo valor. Por ello se opta para implementar este modelo algoritmos genéticos, ya que estos permiten obviar algunas de las dificultades que se generan a partir de los métodos tradicionales y aun así encontrar soluciones iguales o mejores en menores tiempos.

En primer lugar, se discutirá acerca del parámetro de variación de las longitudes de cada elemento, o dipolos, en función a su longitud de onda (λ) pues no se modelara como variables continuas sino discretas, a estas llamaremos variables o rangos de decisión.

Luego se procederá a describir la estructura de cada solución candidata, aspecto fundamental para diseñar y construir el algoritmo.

Posteriormente se describirá la estructura del algoritmo genético. Se indicarán en detalle la inicialización, la evaluación de las soluciones candidatas y los operadores de cruzamiento, mutación de soluciones que se incorporaron al algoritmo.

3.4.1. Variables de decisión y Restricciones de operación

El problema de optimización del diseño de antenas Yagi-Uda, tal como se ha definido anteriormente, consiste en determinar el mejor rendimiento óptimo de sus características electromagnéticas a partir de la distribución física de los elementos que conforman la antena Yagi para una frecuencia específica. En la literatura de antenas, ver [8], se sugiere lo siguiente:

- Longitud de Alimentador: $[0.47 - 0.49] \lambda$
- Longitud de Directores: $[0.4 - 0.45] \lambda$
- Diámetro de Alambre: $D \ll \lambda$
- Longitud de Reflector: $[0.5 - 0.6] \lambda$
- Espacio entre Alimentador y Reflector: $[0.2 - 0.5] \lambda$
- Espacio entre Directores: $[0.3 - 0.4] \lambda$

En el acápite 4.1.1 se hacen ensayos para constatar estos datos y/o proponer variaciones que ayuden a obtener mejor desempeño para el diseño propuesto. Otras restricciones son propuestas en la bibliografía dada, ver [8] y [5]. En la que señala que a partir del sexto elemento, según [8], en adelante no aumenta significativamente el valor de ganancia o directividad por más que se incrementen elementos a la antena, como directores, ver Figura 3.1.

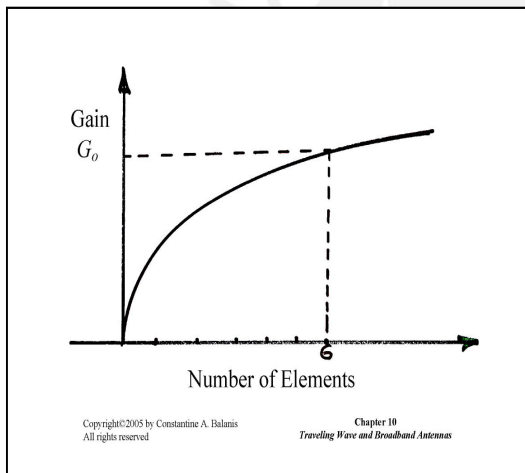


Figura 3.1 (a): Ganancia versus número de elementos [8]

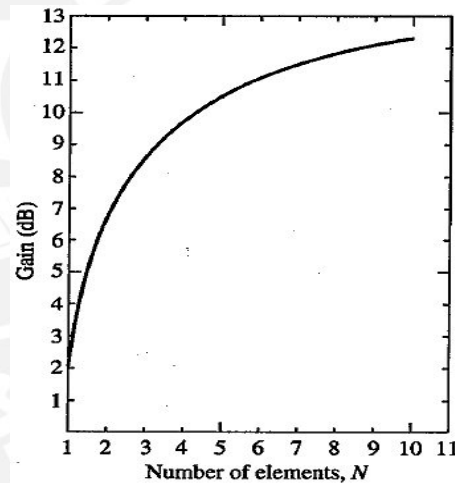


Figura 3.1 (b): Ganancia versus número de elementos [5]

3.4.2. Representación de soluciones

Cada solución candidata estará estructurada por el conjunto de los elementos físicos que conforman la antena Yagi para una frecuencia específica. Estos elementos, o variables de decisión y restricciones, se vieron en el acápite 3.4.1 y se analizarán en el acápite 4.1.1. La representación matricial de las soluciones se muestra en la Figura 3.2.

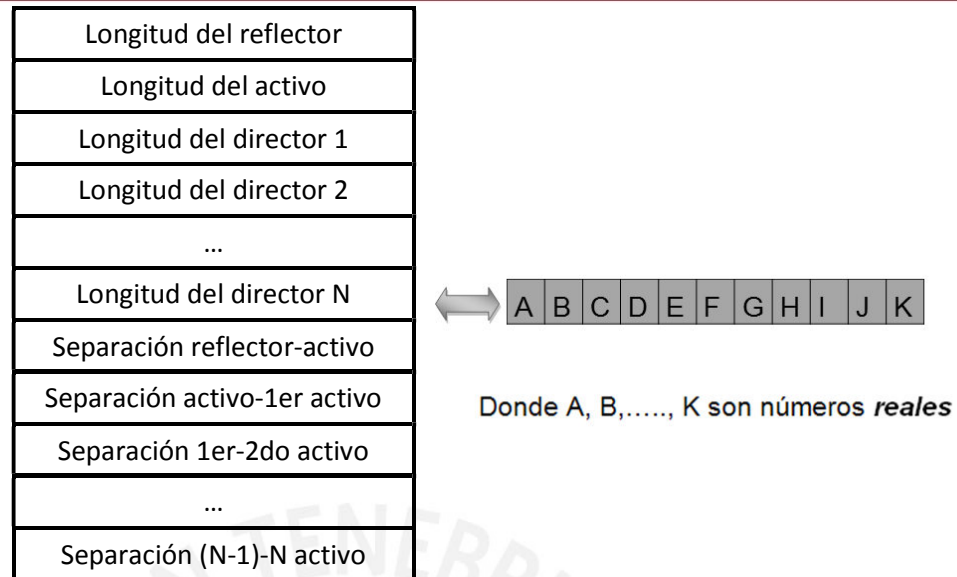


Figura 3.2: Estructura matricial de la solución candidata [8]

3.4.3. Estructura del algoritmo genético

El esquema general de la estructura del algoritmo genético, con sus respectivas etapas, puede verse en la Figura 3.3, mayor detalle véase [6], [22], [19], [23], [24], [26].

3.4.4. Generación de la población inicial

En primer lugar se tiene que decidir la cantidad o número de elementos de la población inicial que vendría a ser un subconjunto de todas las posibles combinaciones de todo el universo de posibilidades. Existe evidencia que un número grande de elementos en la población no asegura una mejor convergencia, pero sí hace crecer en forma lineal el tiempo de ejecución del algoritmo [6]. Acá se tiene que hacer pruebas para determinar la cantidad de individuos de la población para buscar un compromiso entre calidad y tiempo de ejecución.

La población inicial se escogerá como dato de entrada. Cabe resaltar que luego de probar con grupos de 10, 20, 30, 40 y 50 soluciones por población, se pudo observar que sobre 20 soluciones el resultado final no mejoraba sustancialmente.

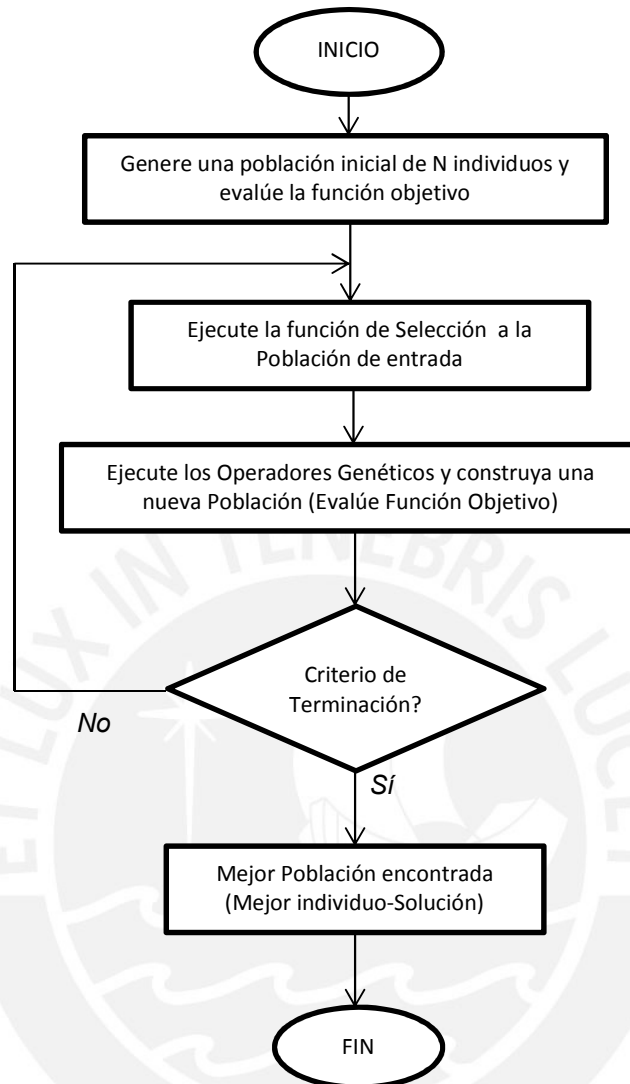


Figura 3.3: Estructura del algoritmo genético propuesto [1]

La Figura 3.4 nos muestra la distribución hipotética del de universo de soluciones llamado espacio de búsqueda; dentro de este universo se escoge aleatoriamente posibles soluciones que viene a ser la población inicial los cuales por medio de operadores genéticos comienzan a generar nuevas soluciones cada vez más optimas, para luego terminar por medio de un criterio de finalización que detallamos en el acápite 3.4.11.

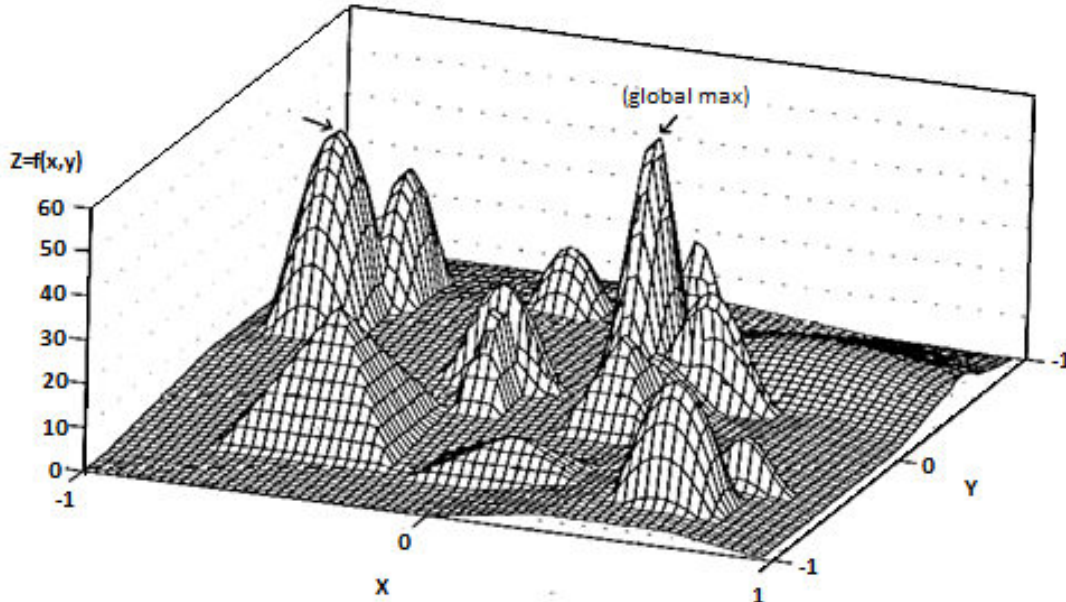


Figura 3.4: Espacio de búsqueda [10]

3.4.5. Evaluación de las soluciones

Con el fin de poder comparar dos soluciones candidatas resulta imprescindible contar con algún mecanismo que evalúe la calidad de cada solución. Esta evaluación se realizará mediante el cálculo de la función objetivo indicada en el acápite 3.3.

Evidentemente, la rutina que calcula la evaluación de las soluciones candidatas dependerá fuertemente del tipo de representación de las soluciones que se utiliza.

3.4.6. Proceso de creación de descendencia

En la Figura 3.6 se puede apreciar un esquema del proceso de creación de descendencia. Al conjunto de N_{eg} elementos de la población $\{G_1, \dots, G_k, \dots, G_{N_{eg}}\}$ se le aplican operadores de cruzamiento y mutación con el objeto de crear un conjunto de soluciones descendientes $\{D_1, \dots, D_k, \dots, D_{N_{eg}}\}$ [6].

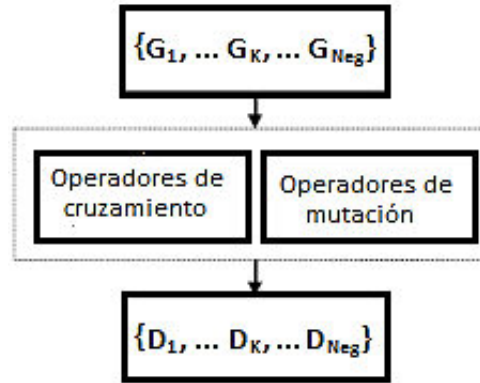


Figura 3.5: Proceso de creación de descendencia [6]

3.4.7. Operador de cruzamiento

La selección de los padres se hizo de forma aleatoria (usando una distribución uniforme), esto permite tener gran variedad de características para ser elegidas y tener diversidad de población.

Un hijo (solución de la nueva descendencia) será el resultado de un promedio aritmético; y el otro hijo del promedio geométrico, ver la Figura 3.7.

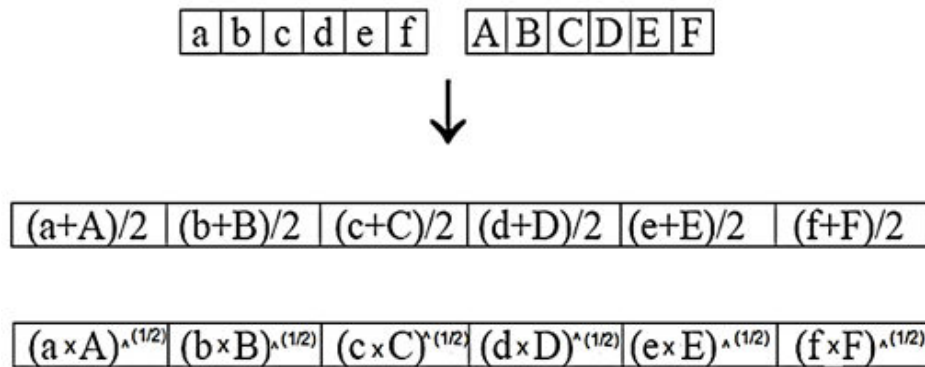


Figura 3.6: Operador de cruzamiento

3.4.8. Operador de mutación

Sobre el conjunto de descendientes creados por los operadores de cruzamiento ($\{D1, \dots Dk, \dots D_{Neg}\}$) se aplica el operador de mutación, de este modo se aumenta la diversidad de la población y se evita la convergencia prematura. Nótese que los operadores por sí solos no crean nuevos individuos, sino que operan sobre los descendientes creados mediante los operadores de cruzamiento.

El criterio utilizado en esta tesis es Mutación Aleatoria. Corresponde al operador de mutación estándar, en el cual un gen (variable) aleatorio de cada cromosoma (solución) de la descendencia tiene la misma probabilidad de cambiar su estado, ver Figura 3.8.

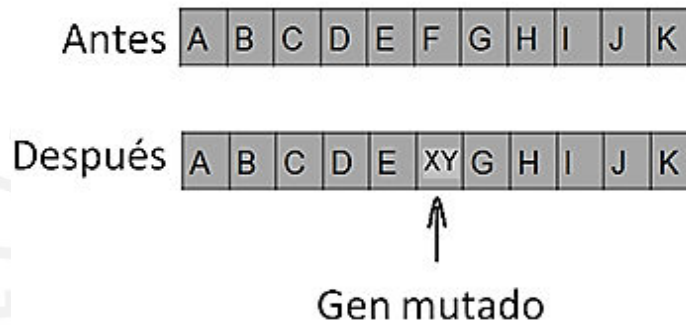


Figura 3.7: Operador de mutación aleatoria

3.4.9. Competencia y recambio generacional

Básicamente lo que se hace es que en cada generación, los N_{eg} elementos de la población actual compiten directamente con los N_{eg} descendientes en base a sus respectivas calidades (función objetivo con mayor peso numérico). Esta competencia por sobrevivir y formar parte de la generación siguiente es llevada a cabo a través del siguiente procedimiento:

Procedimiento de Selección:

Paso 1: Por cada dos soluciones G_k seleccionados aleatoriamente se generaran dos descendiente D_k por medio del cruzamiento.

Paso 2: De toda la nueva generación descendiente se escogerá aleatoriamente el 25%, a los se les aplicara el operador de mutación.

Paso 3: Se evalúa las calidades (por medio de la función objetivo) de los padres y de los hijos, los cuales serán en total el doble de la población inicial.

Paso 4: Del total (padres e hijos) se escoge al 25% con mayor valor de calidad los cuales pasaran a conformar la nueva generación (o nueva población) y el 75% restantes se escogerán aleatoriamente de los no escogidos, entre padres e hijos, para completar la nueva descendencia.

De esta manera se crea la nueva generación de población que será evaluada nuevamente hasta llegar al criterio de terminación del algoritmo y así encontrar el óptimo.

3.4.10. Criterio de finalización

El criterio de finalización propuesta en esta tesis es Finalización por Número de Iteraciones. Para facilitar la comparación de las soluciones obtenidas en distintas simulaciones, se determinó como un parámetro de entrada el número de iteraciones (generaciones). Cabe resaltar que luego de probar con 10, 30, 50, 80, 100, 120, y 150 iteraciones se pudo observar que sobre las 60 iteraciones el resultado no mejoraba sustancialmente.

3.5. Algoritmo implementado

La estructura e implementación del algoritmo se muestra en los anexos. Los resultados se mostraran en el siguiente capítulo.

3.6. Conclusiones

En el presente capítulo se resaltó la definición principal que tiene como estudio la presente tesis y el alcance del problema abordado.

Se presentó el modelamiento para la optimización de antenas Yagi-Uda. Para esto se especificaron los parámetros de entrada y de salida del diseño, así como los supuestos y restricciones en los que éste modelo se basa. Además, se hizo uso de los resultados del Método de los Momentos para determinar la función objetivo sugerido para la presente tesis.

También se presentó la implementación del algoritmo genético para el diseño óptimo de una antena Yagui-Uda, cuyos resultados se señalan el siguiente capítulo. En este contexto, se presentaron y discutieron tanto la estructura del algoritmo (estructura de solución) como los operadores genéticos empleados,

Una parte fundamental del problema está dada por la forma en que se representan las soluciones, ya que los operadores genéticos y los mecanismos de evaluación de las soluciones dependen fuertemente de este factor [6].

Si bien los algoritmos genéticos no aseguran alcanzar el óptimo global, si son capaces de entregar buenas soluciones sin necesitar sacrificar el realismo del diseño en que se basa.

4. Resultados experimentales

En este capítulo se presentan los resultados numéricos y gráficos de la simulación y optimización del diseño propuesto; además de los ensayos del modelo planteado con las restricciones y supuestos. Se incluyen los aportes de la tesis respecto a anteriores trabajos similares.

Los algoritmos empleados en las simulaciones, que se presentan a continuación, fueron programados en MATLAB 2010[®] la cuales se llevaron a cabo en un computador con procesador Intel Core i5 de 2.67 GHz, con 4 GB de memoria RAM, con sistema operativo Windows 7.

4.1. Ensayos de conformidad

En estos ensayos se establecen las restricciones físicas asumidas en el modelo. Luego se explica cómo se determina la Función Objetivo. Finalmente se concluye que el software diseñado en esta tesis proporciona resultados coherentes a lo esperado en comparación con el software comercial QY4[®].

4.1.1. Ensayo – restricciones físicas

A partir de la literatura bibliográfica acerca de los parámetros físicos de distribución de las antenas Yagi sugerido por Balanis, véase [8], se hacen pruebas para constatar estas restricciones y/o proponer nuevos parámetros que nos ayuden a obtener un mejor rendimiento según el diseño propuesto. Esto ayuda a la reducción del tiempo de convergencia para encontrar valores óptimos. Estas pruebas se hacen variando el rango sugerido de cada parámetro y comparando el valor de su rendimiento con la Función Objetivo.

Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 4.1, a continuación:

Parámetros	Propuesta de Blanis	Propuesta Tesis
<i>Longitud de Alimentador</i>	$[0.47 - 0.49] \lambda$	$[0.46 - 0.5] \lambda$
<i>Longitud de Directores</i>	$[0.4 - 0.45] \lambda$	$[0.4 - 0.5] \lambda$
<i>Diámetro de Alambre</i>	$D \lll \lambda$	$D \lll \lambda$
<i>Longitud de Reflector</i>	$[0.5 - 0.6] \lambda$	$[0.5 - 0.7] \lambda$
<i>Espacio entre Alimentador y Reflector</i>	$[0.2 - 0.5] \lambda$	$[0.05 - 0.15] \lambda$
<i>Espacio entre Directores</i>	$[0.3 - 0.4] \lambda$	$[0.3 - 0.1] \lambda$

Tabla 4.1: Restricción según Blanis y restricción en la tesis propuesta

4.1.2. Ensayo - función objetivo

En la definición de esta tesis, ver acápite 3.1, se señaló que la optimización consiste en determinar la mejor estructura radiante que proporcione la mejor característica de directividad y relación frontal-trasera en forma conjunta; y en acápite 3.3 exponemos la Función Objetivo que relaciona a estos parámetros y sus respectivos coeficientes.

El propósito de este ensayo es determinar un equilibrio entre dichos parámetros, el cual proporciona la mejor estructura radiante. Y partimos de la definición que el principal parámetro de optimización es la directividad y en segundo término la relación frontal-trasera, véase [2], [3], [5] y [8]. Por tanto le damos el peso de uno al coeficiente del principal parámetro. Posteriormente buscamos una fracción que acompañará a la relación frontal-trasera. Partimos de la propuesta que hace César De La Cruz López, véase [9], que señala que el denominador tiene que ser el máximo número hallado en las pruebas de la relación frontal-trasera de su algoritmo. Con esta consideración se hace un barrido de números de forma repetitiva, en busca de dicho denominador, partiendo de uno hasta 40 (el máximo hallado de la relación frontal-trasera del diseño de la tesis). Y observamos que en 11.5 se obtiene el mejor desempeño de directividad y relación frontal-trasera en forma conjunta.

De estas pruebas obtenemos lo que mostramos en el acápite 3.3 como la Función Objetivo propuesta en la presente tesis.

4.1.3. Ensayo - parámetros radiantes

En este ensayo, que no es de optimización, mostramos que los valores de los parámetros de radiación que forman parte de la Función Objetivo tienen que ser similares a los valores obtenidos por el programa QY4[®].

Elegimos una frecuencia de 100 MHz y tres directores, un reflector y un alimentador (de un diámetro de ½ pulgada). Con estos datos hacemos pruebas las cuales nos dan como resultado una solución de distribución física y radiante. Luego el resultado de los parámetros físicos, que se obtuvieron, se evalúa en el software QY4[®]. Obtenemos lo siguiente, en la Tabla 4.2:

<u>Parámetros</u>	<u>Software Tesis</u>	<u>Software QY4[®]</u>
Datos ingresados:		
Frecuencia de la onda [MHz]:	100	100
Número de directores:	3	3
Individuos de la población [# par]:	2	2
Diámetro de los elementos [m]:	0.0127	0.0127
Número de iteraciones:	30	30
Resultados – parámetros mecánicos:		
Longitud de reflector:	1.5992 m	1.5992 m
Longitud de alimentador:	1.4304 m	1.4304 m
Longitud del director (1):	1.3145 m	1.3145 m
Longitud del director (2):	1.2749 m	1.2749 m
Longitud del director (3):	1.2920 m	1.2920 m
La separación del reflector al alimentador:	0.90774 m	0.90774 m
La separación del alimentador al 1er director:	0.61004 m	0.61004 m
La separación del director (1 – 2):	1.23540 m	1.23540 m
La separación del director (2 – 3):	1.05430 m	1.05430 m
Resultados - parámetros radiantes:		
Directividad (dB):	10.337	10.24
Relación Frontal Trasera (dB):	10.6494	11.79
Función Objetivo:	12.1575	-
Impedancia de entrada (Ω):	19.372 + 44.178i	27.3 + 32.8i

Tabla 4.2: Comparativo - parámetros radiantes para 100 MHz

A partir de estos resultados mostramos la siguiente tabla comparativa:

Parámetros	QY4 [®] [A]	Diseño Tesis [B]	% diferencia comparativa	
Directividad (dB)	10.24	10.337	$\frac{B - A}{A} * 100\%$	0.947 %
Relación Frontal-Trasera(dB)	11.79	10.6494		9.67 %

Tabla 4.3: Comparativo entre software QY4[®] Vs Tesis para 100 MHz

Podemos concluir que los resultados obtenidos por el diseño propuesto en la tesis se asemejan a lo esperado, teniendo como referencia a QY4[®]. Así demostramos que los resultados del Software de la presente tesis proporcionan datos coherentes y confiables, los cuales son importantes para poder esperar datos, igualmente coherentes y confiables, al momento de optimizar el diseño de antenas Yagi-Uda.

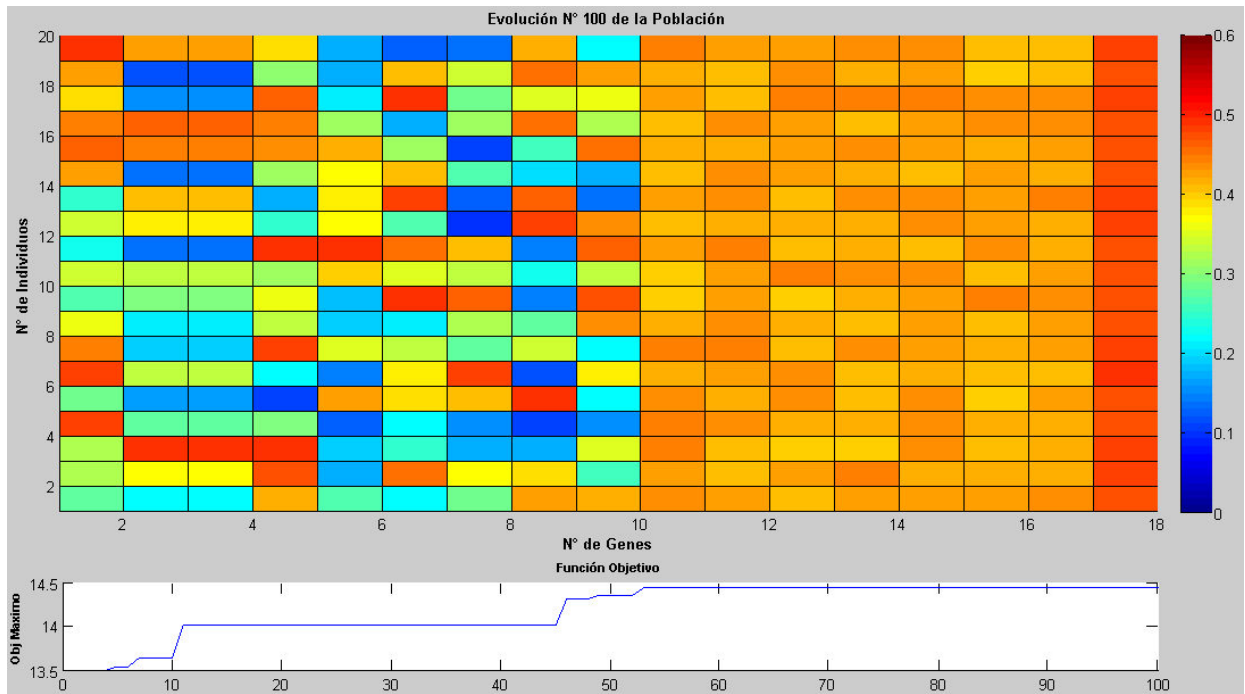
4.2. Prueba de Optimización

Habiendo comprobado que para mismos parámetros de frecuencia, número de elementos y distribución física de estos, obtenemos resultados semejantes entre el software QY4[®] y software para el diseño de la presente tesis. Pasamos a hacer pruebas de optimización teniendo como parámetros de diseño a 145.84 MHz ($\lambda = 2 m$), siete directores (cada uno con 0.0127 metros de diámetro). Estos parámetros son modelados con el software QY4[®] en el Instituto de Radio Astronomía (INRAS-PUCP) para propósitos científicos en la obtención de señales de un satélite que se desarrolla en dicho instituto y que será puesto en órbita. Obtenemos lo siguiente:

<u>Parámetros</u>	<u>Software QY4[@]</u>	<u>Software Tesis</u>
Datos ingresados:		
Frecuencia de la onda [MHz]:	145.84	145.84
Número de directores:	7	7
Individuos de la población [# par]:	-	20
Diámetro de los elementos [m]:	0.0127	0.0127
Número de iteraciones:	-	100
Resultados – parámetros mecánicos:		
Longitud de reflector:	1.032450 m	1.06930 m
Longitud de alimentador:	0.979133 m	0.99363 m
Longitud del director (1):	0.946953 m	0.86342 m
Longitud del director (2):	0.895802 m	0.8831 m
Longitud del director (3):	0.899912 m	0.85264 m
Longitud del director (4):	0.871007 m	0.87852 m
Longitud del director (5):	0.886382 m	0.87168 m
Longitud del director (6):	0.877847 m	0.8834 m
Longitud del director (7):	0.816306 m	0.84819 m
La separación del reflector al alimentador:	0.322176 m	0.70833 m
La separación del alimentador al 1er director:	0.268902 m	0.40888 m
La separación del director (1 – 2):	0.304901 m	0.50063 m
La separación del director (2 – 3):	0.347199 m	0.64098 m
La separación del director (3 – 4):	0.394682 m	0.78811 m
La separación del director (4 – 5):	0.455297 m	0.67534 m
La separación del director (5 – 6):	0.523912 m	0.86525 m
La separación del director (6 – 7):	0.604534 m	0.63226 m
Resultados - parámetros radiantes:		
Directividad (dB):	12.37	13.3765
Relación Frontal Trasera (dB):	25.6	29.1432
Función Objetivo:	-	15.4840
Impedancia de entrada (Ω):	12.5+0.0i	29.8829+39.4624i

Tabla 4.4: Comparativo – prueba de optimización para 145.84 MHz

Resultados - gráficos:



**Figura 4.1: Superior – Evolución de Población,
Inferior –Evolución de la Función Objetivo Vs Iteraciones**

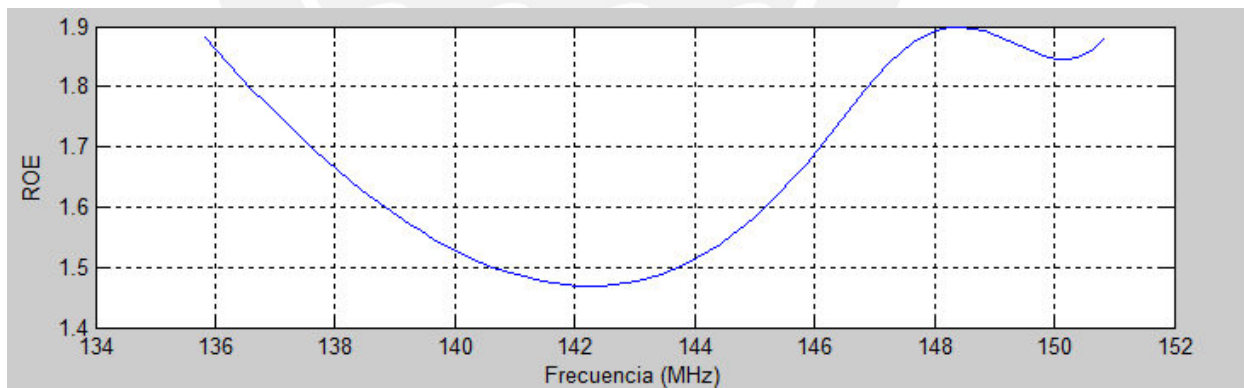


Figura 4.2: ROE Vs Frecuencia

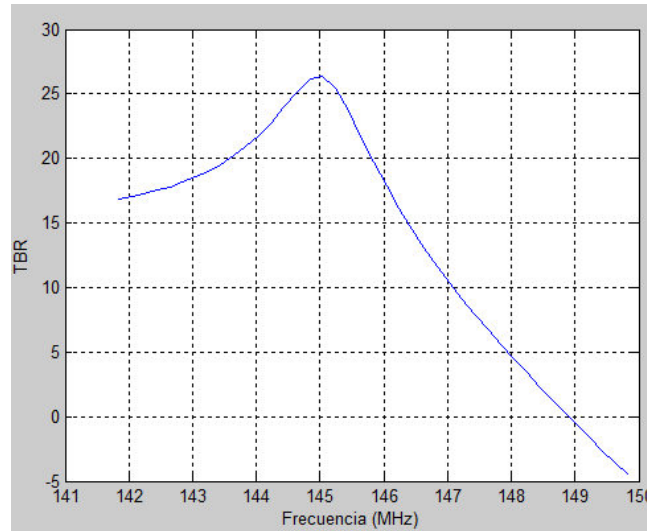


Figura 4.3: Relación Frontal-Trasera Vs Frecuencia

A partir de estos resultados obtenemos la siguiente tabla de optimización:

Parámetros	QY4 [®] [A]	Diseño Tesis [B]	% diferencia optimizada	
Directividad (dB)	12.37	13.3765	$\frac{B - A}{A} * 100\%$	8.1366 %
Relación Frontal-Trasera (dB)	25.6	29.1432		5.3273 %

Tabla 4.5: Comparativo entre software QY4[®] Vs Tesis para 145.84 MHz

Los principales parámetros del diseño de optimización son la directividad y relación frontal-trasera. A partir de las pruebas de conformidad, ver acápite 4.1, podemos determinar que los resultados obtenidos, por el diseño propuesto, son datos coherentes y confiables. Observando la diferencia que se origina al comparar los resultados de ambos software y teniendo como base a QY4[®] podemos concluir que los resultados obtenidos por el diseño propuesto en esta tesis presenta un mejor desempeño respecto a los parámetros de directividad y relación frontal-trasera. Cabe resaltar que según la Función Objetivo el parámetro de directividad tiene mayor importancia en la búsqueda del mejor rendimiento del diseño, véase [1], [8] y [9]. Además, relación frontal-trasera rara vez es

importante pues se trata de una antena direccional (comunicación con línea de vista) que trabaja a una determinada frecuencia; y que las interferencias por la parte trasera no ocurren habitualmente, véase [2], [5], [8], [15]. De darse este caso las antenas Yagi están diseñadas para atenuar las señales que vienen en otras dirección a la establecida (línea de vista) es por ello que se le agrega un elemento reflector a determinada distancia.

4.3. Aportes

Anteriormente se han desarrollado propuestas de optimización para abordar el problema de diseño de antenas Yagi-Uda usando herramientas computacionales. A continuación se señala los aspectos más resaltantes de los trabajos realizados, las diferencias y aportes por parte de esta tesis haciendo un comparativo de las características más resaltantes:

- a) El trabajo elaborado por Edgardo César De La Asunción [9].
 - Éste trabajo también utiliza algoritmos genéticos como propuesta de optimización y el método de los momentos para el modelamiento electromagnético. Pero utiliza un número fijo de población (soluciones candidatas), una cantidad fija de elementos físicos radiantes (cuatro directores, un elemento activo y un elemento reflector) y como operador genético utiliza cruzamiento por puntos, ver acápite 2.4.5. Éste mecanismo incrementa el universo de soluciones aumentando a su vez el tiempo de convergencia. En su función objetivo propone un coeficiente cuyo denominador es el máximo número hallado de la relación frontal-trasera en sus pruebas.
 - La tesis propuesta tiene los siguientes aportes y aspectos diferenciadores a resaltar:
 - A diferencia de lo propuesto por Edgardo César De La Asunción la presente tesis propone como parámetros de entrada (además de la frecuencia de operación y diámetro de los dipolos) la cantidad de elementos físicos radiantes, el número de población (soluciones candidatas) y cantidad de iteraciones evolutivas; los cuales dan al diseño propuesto mayor flexibilidad para hacer pruebas y análisis, ver acápite 3.2.2, con mejores resultados.
 - De las pruebas realizadas obtenemos una función objetivo más certera en la búsqueda de óptimos globales, ver acápite 2.4.4, la cual es más eficiente

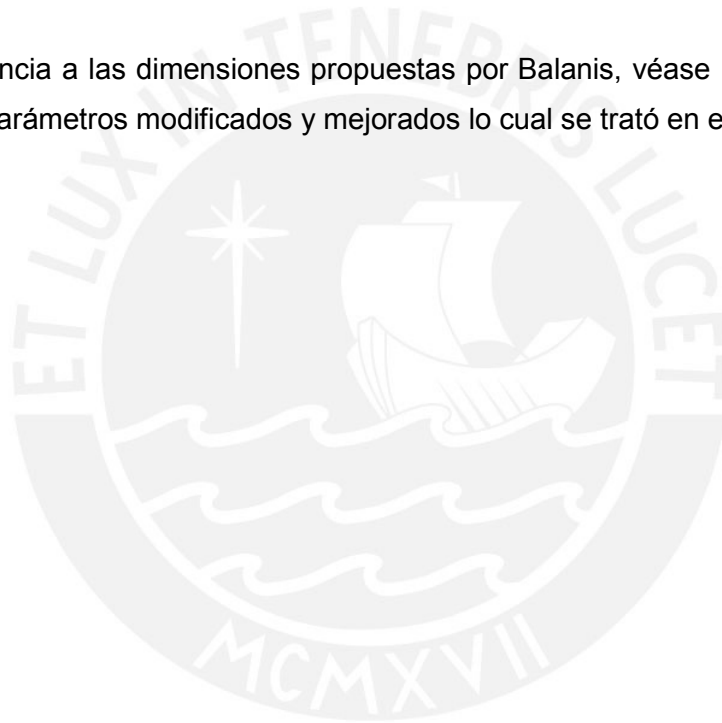
(valores numéricos más altos) en la obtención de soluciones que relacionan tanto a la directividad, como a la relación frontal-trasera.

- Además se utiliza como mecanismo genéticos a la media aritmética, media geométrica y mutación aleatoria para generar nuevos individuos de la población los cuales respetan las restricciones de implementación planteadas en la literatura de diseño de antenas Yagi y conservan las mejores características de las soluciones antecesoras sin perder información valiosa.
- b) El trabajo elaborado por de E. Jones y W. Joines [16].
- Éste trabajo también utiliza algoritmos genéticos y el método de los momentos para el modelamiento electromagnético. Pero la codificación de los cromosomas lo hace mediante números binarios y utiliza el operador genético más común llamado cruzamiento en un punto, ver acápite 2.4.5. Éste mecanismo puede incrementar el universo de soluciones incrementando el tiempo de convergencia.
 - La tesis propuesta tiene los siguientes aportes y aspectos diferenciadores a resaltar:
 - A diferencia de lo propuesto por E. Jones y W. Joines la presente tesis utiliza una codificación por medio de números reales que, según teoría para los análisis de segmentación de longitudes utilizados en el modelamiento de los dipolos, brinda datos más precisos.
 - La codificación por números reales, también, permite respetar las restricciones de implementación planteadas en la literatura de diseño de antenas Yagi y ayudan a una convergencia más rápida de la solución.
 - Además, los operadores genéticos en la presente tesis utiliza un método novedoso para generar descendencia. Esto es la media geométrica y aritmética que para el diseño del problema de antenas permiten hacer un barrido más preciso conservando las condiciones de diseño vistas en el acápite 3.4.1.
- c) El trabajo elaborado por C. I. Páez y R. Bustamante [1].
- Éste trabajo también utiliza algoritmos genéticos y el método de los momentos para el modelamiento electromagnético. Pero para obtener una medida cuantitativa de la influencia de todos sus parámetros elabora una función objetivo definido por la directividad e impedancias de entrada con sus respectivos

coeficientes. Además, su propuesta es para diseños de antena Yagi doblada con una cantidad fija de elementos (tres directores, un elemento activo y un elemento reflector). Este trabajo utiliza como operador genético solamente a la media aritmética.

- La tesis propuesta tiene los siguientes aportes y aspectos diferenciadores a resaltar:
 - A diferencia de lo propuesto por C. I. Páez y R. Bustamante la presente tesis utiliza como parámetros principales, en la función objetivo, a la directividad y a la relación frontal-trasera pues estos representan el mejor criterio de desempeño para el diseño de antenas, véase [5] y [8].
 - En la presente tesis se emplea una flexibilidad en los parámetros de entrada para elegir la cantidad física de elementos de la antena, número de individuos de la población, cantidad de iteraciones evolutivas, entre otros datos para poder analizar el comportamiento del diseño al variar dichos parámetros y la tendencia a obtener mejores resultados, véase acápite 3.2.2.
 - Además las antenas Yagi dobladas no son muy comunes pues tienen un grado de dificultad mecánica de construcción mayor que los clásicos dipolos en paralelo; y si se desea obtener mayor directividad el programa desarrollado por esta tesis tiene la opción de poder elegir antenas con mayor cantidad de dipolos y/o variar los parámetros de entrada, véase acápite 3.2.2.
- d) Trabajo desarrollado por Chuck Smith y el desarrollo del software QY4[®].
 - Éste trabajo no da a conocer su metodología de optimización ni el modelamiento electromagnético pues utiliza un código cerrado y no conocido. Además este software se utiliza en el Instituto de Radio Astronomía (INRAS-PUCP) para el diseño de sus antenas Yagi y cuyos resultados se compararon con el diseño de la presente tesis, ver acápite 4.2.
 - La tesis propuesta tiene los siguientes aportes y aspectos diferenciadores a resaltar:
 - A diferencia de lo propuesto por Chuck Smith y el desarrollo del software QY4[®], la presente tesis propone un diseño que da a conocer el código fuente y metodologías de optimización que puede ser objeto de estudio para futuras

- mejoras y/o otras investigaciones en temas de telecomunicaciones, ingeniería y optimización.
- Brinda mejores resultados numéricos de rendimiento y desempeño al optimizar la directividad y relación frontal-trasera de manera combinada dentro de la Función Objetivo propuesta, los cuales son los principales parámetros de diseño y optimización, véase [5] y [8].
 - Además la presente tesis también brinda resultados no solo numéricos de directividad, relación frontal-trasera y distribución física óptimos, si no también resultados gráficos: parámetros radiantes, ROE vs frecuencia, relación frontal-trasera vs frecuencia, evolución de la población vs el número de la población.
- e) En referencia a las dimensiones propuestas por Balanis, véase [8], la presente tesis sugiere parámetros modificados y mejorados lo cual se trató en el acápite 4.1.2.



En la siguiente tabla se muestra, en forma resumida, las propuestas anteriormente realizadas, la propuesta de la presente tesis (señalando las diferencias correspondientes) y el aporte obtenido por el nuevo diseño:

Propuestas Anteriores	Propuesta de Tesis	Aportes
a. Para [1], [9] y [16] tenemos: Cantidad fija de población (soluciones candidatas).	Cantidad seleccionable de población.	Permite mejor análisis en pruebas de optimización de acuerdo al acápite 3.4.4.
b. Para [1], [9] y [16] tenemos: Cantidad fija de elementos físicos (dipolos).	Cantidad seleccionable de elementos físicos.	Permite mejor análisis en pruebas de optimización de acuerdo al acápite 3.4.1.
c. Para [1] y [16] tenemos: La codificación matricial del modelo es por números binarios.	La codificación del modelo es por números reales.	Permite una representación del modelo más entendible de acuerdo al acápite 3.4.2.
d. Para [9] y [16] tenemos: El operador genético utilizado es cruzamiento por puntos.	El operador genético utilizado es la media aritmética y geométrica.	Propone una alternativa novedosa que permite respetar las restricciones de acuerdo a 4.1.1.
e. Para [1], [9] y [16] tenemos: No seleccionan cantidad de iteraciones evolutivas.	Cantidad seleccionable de iteraciones evolutivas.	Permite mejor análisis en pruebas de optimización de acuerdo al acápite 3.4.10.
f. Para [9] tenemos: Propone función objetivo (FO) en base a directividad y relación frontal-trasera.	La FO utiliza otros coeficientes de directividad y relación frontal-trasera.	Brinda mejores resultados numéricos de optimización según 4.2.
g. Para [1] tenemos: El diseño propuesto es para antenas Yagi dobladas	El diseño actual de la tesis es para Yagis lineales.	La implementación y construcción es más fácil y se puede obtener igual eficiencia.
h. Para QY4 [@] tenemos: La codificación de su algoritmo es cerrada y desconocida.	La codificación del algoritmo propuesto es abierta y conocida.	La tesis puede ser objeto de estudio, mejoras e investigaciones futuras.

Tabla 4.6: Comparativo entre propuestas y aportes

Conclusiones generales

En el presente trabajo de tesis se ha propuesto un nuevo diseño para enfrentar el problema de desempeño en la búsqueda de mejores características radiantes y físicas para las antenas Yagi. Se planteó como técnica de optimización a los algoritmos genéticos los cuales demuestran ser una herramienta muy efectiva para tal propósito.

Con este fin, se comenzó estableciendo los fundamentos matemáticos de la teoría electromagnética para luego implementar como propuesta computacional al Método de los Momentos en la obtención de los parámetros radiantes. Esto derivó en la Función Objetiva que determina el mejor desempeño del diseño, ver acápite 3.3, que relaciona los parámetros de optimización (Directividad y Relación Frontal Trasera). A partir de ello se plantea la mejor representación de las soluciones y de sus variables para luego definir los operadores y las restricciones derivadas de la literatura de antenas, véase acápite 4.1.1.

De esta manera se desarrolló un algoritmo genético con el fin de resolver el problema de optimización del diseño de antenas Yagi. En este contexto cabe resaltar el uso de una original forma de representar soluciones candidatas las cuales permiten respetar las restricciones propuestas que se encuentra de en la bibliografía de antenas, ver acápite 3.4.1.

Los resultados de las pruebas del algoritmo propuesto han demostrado la confiabilidad de las soluciones y la factibilidad de aplicación de los algoritmos genéticos para la solución óptima del diseño antenas Yagi-Uda. En este sentido, el uso de operadores genéticos inteligentes y basados en el conocimiento experto que se tiene del sistema, a partir del análisis previo, permitió una convergencia más rápida y la obtención de soluciones más cercanas al óptimo global, definido en el acápite 2.4.4. Cabe señalar que para la elaboración de ésta propuesta se definieron el espacio de búsqueda (soluciones factibles), los operadores genéticos (cruzamiento y mutación), un indicador de calidad (función objetivo) y se consideró las restricciones con el propósito que las nuevas soluciones respeten las condiciones de diseño y no sean descartadas prematuramente y así llegar a un valor óptimo más rápido.

De acuerdo a los resultados de radiación obtenidos en los ensayos y comparándolo con los del software QY4® (véase acápite 4.2) y considerando la flexibilidad de manipulación de los parámetros de entrada del diseño propuesto (véase acápite 3.2.2), se puede concluir que el diseño propuesto brinda mejores resultados numéricos para la optimización de los parámetros de radiación (directividad, relación frontal-trasera, nivel de lóbulos) y un resultado coherente para la distribución física de una antena Yagi-Uda que trabaja en una frecuencia determinada.

En consecuencia, los resultados obtenidos en las pruebas y ensayos avalan la eficacia y validez del diseño propuesto y el uso de Algoritmos Genéticos, junto con el modelamiento computacional del Método de los Momentos, como técnica de optimización para el diseño de antenas Yagi-Uda.



Recomendaciones para trabajos futuros

El alcance de ésta tesis está indicado en el título, diseño de antenas y no implementación. Del trabajo realizado en este estudio de investigación se puede derivar varias sugerencias en el campo de las telecomunicaciones y optimización ampliada a otros campos de las ciencias.

Si bien los resultados demuestran la aplicabilidad del modelo propuesto para resolver el problema del mejor desempeño de antenas Yagi-Uda sería de utilidad para proyectos futuros la implementación y construcción de antenas basándose en el diseño propuesto. En este sentido es necesario resaltar que para poder hacer comparaciones objetivas y con un mínimo porcentaje de error se necesitaría equipos especializados, como por ejemplo cámaras anecoicas, para poder hacer mediciones muy precisas con fines académicos; sin embargo los diseñadores y constructores nacionales hacen pruebas en campo abierto y a pesar que sus equipos de medición no brindan resultados muy precisos muestran un comportamiento satisfactorio para las aplicaciones deseadas a partir de diseños obtenidos de software comerciales como QY4[®].

Los algoritmos genéticos y el poder de la evolución ganan reconocimiento cada vez más generalizado, algunos usos notables en otros campos se mencionan a continuación: Acústica, Ingeniería aeroespacial, Astronomía y astrofísica, Química, Ingeniería eléctrica, Ingeniería eléctrica, Juegos, Geofísica, Ingeniería de materiales, Matemáticas y algoritmia, Ejército y cumplimiento de la ley, Biología molecular, Reconocimiento de patrones y explotación de datos, Robótica, Diseño de rutas y horarios, Ingeniería de sistemas, estimación de proyectos, entre otros. Véase [25].

Bibliografía

- [1] C. I. Páez, and R. Bustamante, “Diseño Óptimo de Antenas Yagui-Uda,” Revista de Ingeniería Universidad de los Andes, vol. 15, no. May, pp. 10-16, 2002.
- [2] "Radiación y Propagación". Manuel Sierra Castañer. J.L. Besada Sanmartín, L. De Haro Ariet. *Septiembre 2004. ETSI Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid.*
- [3] Ticse Torres Royer. “Simulación de radiación electromagnética usando el método de los momentos (MoM)” UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA Facultad de ciencias. Escuela Profesional de Física
- [4] Daniel José Martínez Agudelo, “Simulación, implementación y puesta a punto de una antena Yagi de 4 elementos a 1,2 GHz: El Método de los Momentos (mom)”. Universidad Industrial de Santander facultad de ingenierías físico-mecánicas escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones – Bucaramanga 2007.
- [5] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, Antena Theory and Desing, 2da ed. Wiley and sons, 1997.
- [6] Tesis de grado presentada por Esteban Manuel Gil Sagás, Tesis de grado presentada por Esteban Manuel Gil Sagás, “Programación de la generacion de corto plazo en sistemas hidrotérmicos usando algoritmos geneticos”, Diciembre de 2001.
- [7] Rafael Caballero Fernández. “Algoritmos genéticos para la resolución de problemas de Programación por Metas Entera. Aplicación a la Economía de la Educación.” Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas). Universidad de Málaga.
- [8] Balanis, Constantine A. Antenna theory : analysis and design / Constantine A. Balanis. New York : Wiley, 1997

- [9] Edgardo César De La Cruz López. "Algoritmos Genéticos Aplicados a la Optimización de Antenas Antenas" Revista de Ingeniería de la Universidad de Medellín
- [10] Marco Antonio Castro Liera, Algoritmos Genéticos Distribuidos, La Paz, B.C.S., Marzo de 2007
- [11] R. Johnson. Antenna Engineering Handbook. Third Edition. Mc Graw-Hill, 1993.
- [12] P. P. Vezbicke, "Yagui Antenna Design", NBS Technical Note 688, U.S. Department of Commerce/National Bureau of standards, Dec. 1968.
- [13] America Radio Relay League, The ARRL Antenna Handbook. 17 Edition.
- [14] G. A. Thiele, "Analysis of Yagui-Uda Antennas". IEEE Trans. Ant. & Prop. VOL 17, pag. 24-31, Jan. 1969.
- [15] C. A. Chen and D. K. Cheng. "Optimum Element Lengths for Yagui-Uda Arrays", IEEE Trans. Ant. & Prop. VOL 23, No. 1, pp 8-15, Jan. 1975.
- [16] E. Jones and W. Joines. "Design of Yagui-Uda Antennas using Genetic Algorithms", IEEE Trans. Ant. & Prop. VOL 45, No. 9, pp. 1386-1392, Sept. 1997.
- [17] W. L. Stulzman and G. A. Thiele. Antenna Theory and Design. Second Edition. John Wiley & Sons. 1998.
- [18] R. F. Harrington, Field Computation by Moment Methods. New York: Macmillan, 1968.
- [19] D. Whitley, "A Genetic Algorithm Tutorial", Reporte Técnico CS-93-103, Colorado State University, Marzo 1993
- [20] D. Beasley, D. R. Bull y R. R. Martin, "An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals", University Computing, Vol. 15, N° 2, pp. 58-69, 1993
- [21] D. B. Fogel, "An introduction to simulated evolutionary", IEEE Transactions on Neural Network, Vol. 5 N° 1, pp. 3-14, Enero 1994

- [22] W. Banzhaf, P. Nordin, R. E. Keller y F. D. Francone, “Genetic Programming: An Introduction”, Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1998
- [23] David E. Goldberg, “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”, Addison–Wesley, 1989
- [24] K. Deb, “Genetic Algorithm in Search and Optimization: The Technique and Applications”, Proceedings of International Workshop on Soft Computing and Intelligent Systems, Calcutta, India: Machine Intelligence Unit, Indian Statistical Institute, pp. 58-87, 1998
- [25] <http://the-geek.org/docs/algen/>
- [26] G. Jones, “Genetic and Evolutionary Algorithms”, Encyclopedia of Computational Chemistry, Wiley, Chichester, UK, 1998. Volume 2, pp. 1127 – 1136.
- [27] R. Martí, “Meta Heurísticos en Optimización Combinatoria”, World Wide Web, <http://www.uv.es/~rmarti/heur.html>, 2000