



Análisis y diseño de un arreglo circular de antenas con 16 elementos radiantes para el sistema de última generación de inteligencia de señales.

Quispe Correa, Diego Alexander

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. Tinoco Salazar, Alexis Fabricio. PhD.

14 de Septiembre de 2020










URKUND

Document Information

Analyzed document	Urkud_DiegoQuispe_Final.txt (D78321223)
Submitted	8/28/2020 9:13:00 PM
Submitted by	TINOCO SALAZAR ALEXIS FABRICIO
Submitter email	atinoco.salazar@gmail.com
Similarity	5%
Analysis address	aftinoco.espe@analysis.orkund.com

Alexis Salazar
1706562178

Sources included in the report

SA	Orkud_Final.docx Document Orkud_Final.docx (D62477112)	 9
W	URL: https://docplayer.es/98795205-Area-de-la-energia-las-industrias-y-los-recursos-nat... Fetched: 11/4/2019 11:20:10 PM	 1
W	URL: https://www.researchgate.net/profile/Jaume_Anguera2/publication/285726131_Teoria_d... Fetched: 7/18/2020 4:59:45 PM	 6
SA	Portilla Danny_Avance 2019-11-24.pdf Document Portilla Danny_Avance 2019-11-24.pdf (D59706986)	 1
W	URL: https://docplayer.es/62257161-Instituto-politecnico-nacional.html Fetched: 11/22/2019 2:32:31 PM	 1
W	URL: https://www.slideshare.net/Isbesita21/5-antenas Fetched: 10/9/2019 8:44:34 AM	 1
SA	Urkud_Cyntia.docx Document Urkud_Cyntia.docx (D62477105)	 1
SA	Trabajo Titulacion Daniel Park.docx Document Trabajo Titulacion Daniel Park.docx (D21782347)	 1
SA	TESIS 22-03-2017.docx Document TESIS 22-03-2017.docx (D26678694)	 1



DEPARTAMENTO DE ELECTRICA, ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERIA DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Análisis y diseño de un arreglo circular de antenas con 16 elementos radiantes para el sistema de última generación de inteligencia de señales" fue realizado por el señor Quispe Correa, Diego Alexander el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de agosto 2020

Firma:

Ing. Tinoco Salazar, Alexis Fabricio. PhD.

C.C. 1706562178



DEPARTAMENTO DE ELECTRICA, ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERIA DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Quispe Correa, Diego Alexander, con cédula de ciudadanía n° 1719256982, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis y diseño de un arreglo circular de antenas con 16 elementos radiantes para el sistema de última generación de inteligencia de señales** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 31 de agosto 2020

Firma:

Quispe Correa, Diego Alexander

C. C. 1719256982



DEPARTAMENTO DE ELECTRICA, ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERIA DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo Quispe Correa, Diego Alexander, con cédula de ciudadanía n° 1719256982, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *Análisis y diseño de un arreglo circular de antenas con 16 elementos radiantes para el sistema de última generación de inteligencia de señales en el Repositorio Institucional*, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 31 de agosto 2020

Firma:

Quispe Correa, Diego Alexander

C. C. 1719256982

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, a mis padres, Miguel y Elvia y a mi hermana Diana por su apoyo incondicional, por la ayuda y paciencia que me han brindado en este proceso, a mis docentes que fueron parte fundamental para todo este tiempo de aprendizaje brindándome su conocimiento y ayuda cuando la necesitaba, a mis compañeros por tantas alegrías y sustos vividos que fueron parte de una grandiosa experiencia que ahora culmino, y finalmente a la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y su personal por las gestiones realizadas.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento primero a Dios y en especial a mis padres por la paciencia y apoyo que he recibido a lo largo de mi formación estudiantil, me supieron dar todo el ánimo para seguir adelante, son mi ejemplo de amor, perseverancia y compromiso, mis maestros de vida. De igual manera agradezco infinitamente a mi tutor, el Dr. Alexis Tinoco, por brindarme su apoyo, y compartir su conocimiento y tiempo para el asesoramiento de este proyecto. A todos mis compañeros y amigos que tuve el agrado de conocer en este periodo de mi vida y fue una experiencia muy agradable comenzar esta historia y ahora terminarla. A mis maestros por compartir su experiencia y conocimiento, fueron una inspiración para seguir adelante y proyectarme en mi futuro. Por último agradezco al personal del CICTE por la colaboración brindada. Y al laboratorio de antenas y propagación (LAP) del Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) por su colaboración en la simulación de las antenas.

Tabla de contenido

Resumen	14
Capítulo 1	13
<i>Introducción.....</i>	<i>13</i>
<i>Justificación</i>	<i>14</i>
<i>Alcance de Proyecto.....</i>	<i>15</i>
<i>Objetivos.....</i>	<i>16</i>
Objetivo General	16
Objetivos Específicos.....	16
<i>Descripción General del Proyecto.</i>	<i>17</i>
Capitulo 2	19
<i>Marco teórico</i>	<i>19</i>
Definición de Antena.....	19
Clasificación de las Antenas	20
Métodos de Análisis	21
Definición y parámetros características de las antenas.....	22
Redes de Antenas.....	38
Capitulo 3	50
<i>Diseño de la geometrías iniciales de la antena</i>	<i>50</i>
Introducción	50

Geometría inicial	50
Diseño del Cazador de Impedancias	56
Diseño de Balun y Conector Coaxial.....	69
Diseño de modelo del arreglo	73
Capítulo 4	
Optimizaciones y análisis de resultados.....	75
Introducción	75
Optimización de la geometría inicial.....	75
Parámetros de desempeño del Cazador de Impedancias	83
Costo computacional necesario para las simulaciones.....	85
Capítulo 5	88
Conclusiones y recomendaciones	88
Bibliografía	90

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Relación entre de paramtros de una antena</i>	28
Tabla 2. <i>Parámetros para caracterizar el diagrama de radiación</i>	32
Tabla 3. <i>Relación entre la directividad exacta y la aproximada</i>	34
Tabla 4. <i>Radiaciones variando espaciado y elementos en fase.</i>	46
Tabla 5. <i>Radiaciones con variaciones en fase</i>	47
Tabla 6. <i>Características geométricas de antena base</i>	54
Tabla 7. <i>Dimensiones geométricas para cazador de impedancias</i>	67
Tabla 8. <i>Pruebas de parámetros de radiación con angulo xy constante</i>	76
Tabla 9. <i>Pruebas de parámetros de radiación con angulo yz constante</i>	78
Tabla 10. <i>Valores geométricos optimizados</i>	81

Índice de figuras

Figura 1. <i>Esquema de enlace bidireccional en un sistema de comunicación.</i>	22
Figura 2. <i>Modelo de una línea de transmisión</i>	26
Figura 3. <i>Sistema de coordenadas esféricas</i>	29
Figura 4. <i>Ejemplos de diagramas de irradiación</i>	30
Figura 5. <i>Cortes de un diagrama de irradiación</i>	31
Figura 6. <i>Representación de parámetros de radiación</i>	31
Figura 7. <i>Relación entre la radiación de antenas isotrópicas y directivas</i>	33
Figura 8. <i>Forma de onda de campo eléctrico</i>	35
Figura 9. <i>Esquemas de polarizaciones</i>	36
Figura 10. <i>Ancho de banda</i>	37
Figura 11. <i>Arreglos de antenas</i>	39
Figura 12. <i>Redes broadside y endfire</i>	41
Figura 13. <i>Radiación dependiendo de la separación entre elementos.</i>	42
Figura 14. <i>Radiación dependiendo de la separación entre elementos.</i>	43
Figura 15. <i>Radiación dependiendo de la separación entre elementos.</i>	44
Figura 16. <i>Radiación dependiendo de la separación entre elementos.</i>	45
Figura 17. <i>Arreglo circular</i>	49
Figura 18. <i>Imagen de la pantalla de inicio del software ansys hfss</i>	51

Figura 19. <i>Diagrama de bloques de proceso ansys</i>	52
Figura 20. <i>Vistas superior e inferior de antena base</i>	53
Figura 21. <i>Geometría inicial de la antena</i>	54
Figura 22. <i>Modelo 3d final con geomtría inicial definida</i>	56
Figura 23. <i>Representacion gráfica del polinomio de chebyshev</i>	58
Figura 24. <i>Polarizacion de una antena dipolo</i>	62
Figura 25. <i>Línea de transmisión microstrip</i>	63
Figura 26. <i>Línea de transmisión modificada</i>	63
Figura 27. <i>Parámetros geométricos de la línea microstrip</i>	64
Figura 28. <i>Impedancia 1</i>	65
Figura 29. <i>Impedancia 2</i>	66
Figura 30. <i>Impedancia 3</i>	66
Figura 31. <i>Impedancia 4</i>	67
Figura 32. <i>Esquema del transformador de impedancias</i>	68
Figura 33. <i>Modelo 2d del casador de impedancias</i>	68
Figura 34. <i>Modelo 3d del casador de impedancias</i>	69
Figura 35. <i>Balun tipo tapped</i>	70
Figura 36. <i>Diseño completo del casador y el balun</i>	71
Figura 37. <i>Conector sma</i>	72

Figura 38. <i>Dimensiones geometrías del conector sma</i>	72
Figura 39. <i>Modelado del casador, balun y conector sma</i>	73
Figura 40. <i>Modelo de red circular de antenas en 2d</i>	74
Figura 41. <i>Modelo de red circular de antenas en 3d</i>	74
Figura 42. <i>Geometría final del elemento radiante</i>	80
Figura 43. <i>Diagrama de radiación 3d</i>	81
Figura 44. <i>Curva de coeficiente de reflexión</i>	82
Figura 45. <i>Grafica de impedancia</i>	83
Figura 46. <i>Coeficiente de reflexión del casador de impedancias</i>	84
Figura 47. <i>Coeficiente de trasmisión</i>	84
Figura 48. <i>Carta de smith</i>	85

RESUMEN

Un buen diseño y construcción de una antena o en un arreglo de antenas, mejora el desempeño de la misma y facilita la mediciones como el nivel de potencia recibida en el equipo receptor, así como su nivel de potencia de interferencia, etc. En sí, un arreglo, es una antena que está compuesta por cierto número de radiadores idénticos y ordenados regularmente para obtener una radiación predefinida. En la actualidad, los arreglos de antenas o arrays son utilizados desde aplicaciones muy comunes en la sociedad en general, ya sea como receptores para los equipos domésticos, o para aplicaciones avanzadas como la construcción de antenas inteligentes. El trabajar con arrays tiene ciertas ventajas que hacen que su uso sea más versátil, ya que, se puede controlar amplitud y fase de la señal en cada elemento para modificar la forma del factor del arreglo, así también se pueden conseguir que los parámetros de la antena dependan de la señal recibida a través de los elementos radiantes, estas características permiten que el arreglo sea una gran opción a la hora de generar una aplicación con un propósito determinado.

El presente proyecto trata del análisis, diseño, simulación, construcción y verificación de un prototipo de un arreglo circular de antenas, que trabajará en las bandas de frecuencias VHF y UHF, cada antena será del tipo impresa, que contribuirá con el proyecto de sistemas de última generación para Inteligencia de señales propuesto por el Centro de Investigación de Aplicaciones Militares – CICTE. Se utilizará una metodología teórica - experimental. Este prototipo será diseñado y optimizado, verificando su desempeño utilizando la infraestructura disponible en el Laboratorio de Telecomunicaciones que pertenece al centro de investigación antes mencionado.

Palabras clave:

- **ARREGLO DE ANTENAS**
- **ANÁLISIS**
- **SIMULACIÓN**
- **BANDAS DE FRECUENCIAS**

ABSTRACT

A correct design and construction of an antenna or an array of antennas, improves its performance and facilitates measurements such as the power level received in the receiving equipment, as well as its interference power level, etc. An array is an antenna that is composed of a certain number of identical radiators regularly ordered to obtain a predefined radiation. At present, antenna arrays or arrays are used from very common applications in society in general, either as receivers for domestic equipment, or for advanced applications such as the construction of smart antennas. Working with arrays has certain advantages that make its use more versatile, since it is possible to control the amplitude and phase of the signal in each element to modify the shape of the array factor, thus it is also possible to achieve that the parameters of the antenna depend on the signal received through the radiating elements, these characteristics allow the arrangement to be a great option when generating an application with a specific purpose.

This project deals with the analysis, design, simulation, construction and verification of a prototype of a circular array of antennas, which will work in the VHF and UHF frequency bands, each antenna will be of the printed type, which will contribute to the project of latest generation for signals intelligence proposed by the Military Applications Research Center - CICTE. A theoretical - experimental methodology will be used. This prototype will be designed and optimized, verifying its performance using the infrastructure available in the Telecommunications Laboratory that belongs to the aforementioned research center.

Keywords:

- **ARRAYS OF ANTENNAS**
- **ANALYSIS**
- **SIMULATION**
- **FREQUENCY BANDS**

CAPÍTULO 1

Introducción

Las telecomunicaciones, en la actualidad son la manera en la que la sociedad ha tendido a comunicarse, es decir, que la tecnología ha jugado un papel muy importante en lo que respecta al manejo de información y comunicación. Los dispositivos electrónicos que conforman los circuitos de transmisión y recepción en esta tecnología son parte fundamental para una buena comunicación.

Los elementos irradiantes o antenas, son un elemento indispensable, ya que mediante este elemento se puede crear el inicio y el final de un canal inalámbrico de comunicación exitoso, y el correcto diseño general de este elemento ayuda al cumplimiento de los distintos objetivos de estos dispositivos dependiendo de la necesidad o requerimiento.

Las necesidades que actualmente se requieren con respecto a un sistema de comunicación, como por ejemplo, mayor directividad, ancho de banda, ganancia, interferencia, etc. han llevado al objetivo común de elaborar diseños nuevos que involucran no solo un elemento irradiante, sino que da paso al diseño de las agrupaciones de elementos radiantes, que juegan un papel muy importante al momento de conseguir cumplir estas necesidades, debido a que cuando interactúan simultáneamente estos elementos se pueden conseguir nuevas características eléctricas dependiendo de la necesidad requerida (Angel D. Pinto Mangones, 2016).

Los arreglos de antenas, como ya se mencionó anteriormente, ayudan a cumplir distintos requerimientos que con un solo elemento irradiante es difícil de lograr. Por ejemplo, los arreglos circulares de antenas son una manera de conseguir características inusuales, por ejemplo en: directividad, comunicación a larga distancia, potencia elevada además de la optimización de la

energía, mayor ancho de banda y la peculiaridad de proporcionar una configuración de campo constructivo, en algunas direcciones, o si desea añadir una interferencia destructiva, en direcciones específicas. Así también este tipo de arreglos es muy común en sistemas de comunicación móvil o inalámbrica (Martin, 2011).

El presente proyecto, se basa en el análisis, diseño e optimización de un elemento del arreglo circular de antenas, donde, cada elemento es un dipolo de tipo impreso, con el objetivo de obtener un ancho de banda que cubra en su mayoría con las bandas de VHF y UHF (30 MHz a 3 GHz), y que tenga un patrón de radiación cubriendo los 360° de azimut, con el objetivo de cumplir el requerimiento propuesto por el CICTE, en el programa de sistemas de última generación para inteligencia de señales.

En este proceso, se realiza un análisis teórico del tema propuesto, para continuar con el diseño y simulación en el software Ansys HFSS™ donde primero se obtiene la geometría inicial de uno de los elementos irradiantes que pertenecerán al arreglo. Así como el material a utilizar para el substrato (FH4 - Fibra de Vidrio) y el conductor (Cobre), y observar la simulación de los parámetros de radiación en el espacio libre, además del diseño del sistema de casamiento entre el generador y la antena. Todas las simulaciones y pruebas realizadas para este proyecto se describen a lo largo de este documento.

Justificación

En las comunicaciones inalámbricas, existen varias aplicaciones para sistemas de transmisores y receptores de señales. En sí, las redes inalámbricas dan solución al intercambio de señales en lugares a donde el cableado se dificulta de alguna manera, como el existir problemas topográficos o de costos.

En aplicaciones simples como la radio y televisión existen distintos modelos de arreglos de antenas cuyo uso es consagrado. En cambio, para aplicaciones avanzadas, como requerimientos militares, que tengan algún propósito específico, se buscan desarrollar modelos de arreglos más avanzados donde sus elementos irradiantes permitan transmitir y recibir señales de una forma más óptima.

El estudio que envuelve el diseño, análisis, simulación, optimización y construcción de redes de antenas proporcionará una tecnología útil para estudios en el Centro de Investigación de Aplicaciones Militares – CICTE. En este caso, y con el fin de contribuir al programa de Sistemas de Última Generación para Inteligencia de Señales, se estudiará un arreglo circular de antenas, específicamente con 16 elementos irradiantes que podrá servir para estudios y aplicaciones de monitoreo de señales en 360° de azimut.

El proyecto a desarrollar, será netamente nacional, con el fin de contribuir positivamente al desarrollo del país, y se basa en la necesidad de generar tecnologías endógenas. La investigación y la ingeniería inversa son fundamentales para garantizar una transferencia de la tecnología al usuario final, pasando por los procesos de diseño, simulación, implementación, pruebas y operación. Finalmente, debido a que el sistema deseado implica desarrollar procedimientos y metodologías para el desarrollo de arreglos de antenas, el presente proyecto justifica ser realizado por un estudiante como proyecto de graduación.

Alcance de Proyecto

El presente proyecto tiene como principal alcance ayudar al programa de sistemas de última generación para inteligencia de señales llevado a cabo por el CICTE en el área de ciencias tecnológicas aplicadas al ámbito de la seguridad y defensa, con el objetivo de ser útil en

aplicaciones militares de comunicación y detección de señales en un ancho de banda considerable que cubra las bandas de VHF y UHF en un azimut de 360°.

La comunicación y detección de señales, es fundamental en cuando a seguridad y defensa se refiere, y es muy importante para las Fuerzas Armadas Ecuatorianas, estar pendiente en lo que puede ocurrir al contorno del territorio ecuatoriano, y el que se pueda interceptar señales ayuda a este propósito, ya que se pueden detectar señales que puedan contener con información con intención hostil, o también información perteneciente al mismo ejército Ecuatoriano.

Por las razones antes mencionadas, se evidencia la necesidad de optimizar los equipos de transmisión y recepción, y este proyecto pretende brindar un arreglo de antenas de gran ancho de banda en un azimut de 360° para que cumpla este propósito.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar un prototipo de un arreglo circular de antenas que posea 16 elementos irradiantes, para la banda de VHF y UHF con el propósito de incorporarlo al programa de sistemas de generación para inteligencia de señales.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este proyecto están en concordancia con su objetivo general y fueron escogidos para dar sustento a cada una de las etapas del desarrollo del mismo. Esos objetivos son resumidos a continuación:

- Realizar el estudio y análisis del estado del arte en relación al tema propuesto con el fin de identificar características y parámetros a tomarse en cuenta en el diseño del arreglo de antenas.
- Generar las especificaciones básicas del arreglo circular de antenas, con el fin de ser usado en el programa de inteligencia de señales.
- Diseñar las antenas de tipo impresa que satisfagan las dimensiones del arreglo, el ancho de banda de funcionamiento, diagrama de radiación y peso del prototipo.
- Implementar el arreglo de antenas que cumplan los parámetros del diseño para que se pueda utilizar en el programa de inteligencia de señales.
- Evaluar parámetros de impedancia de entrada y diagramas de irradiación, en los planos principales, del prototipo construido.

Descripción General del Proyecto.

En general, este proyecto constará de los siguientes ítems:

En primer lugar, se realiza el estudio y análisis del estado del arte en relación al tema propuesto con el fin de identificar características y parámetros a tomarse en cuenta en el diseño del arreglo de antenas.

Segundo, generar las especificaciones básicas del arreglo circular de antenas, con base al estudio realizado en el ítem anterior, y que será futuramente utilizada en el programa de inteligencia de señales.

Tercero, usar simuladores electromagnéticos específicos para observar el comportamiento electromagnético del diseño, optimizar las dimensiones y desempeño de cada uno de los elementos irradiantes pertenecientes al arreglo circular de antenas.

Cuarto, optimizar el prototipo del arreglo de antenas con las especificaciones obtenidas en el ítem anterior. Concluyendo con la verificación de las características básicas de la antena/arreglo y diagramas de radiación para el prototipo construido.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

Definición de Antena

En la bibliografía consultada se disponen de varias definiciones de *Antena*. Del punto de vista sistémico la IEEE define antena como “aquella parte de un sistema de transmisión o recepción que está diseñada específicamente para radiar o captar ondas electromagnéticas”, es decir, que una antena es la transición entre un medio guiado y el espacio libre (Standard-IEEE, 2013).

En otras palabras, una antena es una sección de material conductor o una combinación de un material dieléctrico con superficies conductoras al cual se le aplica una señal eléctrica y esta es irradiada en forma de ondas electromagnéticas propagándose en un medio físico definido, por ejemplo el espacio libre. El trabajo de las antenas es brindar a la onda electromagnética un interface de acoplamiento con el medio de propagación. Normalmente, su estructura geométrica permite controlar las características de propagación de la onda irradiada. Aplicaciones típicas en donde encontramos algún tipo de antenas son:

Comunicaciones personales, tales como en la telefonía celular.

Comunicaciones móviles, como las usadas en vehículos, aviones, trenes, barcos, etc.

Comunicaciones punto a punto, como en los sistemas de la policía o bomberos.

Sistemas de radiodifusión, como radio y televisión.

Sistemas de Detección remota, como radar o radiómetro.

Clasificación de las Antenas

Como mencionado anteriormente el campo de aplicación de las antenas es bastante amplio. Por ese motivo, existen diversos criterios para su clasificación. Siguiendo parámetros como geometría, elementos constitutivos, complejidad del elemento irradiador se puede agrupar dentro de las siguientes categorías.

Antena tubular o de Cable: Estas antenas son las más difundidas y fácilmente encontradas en el día a día. Ejemplo de estas son: dipolos, mono polos, espirales, Yagi-Uda, entre otras.

Antenas de abertura: Son antenas que de alguna forma envuelven un área en la cual existe una distribución superficial de corrientes o de campo electromagnético (Gonzaga Rios & Barbosa , 2002). Por ejemplo, antenas tipo corneta, las ranuras y las antenas del tipo microcinta (*microstrip antennas*).

Antenas Reflectoras: Son antenas que poseen un superficie reflector la cual dirige la energía electromagnética en una determinada dirección (Balanis C. , 2005). Ejemplo de estas son las parabólicas, diedros y planos reflectores.

Antenas Lentes: Este tipo de antena usa la propiedad de los lentes de colimar la energía divergente incidente para evitar su dispersión en direcciones no deseadas. De esta forma la directividad de la antena puede aumentarse. Ejemplos de las mismas son la bi-convexa, cóncava – convexa, cóncava – plana, entre otras. (Balanis C. , 2005).

Redes o arreglos de antenas: Una red o arreglo (*array*) de antenas es un conjunto de antenas, o elementos irradiadores, de cualquier tipo que presentan una determinada distribución espacial con el objetivo de modificar una determinada característica de irradiación del elemento individual.

Métodos de Análisis

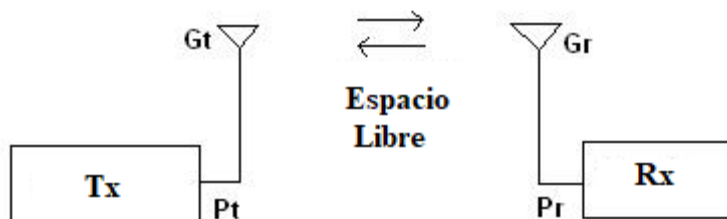
La teoría electromagnética propuesta por James Clerk Maxwell (1865) es la base para determinar el desempeño de una antena o de una red de antenas. Al final de cuentas, la resolución de las ecuaciones de Maxwell con sus respectivas condiciones de contorno permite modelar los elementos irradiadores y determinar su desempeño. Por ejemplo, para elementos irradiadores simples como los de tipo tubular o cable (i.e. monopolos, dipolos, etc) existen métodos analíticos consagrados que permiten caracterizarlos (Perez & Aguera, 2008). Por otro lado, cuando su geometría es más compleja o si el medio que le rodea presenta características como no homogeneidad, anisotropía o dispersión, por ejemplo, no se puede llegar a una solución cerrada y en este caso su caracterización es obtenida a través de métodos numéricos. En este punto, se debe mencionar que existen softwares de simulación electromagnética, que se fundamentan en varias técnicas numéricas disponibles comercialmente y/o para fines académicos. Entre los métodos más conocidos podemos mencionar el Método de los Momentos (*Method Of Moments - MOM*), método de Diferencias Finitas en el Dominio Temporal o en el Dominio de la Frecuencias (*Finite Difference Time Domain or Frecuenci Domain – FDTD / FDFD*), Método de los Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*) y tenemos varias familias de métodos Híbridos (Perez & Aguera, 2008). La versatilidad de esos diferentes softwares nos permiten analizar el desempeño de antenas, vía simulación, en entornos que interactúan con estructuras complejas como carros, barcos, satélites, etc. (Perez & Aguera, 2008).

Definición y parámetros característicos de las antenas

Antenas son elementos pasivos que pueden ser utilizadas tanto en las etapas de recepción y/o transmisión en los sistemas de comunicación inalámbricos. Como regla general se establece que, por ejemplo, la antena de transmisión esté perfectamente sintonizada con el equipo transmisor (esto también se aplica al sistema de recepción). Esa restricción evita que parte de la potencia incidente en la antena transmisora sea reflejada de vuelta al transmisor y pueda dañar las etapas de salida de los amplificadores de potencias (Perez & Aguera, 2008). El esquema simplificado del enlace de comunicación entre dos puntos es mostrado en la Figura 1.

Figura 1.

Esquema de enlace bidireccional en un sistema de comunicación.



En la Figura 1. los bloques Tx y Rx corresponden, respectivamente, al transmisor y al receptor. G_t y G_r son las ganancias de las antenas del transmisor y del receptor, respectivamente. P_t y P_r son las potencias generada por el transmisor y detectada en el receptor. El medio de transmisión, para el diagrama mostrado, es el espacio libre (atmosfera ideal).

De las definiciones que se encontraron en la literatura la considerada más ilustrativa ve a una antena como un elemento irradiador selectivo en frecuencia y en espacio. En base en esa definición, es necesario controlar la geometría del irradiador para obtener las características deseadas. Por ejemplo, si se desea diseñar una red de antenas multi-frecuencias, de especial interés en sistemas que deben brindar diversos servicios a usuarios que poseen características electromagnéticas similares (i.e.: ancho de banda, ganancia, diagrama de radiación, polarización, entre otros), se debe alterar la geometría de la red para obtener la diversidad en frecuencia buscada (Jaume Anguera).

En la actualidad, la interconectividad en sistemas celulares y de forma general en redes inalámbricas ha motivado el surgimiento de nuevas topologías de redes de antenas. Estos sistemas exploran la capacidad de diversidad espacial/frecuencia y son denominadas como redes Múltiples Entradas Múltiples Salidas (*Multiple Input Multiple Output – MIMO*). Redes del tipo MIMO se caracterizan por estar constituidas por elementos irradiadores y por la incorporación de un algoritmo de formación de lóbulos (Perez & Aguera, 2008). Esa unión entre hardware y software le confiere a la red MIMO prestaciones de servicio mejoradas, mayores capacidades en termino da ancho de banda, directividad, tasas de transferencia efectivas, entre otros.

En este punto es necesario mencionar que en la actualidad el diseño/análisis de ese tipo de redes no solo debe considerar que el medio que rodea a la red es el espacio libre. Cada vez más se lleva en consideración que el medio interactúa directamente con la geometría de las antenas – por ejemplo: el cuerpo humano, la plataforma donde será instalado el sistema de recepción/transmisión (i.e: automóviles, barco, aviones, edificios, etc), efectos de vientos solares, entre otros. En ese sentido, afortunadamente, los softwares que implementa alguno de los mencionados métodos numéricos permiten realizar análisis bastante completos y estudiar el

desempeño o comportamiento de esos irradiadores (Perez & Aguera, 2008). A seguir se presentan los parámetros sobre los cuales se evalúa el desempeño de una antena o de una red de antenas.

Impedancia de entrada

La impedancia de entrada es definida como “la impedancia presentada en una antena en sus terminales o la relación del voltaje para la corriente en un par de terminales o la relación de las componentes apropiadas de los campos eléctricos al magnético en un punto.” (Balanis C. , 2005). Esta impedancia presenta una parte real y una imaginaria, y a su vez, ambas partes dependen de la frecuencia como se muestra en la ecuación (1).

$$Z_{in} = R(w) + jX(w) \quad (1)$$

La parte real y la parte imaginaria son representadas por $R(w)$ y $X(w)$ respectivamente (Perez & Aguera, 2008). La resistencia de la antena está compuesta de dos elementos, la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas, que se representan como R_r y R_p ,

R_r : Está relacionada con la potencia que irradia la antena en el espacio libre, es decir, que es el valor de la resistencia que disiparía igual potencia que la antena está irradiando.

R_p : Representa la pérdida que se generan en la antena, específicamente puede ser, en los conductores, en el material de construcción y/o en el núcleo de la antena.

La parte reactiva de la impedancia de entrada se representa como $X(w)$. Otra manera de ver las partes que componen la impedancia de entrada es que, R_r está relacionada con la densidad de potencia activa que la antena irradia en la región de campo lejano, mientras que la R_p representa la potencia disipada en forma de calor.

La parte reactiva o imaginaria $X(\omega)$ representa la densidad de potencia reactiva que se encuentra almacenada en la región de campo próximo. Adicionalmente, una antena es resonante a una frecuencia específica f_0 , frecuencia para la cual la parte imaginaria es nula, $X(\omega_0) = 0$.

La adaptación de impedancias es otro parámetro importante para el diseño de antenas, ya que cuantifica la cantidad de potencia que el generador entrega a la antena transmisora y posteriormente se irradia al espacio. Por otro lado, si la antena no está adaptada o casada, una parte de la potencia se reflejaría hacia el mismo generador y esto podría dañar alguna de las etapas de salida del transmisor.

Normalmente, el transmisor se encuentra alejado de la antena transmisora, y la conexión entre ellos se realiza mediante una línea de transmisión, la misma que colabora en el casamiento del transmisor y su respectiva antena. Los parámetros que son optimizados, durante el mencionado casamiento, son la impedancia característica de la línea, la atenuación y su longitud. Los principales parámetros que cuantifican el nivel de casamiento son (Perez & Agüera, 2008):

Coefficiente de onda estacionaria: $SWR \in [1, \infty[$

Coefficiente de reflexión: ρ , S_{11} .

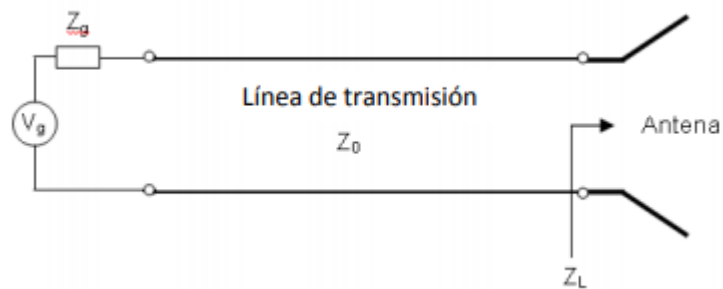
En relación a estos parámetros se considera que dos dispositivos están perfectamente casados cuando presentan $\rho = 0$, $SWR = 1$, o $S_{11} < -30$ dB (siendo -30 dB valor obtenido en una carga de calibración). Por otro lado cuando se dice que existe un descasamiento total $\rho = 1$, $SWR = \infty$, o $S_{11} = 0$ dB. Las expresiones para el cálculo del SWR y del coeficiente de retorno son:

$$SWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}, \quad \rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

Donde, Z_L es la impedancia de carga (de la antena) y Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión (impedancia de referencia).

Figura 2.

Modelo de una línea de transmisión



Nota: Este grafico representa el modelo usado para el cálculo del coeficiente de reflexión producido durante el acoplamiento de la línea de transmisión y la antena transmisora. (Perez & Aguera, 2008)

Eficiencia de Radiación

El parámetro eficiencia de radiación se define como la relación entre la potencia radiada (P_r), y la potencia entregada a la antena ($P_r + P_d$):

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_r + P_d} = \frac{R_r}{R_r + R_d} \quad (3)$$

Donde P_d , es la potencia disipada a causa de pérdidas en la antena como pérdidas en el dieléctrico o en el conductor y P_r es la potencia disponible en los terminales de la antena.

Pérdidas por descasamiento

El concepto de “*mismatch loss*” o pérdidas por descasamiento cuantifica efectivamente la potencia que es entregada a la carga en relación a la potencia que es reflejada por ella. De forma general se acepta, como una orden de magnitud, un $SWR \leq 2$ como un valor adecuado de pérdida de descasamiento (Perez & Aguera, 2008). En la tabla 1 se explica la relación entre la relación SWR el coeficiente de reflexión y las pérdidas por descasamiento.

Intensidad de radiación

La intensidad de radiación es “la potencia irradiada por una antena por unidad de ángulo sólido.” La intensidad de irradiación es un parámetro de campo distante y este puede ser obtenido por la multiplicación simple de la densidad de irradiación por el cuadrado de la distancia (Balanis C. , 2005). Las unidades son vatios por estereorradián (W/ unidad de ángulo sólido).

Dicho parámetro es independiente de la distancia a la que se encuentre la antena emisora. El parámetro de la intensidad de radiación tiene el objetivo de cuantificar el comportamiento de irradiación con algún parámetro, con el fin hacer una comparación entre distintas antenas (Perez & Aguera, 2008).

En este punto es conveniente recordar que en el estudio de antenas se debe definir un sistema de coordenadas de referencia, donde en su origen se encuentra posicionada la antena bajo estudio. Normalmente el sistema de coordenadas utilizado es el de coordenadas esféricas el cual define el vector posición en términos de los vectores unitarios (versores) \hat{r} , $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$. En la figura 3 se presenta el sistema de coordenadas y un elemento diferenciales de volumen para el sistema de coordenadas esféricas.

Tabla 1.*Relación entre de parámetros de una antena*

VSWR	 S₁₁ (dB)	Potencia entregada a la antena (%)	Perdidas por descasamiento (dB)
6	-2,9	49,0	-3,10
3	-6,0	75,0	-1,20
2	-9,5	88,9	-0,50
1.5	-14,0	99,8	-0,20
1.1	-26,4	99,8	-0,01

Nota: La tabla muestra una relación entre los parámetros VSWR, coeficiente de reflexión y pérdidas por desadaptación. Recuperado de Teoría de Antenas. Copyright 2008 por la compañía Editorial Creative Commons Deed.

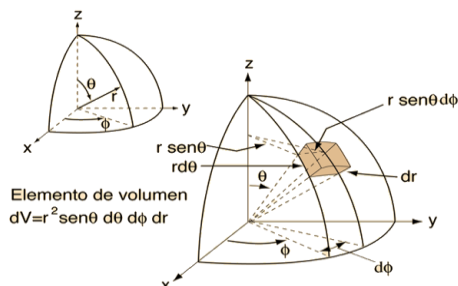
En la condición de campo lejano la intensidad de irradiación es dada por la expresión (4).

$$K(\theta, \varphi) = r^2 \delta(\theta, \varphi) \quad W/str \quad (4)$$

Donde $K(\theta, \varphi)$ es la intensidad de irradiación en [W/unidad de ángulo sólido], $\delta(\theta, \varphi)$ es la densidad de irradiación en [W/m²].

Figura 3.

Sistema de coordenadas esféricas



Nota: Sistemas de coordenadas utilizadas para el estudio de un elemento radiante.

Recuperado de sitio web hyperphysics.phy

El cálculo de la potencia total irradiada se puede realizar integrando la intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio, como se observa en (5).

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} K(\theta, \varphi) d\Omega \quad (5)$$

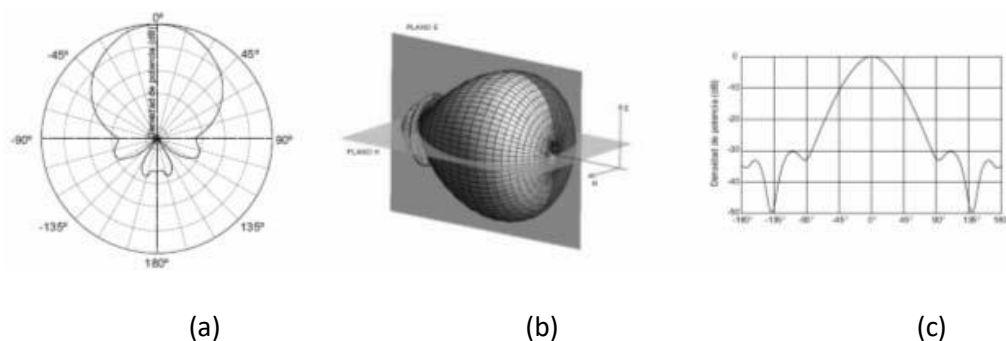
Donde $d\Omega$ es el diferencial de ángulo sólido y es definida como siendo $d\Omega = \sin(\theta) d\theta d\varphi$

Diagramas de radiación

Se define un diagrama de irradiación como la representación gráfica de las propiedades de irradiación de una antena, sobre un sistema de coordenadas esférico, y en condición de campo distante (Tirado, 2006). Siendo la antena el origen del sistema coordenado se busca expresiones para las componentes de campo eléctrico distante $E_{\theta}(\theta, \varphi)$ y $E_{\varphi}(\theta, \varphi)$, se debe recordar que en esta región la componente $E_r(\theta, \varphi)$ es nula (Kraus & Marhefka, 1988). En la Fig. 4 se muestran algunos ejemplos de diagramas de irradiación.

Figura 4.

Ejemplos de diagramas de irradiación



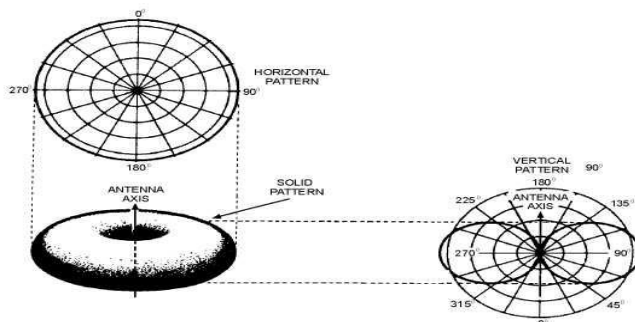
Nota: Ejemplos de diagramas de irradiación. En (a) se observa un diagrama de irradiación polar bidimensional, en (b) el diagrama tridimensional y en (c) un diagrama bidimensional rectangular. Recuperado de "diseño y fabricación de una antena con diversidad en polarización para redes wifi a 2,4 Ghz" año 2006.

Diagramas de irradiación pueden ser representados mediante cortes del diagrama de irradiación tridimensional. Esos cortes pueden ser para la variable φ igual a una constante o para la variable θ igual a una constante. Cada uno de estos cortes son denominados planos principales. Siendo que cada uno de ellos pueden ser representados en coordenadas cartesianas o polares. Un ejemplo de los planos principales generados a partir del diagrama de irradiación tridimensional para un dipolo es mostrado en la Figura 5.

A partir de los diagramas de irradiación se pueden definir varios parámetros de importancia para caracterizar el desempeño de una antena. Estos parámetros son presentados con auxilio del gráfico de la Figura 6 y las definiciones presentadas en Tabla 2

Figura 5.

Cortes de un diagrama de irradiación

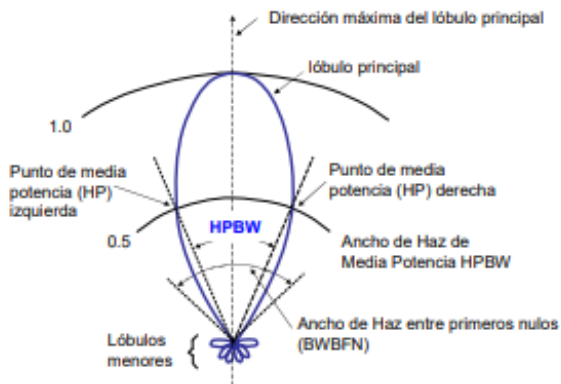


Nota: Representación de los cortes de un diagrama de radiación en coordenadas polares.

Recuperado de Teoría de Antenas. Copyright 2008 por la compañía Editorial Creative Commons Deed.

Figura 6.

REPRESENTACION DE PARÁMETROS DE RADIACIÓN



Nota: Representación de los parámetros que caracterizan un diagrama de Radiación.

Recuperado de Presentación UNI-FEE capitulo Antenas 2010.

Tabla 2.*Parámetros para caracterizar el diagrama de radiación*

Parámetros	Definiciones
Lóbulo principal	Zona de máxima radiación
Lóbulos laterales	Zona que rodea los máximos de menor amplitud
Lóbulo Secundario	El lóbulo lateral de mayor amplitud. Suele ser adyacente al lóbulo principal.
Lóbulo Posterior	Es el lóbulo opuesto al lóbulo principal
Ancho de haz de media potencia –3dB	Es la separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor medio del máximo.
Ancho de haz de ceros θ_{z}	Separación angular en las direcciones del espacio en las cuales el lóbulo principal toma un valor nulo.
Relación Frente-Espalda (F/E)	Es el cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior expresado en dB
Relación del lóbulo principal a secundario (NLPS)	Cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario.

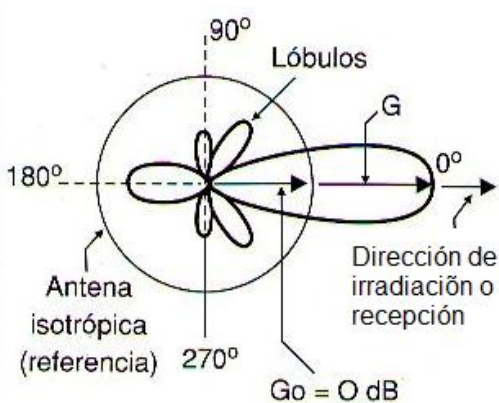
Nota: En esta tabla se representan las definiciones de los parámetros de irradiación mostrados en la Figura 6. Recuperado de *Recuperado de Teoría de Antenas. Copyright 2008 por la compañía Editorial Creative Commons Deed.*

Función directividad y directividad

Es la relación entre la densidad de potencia que se radia hacia una dirección determinada y la densidad de potencia que podría radiar una antena isotrópica a la misma distancia (Tirado, 2006). Un ejemplo gráfico de esta relación se puede observar en la Figura 7.

Figura 7.

Relación entre la radiación de antenas isotrópicas y directivas



Nota: Recuperado de Teoría de Antenas. Copyright 2008 por la compañía Editorial Creative Commons Deed.

Se dice que una antena es muy directiva, si puede concentrar la potencia que radia o recibe en una determinada dirección establecida (Perez & Aguera, 2008). La ecuación definida en (6) se refiere a la función directividad. Si se toma como referencia la dirección de máxima irradiación la función de directividad se conoce como Directividad.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\delta(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \quad D = \frac{\delta_{\max}}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \quad (6)$$

donde $D(\theta, \varphi)$ es la función directividad y D representa la directividad de la antena.

Tabla 3.*Relación entre la directividad exacta y la aproximada*

N	D exacta [dB]	D aprox. [dB]
1	6,0	4,5
2	7,8	7,0
3	9,0	8,7
4	10,0	9,8

Nota: Esta tabla muestra la relación entre la directividad exacta y la aproximada en base al diagrama de radiación. Recuperado de Teoría de Antenas. Copyright 2008 por la compañía Editorial Creative Commons Deed.

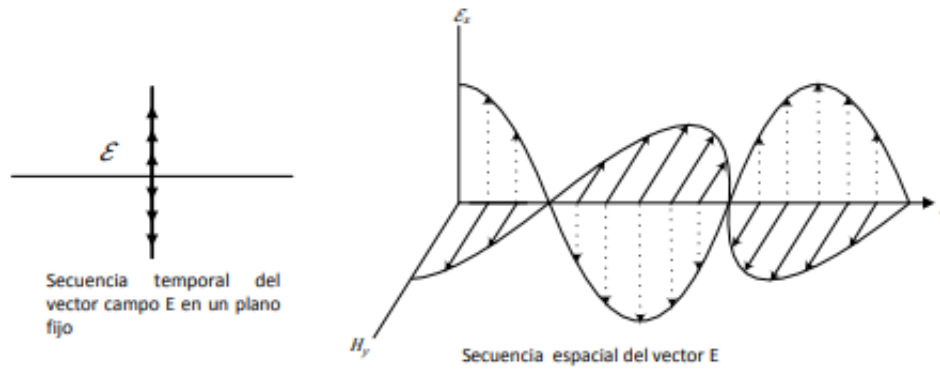
Polarización

A polarización de una antena es definida por la posición de la antena en relación a la tierra, o mejor dicho, por la posición del vector campo eléctrico. Por ejemplo, si el vector campo eléctrico está posicionado horizontalmente, se dice que el campo (o la antena) presentan polarización horizontal (Gonzaga Rios & Barbosa , 2002).

En la Figura 8 se observa la progresión de una onda en el espacio en un instante de tiempo t . Ella está constituida por los campos eléctricos (x, y, z, t) , en el eje X , y magnéticos (x, y, z, t) , en el eje Y . Ambos campos están contenidos en un único plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda, en el caso de la Fig. 8 el eje Z . Este es un ejemplo de una polarización lineal según el eje X .

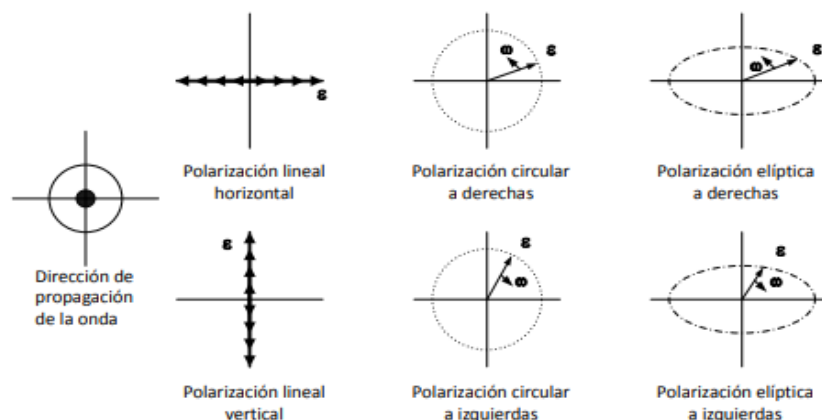
Figura 8.

Forma de onda de campo eléctrico



Nota: Forma de Onda polarizada según el eje X. Recuperado de Teoría de Antenas. Copyright 2008 por la compañía Editorial Creative Commons Deed.

La polarización más genérica que se puede encontrar es la polarización elíptica siendo que tanto la polarización lineal y circular, otros dos tipos de polarización bastante comunes en las comunicaciones, pueden ser analizados como casos particulares de la polarización elíptica. En la Figura 9 se presentan la polarización lineal, circular, elíptica y se incluye el sentido de giro del campo eléctrico en los casos de polarización circular y elíptica.

Figura 9.*Esquemas de polarizaciones*

Nota: Representación de las polarizaciones lineal, circular y elíptica. Recuperado de Teoría de Antenas. Copyright 2008 por la compañía Editorial Creative Commons Deed.

Ancho de Banda

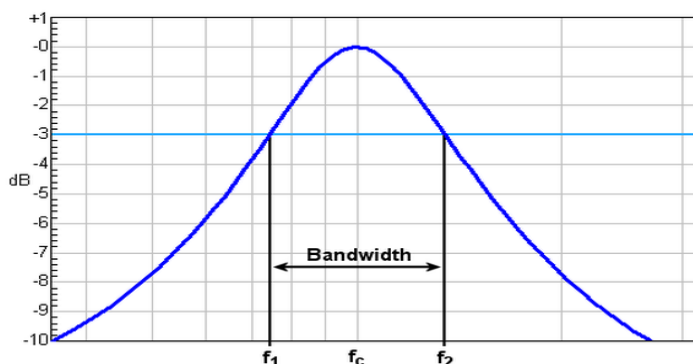
El ancho de banda se define como el rango de frecuencias donde el comportamiento de la antena satisface cierto parámetro de desempeño deseado, es decir, es el rango de frecuencias en el que algún parámetro de la antena no sobrepasa un límite establecido (Tirado, 2006). Al alterar de forma sistemática y controlada la geometría de la antena se puede garantizar que ese parámetro se alcanzado para un rango definido de frecuencias dentro de ciertos límites. El ancho de banda fraccional es expresado en porcentaje, el cual está definido como la diferencia entre la frecuencia máxima de operación y la mínima, dividido para la frecuencia central multiplicado por cien.

$$BW = 100 \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad [\%] \quad (7)$$

Los parámetros de irradiación de la antena que son afectados por la variación del ancho de banda son: la directividad, función directividad, polarización, ancho de haz, nivel de lóbulo principal a secundario, la impedancia de la antena, el coeficiente de reflexión y la relación de onda estacionaria. Los parámetros que son afectados dependen de la geometría y del proceso de construcción de la antena (Cardama, 2002). En la Figura 10, se observa la representación gráfica del ancho de banda donde la f_2 es la frecuencia máxima, f_1 es la frecuencia mínima y f_c es la frecuencia central o portadora donde se concentra la mayor cantidad de energía.

Figura 10.

Ancho de banda



Nota: En esta figura se muestra la representación gráfica del Ancho de Banda. Recuperado de sitio web todoantenas.weebly.com

Ganancia

Este parámetro toma en cuenta tanto la eficiencia de irradiación y la función directividad de la antena. Es decir, la ganancia de un elemento irradiante es definido como la relación entre la intensidad de irradiación en una dirección dada y la intensidad de irradiación isotrópica (Rod M. Alvarez D, 2013), como bien se observa en la Figura 7. Matemáticamente el gaño es definido como siendo:

$$G = 4\pi \frac{K(\theta, \varphi)}{P_{IN}} \quad (8)$$

donde P_{IN} es la potencia total de entrada y $K(\theta, \varphi)$ fue definida en (4).

Redes de Antenas

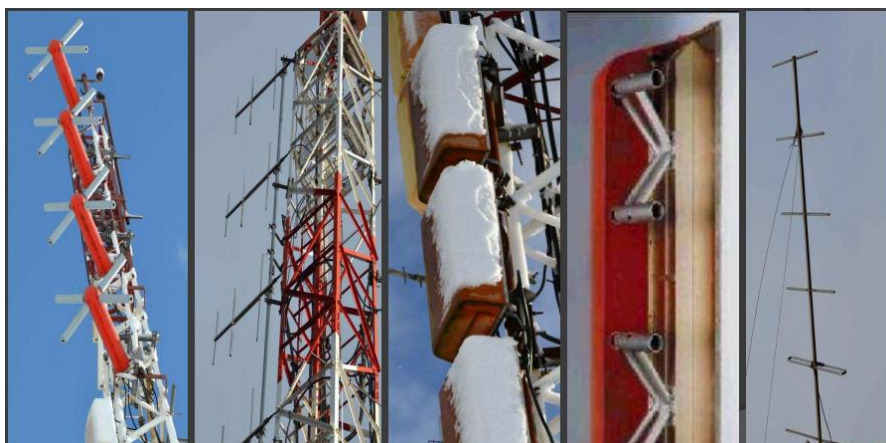
Una red de antenas es un agrupamiento de antenas trabajando en conjunto bajo ciertas condiciones. Generalmente, todos los elementos de la red son geoméricamente iguales y acomodadas en una disposición espacial bien definida (Martin, 2011). Esto permite que la red actúe como un único elemento irradiador de características mejoradas, las mismas que son obtenidas a partir del elementos irradiador individual (Sarmiento).

La ventaja más clara que existe cuando se utiliza una red es que se consigue variar las características del diagrama de radiación controlando la magnitud y la fase de las corrientes que se aplican a los elementos de la red. Adicionalmente, el control de las corrientes de alimentación permite parametrizar el control de otros parámetros de las antenas constituyéndose, de esa forma, en las conocidas como antenas adaptativas (Perez & Aguera, 2008).

Las características más frecuentes que se pretenden controlar al diseñar una red de antenas son, por ejemplo: manipulación de la ganancia, control en la diversidad espacial o de frecuencia, cancelar interferencias naturales o intencionales provenientes de direcciones particulares, controlar su directividad, determinar la dirección de llegada de señales recibidas, aumentar la relación señal ruido (SNR), etc. En la Figura 11, se muestra un arreglo de antenas utilizadas en las radios base para telefonía celular.

Figura 11.

Arreglos de antenas



Nota: En esta imagen se puede observar distintos ejemplos de Arreglos de antenas utilizados para transmisión o recepción de señales. Recuperado de Presentación de Rubén Canga, Curso de Iniciación para telecomunicaciones 2011.

En una red de elementos idénticos (elementos bien comportados) la modificación del diagrama de irradiación puede ser realizada controlando algunos de los siguientes parámetros: a) la configuración de la distribución espacial de los elementos de la red (i.e. lineal, circular, planas, esférica, etc...), b) el espaciamiento relativo entre elementos, c) la amplitud de la corriente de excitación de cada elemento, d) la fase de la corriente de excitación de cada elemento, e) el patrón de irradiación de cada uno de los elementos individuales (Balanis C. , 2005).

Cuando los elementos de la red están distribuidos sobre una recta esa red recibe el nombre de red lineal. Si adicionalmente los elementos de la red son excitados con corrientes de igual amplitud y con fases progresivas uniformes, la red se denomina lineal y uniforme (Gonzaga Rios & Barbosa , 2002). Análogamente se puede extender el concepto de redes uniformes para

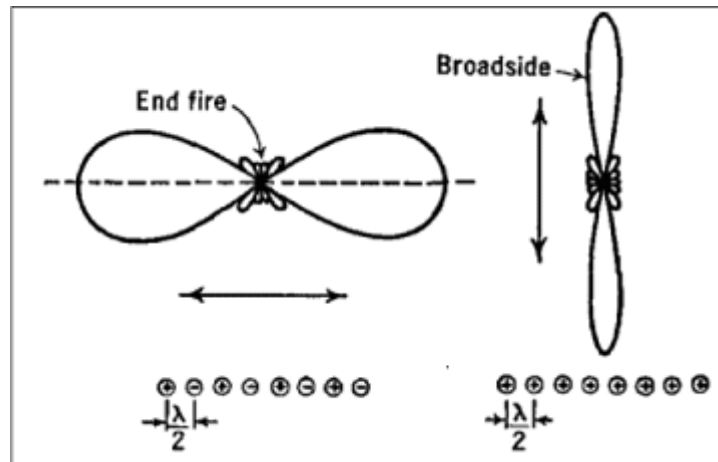
redes que presentan distribuciones espaciales bidimensional (redes planas), esféricas (redes tridimensionales), o sobre una circunferencia (redes circulares). Entre las redes lineales y uniformes las más utilizadas son las redes del tipo *broadside* (transversal) y *endfire* (longitudinal). Estas dos últimas redes lineales uniformes (*broadside* y *endfire*) serán usadas a continuación para presentar como varían las características del diagrama de irradiación.

Redes Endfire y Broadside

Se define una red *Broadside* como un arreglo cuyo máximo lóbulo de irradiación se encuentra perpendicular a la recta sobre la cual se distribuyen los elementos de la red. Mientras que una red *Endfire* es un irradiador cuyo máximo de radiación se abre de forma co-lineal con el eje de la red.

En la figura 12, se observan representaciones de las dos redes con sus respectivos diagramas de irradiación. Como ya fue mencionado ambas redes son lineales y uniformes. Adicionalmente estas redes son denominadas resonantes, ya que los elementos irradiadores que las constituyen son elementos resonantes. Debido a la resonancia, ambas redes presentan un haz más estrecho y una alta directividad (TutorialsPoint, 2016).

Una forma de entender el mecanismo que permite modificar los diagramas de irradiación de la red para obtener características *Endfire* y *Broadside* es suponer que los elementos constitutivos de la red son "*bien comportados*", desde el punto de vista electromagnético, y analizar las interferencias constructivas y destructivas que se producen cuando las ondas electromagnéticas generadas por cada elemento se propagan. Para simplificar esa explicación se considera a seguir una red lineal de elementos isotrópicos, elemento que por definición es ideal, y que por su naturaleza ideal se considera un *elemento bien comportado*.

Figura 12.*Redes broadside y endfire*

Nota: Representación de la red Endfire, a la izquierda, y Broadside, en el lado derecho.

Rescatado de Página web TutorialsPoint.

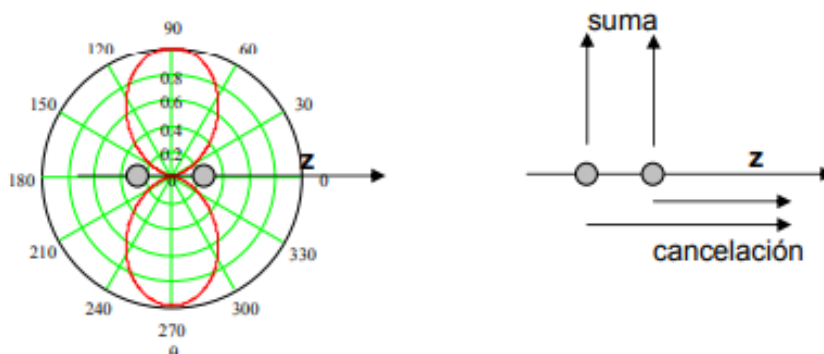
Interferencia de Señales

El caso más simple de una red lineal uniforme es la constituida por dos elementos irradiantes iguales y alimentados por corrientes de igual magnitudes y fases. En este caso, es intuitivo pensar que cada elemento producirá una onda esférica que se propaga en sentido de alejarse de la fuente de irradiación. Así mismo, al interactuar los frentes de onda de cada antena existirán regiones donde la interferencia será constructiva y otras donde la interferencia destructiva producirá la cancelación de las ondas. La interferencia constructiva, o positiva, se produce cuando la diferencia de fase entre los caminos recorridos por la onda sea un múltiple entero de 2π . Pero cuando la diferencia de fase entre los caminos recorridos es un múltiple impar π la diferencia será destructiva (Canga, 2011).

Si no existe separación entre los dos elementos irradiantes, entonces no existirá ningún tipo de desfase, lo que causaría que la señal sea irradiada de forma isotrópica en todas las direcciones. Si los elementos irradiantes están separados de media longitud de onda ($\lambda_0/2$, con λ_0 la longitud de onda en el espacio libre) se producirá un máximo en la dirección perpendicular a la recta base de la red (condición Broadside) ya que las señales se sumarán en oposición de fase, como se observa en la Figura 13.

Figura 13.

Radiación dependiendo de la separación entre elementos.



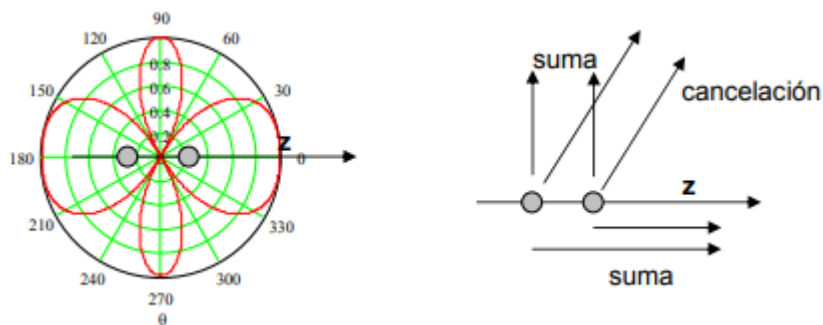
Nota: En la figura se muestra la radiación en un arreglo lineal uniforme con una separación de 180° o $\lambda/2$ entre las antenas. Recuperado de Presentación de Rubén Canga, Curso de Iniciación para telecomunicaciones 2011.

Por otro lado, cuando la separación entre los elementos es igual a λ_0 se producirán máximos de radiación en las direcciones del eje de la red (condición Endfire), y en la dirección perpendicular a este e incluso cancelaciones para ángulos en los que ambas señales estén en oposición de fase (Canga, 2011).

El comportamiento del diagrama mencionado anteriormente se ilustrado en la Figura 14. Se debe resaltar que el mencionado comportamiento es producto de dos factores, uno: la separación entre elementos y, dos, las corrientes de alimentación consideradas (mismas amplitudes y fases). Por ejemplo, si la diferencia de fase en las corrientes de alimentación, aplicadas a los elementos irradiadores, es de $-\pi\lambda/4$ y la separación espacial entre ellos es de $\pi\lambda_0/4$ el diagrama de irradiación obtenido se ilustra en la Figura 15 (Canga, 2011).

Figura 14.

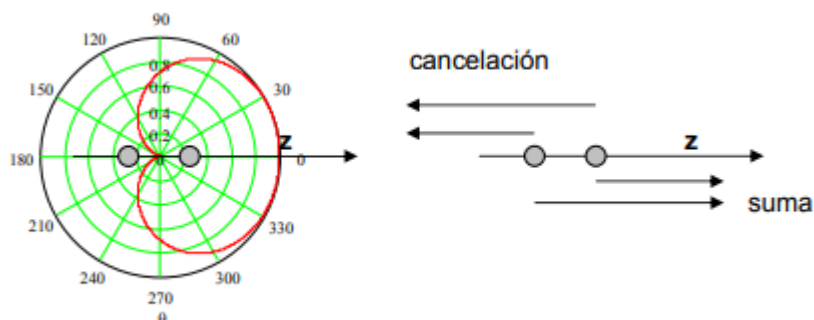
Radiación dependiendo de la separación entre elementos.



Nota: Radiación en una separación de longitud de onda máximo. Recuperado de Presentación de Rubén Canga, Curso de Iniciación para telecomunicaciones 2011.

Figura 15.

Radiación dependiendo de la separación entre elementos.



Radiación en una Longitud de onda de lambda cuartos. Recuperado de Presentación de Rubén Canga, Curso de Iniciación para telecomunicaciones 2011.

Efecto de Espaciado

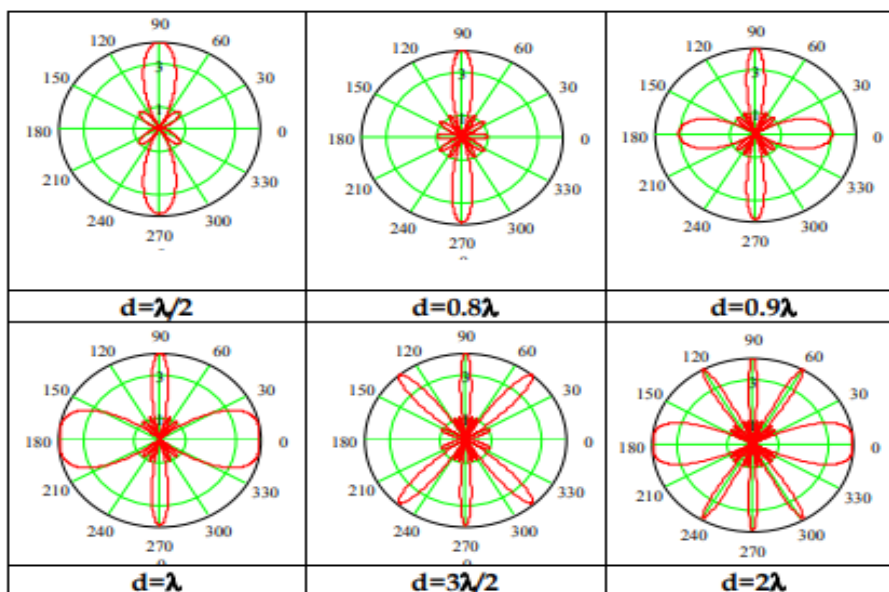
Con base a lo expuesto en la sección se puede concluir, de forma intuitiva, que el espaciado entre elementos de una red tiene una gran influencia en el formato del diagrama de irradiación de la red. De forma general se puede decir que la separación entre los elementos de la red determina el número de máximos de irradiación del diagrama. Si esa separación es menor $\lambda_0/2$ solo se podrá apreciar el lóbulo principal máximo. Mientras que si la separación entre los elementos es menor que λ_0 el diagrama de radiación tendrá más de un lóbulo principal máximo y estos se denominan lóbulos de difracción (Canga, 2011).

En la Figura 16 se observa claramente que el número de lóbulos de difracción aumenta en número y amplitud conforme aumenta el espaciado entre los elementos, a partir de $\lambda_0/2$. Adicionalmente, si el espaciado entre antenas es constante y aumentamos su número en la red se obtendrá un aumento en la directividad o reducción de su respectivo ancho de haz. En la

Tabla 4 se muestran ejemplos de diagramas de irradiación 3D mientras se aumenta el número de los elementos de la red y su espaciamiento. Por otro lado, cuando el desfase o la variación de la fase de las corrientes que alimentan a los elementos de la red, así como, el número sus irradiadores varían se obtiene condiciones del tipo Broadside o Endfire, como se muestra en la Tabla 5.

Figura 16.

Radiación dependiendo de la separación entre elementos.







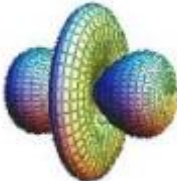
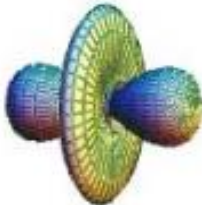



Nota: Ejemplos de diagramas con distintos espaciados y cuatro elementos radiantes.

Recuperado de Presentación de Rubén Canga, Curso de Iniciación para telecomunicaciones 2011.

Tabla 4.

Radiaciones variando espaciado y elementos en fase.

Espaciamiento	2 Elementos	3 Elementos	4 Elementos
$\lambda/4$			
$\lambda/2$			
λ			




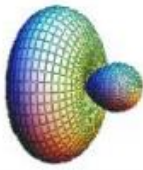





Nota: En esta tabla se muestra un ejemplo de radiaciones donde el aumento de la directividad de la red conforme el número de sus elementos aumente de dos para cuatro. Recuperado de Presentación de Rubén Canga, Curso de Iniciación para telecomunicaciones 2011.

Para redes lineales y bidimensionales los efectos mostrados en las Figuras 13 a 16, Tabla 4 y Tabla 5 están estrechamente relacionadas con el parámetro denominado de Factor de Red. Este factor permite, básicamente, calcular el diagrama de irradiación de la red teniendo como base el diagrama de irradiación de un elemento más los desfases espaciales relativos a la posición de cada uno de los elementos de la red.

Se debe resaltar, que en este procedimiento se supone que los elementos irradiadores son todos bien comportados. Es decir, cuando los diagramas de irradiación de todos los elementos son iguales y cada elemento no influye en las características de los elementos vecinos. Este factor es válido solamente en estructuras bidimensionales y lineales, para estructuras circulares, cilíndricas y esféricas se define lo que se denomina Factor de Forma y es completamente diferente al factor de red (Wong, 1999).

Tabla 5.

Radiaciones con variaciones en fase

Espaciamiento	2 Elementos	3 Elementos	4 Elementos
$\lambda/4$			
$\lambda/2$			
λ			

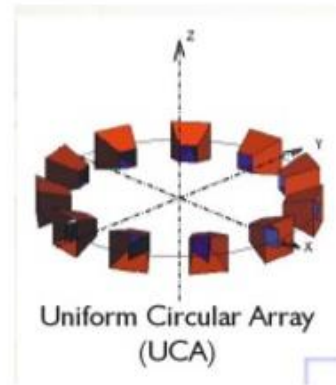
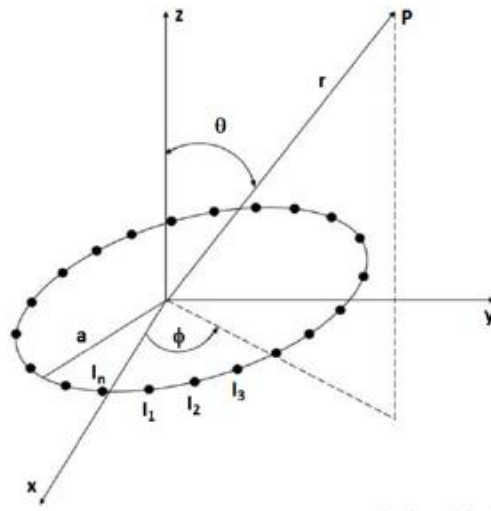
Nota: En esta tabla se muestran ejemplos donde la variación de la fase de las corrientes que alimentan a los elementos de la red. Recuperado de Presentación de Rubén Canga, Curso de Iniciación para telecomunicaciones 2011.

Arreglo circular de Antenas

Este tipo de arreglo, es básicamente, un arreglo planar pero donde los elementos radiantes están colocados sobre un anillo circular. Normalmente son usados para detección de radares, goniometría vía radio, exploración sísmica, disminuir o suprimir interferencias electromagnéticas en sistemas de comunicaciones móviles, entre otras (Angel D. Pinto Mangones, 2016).

Una de las características de este tipo de arreglos es que, al no poseer esquinas, estas pueden girar su diagrama de radiación en el plano azimutal, sin la necesidad de variar la forma del haz, además de tener la capacidad de compensar el acoplamiento mutuo, que es un efecto normal en los arreglos bidimensionales, mediante la descomposición de las excitaciones de los elementos del arreglo (Angel D. Pinto Mangones, 2016).

En la Figura 17 se muestra la geometría básica del arreglo circular de antenas isotrópicas, donde cada elemento es excitado por una corriente de excitación (I_n) con amplitud y fase definida. En la imagen " a " representa el radio de la circunferencia del arreglo, " q " es el valor del ángulo desde el eje " z " que pasa por el centro de la circunferencia de forma perpendicular, " f " es el ángulo que está en el plano del arreglo y cuyo valor se mide a partir del eje " x " (Angel D. Pinto Mangones, 2016).

Figura 17.*Arreglo circular*

Geometría básica de un arreglo circular de antenas. Recuperado de "Optimización de un arreglo circular de antenas con distribución continua de corriente de alimentación utilizando PSO (Particle Swarm Opimization) 2016 y Pagina web slideshare Presentación de arreglos de antenas 2011.

CAPITULO 3

DISEÑO DE LA GEOMETRÍAS INICIALES DE LA ANTENA

Introducción

En este capítulo se muestra el proceso de diseño de la geometría inicial, tomando en cuenta la teoría estudiada en el capítulo anterior y la topología de la antena modelo donde se basó este proyecto. Con el propósito de iniciar el primer acercamiento a la geometría del elemento radiante se presenta los aspectos fundamentales de su diseño. En una próxima etapa del proyecto donde se engloba esta iniciativa el elemento diseñado será integrado en una red circular de antenas. La herramienta computacional que fue utilizada fuertemente durante este proceso es el software de simulación electromagnético ANSYS HFSS, el mismo que permita observar los cambios de los parámetros característicos del irradiador cuando variar su geometría.

De la misma manera se presenta el diseño del circuito cazador de impedancias, que es una parte importante para la alimentación de la antena y de su correcto funcionamiento. La posterior simulación el circuito completo, antena y alimentación, entrega resultados que permiten realizar debidos cambios con el fin de acercarnos a cumplir el objetivo plantado en este proyecto.

Geometría inicial

Software ANSYS HFSS

El software que ayudará al diseño de la geometría y la simulación de los parámetros del elemento radiante es ANSYS HFSS, que básicamente es un solucionador de métodos numéricos finitos para simulación de estructuras electromagnéticas y es una herramienta muy útil para el desarrollo del diseño de antenas y elementos de alta frecuencia.

El proceso que sigue la herramienta de HFSS empieza con la creación de la estructura física de la cual se desea realizar el estudio, donde posteriormente se ingresan los campos y fuentes electromagnéticas que van a mostrar los cambios que afectan al diseño. Las metodologías que sigue esta herramienta son basadas en elementos finitos (FEM) o métodos híbridos avanzados que permiten simular aplicaciones de baja y alta frecuencia.

Figura 18.

Imagen de la pantalla de inicio del software ansys hfss



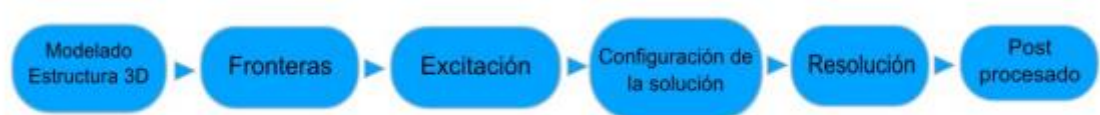
Nota: En la imagen se puede ver la representación del Software Ansys HFSS. Recuperado Google Imágenes.

En la resolución para una simulación de algún problema electromagnético el software HFSS sigue una serie de etapas que se muestran en la Figura 19. Como se puede observar la creación de una estructura en 3D es el primer paso, donde se asignan las dimensiones de los elementos que forman parte de la estructura así como las propiedades de sus materiales. Seguidamente, se procede a definir las condiciones de frontera, es decir “encerrar a la antena dentro de una caja que funcionará como un condición de absorción electromagnética perfecta”, esto se realiza con el fin de que los cálculos matemáticos que el software realiza puedan considerar una condición de campo distante, a pesar, que la caja límite sea finita.

Después de establecer la alimentación o excitación de la estructura del elemento. El paso siguiente es configurar el tipo de análisis y finalmente se procede con la resolución de la estructura del elemento y el post-procesado, es decir, obtener la información relevante de la estructura ya sea como imágenes de diagramas, gráficos bi-dimensionales o tridimensionales, resultados en forma de tablas y todos los reportes que se requieran (Sanchez, 2013).

Figura 19.

Diagrama de bloques de proceso ansys



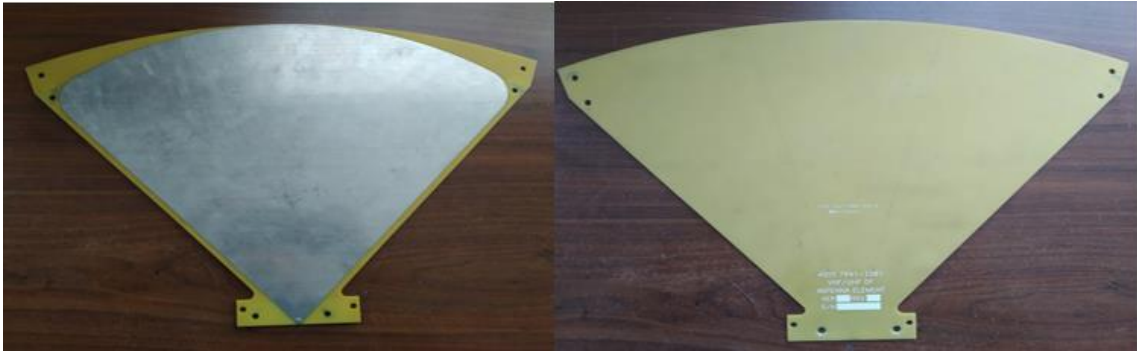
Nota: Proceso de una simulación de una estructura con HFSS. Recuperado de “Herramienta de optimización distribuida con HFSS”.

Geometría Inicial

En primer lugar, se toma en cuenta que la geometría básica propuesta para el elemento irradiante para este proyecto, en nuestro caso se basa en una antena ya existente, que consta de elementos radiantes tipo dipolo tipo impreso, es decir, que a partir de esto, se empezará por modificar las características geométricas con el propósito de encontrar los parámetros electromagnéticos necesarios para que cumpla el objetivo del proyecto. En la Figura 20 se muestran la geometría base del elemento irradiante, vista superior e inferior, que son las bases geometría inicial de este proyecto.

Figura 20.

Vistas superior e inferior de antena base



(a)

(b)

Nota: En la imagen se muestra la geometría de cada polo del elemento radiante existente del tipo dipolo banda ancha. En (a) se observa la cara superior del polo y en (b) la cara posterior del polo.

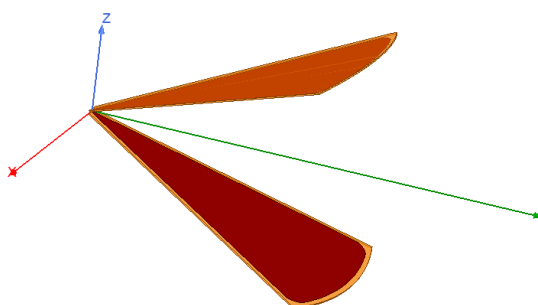
Con base a la geometría del elemento irradiador que se dispone en el Centro de Investigación de Aplicaciones Militares – CICTE fue construido el modelo tridimensional virtual dentro del entorno de diseño del HFSS. El modelo fue completamente parametrizado para conseguir variar sus dimensiones geométricas en el instante de aplicar la optimización. La figura del modelo virtual implementado en el HFSS se presenta en la Figura 21.

Las dimensiones geométricas tomadas de la antena base se detallan en la Tabla 6. El ancho de banda propuesto en la que trabajara este arreglo es en el rango de VHF y UHF ($f_{min} = 300\text{MHz}$ a $f_{max} = 3\text{GHz}$).

La estructura de la antena está sujeta a la longitud de onda correspondiente a la frecuencia mínima en la que se va a trabajar, en este caso es de 300MHz. Para ello utilizamos la ecuación (9), que corresponde al cálculo de la frecuencia en función de la longitud de onda (λ_L) y al valor estándar de la velocidad de la luz (c).

Figura 21.

Geometría inicial de la antena



Nota: En esta imagen se muestra la geometría inicial del elemento radiante que forma parte del arreglo para este proyecto. Modelo 3D de la Antena Dipolo – Software ANSYS HFSS

Tabla 6.

Características geométricas de antena base

Parámetro	Valor
Apertura del Dipolo (Plano YZ)	30°
Angulo de apertura del elemento radiante (Plano XY)	38,845°
Radio	300 mm

Nota: En esta tabla se muestran los valores iniciales tomados de la geometría existente para el diseño de la antena en este proyecto.

$$f_{min} = \frac{c}{\lambda_L} \quad (9)$$

Para obtener las características de longitud de cada polo del elemento radiante se toman los valores conocidos de la frecuencia mínima en la que trabajara la antena y la constante de la velocidad de la luz, donde se despeja la longitud de onda. Teóricamente la longitud del polo será igual a la longitud de onda.

$$\lambda_L = \frac{c}{f_{min}} \quad (11)$$

$$\lambda_L = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{300 \text{ MHz}} = 0,3 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

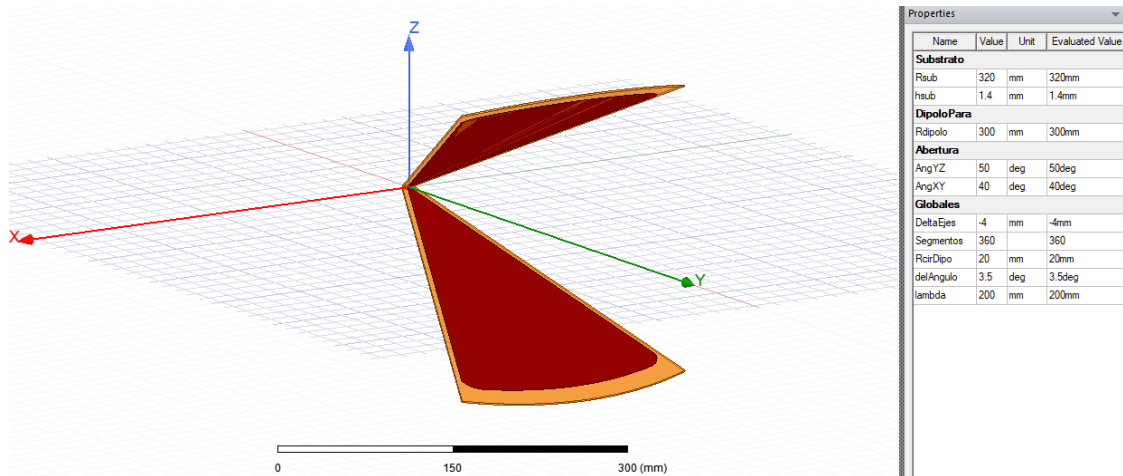
$$\lambda_L = 0,3 \text{ m} = 300 \text{ mm}$$

Como se mencionó anteriormente, en este proyecto se plantea analizar un elemento irradiador que será usado para diseñar un arreglo circular, basado en uno ya existente, pero con la diferencia de que este nuevo arreglo tenga un mayor número de elementos radiantes con el fin de estudiar y mejorar los parámetros de radiación manteniendo su ancho de banda.

Después de conocer la longitud que tendrá cada elemento en (11) y, mediante el método de simulaciones sucesivas se varió los parámetros mostrados en la Tabla 6: Apertura de Dipolo (Angulo en el plano YZ) y Apertura del elemento radiante (Angulo en el plano XY), en el software de simulación Ansys HFSS y esto ayudó a poder obtener los ángulos donde las características de radiación sean las más óptimas. Además, se toma en cuenta que la distancia entre cada polo es de 1.4mm para ingreso de la alimentación, por especificaciones originales del diseño. Los resultados de la optimización serán presentados en el próximo capítulo. Un gráfico de la geometría inicial implementada en el CAD de HFSS se muestra en la figura 22.

Figura 22.

Modelo 3d final con geometría inicial definida



Nota: Diseño del modelo 3D del elemento dipolo final con las medidas establecidas iniciales.

Software Ansys HFSS.

Diseño del Cazador de Impedancias

Un cazador o transformador de impedancia tiene como propósito, transformar o adaptar la impedancia de entrada, que es la salida de nuestro generador, a la impedancia de salida del transformador, que es el elemento radiante, antena o impedancia de entrada de otro dispositivo que se coloque a continuación del mismo.

Transformador de impedancias Chebyshev

Ya que este proyecto necesita un ancho de banda considerable, se establece el transformador de tipo Chebyshev, que a diferencia de otros tipos como el binomial, mejora el ancho de banda mediante la introducción de rizado en la banda de paso, por lo que se obtiene una mejor respuesta en ancho de banda que otro tipo de transformador.

Este diseño de transformador o cazador tipo Chebyshev comienza calculando el coeficiente de reflexión $\Gamma(\theta)$ a través del polinomio de Chebyshev de orden N . Una característica de estos transformadores es que para calcular los valores de las impedancias y los coeficientes de reflexión se calcula el polinomio de orden N correspondiente, además de comparar con la expresión de forma similar a una serie de Fourier del coeficiente de reflexión $\Gamma(\theta)$. (Ibañez, 2015)

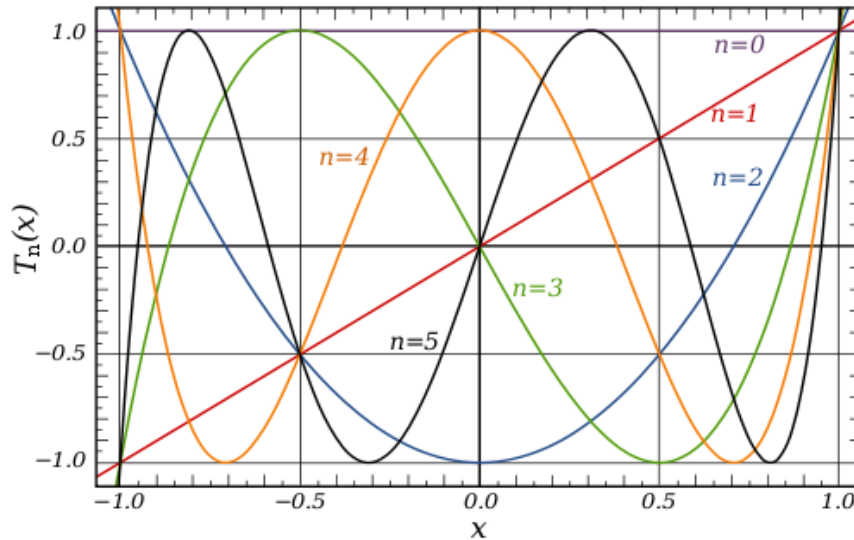
Como se conoce, la característica del polinomio de Chebyshev es que su fórmula es recurrente, es decir, los términos que se obtienen en órdenes superiores dependen netamente de los términos obtenidos en órdenes inferiores empezando desde el orden 0. Y para empezar a calcular los órdenes superiores del polinomio de Chebyshev se requiere saber las dos primeras ordenes $C_{0(x)}$ y $C_{1(x)}$. La expresión general del polinomio de Chebyshev es la siguiente:

$$C_{N(x)} = 2x C_{N-1(x)} - C_{N-2(x)} \quad (12)$$

El comportamiento de este polinomio se representa gráficamente en la Figura 23, donde se puede observar que no sobrepasa el valor de la unidad cuando el valor absoluto de la variable de entrada es menor que la unidad, y en este rango la respuesta es oscilante, esta zona se le conoce como la región de pasa banda, mientras que la zona fuera de este rango se le conoce como la región fuera de banda.

Figura 23.

Representación gráfica del polinomio de Chebyshev



Nota: La imagen representa las curvas de las primeras 5 órdenes del polinomio de Chebyshev.

Recuperado de página web Embedded Related.com. Autor Jason Sachs (2012).

Para el diseño del rizado se relaciona la variable de entrada como una función trigonométrica periódica ($\cos \theta$), donde el valor de θ es considerado como la longitud eléctrica. También se definen los límites, superior e inferior, en función de θ , es decir, θ_m cuando $x = 1$ y $\pi - \theta_m$ cuando $x = -1$, y esto se logra al realizar el cambio de variable $\cos \theta \rightarrow \frac{\cos \theta}{\cos \theta_m}$. Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado y teoría trigonométrica, el polinomio de Chebyshev se expresa de la siguiente manera (Ibañez, 2015).

$$C_N\left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_m}\right) = \cos\left(N \cos^{-1}\left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_m}\right)\right) \quad (13)$$

Tomando en cuenta que $\sec\theta_m = \frac{1}{\cos\theta_m}$ y los estudios existentes, indican que la formula ya sintetizada del coeficiente de reflexión $\Gamma(\theta)$ en función del polinomio del Chebyshev se expresa de la siguiente manera:

$$\Gamma(\theta) = Ae^{-jN\theta} C_{N(\sec\theta_m \cos\theta)} \quad (14)$$

Donde, A es la amplitud del rizado, N es el número de secciones del adaptador y C_N es el polinomio del Chebyshev dependiendo del orden en que se encuentre el análisis. Para encontrar el valor de la constante A , se puede igualar la longitud eléctrica $\theta = 0$, es decir, que se obtiene el valor máximo de la amplitud con una frecuencia igual a cero.

La máxima amplitud en la banda de paso se observa cuando existe el máximo coeficiente de reflexión Γ_m , por esto se llega a la conclusión que el coeficiente de reflexión es igual al valor absoluto de la amplitud. Entonces se puede despejar C_N en función las impedancias de la carga y salida, y del coeficiente de reflexión máximo.

$$C_{N(\sec\theta_m \cos\theta)} = \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right| \frac{1}{\Gamma_m} \quad (15)$$

Por último, con lo explicado anteriormente, la $\sec\theta_m$ expresada en función de Γ_m y las impedancias Z_L y Z_0 , se muestra de la siguiente forma:

$$\sec\theta_m = \cosh \left(\frac{1}{N} \cos^{-1} \left(\left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right| \frac{1}{\Gamma_m} \right) \right) \quad (16)$$

$$\sec\theta_m \cong \cosh \left(\frac{1}{N} \cos^{-1} \left(\left| \frac{\ln \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right)}{2\Gamma_m} \right| \right) \right) \quad (17)$$

Al encontrar las similitudes entre los polinomios de Chebyshev y la fórmula del coeficiente de reflexión como una serie de Fourier del mismo orden que el polinomio, se puede observar los coeficientes de reflexión y las impedancias de las líneas de transmisión del transformador en función del coeficiente de reflexión máximo en la banda de paso y el número de secciones. Una vez tenemos los coeficientes de reflexión las impedancias se calculan de forma recursiva empezando por $n = 0$ con la aproximación del coeficiente de reflexión para transformadores con pequeñas discontinuidades. (Ibañez, 2015).

$$Z_{n+1} = Z_n e^{2\Gamma_n} \quad (18)$$

Diseño del cazador de tipo Chebyshev

Para el diseño se consideró un coeficiente de reflexión $\Gamma_m = -30dB$, para un número de secciones de $N = 4$. Las impedancias para transformar son $Z_L = 188\Omega$ y $Z_0 = 50\Omega$, de la antena y el generador respectivamente.

Donde:

$$|A| = |\Gamma_m|$$

$$|A| = 0,0316227$$

Entonces reemplazando estos valores en (17):

$$\sec \theta_m \cong \cosh \left(\frac{1}{4} \cos^{-1} \left(\left| \frac{\ln \left(\frac{188}{50} \right)}{2(0,0316227)} \right| \right) \right) \quad (19)$$

$$\sec \theta_m \cong 1,46836$$

Para encontrar la longitud eléctrica se despeja θ_m . Entonces

$$\frac{1}{\cos \theta_m} \cong 1.46836$$

$$\cos \theta_m \cong \frac{1}{1.46836} \quad (20)$$

$$\cos \theta_m \cong 0.68103$$

$$\theta_m \cong 47.07570$$

Calculo del coeficiente de reflexión

$$\Gamma_0 = \frac{A}{2} \sec \theta_m^4 = 0.07350 \quad (21)$$

$$\Gamma_1 = \frac{A}{2} (4 \sec \theta_m^4 - 4 \sec \theta_m^2) = 0.15765 \quad (22)$$

$$\Gamma_2 = A(3 \sec \theta_m^4 - 4 \sec \theta_m^2 + 1) = 0.19991 \quad (23)$$

$$\text{Por simetria} \begin{cases} \Gamma_3 = \Gamma_1 \\ \Gamma_4 = \Gamma_0 \end{cases} \quad (24)$$

Cálculo de Impedancias

$$\text{Si } Z_0 = 50 \Omega$$

$$Z_{n+1} = Z_n e^{2\Gamma_n}$$

$$Z_0 = 50 \Omega$$

$$Z_1 = 50 * e^{2(0.07350)} = 57.91770 \Omega \quad (25)$$

$$Z_2 = 57.91770 * e^{2(0.15765)} = 79.38608 \Omega \quad (26)$$

$$Z_3 = 79.38608 * e^{2(0.19991)} = 118.40880 \Omega \quad (27)$$

$$Z_4 = 118.40880 * e^{2(0.15765)} = 162.29944 \Omega \quad (28)$$

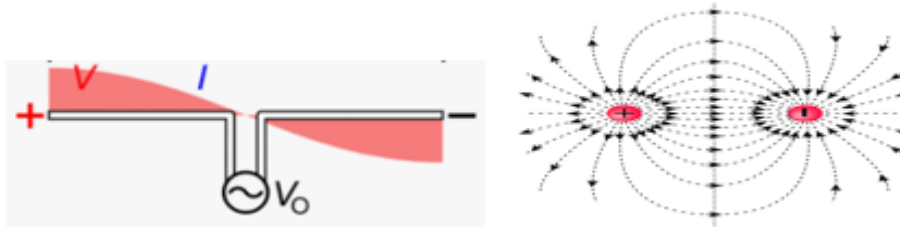
$$Z_5 = 162.29944 * e^{2(0.07350)} = \mathbf{188.00019 \Omega} \quad (29)$$

Consideraciones de la línea de transmisión para el cazador

Tomando en cuenta el funcionamiento electromagnético de un dipolo, se necesita diseñar una línea de transmisión para realizar el cazador de impedancias, que conecte el generador o fuente de manera correcta a la antena, ya que se necesita una alimentación en cada uno de los terminales del dipolos, positiva y negativa como se puede apreciar en la Figura 24, además muestra la radiación electromagnética básica de un dipolo.

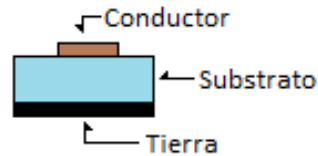
Figura 24.

Polarización de una antena dipolo

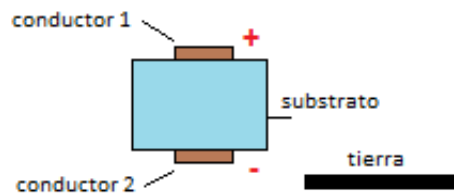


Nota: En la imagen se muestra la polarización de una Antena Dipolo, así como el campo eléctrico formado por cada polo.

Se tomó la decisión de utilizar una línea de transmisión del tipo Microstrip (micro cinta) para el diseño del cazador, debido a su efectividad y considerando el diseño principal de la antena en la cual está basado este proyecto, pero se toma en cuenta que la línea de transmisión Microstrip básica que se muestra en la Figura 25, puede funcionar solo como una fuente de una sola polaridad, debido a que tiene un conductor, un substrato y tierra.

Figura 25.*Línea de transmisión microstrip**Nota:* Esquema de línea básica de transmisión Microstrip.

Con el fin de resolver el problema de las dos polaridades que necesita el dipolo, se utiliza una versión modificada de la línea de transmisión Microstrip, donde dos líneas básicas de transmisión fusionan, una de manera normal y otra de forma invertida, como se muestra en la Figura 26, donde ambos conductores funcionan como fuentes de distinta polaridad, y la tierra será exterior al contorno de la línea de transmisión.

Figura 26.*Línea de transmisión modificada*

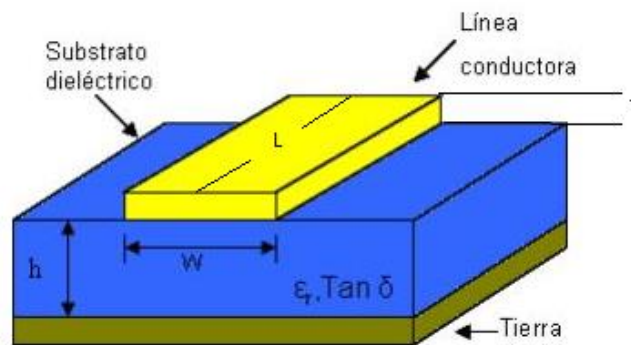
Nota: Versión modificada de la línea de transmisión para realizar el cazador de impedancias para dos polaridades.

Parámetros geométricos del cazador tipo Chebyshev

Con los cálculos obtenidos de impedancia y longitud eléctrica, a partir de datos conocidos como el coeficiente de reflexión considerado y la frecuencia en la que va a trabajar la antena, se procede a utilizar el software llamado TXLINE, donde se introducen parámetros conocidos y entrega los parámetros geométricos que se presentan en la Figura 27.

Figura 27.

Parámetros geométricos de la línea microstrip



Nota: Parámetros geométricos de la línea de transmisión Microstrip

Donde:

W : es el ancho del conductor de la línea de transmisión.

L : es la longitud del conductor de la línea de transmisión.

h : es la altura del sustrato.

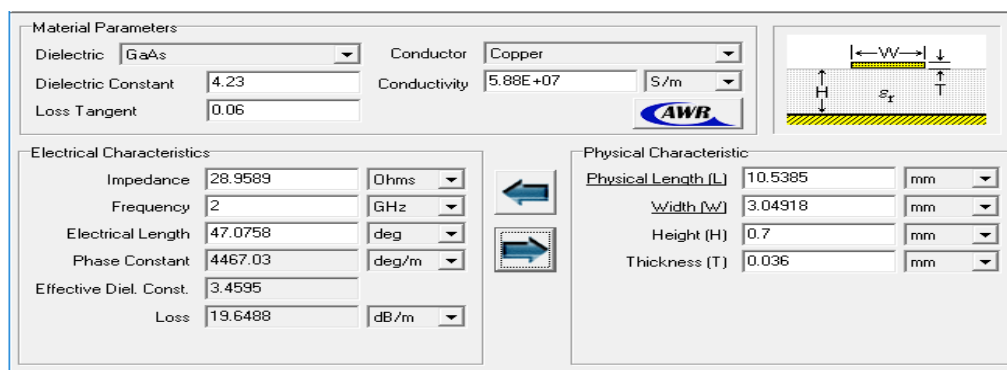
T : es la altura del conductor de la línea de transmisión.

También se introducen datos conocidos y necesarios para el cálculo de los parámetros geométricos, como ϵ_r , que es la constante dieléctrica y $\tan\delta$ que se refiere a la tangente de pérdidas, las mismas que dependen del material del dieléctrico, además de la longitud eléctrica θ_m . De la misma manera se especifica el tipo de material del conductor en el que se trabajará, que en este caso es cobre, para conocer su conductividad y el tipo de material para el substrato FR4.

Para ingresar los datos en el software TXLINE, se toma en cuenta que los parámetros que entrega este software son para una línea de transmisión básica como la de la Figura 25, y en este caso como se utilizan dos líneas de transmisión unidas y los cálculos realizados para el cazador de impedancias no contemplan las modificación en la línea microstrip, los datos de impedancia se dividen a la mitad. En las Figuras de la 28 a la 31 se muestran las imágenes de los resultados obtenidos en TXLINE.

Figura 28.

Impedancia 1



The screenshot displays the TXLINE software interface with the following data:

Material Parameters		Conductor	
Dielectric	GaAs	Conductor	Copper
Dielectric Constant	4.23	Conductivity	5.88E+07 S/m
Loss Tangent	0.06		

Electrical Characteristics		Physical Characteristic	
Impedance	28.9589 Ohms	Physical Length (L)	10.5385 mm
Frequency	2 GHz	Width (W)	3.04918 mm
Electrical Length	47.0758 deg	Height (H)	0.7 mm
Phase Constant	4467.03 deg/m	Thickness (T)	0.036 mm
Effective Diel. Const.	3.4595		
Loss	19.6488 dB/m		

The interface also includes a diagram of a microstrip line on a substrate, showing parameters like width (W), height (H), thickness (T), and dielectric constant (ϵ_r).

Nota: Valores resultantes con una media impedancia $Z_1 = 28,9589\Omega$

Figura 29.

Impedancia 2

Material Parameters		Conductor		
Dielectric	GaAs	Conductor	Copper	
Dielectric Constant	4.23	Conductivity	5.88E+07 S/m	
Loss Tangent	0.06			
Electrical Characteristics		Physical Characteristic		
Impedance	39.698 Ohms	Physical Length (L)	10.7798 mm	
Frequency	2 GHz	Width (W)	1.9388 mm	
Electrical Length	47.0758 deg	Height (H)	0.7 mm	
Phase Constant	4367.05 deg/m	Thickness (T)	0.036 mm	
Effective Diel. Const.	3.30638			
Loss	18.9111 dB/m			

Nota: Valores resultantes con una media impedancia $Z_2 = 39,698\Omega$

Figura 30.

Impedancia 3

Material Parameters		Conductor		
Dielectric	GaAs	Conductor	Copper	
Dielectric Constant	4.23	Conductivity	5.88E+07 S/m	
Loss Tangent	0.06			
Electrical Characteristics		Physical Characteristic		
Impedance	59.2044 Ohms	Physical Length (L)	11.1296 mm	
Frequency	2 GHz	Width (W)	0.98952 mm	
Electrical Length	47.0758 deg	Height (H)	0.7 mm	
Phase Constant	4229.76 deg/m	Thickness (T)	0.036 mm	
Effective Diel. Const.	3.10177			
Loss	17.9318 dB/m			

Nota: Valores resultantes con una media impedancia $Z_3 = 59,2044\Omega$

Figura 31.*Impedancia 4*

The screenshot shows the TXLINE software interface with the following parameters:

- Material Parameters:** Dielectric: GaAs, Conductor: Copper, Dielectric Constant: 4.23, Conductivity: 5.88E+07 S/m, Loss Tangent: 0.06.
- Electrical Characteristics:** Impedance: 81.1497 Ohms, Frequency: 2 GHz, Electrical Length: 47.0758 deg, Phase Constant: 4116.86 deg/m, Effective Diel. Const.: 2.93838, Loss: 17.2052 dB/m.
- Physical Characteristic:** Physical Length (L): 11.4349 mm, Width (W): 0.504472 mm, Height (H): 0.7 mm, Thickness (T): 0.036 mm.

A diagram on the right shows a cross-section of a microstrip line with width W, height H, and thickness T, with a dielectric constant ϵ_r .

Nota: Valores resultantes con una media impedancia $Z_5 = 81,1497\Omega$

Conociendo los valores de la constante dieléctrica $\epsilon_r = 4.23$, la tangente de pérdidas $\tan \varphi = 0.06$ y la longitud eléctrica calculada es $\theta_m = 47,07570$. Los valores obtenidos en las simulaciones de las Figuras 28-31 se muestran en resumen en la tabla 7.

Tabla 7.*Dimensiones geométricas para cazador de impedancias*

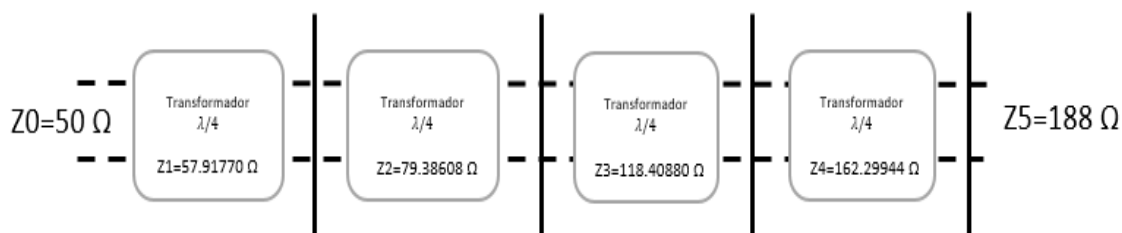
	$Z/2$	h [mm]	\varnothing [mm]	L [mm]	W [mm]	$\varnothing_{r,eff}$
Z1	28,95558	0,7	0,036	10,5385	3,04919	3,4596
Z2	39,69804	0,7	0,036	10,7798	1,9388	3,3064
Z3	59,2044	0,7	0,036	11,1296	0,98952	3,1018
Z4	81,1497	0,7	0,036	11,4349	0,50447	2,9384

Nota: Se muestran los valores geométricos generados por el Software TXLINE

En la Figura 32 se presenta el diagrama de bloques del acoplador de tipo Chebyshev, con sus respectivos valores para impedancias y parámetros geométricos calculados. Es la Figura 33 y 34 se muestra el diseño en CAD del acoplador en el plano XY, donde se indica las impedancias calculadas.

Figura 32.

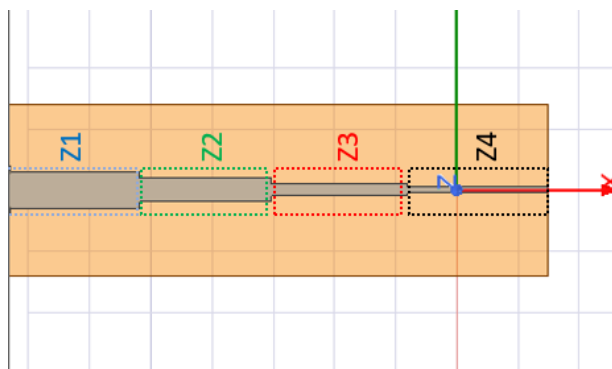
Esquema del transformador de impedancias



Nota: Diagrama de bloques representativo del transformador diseñado de orden $N=4$

Figura 33.

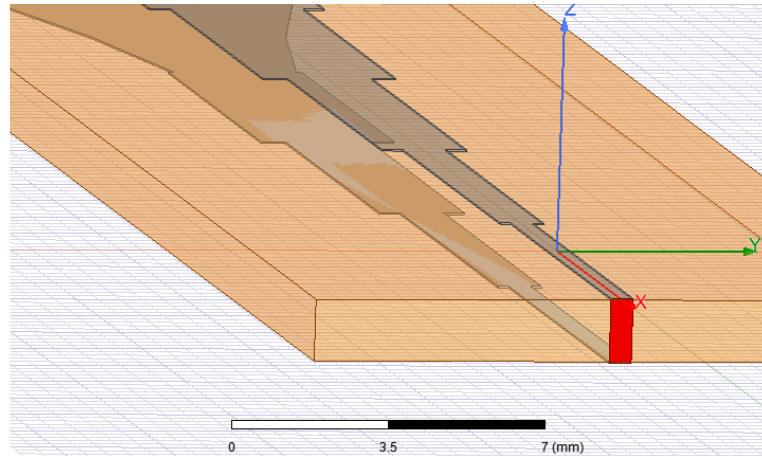
Modelo 2d del casador de impedancias



Nota: Esquema 3D del casador de impedancias de orden 4 realizado en el software ANSYS HFSS.

Figura 34.

Modelo 3d del casador de impedancias



Nota: Esquema del casador realizado en el software Ansys HFSS. Vista en el plano XY superior

Diseño de Balun y Conector Coaxial.

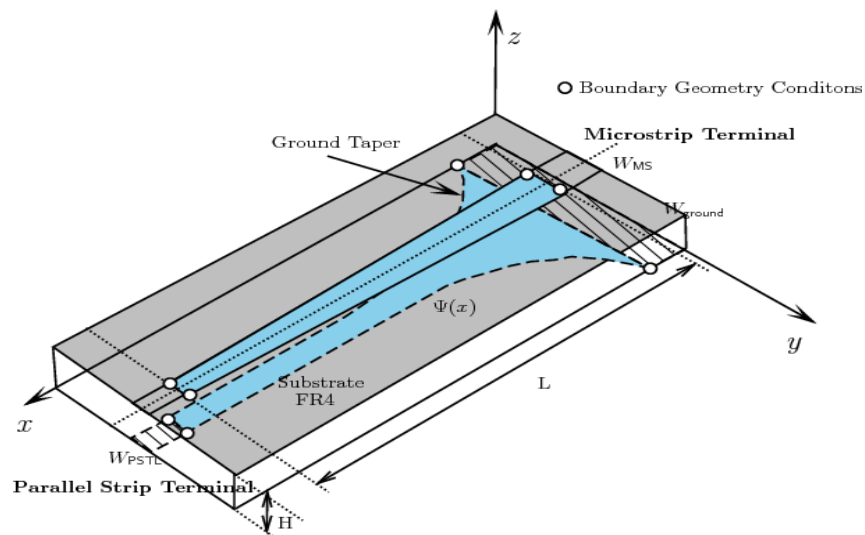
Diseño de Balun

La función de un balun es el acople entre alimentaciones desbalanceadas como un conector coaxial y alimentaciones balanceadas como, para este proyecto, es una antena dipolo. El inconveniente en el diseño de un balun es que no existe una técnica predeterminada para su implementación. Para este proyecto, el diseño del balun se lo hace mediante la modelación y optimización en el software ANSYS HFSS.

Se decide implementar un balun de tipo tapered, donde en su concepto se contempla una alimentación microstrip cuyo plano de tierra disminuye de manera gradual su ancho hasta llegar a obtener una línea bifilar como se muestra en la Figura 35. Para la implementación del balun se establece el uso de una curva exponencial con el fin de lograr el plano de tierra que se encuentra en la parte inferior, como se muestra en la figura 36 donde ya se puede apreciar el diseño en el software ANSYS HFSS del balun con el acoplador ya incorporado

Figura 35.

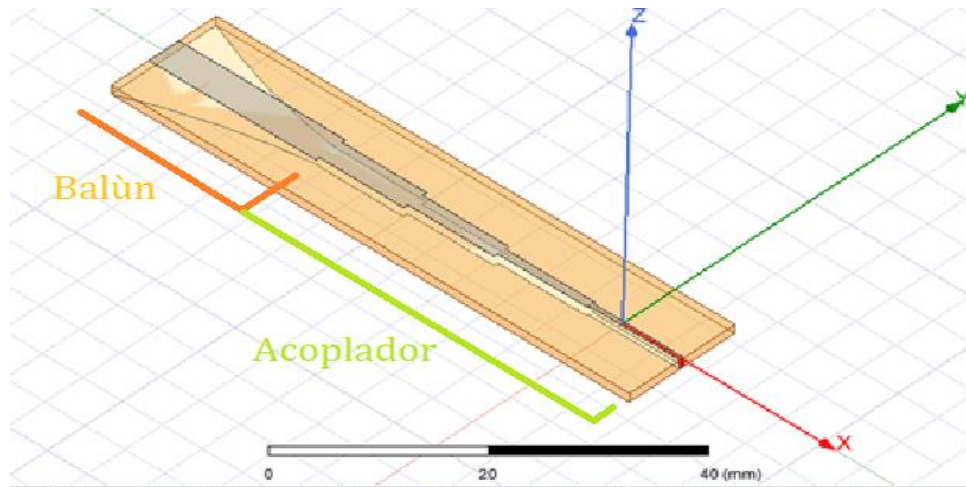
Balun tipo tapped



Nota: En esta imagen se observa un ejemplo de Balun Tapered. Recuperado de “Comportamiento multifrecuencia en una antena microstrip mediante múltiples elementos parásitos”. Jaume Anguera.

Figura 36.

Diseño completo del casador y el balun



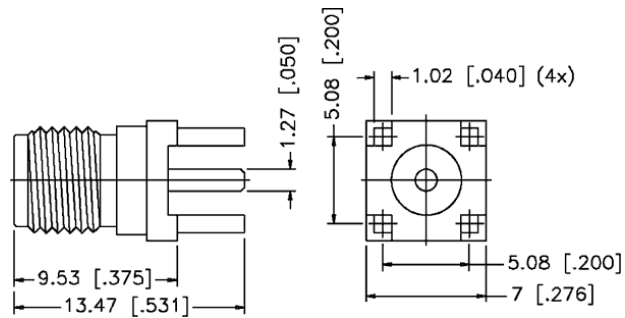
Nota: Diseño incorporado de cazador y balun Software ANSYS HFSS

Conector Coaxial

Para la conexión entre el balun y el generador de señal se utiliza un conector SMA, este conector coaxial para RF es un conector en miniatura para la transmisión de señales por cable coaxial con un mecanismo roscado. (MuchoTrast MT, s.f.). Este conector es de 50 Ohm y es excelente para la transmisión de señales de hasta 18 Ghz. En la Figura 37 y 38 se muestra el conector con sus respectivas medidas.

Figura 37.*Conector sma*

Nota: Conector SMA. Tomado de web google imágenes.

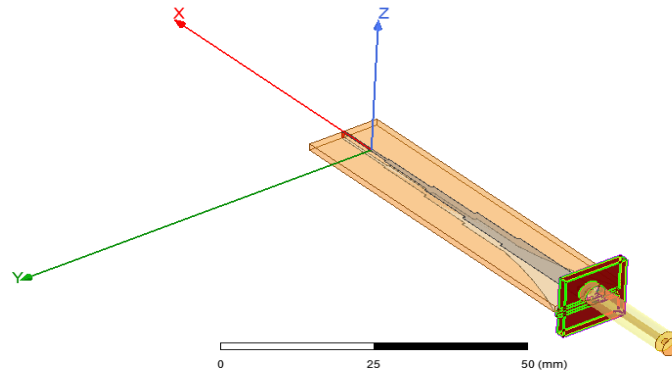
Figura 38.*Dimensiones geométricas del conector sma*

Nota: Medidas geométricas del Conector SMA. Tomado de web google imágenes.

Basado en las medidas del conector mostrado en la Figura 38, se realiza el diseño en CAD del conector para su simulación y observación de su comportamiento. En la Figura 39 se observa ya la unión de todo el circuito de alimentación (acoplador, balun y conector).

Figura 39.

Modelado del casador, balun y conector sma



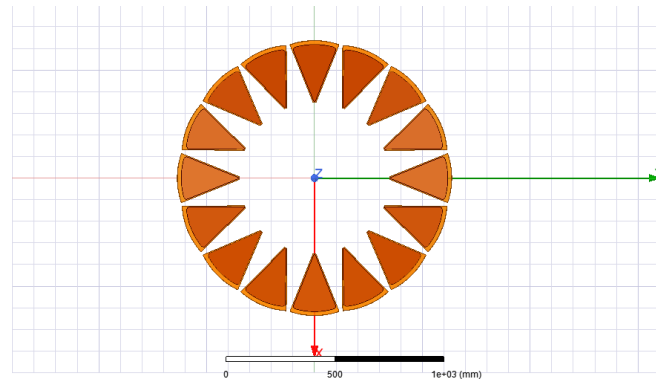
Nota: Diseño en CAD del circuito de alimentación completo. Software ANSYS HFSS.

Diseño de modelo del arreglo

Teniendo en cuenta el estudio realizado para el elemento radiante base de este proyecto, con las especificaciones geométricas optimizadas se realizó el diseño base aproximado del arreglo total con todos los elementos irradiadores que conformarían la agrupación con el propósito de tener una idea igualmente geométrica de como estaría compuesto este arreglo. En las Figuras 40 y 41 se observa este diseño en 2D y 3D respectivamente.

Figura 40.

Modelo de red circular de antenas en 2d.

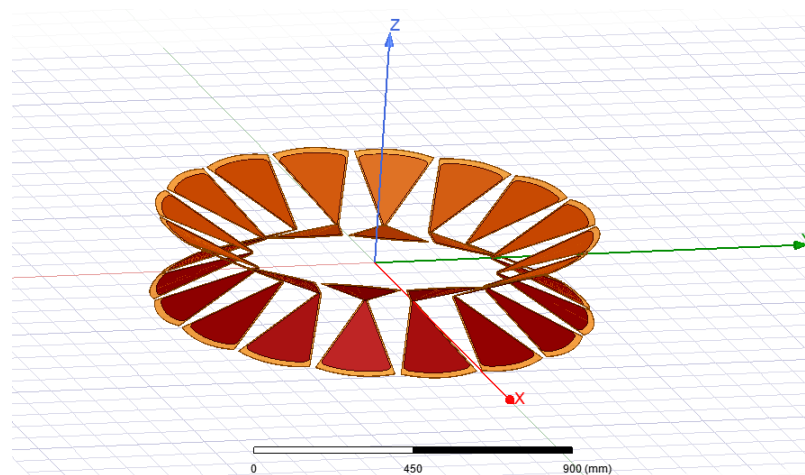


Nota: Diseño en CAD del arreglo circular de antenas con 16 elementos. Vista en el plano XY.

Software ANSYS HFSS.

Figura 41.

Modelo de red circular de antenas en 3d.



Nota: Diseño en CAD del arreglo circular de antenas con 16 elementos. Vista en el espacio 3D.

Software ANSYS HFSS.

CAPITULO 4

OPTIMIZACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos después del proceso de optimización de la geometría inicial del elemento irradiador. Tomando en cuenta la teoría estudiada en el capítulo anterior y con base a la geometría inicial del diseño de la antena fueron realizadas varias simulaciones con el objetivo de mejorar el desempeño de la antena. Este proceso se llevó a cabo en el software ANSYS HSFF, donde permite observar los cambios de los parámetros intrínsecos del elemento cuando su geometría es alterada.

Optimización de la geometría inicial

Después de calcular las dimensiones de la geometría inicial se procedió con el proceso iterativo para optimizar el desempeño del irradiador. En la Tablas 8 y 9 se presentan el ancho del haz, la relación frente espaldas (F/E) y el Nivel del Lóbulo Principal Secundario (NLPS), como función de los ángulos de apertura en los planos XY y YZ. En este caso se toma en cuenta que la distancia entre cada polo es de 1,4mm para ingreso de la alimentación, por especificaciones originales del diseño, y que la espesura del dieléctrico sobre el cual se imprimen los brazos del dipolo también es de 1,4 mm.

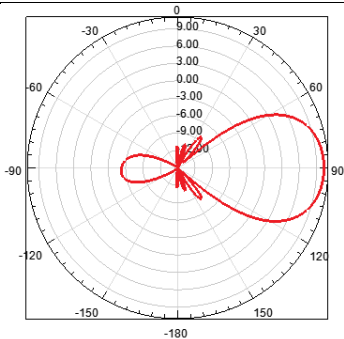
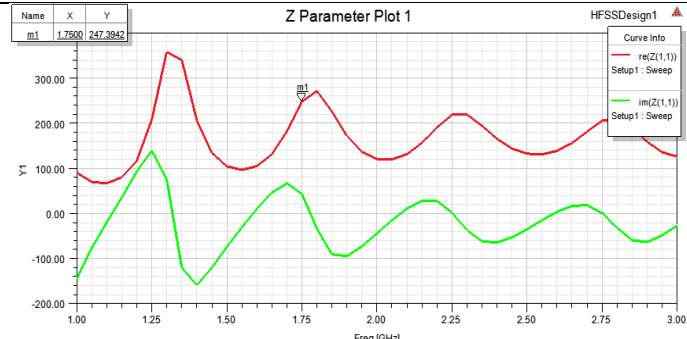
La apertura de Dipolo (Angulo en el plano YZ) y la apertura del elemento radiante (Angulo en el plano XY) en el software de simulación Ansys HFSS y contribuyo para establecer los ángulos de inicio donde las características de radiación sean las más óptimas. Adicionalmente en las tablas mencionadas son mostrados los diagramas de irradiación de 3.5GHz y el comportamiento de la impedancia de entrada en función de la frecuencia.

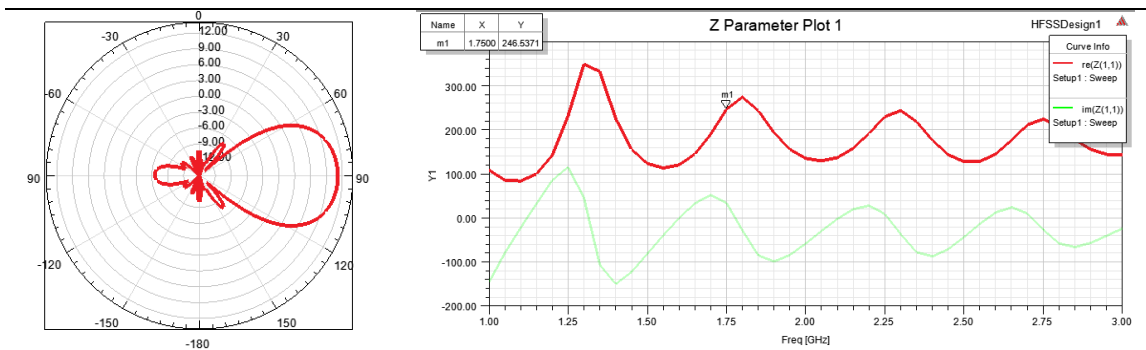
Se puede observar en las mencionadas Tablas que los parámetros de radiación se comportan de mejor manera mientras el Angulo en el plano YZ aumenta hasta llegar al ángulo 50° y donde su ancho de haz es de 40 grados, pero casi no posee lóbulos secundarios y su relación frente – espalda es 28 dB, lo que permite que este ángulo se tome como punto de parida optimo en este plano para el proyecto, a partir de los 50° irradia de manera no apta para este proyecto.

De la misma manera, en la Tabla 9, en el corte del plano XY, con un ángulo de 45° constante en el YZ, se observa que su radiación promedio esta sobre los -31dB, en todos los ángulos que se simularon, lo que indica un comportamiento idóneo de radiación. Las impedancias en todos los casos mantienen un rango promedio de 150 a 180 ohmios.

Tabla 8.

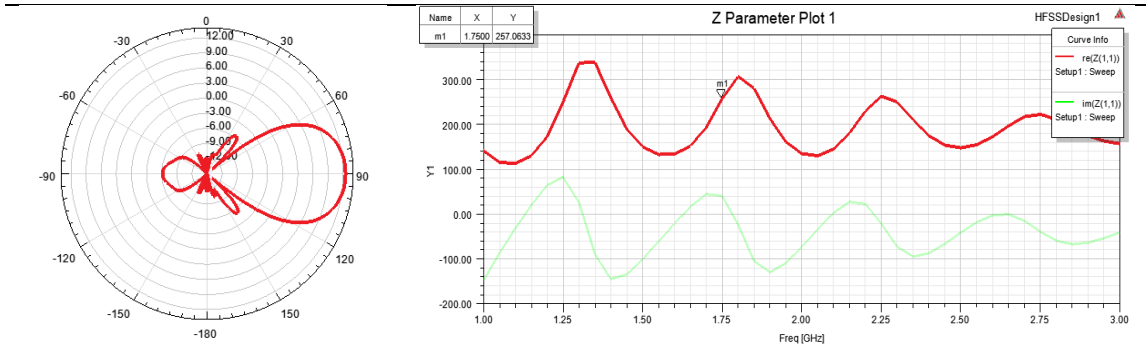
Pruebas de parámetros de radiación con ángulo xy constante

Angulo XY Constante = 15°			
Angulo ZY	Ancho de Haz	Relación F/E (dB)	NLPS (dB)
25°	40	36	26
Patrón de Radiación		Gráfico de Impedancias	
			
Angulo ZY	Ancho de Haz	Relación F/E (dB)	NLPS (dB)
30	50	33	19
Patrón de Radiación		Gráfico de Impedancias	



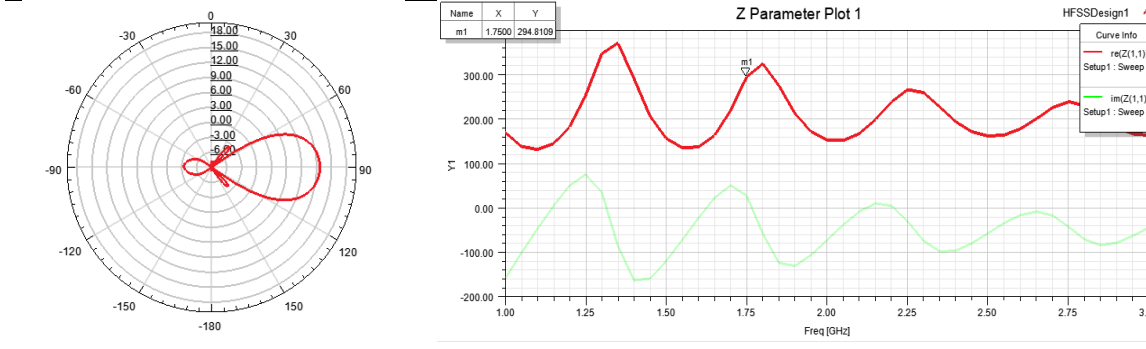
Angulo ZY	Ancho de Haz	Relación F/E (dB)	NLPS (dB)
40	40	36	17

Patrón de Radiación Gráfico de Impedancias



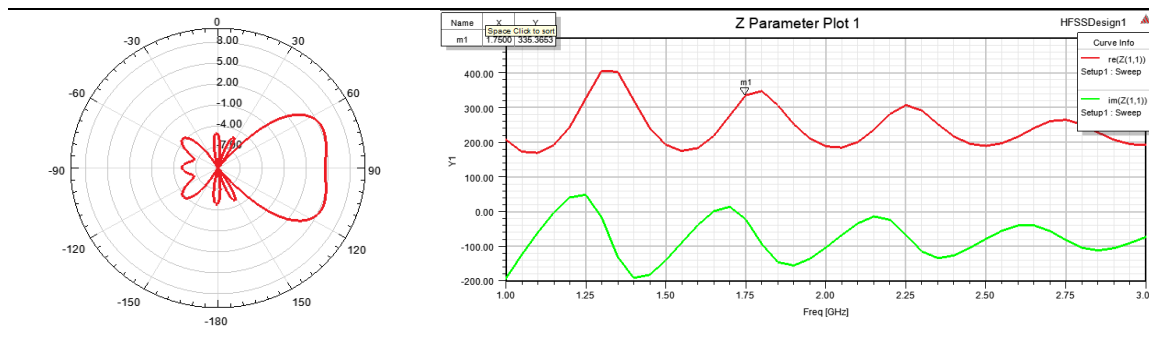
Angulo ZY	Ancho de Haz	Relación F/E (dB)	NLPS (dB)
50	40	27	16

Patrón de Radiación Gráfico de Impedancias



Angulo ZY	Ancho de Haz	Relación F/E (dB)	NLPS (dB)
100	80	28	10

Patrón de Radiación Gráfico de Impedancias

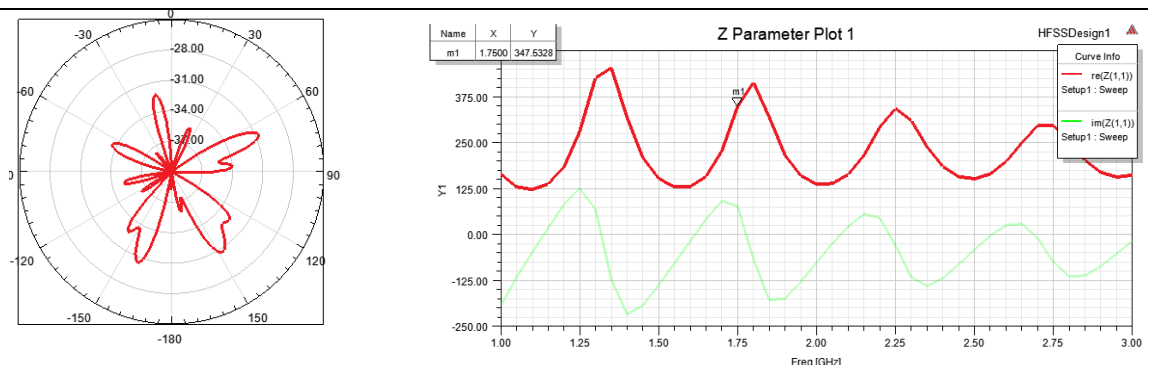


Un requerimiento teórico en el diseño de elementos radiantes indica que un coeficiente de reflexión inferior a -10dB , es lo adecuado para el proceso, debido a que esto implica que aproximadamente el 10% de toda la energía inyectada a la antena puede reflejarse sin causar daños al generador y este criterio debe aplicarse en todo el ancho de banda en el que trabaja el elemento. La geometría final de la antena se puede observar en la figura 42 y los valores optimizados finales se muestran en la tabla 10.

Tabla 9.

Pruebas de parámetros de radiación con ángulo yz constante

Angulo ZY Constante = 45°		
Angulo XY	Relación F/E (dB)	NLPS (dB)
25°	36	26
Patrón de Radiación	Gráfico de Impedancias	



Angulo XY	Relación F/E (dB)	NLPS (dB)
50°	33	19

Patrón de Radiación **Gráfico de Impedancias**

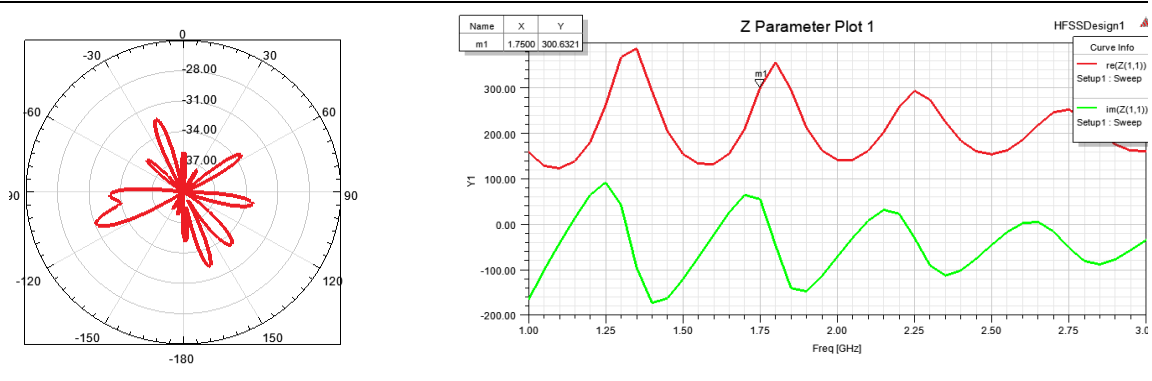
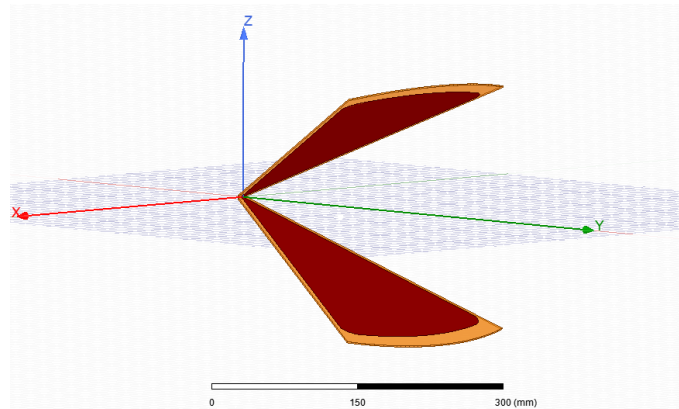


Figura 42.

Geometría final del elemento radiante.



Nota: Geometría Final de la antena. Software ANSYS HFSS.

En la tabla 10 se observan los valores ya definidos de la geometría final del elemento radiante, y con los cuales se pudo apreciar resultados mostrados en las siguientes figuras. En la Figura 43 se muestra el diagrama de directividad en 3D, con una frecuencia de 3.5GHz, se puede observar que es muy directivo con un valor de 22.5 dB. En la figura 44 se puede observar una gráfica del parámetro $S(1,1)$ en función de la frecuencia que representa el coeficiente de reflexión de la antena con un valor por debajo de -10dB a partir de los 600MHz lo que indica que la antena no podría trabajar en el rango de frecuencias de 300MHz a 600MHz por la cantidad de energía que rebotaría hacia el generador.

Tabla 10.

Valores geométricos optimizados

Nombre	Valor	Unidad
Substrato		
Radio del Substrato	320	mm
Altura del Substrato	1.4	mm
Dipolo		
Radio del dipolo	300	mm
Ángulos de apertura		
Angulo en el plano YZ	50	Grados
Angulo en el plano XY	40	Grados

Figura 43.

Diagrama de radiación 3d

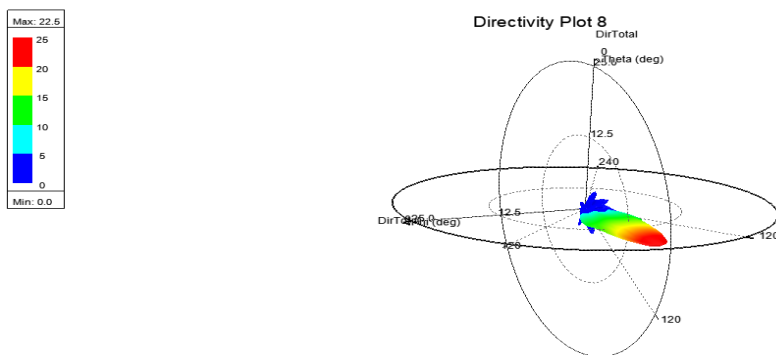
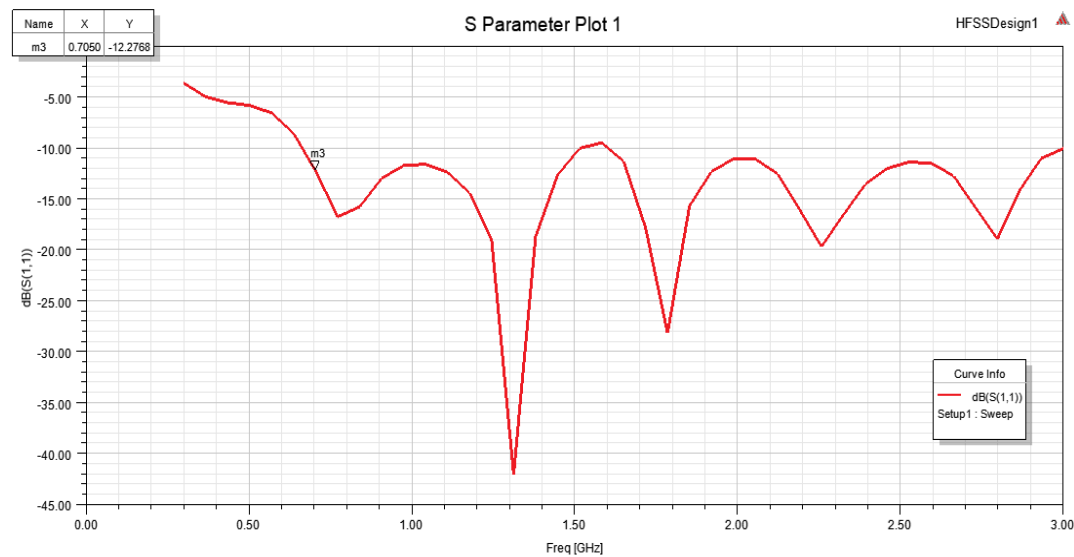


Diagrama de radiación 3D de un elemento radiante con una frecuencia de 3.5GHz. Software

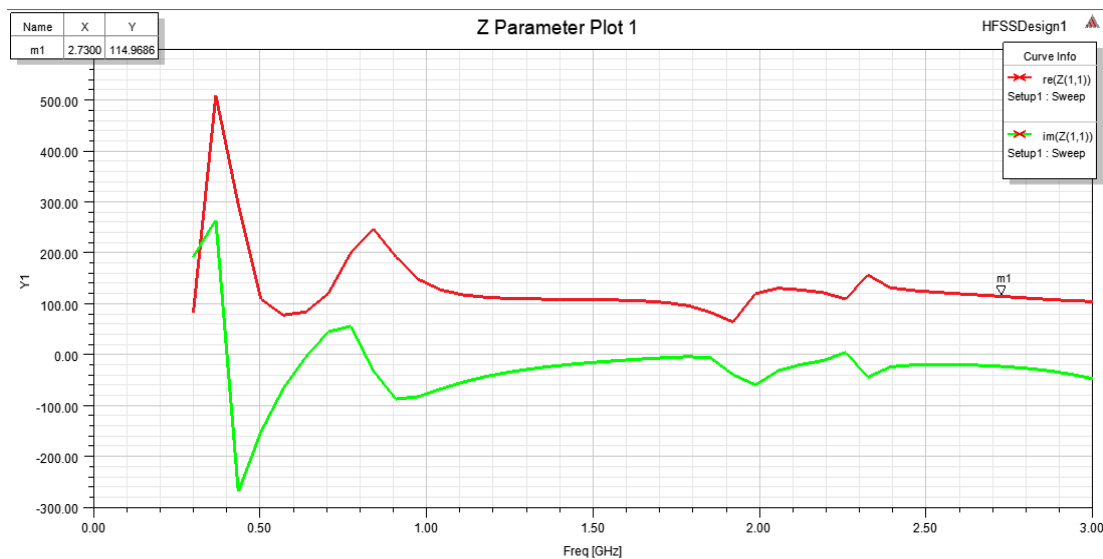
Ansys HFSS.

Figura 44.*Curva de coeficiente de reflexión**Simulación de la curva del coeficiente de reflexión. Software Ansys HFSS*

En la Figura 45 se observa la curva Z que caracteriza a la impedancia de la antena donde podemos apreciar que el valor de la impedancia real en todo el ancho de banda se mantiene en un promedio de aproximadamente 170Ω con una variación en las frecuencias bajas muy significativo, de $+400 \Omega$ en el rango de 300 MHz a 600 MHz, después se estabiliza con una variación de $+80 \Omega$, estos resultados muestran una vez más que la geometría de la antena no permite trabajar con frecuencias por debajo de los 600 MHz. En la parte imaginaria la relación es muy similar llegándose a estabilizar en un promedio de 0Ω con la misma desviación en los rangos de frecuencia antes mencionados.

Figura 45.

Gráfica de impedancia



Simulación de la curva del parámetro Z o impedancia de la parte real e imaginaria. Software

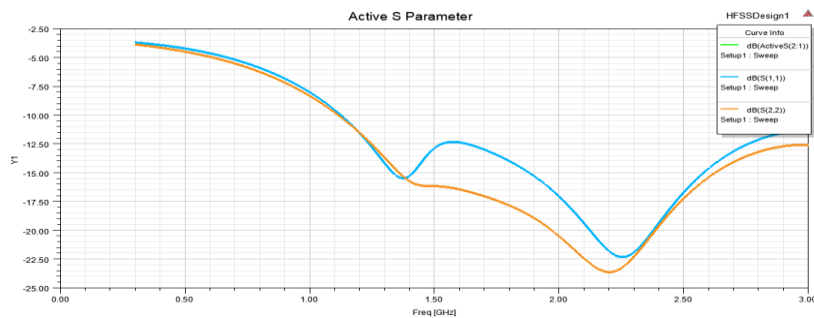
Ansys HFSS

Parámetros de desempeño del Cazador de Impedancias

Considerando el diseño del casador Chebyshev diseñado de orden 4, es decir consta de 4 secciones. En la figura 46 se observa la simulación del casador donde el coeficiente de reflexión es mucho más alto en frecuencias bajas y su valor más bajo lo tiene específicamente en la frecuencia de 2.25GHz.

Figura 46.

Coefficiente de reflexión del casador de impedancias

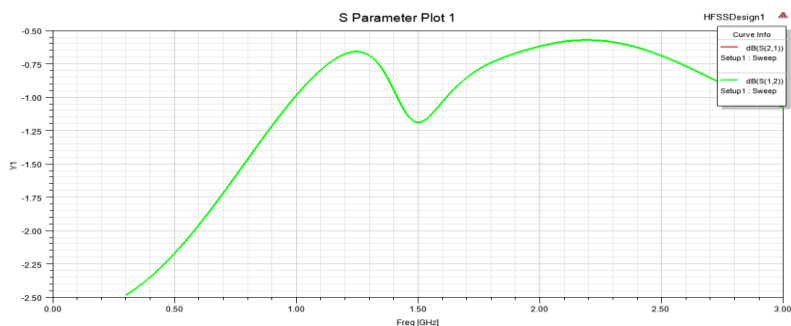


Simulación de la curva del parámetro S del casador de impedancias. Software Ansys HFSS

A continuación se muestra la figura 47, donde se observa el coeficiente de transmisión que es el encargado de medir la potencia de la señal recibida en el puerto con respecto a la señal que incide, y se aprecia en las frecuencias bajas a partir de los 300 MHz a 600 MHz la recepción de señal es muy baja y su crecimiento comienza para frecuencias altas a partir de 1 GHz.

Figura 47.

Coefficiente de transmisión

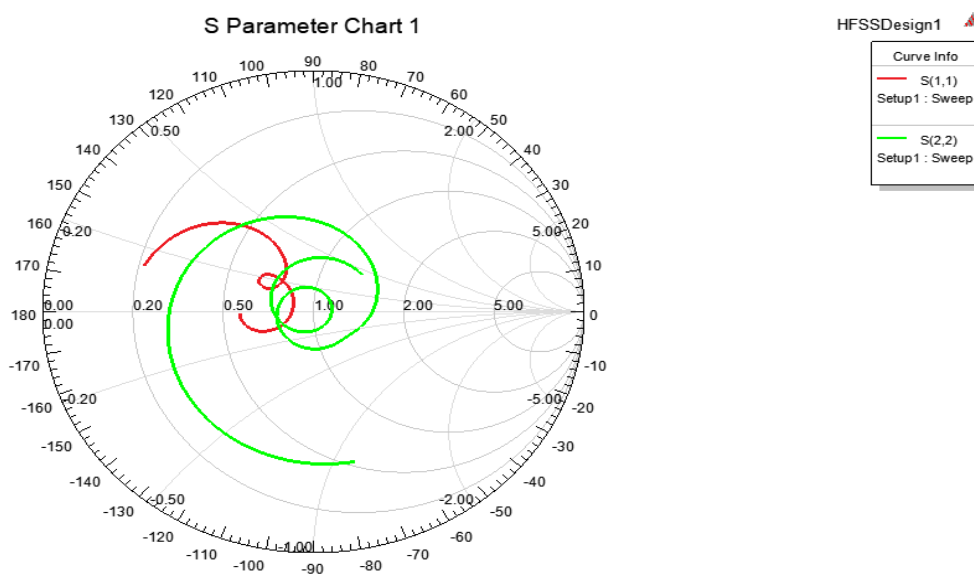


Simulación de la curva del coeficiente de transmisión del casador de impedancias. Software Ansys HFSS

A continuación se muestra la en la Figura 48 donde se puede apreciar la adaptación del circuito de alimentación de 50Ω , dónde el puerto tiende a acercarse a un valor de $VSWR = 1$ que es una buena característica de adaptación.

Figura 48.

Carta de smith



Simulación de la carta de Smith que representa la adaptación entre puerto en el casador de impedancias. Software Ansys HFSS

Costo computacional necesario para las simulaciones.

Como se pudo observar a lo largo de este documento, este proyecto tiene como eje principal la simulación en el software ANSYS HFSS, el cual es un software que permite de manera simulada observar el comportamiento gráfico de los campos electromagnéticos de elementos radiantes, y así también ver los parámetros de radiación de los mismos.

Los requisitos de hardware recomendados por los fabricantes de este programa son los siguientes: Un procesador con al menos 4 núcleos (cada producto de la línea de productos Ansys actual utiliza 4 núcleos sin cargo adicional. Se pueden utilizar núcleos adicionales con licencias HPC), un sistema operativo Windows de 64 bits, una tarjeta gráfica de 4 GB (o superior), 16-128 GB de RAM según el tamaño del problema, dos discos duros PCIe de 1 TB en una configuración RAID 0. Esta es la configuración de rendimiento más rápida y debería proporcionar mucho espacio para los modelos de análisis, un controlador RAID de hardware y no un controlador RAID de software, ya que los controladores RAID de software perjudican el rendimiento.

Basado en los requisitos previos, para este proyecto se dispuso de una computadora con las siguientes características de hardware:

- Procesador de 4 núcleos.
- Sistema operativo Windows de x64bits
- Memoria RAM de 8GB
- Un disco duro de 500GB RAID 0.

Con las características previas de hardware disponibles, los resultados de simulación para solamente un elemento radiante se obtuvieron en un tiempo promedio de 1 hora con 10 min, realizándose un aproximado de 150 simulaciones para obtener los parámetros de radiación más óptimos posibles del elemento y por otro lado un tiempo aproximado de 40 min realizándose un promedio de 40 simulaciones para obtener los resultados óptimos en el cazador de impedancia.

Las exigencias de memoria RAM y procesamiento solicitadas por el software y las limitaciones del computador disponible para la realización del proyecto dificultaron obtener un ancho de banda óptimo y conseguir la simulación completa de la red circular. Se contó con el

apoyo del CICTE para el asesoramiento en este proyecto y se esperaba que se adquiriera un Workstation del software Ansys para poder simular y obtener resultados más óptimos y completos pero por problemas de presupuesto no llegó a tiempo.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La geometría de una antena o elemento irradiante juega un papel importantísimo cuando de encontrar los mejores parámetros de irradiación se refiere, debido a que estos parámetros son guiados por su geometría además del material con el que está construido el elemento.

Considerando que la forma geométrica del elemento irradiante de donde este proyecto se basa, los cambios realizados según las especificaciones establecidas en la geometría no lograron abarcar el ancho de banda solicitado, esto lleva a la conclusión que esta geométrica no llegó a ser optimizada con plenitud debido a falta de recursos computacionales. Por ese motivo, el mejor resultado obtenido fue para frecuencias superiores a 600 MHz. La antena diseñada llegó a tener una directividad considerable en la dirección de máxima irradiación.

A pesar de que se logró abarcar un ancho de banda considerable en las simulaciones del elemento, se pudo comprobar que al disminuir su geometría el ancho de banda también disminuye.

Los ángulos de apertura en cada plano, afectan directamente a los parámetros de radiación del elemento, y a pesar de que su ganancia en el lóbulo principal se mantiene con variaciones muy pequeñas, los lóbulos laterales no son muy favorables. En este punto también se considera que el principal problema fue la falta de optimización del elemento.

La antena diseñada, tiene un ancho de banda considerable, y una ganancia bastante fuerte lo que la hace idónea para poder ser utilizada en transmisión y recepción de señales.

Recomendaciones

En el momento de realizar la geometría inicial, se debe tomar en cuenta los datos con los que los polos de la antena base fueron construidos con el fin de tener una referencia sólida de inicio.

El software Ansys HFSS es un programa con requerimientos fuertes y utilizar un computador con las características de hardware más cercanas a los requerimientos, o mejor aún conseguir un Workstation para la utilización del servidor del software Ansys, contribuiría de mejor manera en el trabajo.

En el diseño del cazador se debe tomar en cuenta con cuantas secciones el acoplamiento sería el óptimo, esto debido a que no siempre suele salir un buen acoplamiento en la simulación pese a que los cálculos digan que sí.

Bibliografía

- Angel D. Pinto Mangones, J. M. (2016). Optimización de un arreglo circular de antenas con distribución continua de corriente de alimentación utilizando PSO (Particle Swarm Optimization). *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 20 (81), 202-203.
- Balanis, C. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*. Jhon Wiley & Sons.
- Canga, R. (Marzo de 2011). *Curso de Iniciación a las Telecomunicaciones - Agrupaciones de Antenas*. Obtenido de <http://serbal.pntic.mec.es/srug0007/archivos/radiocomunicaciones/2%20ANTENAS/6%20Agrupaci%F3n%20de%20Antenas..pdf.pdf>
- Cardama, A. (2002). *Antenas*. Valencia: upc.
- Gonzaga Rios, L., & Barbosa, P. (2002). *Engenharia de antenas*. Edgard Blucher.
- Ibañez, A. L. (2015). *Diseño de adaptadores de impedancias en tecnología coaxial para divisores radiales de potencia*. Madrid .
- Jaume Anguera, G. F. (s.f.). Comportamiento multifrecuencia en una antena microstrip mediante múltiples elementos parásitos. 1-2.
- Kraus, J. D., & Marhefka, R. (1988). *Antennas - For All Applications*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Martin, C. D. (30 de Junio de 2011). *SlideShare*. Obtenido de https://es.slideshare.net/Antenas_propagacion/presentacin-arreglo-de-antenas
- MuchoTrast MT*. (s.f.).
- Perez, A., & Aguera, J. (2008). *Teoría de Antenas*. Barcelona: Creative Commons Deed.
- Rod M. Alvarez D, A. J. (2013). *Desarrollo de un arreglo de antenas patch en la banda de 300-650MHz*. Caracas.

- Sanchez, C. M. (2013). *Herramienta de Optimización Paramétrica Distribuida con HFSS*. Madrid.
- Sarmiento , W. (s.f.). *Academia*. Obtenido de Arreglo de Antenas:
https://www.academia.edu/13089907/Arreglo_de_Antenas?auto=download
- Standard-IEEE. (2013). IEEE Standard for definition of terms for Antennas. *IEEE Std 145TM (Revision of IEEE Std 145 - 1993)*.
- Tirado, J. V. (2006). *DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ANTENA CON DIVERSIDAD EN POLARIZACIÓN PARA REDES WIFI A 2,4 GHz*. Bellaterra.
- TutorialsPoint. (2016). *Antenna Theory - End-fire Array*. Obtenido de
https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_end_fire_array.htm
- Wong, K.-L. (1999). *Design of Nonplanar Microstrip Antennas and Transmission Lines*.