



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Diseño y Caracterización de una Antena Yagi en la Banda UHF

**TRABAJO DE TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
Ingeniero en Redes**

PRESENTA

Br. Reyes Arturo Polanco Torres

**DIRECTOR DE TESIS
Dr. Homero Toral Cruz**

ASESORES

Ing. Pablo Velarde Alvarado

Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Ing. Francisco Méndez Martínez



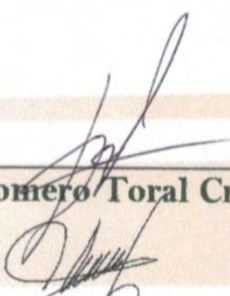


UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**TRABAJO DE TESIS ELABORADO BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ
DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN REDES**

Comité de Trabajo de Tesis

DIRECTOR:



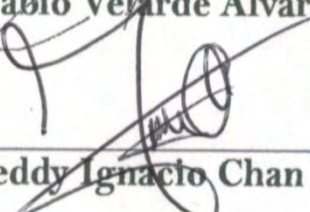
Dr. Homero Toral Cruz

ASESOR:




Ing. Pablo Velarde Alvarado

ASESOR:



Dr. Freddy Ignacio Chan Puc


**UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO**
SERVICIOS ESCOLARES
TITULACIONES



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2017

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de manera especial a mi madre Rita Margarita Torres Iuit y mi padre Arturo René Polanco Ramírez porque siempre estuvieron conmigo a lo largo de este trayecto brindándome su amor, su apoyo incondicional y muchos consejos para hacer de mí una mejor persona.

A mi hermana Lizbeth y mi sobrino Caleb por su compañía, paciencia y que de alguna u otra forma siempre han estado en mi vida para reír, llorar e incluso para apoyarme mucho.

A todos los miembros de mi familia que siempre me daban aliento a seguir adelante para no rendirme en el largo camino y por confiar en mí.

También todos mis amigos que me han apoyado siempre a lo largo de mi vida y de la carrera.

Finalmente a todos los profesores que fueron muy importantes en mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Estoy muy agradecido con mis padres Rita Margarita Torres Iuit y Arturo René Polanco Ramirez por todo lo que han hecho por mí. Gracias por confiar y creer en mí. Gracias a mi madre por siempre querer lo mejor para mí, gracias a mi padre por cada consejo y por cada una de sus palabras que me han ido guiando.

Gracias a mi hermana Lizbeth que siempre ha estado en todo momento para mí y por preocuparse por que me vaya bien. También gracias a toda mi familia que siempre me daban ánimos para seguir.

Gracias a mi novia Karen que desde que entré a la carrera siempre confió en mí plenamente y fue un gran apoyo a lo largo del trayecto.

A mis amigos: Kevin, David, Santos, Omar, Saul, Araceli, Adal, Carlos y Mauricio que me permitieron aprender más de la vida, regalándome risas y muchos buenos momentos.

Gracias a mis profesores y en especial al Dr. Homero Toral y al Dr. Pablo Velarde por permitirme realizar este proyecto con su asesoramiento.

Gracias al Consejo Quintanarroense de Ciencia y Tecnología por haber proporcionado una beca durante 4 meses como asistente de investigador.

ÍNDICE

CONTENIDO

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	13
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	13
1.3 JUSTIFICACIÓN	14
1.4 OBJETIVO GENERAL	14
1.5 OBJETIVOS PARTICULARES	14
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	16
2.1 INTRODUCCIÓN	16
2.2 TRAYECTORIAS DE PROPAGACIÓN	18
2.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	18
2.3.1 APLICACIÓN DE LAS BANDAS	20
2.4 ANTENAS	22
2.4.1 CLASIFICACIÓN Y TIPO DE ANTENAS	22
2.5 PARÁMETROS DE UNA ANTENA	27
2.5.1 DIAGRAMA DE RADIACIÓN	27
2.5.2 ANCHO DEL HAZ	31
2.5.3 CAMPOS DE LAS REGIONES	33
2.5.4 RESISTENCIA Y EFICIENCIA DE RADIACIÓN	35
2.5.5 DENSIDAD DE POTENCIA RADIADA	36
2.5.6 GANANCIA DIRECTIVA Y GANANCIA DE POTENCIA	39
2.5.8 POLARIZACIÓN	43
2.5.9 IMPEDANCIA	48
2.5.10 ADAPTACIÓN	49
2.5.11 LONGITUD EFECTIVA	50
2.5.12 AREA EFECTIVA	51
CAPITULO III ANTENA YAGI-UDA	53
3.1 GANANCIA	56
3.2 IMPEDANCIA DE ALIMENTACIÓN	57
3.3 OPERACIÓN	58
3.4 VENTAJAS	61
3.5 RESUMEN	62

CAPITULO IV DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA YAGI	65
4.1 DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS Y CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE LA ANTENA.....	65
4.2 SIMULACIÓN DE LA ANTENA.....	67
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA MEDIANTE EL ANALIZADOR DE ESPECTROS.....	85
4.4 CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA MEDIANTE EL ANALIZADOR DE ANTENAS.....	101
4.5 PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA.....	121
CONCLUSIONES	133
BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXOS	137

LISTA DE IMÁGENES

Figura 2.1 Antena monopolo vertical.....	23
Figura 2.2 Antena dipolo.....	23
Figura 2.3 Antena yagi.....	24
Figura 2.4 Antena de espira	24
Figura 2.5 Antena de bocina	25
Figura 2.6 Antena de ranura.....	25
Figura 2.7 Antena parabólica	26
Figura 2.8 Antena de array.....	26
Figura 2.9 Sistemas de coordenadas esféricas	27
Figura 2.10 Diagrama tridimensional	28
Figura 2.11 Diagrama en coordenadas polares.	29
Figura 2.12 Diagrama en coordenadas cartesianas.	29
Figura 2.13 Parámetros del diagrama de radiación	30
Figura 2.14 Diagrama de radiación de potencia en dB	31
Figura 2.15 Representación tridimensional de un diagrama de radiación	32
Figura 2.16 Cambios típicos de la forma del patrón de amplitud de la antena desde el campo cercano reactivo hacia el campo lejano.....	34
Figura 2.17 Polarización de antena: (a) Lineal; (b) Elíptica; (c) Circular.....	43
Figura 3.1 Antena Yagi-Uda	54
Figura 3.2 Yagi-Uda de dos elementos. Conductor de 0.4781λ y un reflector de 0.49λ . (a) Configuración de la matriz (b) Patron Plano H.....	54
Figura 3.3 Yagi-Uda de dos elementos. Conductor de 0.4781λ y un director de 0.45λ . (a) Configuración de la matriz (b) Patron Plano H.....	55
Figura 3.4 Antena Yagi-Uda de cinco elementos, un reflector, tres directores.....	55
Figura 3.5 Diagrama polar típico de una Yagi-Uda	57
Figura 3.6 Orientación de antena Yagi-Uda.....	58
Figura 3.7 Patrón típico de una antena de haz.....	59
Figura 4.1 Antena Yagi de seis elementos	65
Figura 4.2 Ventana de nuevos proyectos	67
Figura 4.3 Ventana para elegir un área de aplicación	68
Figura 4.4 Opciones de área de aplicación.....	68
Figura 4.5 Ventana para elegir workflow.....	69
Figura 4.6 Ventana para elegir solver.	70
Figura 4.7 Ventana para establecer unidades	70
Figura 4.8 Ventana para establecer la frecuencia.....	71
Figura 4.9 Resumen de configuraciones	71
Figura 4.10 Área de trabajo del CST Studio.	72
Figura 4.11 Recuadro de lista de parámetros.	72
Figura 4.12 Lista de parámetros.....	73
Figura 4.13 Herramientas del software	73
Figura 4.14 Configuración del Reflector.	74

Figura 4.15 Configuración de directores. a) Director 1 b) Director dos c) Director tres d) Director cuatro.....	75
Figura 4.16 Elementos de la antena	75
Figura 4.17 Herramientas del software.....	75
Figura 4.18 Configuración del cubo.....	76
Figura 4.19 Configuración del dipolo.....	76
Figura 4.20 Construcción del dipolo.....	77
Figura 4.21 Dipolo construido.....	77
Figura 4.22 History tree del dipolo	77
Figura 4.23 Opciones de pick points.....	78
Figura 4.24 Pick points añadidos	78
Figura 4.25 Puerto discreto.....	78
Figura 4.26 Configuración de puerto discreto.....	79
Figura 4.27 Puerto discreto agregado.....	79
Figura 4.28 QuickStar Guide del software.....	80
Figura 4.29 Opciones de monitores de campo.....	81
Figura 4.30 Configuración de la simulación	81
Figura 4.31 Parámetros del solver.....	82
Figura 4.32 Progreso de la simulación.....	82
Figura 4.33 Simulación en 3D del software.....	83
Figura 4.34 Diagrama polar de la antena	83
Figura 4.35 Diagrama cartesiano.....	84
Figura 4.36 Analizador de espectro Rigol DSA81.....	86
Figura 4.37 Puente VSWR Rigol VB 1020.....	87
Figura 4.38 Adaptadores del puente VSWR	87
Figura 4.39 Adaptadores del puente VSWR.....	87
Figura 4.40 Puente VSWR conectado al analizador de espectro	88
Figura 4.41 Pigtail RG-58.....	88
Figura 4.42 Pigtail conectado.....	89
Figura 4.43 Configuración del ancho de banda en el analizador de espectro	89
Figura 4.44 Configuración del analizador de espectro.....	90
Figura 4.45 VSWR activado en el analizador de espectro.....	90
Figura 4.46 Configuración del analizador de espectro.....	91
Figura 4.47 Conexión con la antena yagi.....	91
Figura 4.48 Adaptador BNC hembra	92
Figura 4.49 Conexión de la antena con el BNC hembra.....	92
Figura 4.50 Opción VSWR en el analizador de espectro.....	93
Figura 4.51 Función VSWR activada	93
Figura 4.52 Opción Ref Lvl en el analizador de espectro	94
Figura 4.53 Ajuste de las señales	94
Figura 4.54 Ajuste realizado en el analizador de espectro	95
Figura 4.55 Tecla peak para ubicar puntos más bajos.....	95
Figura 4.56 Función Marker State activada	96
Figura 4.57 Peak número uno.....	96
Figura 4.58 Retorno a opciones anteriores.....	97

Figura 4.59 Función Marker	97
Figura 4.60 Funciones del Peak	98
Figura 4.61 Gráfica de la relacion de onda estacionaria	99
Figura 4.62 Gráfica de la relacion de onda estacionaria	99
Figura 4.63 Gráfica de la relacion de onda estacionaria	100
Figura 4.64 Gráfica de la relacion de onda estacionaria	100
Figura 4.65 Kit de calibración.....	102
Figura 4.66 5CO501NM.1 OPEN/SHORT	103
Figura 4.67 CL501NM.1 LOAD.....	103
Figura 4.68 CO501NF.1 OPEN	103
Figura 4.69 CS506NF.1 SHORT	103
Figura 4.70 Analizador de antenas de la marca RigExpert AA-1400	104
Figura 4.71 Pigtail conectado al analizador de antenas	104
Figura 4.72 Conexión del analizador de antenas con la computadora	105
Figura 4.73 Pantalla principal de analizador de antenas	106
Figura 4.74 Función PC MODE activada	106
Figura 4.75 Analizador de antenas detectado.....	107
Figura 4.76 Modelos de analizadores disponibles en el software	107
Figura 4.77 Selección para obtener la carta de Smith	108
Figura 4.78 Barrilito SMA HEMBRA- N Macho.....	108
Figura 4.79 Circuito abierto	109
Figura 4.80 Rango de la frecuencia.....	109
Figura 4.81 Elección de un directorio	110
Figura 4.82 Inicio de proceso para obtención de datos.	110
Figura 4.83 Carta smith del circuito abierto.....	111
Figura 4.84 Almacenamiento de resultados obtenidos.....	111
Figura 4.85 Circuito cerrado conectado.	112
Figura 4.86 Carta smith del circuito cerrado.....	112
Figura 4.87 Almacenamiento de resultados obtenidos del circuito cerrado.....	113
Figura 4.88 Barrilito N male-SMA Female	113
Figura 4.89 Adaptador P501NFNF.1	114
Figura 4.90 Circuito de carga con sus respectivos adaptadores	114
Figura 4.91 Circuito de carga conectado con el pigtail.....	114
Figura 4.92 Carta smith del circuito de carga	115
Figura 4.93 Almacenamiento de resultados obtenidos.....	115
Figura 4.94 Adaptador SMA hembra- SMA hembra	116
Figura 4.95 Conexión de analizador de antenas y la antena.	116
Figura 4.96 Carga de resultados obtenidos	117
Figura 4.97 Inicio de proceso para obtención de carta Smith	117
Figura 4.98 Carta smith de antena yagi.....	118
Figura 4.99 Información de la carta smith	119
Figura 4.100 Información de la carta smith	119
Figura 4.101 Información de la carta smith	120
Figura 4.102 Información de la carta smith	120

Figura 4.103	Analizador espectro	122
Figura 4.104	Generador de señales	122
Figura 4.105	Configuración de la frecuencia en el generador de señales	123
Figura 4.106	Configuración de la amplitud en el generador de señales.....	123
Figura 4.107	Adaptador N-macho a SMN-Hembra	124
Figura 4.108	Conexión del generador de señales y el pigtail.....	124
Figura 4.109	Activación de la salida RF	125
Figura 4.110	Analizador de espectro con antena conectada	125
Figura 4.111	Configuración de frecuencia en el analizador de espectro.....	126
Figura 4.112	Configuración de amplitud en el analizador de espectro	126
Figura 4.113	Configuración final del analizador espectro	127
Figura 4.114	Resultados de la potencia de la antena Yagi.....	127
Figura 4.115	Mejora de resultados por la función Max Hold	128
Figura 4.116	Antena Yagi polarizada horizontalmente	129
Figura 4.117	Antena Yagi polarizada verticalmente.....	129
Figura 4.118	Diagrama plano vertical.....	131
Figura 4.119	Diagrama plano horizontal.....	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Capas de la ionosfera.....	17
Tabla 2.2 Lista de bandas de radio de la ITU.....	19
Tabla 2.3 Bandas, tipos de antenas y sus aplicaciones.....	20
Tabla 4. 1 Cálculos de elementos.....	66
Tabla 4.2 Calculo de separación de elementos.....	67
Tabla 4. 3 Tabla plano horizontal.....	130
Tabla 4. 4 Tabla plano vertical.....	130

Resumen

El presente proyecto de tesis consiste en diseñar y simular una antena Yagi sintonizada a la frecuencia de 1.4 GHz. Para esto fue necesario realizar una investigación acerca de las trayectorias de propagación de las ondas electromagnéticas, también sobre el espectro electromagnético, de las bandas de radio con sus respectivas aplicaciones y sobre antenas como clasificación, los tipos de antenas existentes, su funcionamiento, sus características físicas y de los parámetros de una antena tales como diagrama de radiación, ganancia, impedancia. Luego de realizar dicha investigación se enfocó en la antena Yagi, en conceptos como los elementos que la conforman, sus usos más comunes, sus aplicaciones, sus ventajas y la importancia dentro del área de la telecomunicación.

Se investigó acerca del método tradicional de diseño que está basado en la frecuencia de trabajo de donde se obtendrá la longitud de onda y con este dato se obtienen las dimensiones y espaciamentos de los elementos que conforman dicha antena. Luego se procedió a realizar la simulación correspondiente con las dimensiones y espaciamentos que se obtuvieron. Para realizar la simulación fue necesario el uso del software denominado CST STUDIO SUITE que proporciona las herramientas necesarias para realizar el cálculo, diseño y simulación de la antena desarrollada en la tesis. Posteriormente, se pasó a la fase de experimentación mediante el uso de distintos equipos de medición como el analizador de espectro y el analizador de antenas. Finalmente se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de culminar el proyecto de tesis.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Una antena es un dispositivo diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia o desde el espacio libre. Una antena transmisora transforma corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas y una receptora realiza la función inversa. En el caso de que las antenas estén conectadas por medio de guía ondas, esta función de transformación se realiza en el propio emisor o receptor. Las antenas son un componente fundamental en sistemas de radio, televisión, teléfonos móviles, routers inalámbricos, controles remotos, etc.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

El diseño de una antena requiere de un conocimiento técnico y teórico sobre su estructura y los diferentes métodos analíticos y de diseño. Así mismo, se debe tener un conocimiento sobre teoría de campos electromagnéticos, propagación, radiación, geometría, materiales de diseño, instrumentación, etc. Todo esto juega un papel importante cuando se trata de diseñar una antena.

Otro aspecto importante es el método de modelado analítico, esto es, las simulaciones computacionales que determinan cómo funciona la antena, su rango de frecuencia y su comportamiento electromagnético. Hay varios métodos que se pueden utilizar para el modelado analítico que incluyen; la técnica del Método de los Momentos (*MoM*), el Método del Tiempo Finito Diferenciado (*FDTD*), el Método de los Elementos Finitos, etc. Estos métodos de modelado analítico o computacional, juegan un papel importante en los métodos de diseño de antenas que se pueden utilizar en las interfaces de la aplicación de software de CAD (*Computer Assisted Design*). Los cinco programas CAD más importantes son: ZELAND IE3D [H1], Ansoft HFSS [H2], Microwave Studio CST [H3], FEKO [H4] y Antenna Magus [H5].

1.3 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día se requieren capacidades en el diseño e implementación de un sistema de comunicaciones inalámbricas. La transmisión de información inalámbrica es muy importante para el desarrollo de diversas actividades y un dispositivo que es capaz de realizar la transmisión de ondas electromagnéticas es la antena. Por tal razón, este proyecto tiene la finalidad de presentar una visión global de su estudio, el cual estará enfocada en la antena Yagi. Esta antena tiene extensas aplicaciones en el área de las telecomunicaciones como la transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia en las bandas VHF Y UHF, así mismo son usadas como repetidores en las bandas de telefonía celular. En la antena Yagi es posible configurar ciertos parámetros como la ganancia, directividad y ancho de banda ya que esto dependerá directamente de la longitud de la antena, del número de elementos y distancia entre los elementos. La importancia de este trabajo y sus resultados servirán a su vez para obtener material de apoyo que ayudará para el aprendizaje de los estudiantes ya que se buscará la manera de introducirlos a las labores relacionadas con el diseño, caracterización y optimización de las antenas mediante el uso de paquetes de cómputo que son orientados al diseño asistido por computadora.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Presentar los resultados teóricos y experimentales obtenidos durante el proceso del diseño de una antena Yagi para la banda de UHF (300MHz - 3GHz).

1.5 OBJETIVOS PARTICULARES

- Comprender los conceptos básicos de antenas, la división del espectro, así como conocer algunas de las aplicaciones que trabajan con frecuencias de la banda de UHF.
- Conocer el manejo del equipo de instrumentación de medición: generador de señales de RF, analizador de espectros, analizador de antenas, puente VWSR y componentes de soporte.
- Realizar el diseño y caracterización de la antena mediante el uso de un paquete de cómputo, concretamente, Microwave Studio CST.

- Llevar al diseño físico de la antena de acuerdo a las especificaciones obtenidas en durante la fase de simulación.
- Realización de pruebas de funcionamiento de la antena en el espacio libre.
- Medición de parámetros de la antena: ancho del haz, directividad, ganancia, polarización, impedancia, obtención del patrón de radiación.
- Elaboración del documento de tesis donde muestra el proceso de diseño construcción y elaboración del diseño final de antena.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años las telecomunicaciones han sufrido un gran cambio puesto que el sector se ha revolucionado. Pero así como ha revolucionado han surgido diversos tipos de problemas. Con el paso del tiempo se fueron dando lugar a nuevos avances tecnológicos como la invención del telégrafo que en su momento realizaron cambios notables en la sociedad. Años después se dio a conocer el teléfono que inicio con la explotación privada para después unificarse con el telégrafo estatal. Para el año 1901 surgió la radio y con esto vino una revolución que no era solamente técnica sino que también era empresarial ya que con la radio varias empresas afianzaron monopolios estatales. En los años veinte del siglo XX, se desarrolló la radiodifusión y ondas cortas que permitían nuevos ámbitos de aplicación.

De esta forma se fueron implementando diversas mejoras como los microondas, radioenlaces, cables submarinos telefónicos llegando a una muy importante evolución: la televisión. Con la llegada de la televisión, la posibilidad de más cosas surgieron. Otros desarrollos importantes en campo de las telecomunicaciones viene por iniciativa del Departamento de Defensa (DoD) que encomendó a la ARPA (*Advanced Research Projects Agency*) crear una red experimental de conmutación de paquetes utilizando líneas telefónicas que fue nombrada ARPANET, con esto se dio el primer paso para el Internet, ya para 1972 se regularizaron los servicios de datos, con esto la diferenciación de transmisión de datos y proceso de datos. A partir de entonces, las redes automáticas y de ámbito mundial revolucionaron las telecomunicaciones, posteriormente llegó el fax que fue competencia directa al telégrafo y directamente al correo. Así mismo, vino la digitalización gracias al gran desarrollo tecnológico que hubo ya que la tecnología digital aplicada a la red telefónica. Ya en los ochentas del siglo XX entró la fibra óptica que permitió la transmisión de datos en forma de luz con muy poca pérdida y mayores distancias con poca potencia. Estos avances permitieron utilizar dispositivos emisores el láser y receptores de diodos fotosensibles. De este modo, se logró que la red, la conmutación y transmisión fueran digitales. El resultado de este proceso evolutivo es conocido como convergencia de las

telecomunicaciones, donde diferentes redes, sistemas y servicios, se construyen a partir de (o combinando) otras redes, sistemas o servicios. Con esto se obtuvo la capacidad de ofrecer distintos servicios según la necesidad de los usuarios y con el paso de los años se fueron incorporando más cosas como las comunicaciones móviles. Hoy en día se puede apreciar el gran avance logrado por las telecomunicaciones porque es posible encontrar infinidad de servicios y maneras de transmisión que facilitan muchas actividades que antes eran muy difíciles de lograr.

En esta sección se darán a conocer diferentes conceptos básicos de las señales electromagnéticas y de antenas. También se definirán los parámetros más comunes que son tomados en cuenta a la hora de construir y realizar pruebas de una antena.

2.1 IONOSFERA

Es una de las partes superiores de la atmosfera y está formada por capas que tienen moléculas y átomos ionizados y la ionización es por la radiación solar. Las capas se encargan de refractar, reflejar y difractar ondas electromagnéticas, [1].

La ionosfera está dividida por capas como se aprecia en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Capas de la ionosfera

Capa	Altura
Tierra - Capa D	40-80 Km
Capa D – Capa E	80-145 Km
Capa E – Capa F	145 – 560 Km

Capa D: Está ubicada entre los 40 y 80 kilómetros de altura, esta capa solo se produce de día y su grado de ionización es relativamente bajo, [2].

Capa E: Esta se extiende desde los 80 hasta los 145 kilómetros de altura, en esta capa la densidad de ionización máxima a 110 kilómetros sobre la tierra aproximadamente es necesario mencionar que esta capa es más fuerte que la capa D y esta no desaparece por la noche aunque sea muy débil. La densidad de la capa E ocurre al medio día, [2].

Capa F: Esta se extiende desde los 145 hasta los 560 kilómetros. En esta capa por la noche, solo está la capa F pero durante el día esta se diferencia en F1 y F2. La capa F2 que es la de mayor altura tiene una densidad iónica y es la más alta que cualquiera, [2].

2.2 TRAYECTORIAS DE PROPAGACIÓN

Toda onda electromagnética se propaga en el espacio en línea recta sin importar la frecuencia que tenga y se clasifican en tres tipos de trayectoria de propagación, [2]:

- **Onda Directa:** También llamado rayo directo es muy importante en comunicaciones a corta distancia. En las frecuencias que son superiores a los 50 MHz las comunicaciones se efectúan solamente por onda directa en pocas palabras que la estación transmisora y receptora deben estar al alcance de la línea visual.
- **Onda Terrestre:** Las ondas que irradian en la Tierra pierden una parte de su energía por la absorción de la Tierra. Esto causa la inclinación del frente de la onda de manera que esta se ciñe. Si la frecuencia son muy elevadas la absorción de la tierra es muy alta y si es baja la absorción será baja lo que es suficiente para trazar la trayectoria de las ondas y esto permite la propagación a grandes distancias.
- **Onda Ionosférica:** Conocida también como onda de firmamento u onda espacial. En esta cuando una onda de frecuencia menor que la frecuencia máxima tolerable incide en la ionosfera y de este modo sufre refracciones y la devuelve a la tierra. Y al incidir sobre la superficie de la tierra esta se refleja otra vez y con esto se consigue comunicaciones satisfactorias a gran distancia.

2.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Es la distribución de ondas electromagnéticas y se caracterizan por su frecuencia y longitud de onda, λ . Donde la frecuencia es una magnitud que mide las repeticiones por unidad de tiempo de cualquier suceso periódico y es importante por las propiedades de radiación que dependen de ella y se está dada en Hertz. La longitud de onda es la distancia que hay de pulso a pulso y es proporcional a la frecuencia. La unidad de medida de la longitud de onda es el metro, como la de cualquier otra longitud, esta puede ser muy pequeña y se mediría usando desde un nanómetro; cuando es muy grande se usan hasta cientos de metros. Otro término que debemos tener en cuenta es la amplitud de onda que es la distancia que separa el pico de la cresta de la línea base, [2].

El espectro de bandas de radiofrecuencia es determinado por la ITU (*International Telecommunication Union*). Las bandas de ITU de radio determinan que el espectro radioeléctrico se divide en nueve bandas de frecuencia, identificadas con números enteros progresivos de acuerdo a la Tabla 2.2, [3].

Tabla 2.2 Lista de bandas de radio de la ITU

Bandas	Frecuencias	Longitud de Onda	Onda de Propagación
Very Low Frequency (VLF)	10 KHz – 30 KHz	3 – 10 Km	Onda Terrestre
Low Frequency (LF)	30 KHz - 300 KHz	10- 1 Km	Onda Terrestres
Medium Frequency (MF)	300 KHz - 3 MHz	1 km -100 m	Onda Ionosférica
High Frequency (HF)	3 MHz- 30 MHz	100 m – 10 m	Onda Ionosférica
Very High Frequency (VHF)	30 MHz -300 MHz	10 m – 1 m	Onda Directa Satélite
Ultra High Frequency (UHF)	300 MHz – 3 GHz	1 m – 100 mm	Onda Directa Satélite
Super High Frequency (SHF)	3 GHz - 30 GHz	100 mm – 10 mm	Onda Directa Satélite
Extremely High Frequency (EHF)	30 GHz- 300 GHz	10 mm – 1 mm	Onda Directa Satélite
Tremendously High Frequency (THF)	300 GHz- 3000 GHz	1 mm – 100 nm	Onda Directa Satélite

2.3.1 APLICACIÓN DE LAS BANDAS

Cada una de las bandas tienen un uso y una aplicación que varían dependiendo de la frecuencia. La clasificación se encuentra en la Tabla 2.3 y brevemente las distintas aplicaciones de cada banda.

Tabla 2.3 Bandas, tipos de antenas y sus aplicaciones

Frecuencia muy baja	Frecuencia baja	Frecuencia media	Frecuencia Alta	Frecuencia muy alta	Frecuencia ultra alta	Microondas	Ondas milimétricas
VLF (30Hz-30Khz) $\lambda = (10^4 - 10^5 m)$	LF (30-300 KHz) $\lambda = (10^3 - 10^4 m)$	MF (300KHz-3MHz) $\lambda = (10^2 - 10^3 m)$	HF (3-30MHz) $\lambda = (10^1 - 10^2 m)$	VHF (30-300 MHz) $\lambda = (10^0 - 10^1 m)$	UHF (300MHz-1GHz) $\lambda = (1m - 1m)$	(1-30 Ghz) $\lambda = (1m - 10cm)$	(30-100 GHz) $\lambda = (0.1m - 1cm)$
USOS							
Militar y marítimo	Militar y marítimo	Marítimo y radiodifusión	Todos los servicios	Radiodifusión y telecomunicaciones móviles, enlaces punto a punto	Telecomunicaciones móviles, radioenlaces, satélites	Radioenlaces de microondas de banda ancha	Sistemas de guía de onda

Como se aprecia en la Tabla 2.3 cada banda tiene un uso diferente y para mejor comprensión a continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellas, [2]:

- **VLF (Very Low Frequency):** Es utilizada en circuitos de largos alcances con emisores de alta potencia y también para comunicaciones entre puntos fijos y con servicios continuos. Su principal aplicación es en la radio ayuda a la navegación

marítima, área y hasta terrestre. El uso de esta banda está dada para servicios gubernamentales.

- **LF (*Low Frequency*):** Son utilizadas para cubrir con demasiada seguridad distancias que están dados por cientos de kilómetros con la onda terrestre. Las aplicaciones de la banda LF es muy similar a la banda VLF que esta designada para servicios gubernamentales.
- **MF (*Medium Frequency*):** Utilizada para servicios de radiodifusión que oscila entre los 550 y 1600 KHz. Lo que se busca en la radiodifusión es que aparte de obtener señales inteligibles también alcanza señales de alta fidelidad. De este modo el ancho de banda a transmitir es mayor y la distorsión tolerable sea mucho mejor. Su aplicación es utilizado por los radioaficionados y radiodifusión AM.
- **HF (*High Frequency*):** Usado para comunicaciones a muy corta distancia ya que la comunicación a mayor distancia depende de la onda ionosférica y para obtener una óptima propagación se debe elegir la frecuencia cuidadosamente. Son aplicados para radiodifusión de onda corta, banda ciudadana, telefonía móvil, marina, radar e incluso comunicaciones de aviación.
- **VHF (*Very High Frequency*):** Esta banda se encuentra entre la gama de frecuencias reservadas para la transmisión de televisión, se usa solamente la onda directa ya que la onda ionosférica casi no existe porque las frecuencias son superiores a la frecuencia de las capas de la ionosfera. Es aplicada para FM, radio meteorológica, televisión, telefonía móvil marítima y terrestre.
- **UHF (*Ultra High Frequency*):** Es similar a la banda UHF la diferencia es que tiene una alta atenuación a la ionosfera y a la superficie de la tierra. Aplicada para televisión, radar, satélite, hornos de microondas, redes inalámbricas incluso radio enlaces de comunicación urbana como bancos.
- **SHF (*Super High Frequency*):** Las frecuencias de esta banda son utilizadas en radar y sistemas de enlace por microondas. La propagación es por rayo directo y la propagación depende mucho de las condiciones atmosféricas. Son empleadas para la comunicación vía satélite, enlaces de microondas urbanas y también en radio ayudas a la navegación.

- **EHF (*Extremely High Frequency*):** Es similar a la UHF pero la variante es que utiliza como medio de transmisión la fibra óptica. En esta banda existe tanta atenuación que no es viable usarla para comunicaciones seguras. Se emplean para radioastronomía, transmisión por microondas, teledetección.
- **THF (*Tremendously High Frequency*):** Se refiere a las ondas electromagnéticas que se propagan en las frecuencias en el rango de los terahercios. Se emplean en astronomía submilimétrica, en algunas frecuencias de la radiación de terahercios pueden ser usadas para imágenes en 3D de los dientes y puede ser más preciso y seguro que los métodos convencionales de rayos X, la radiación de terahercios puede penetrar los tejidos y los plásticos, así que puede ser usada en la vigilancia, como control de la seguridad, para descubrir armas ocultas en alguna persona.

2.4 ANTENAS

Las antenas forman parte de los sistemas de telecomunicación y están diseñadas para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Otra manera de definir las es que son los dispositivos que adaptan las ondas guiadas, que son transmitidas por conductores o guías a las ondas que se propagan en el espacio libre. Se utilizan para enlaces punto a punto, otra aplicación es que son capaces de transmitir señales de televisión y radio, incluso son capaces de transmitir o recibir señales en dispositivos portátiles, [4].

2.4.1 CLASIFICACIÓN Y TIPO DE ANTENAS.

La clasificación más común de las antenas está conformada por tres tipos:

De hilo o cable: Las antenas de cable son las más antiguas y prevalentes de todas las formas de antena. Las antenas de alambre pueden ser diseñadas de cable sólido o conductor tubular. Son simples en el concepto, son fáciles de construir y son económicas. En esta clasificación las antenas tienen elementos radiantes conductores de hilo de sección despreciable. Son muy usadas y útiles en las bandas de MF, HF, VHF Y UHF, [5].

Algunos ejemplos de esta clasificación son:

- **Monopolo vertical:** Esta es un tipo de antena que está constituida de un solo brazo rectilíneo irradiante en posición vertical como se logra apreciar en Figura 2.1. Su polarización es vertical y su campo eléctrico es perpendicular al plano del suelo. Este tipo de antena es capaz de tener ganancias de tres hasta los 17 dBi. Se emplea principalmente en la banda VHF que es para aplicaciones de radio móvil, [1].



Figura 2.1 Antena monopolo vertical

- **Dipolo:** Este tipo de antenas son las más simples teóricamente, tienen un patrón de radiación generalizado, es utilizada para transmitir y recibir ondas de radiofrecuencia. Es importante mencionar que es muy sensible a cualquier movimiento, [4]. La forma de la antena se aprecia a continuación en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Antena dipolo

- **Yagi:** Esta antena es de alto rendimiento y está constituida por un dipolo así como de elementos parásitos conocidos como reflector y directores. Usualmente consta de un elemento activo, un reflector y entre dos y veinte directores. El cual el elemento activo suele ser un dipolo doblado. En la Figura 2.3 se aprecia una antena yagi con su reflector, el elemento activo y cinco directores. Habitualmente es usado en las bandas HF, VHF Y UHF que son para aplicaciones de radiodifusión de televisión, radioenlaces punto a punto, estaciones de radioaficionados, [1].

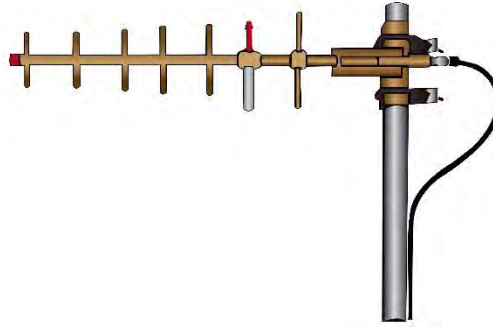


Figura 2.3 Antena yagi

- **Espira:** Es una antena compuesta de al menos una espira de un conductor. Se considera dipolo ya que sus brazos se repliegan hasta formar una espira circular como se logra apreciar en la Figura 2.4. Es necesario hacer mención que este tipo de antena es muy direccional.



Figura 2.4 Antena de espira

De Apertura: Este tipo de antenas son las que utilizan superficies o aperturas para direccionar el haz electromagnético de modo que concentran la emisión y recepción de su sistema radiante en una dirección y de este modo forma ángulos sólidos, [5].

- **De bocina:** Este tipo de antena consiste en una guía de onda metálica en la cual el área de la sección se va incrementando progresivamente hasta un extremo abierto y esto se comporta como una apertura. En la Figura 2.5 se puede apreciar esta antena de bocina. Son utilizadas en las bandas de frecuencia de microondas ya que proporcionan alta ganancia, buena adaptación a la guía de alimentación, ancho de banda muy grande y son fáciles de diseñar y construir, [1].

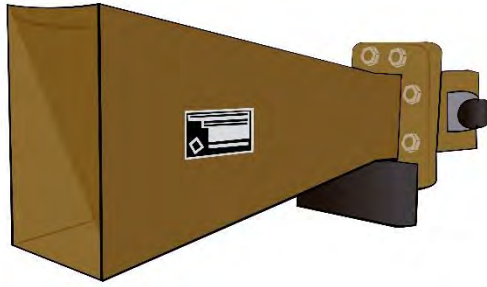


Figura 2.5 Antena de bocina

- De ranura: Este tipo de antenas son resonantes y tienen un margen muy estrecho de frecuencias de trabajo y son utilizadas en las frecuencias 2 a 2.4 GHz. En estas antenas las ranuras son tomadas como dipolos debido a un principio llamado *Babinet* y por lo tanto este tipo son consideradas como arreglo de antenas, un ejemplo se puede apreciar en la Figura 2.6. La polarización suele ser horizontal y pueden ser omnidireccionales o direccionales.



Figura 2.6 Antena de ranura

- Parabólica: Este tipo de antenas se caracterizan por llevar un reflector parabólico, proporcionan una ganancia, una frecuencia extremadamente altas y son utilizadas para enlaces de microondas y también para el enlace de comunicación por satélite. Está constituida por dos partes principales que es el reflector parabólico y un elemento activo llamado mecanismo de alimentación como se logra ver en la Figura 2.7. Este tipo de antenas pueden ser transmisoras, receptoras o full dúplex, [1].



Figura 2.7 Antena parabólica

Planas: Son usadas para los radares de apertura sintética. Algunos ejemplos son las antenas de array.

- Antena de array: Existen diversas aplicaciones que requieren de características de radiación que no pueden ser alcanzables por un elemento. Sin embargo existe la posibilidad de un agregado de elementos radicales con disposición eléctrica y geométrica que logran obtener las características de radiación deseada. Están conformadas por un conjunto de dos o más antenas idénticas distribuidas y ordenadas de tal forma que en su conjunto permite que se comporten como una única antena con un solo diagrama de radiación. Su principal característica es que su diagrama es modificable y se adapta de distinta aplicaciones o necesidad, enseguida podremos observar como luce en la Figura 2.8 [6].



Figura 2.8 Antena de array

2.5 PARÁMETROS DE UNA ANTENA

Para describir el funcionamiento de una antena, es importante definir diversos parámetros que son significativos. Algunos de los parámetros están interrelacionados y no es necesario especificar todos ellos para una descripción completa del rendimiento de la antena.

2.5.1 DIAGRAMA DE RADIACIÓN

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio, a una distancia fija. Usualmente se emplea un sistema de coordenadas esféricas, ver Figura 2.9. Con la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia se expresará el campo eléctrico en función de las variables angulares (θ, ϕ) . Como el campo es una magnitud vectorial, habrá que determinar en cada punto de la esfera de radio constante el valor de dos componentes ortogonales, habitualmente $\hat{\theta}, \hat{\phi}$, [7].

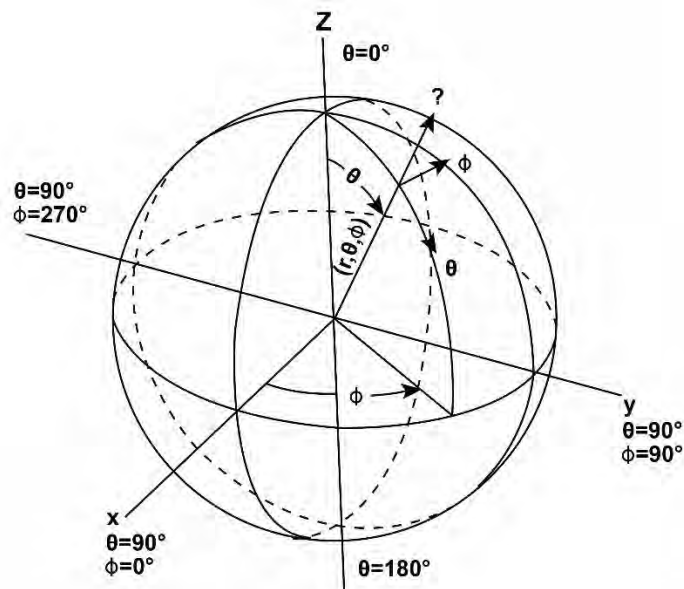


Figura 2.9 Sistemas de coordenadas esféricas

Como el campo magnético se deriva directamente del eléctrico, la representación podría realizarse a partir de cualquiera de los dos, siendo norma habitual que los diagramas se refieran al campo eléctrico.

El diagrama de radiación se puede representar en forma tridimensional utilizando técnicas graficas diversas, como las curvas de nivel o el dibujo en perspectiva. La Figura 2.10 permite ver el diagrama tridimensional de una antena y los planos E y H, [7].

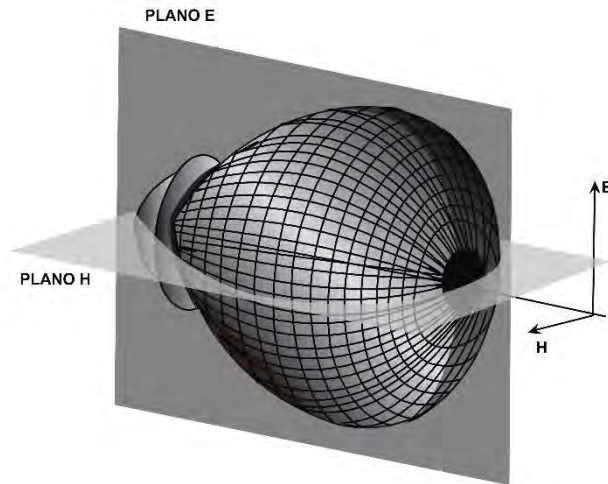


Figura 2.10 Diagrama tridimensional

Los niveles se expresan en decibeles respecto al máximo de radiación. Para antenas linealmente polarizadas se define el plano E como el que forma la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. Análogamente, el plano H es el formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección. Ambos planos son perpendiculares y su intersección determina una línea que define la dirección de máxima radiación de la antena. La información que proporciona la radiación tridimensional es de sumo interés y en muchos casos suficiente para representar un corte del diagrama. Los cortes pueden hacerse de infinitas formas. Los más habituales son los que siguen los meridianos en una hipotética esfera o los paralelos. La información de todos los cortes del diagrama es excesiva, por lo que se recurre a representar dicha información solo en los planos principales. Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar coordenadas polares o cartesianas. En el primer caso el ángulo en el diagrama polar representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada, un ejemplo se aprecia en la Figura 2.11. En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y el campo o la densidad de potencia en ordenadas, un ejemplo se aprecia en la Figura 2.12, [7]. La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas

directivas, mientras que el diagrama polar suministra una información más clara de la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio. El campo se puede representar de forma absoluta o relativa, normalizando el valor máximo a la unidad. También es bastante habitual la representación del diagrama con la escala en decibeles. El máximo del diagrama de radiación es cero decibeles y en las restantes direcciones del espacio los valores en dB son negativos. Es importante tener en cuenta que los diagramas de campo y potencia son idénticos cuando la escala está en decibeles, [7].

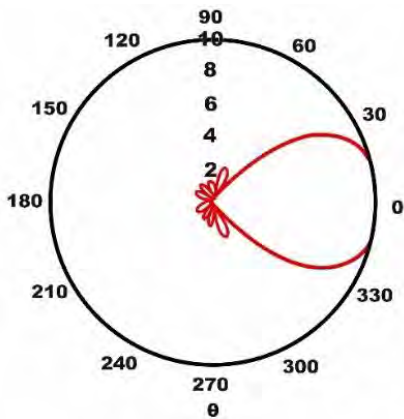


Figura 2.11 Diagrama en coordenadas polares.

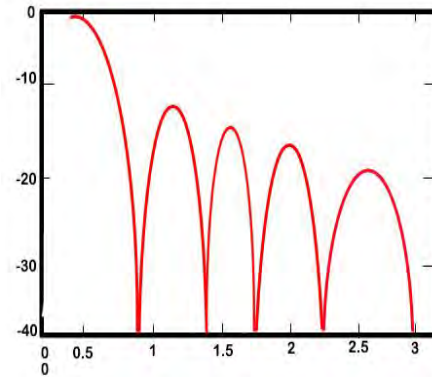


Figura 2.12 Diagrama en coordenadas cartesianas.

En el diagrama de radiación existen diversos parámetros que son importantes mencionar ya que estos permiten conocer el comportamiento de una antena, a continuación en la Figura 2.13 podemos ver estos parámetros.

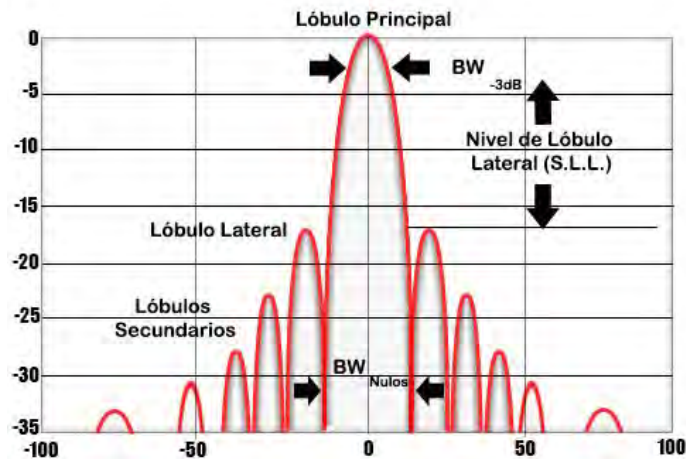


Figura 2.13 Parámetros del diagrama de radiación

El lóbulo de radiación es la porción del diagrama que se encuentra limitado por regiones que tienen menor radiación. Los lóbulos principales son los siguientes, [5]:

- Lóbulo principal: Es donde se encuentra la dirección máxima de radiación y se obtiene mayor ganancia.
- Lóbulos secundarios: En algunos diagramas de radiación, lo constituye un lóbulo lateral de mayor amplitud. Aquí la radiación y la ganancia son menores.
- Lóbulos laterales: Son zonas de radiación que, a menudo, rodean al lóbulo principal. Estos lóbulos son los más altos que los secundarios.
- Lóbulo posterior: Es el lóbulo que forma 180 grados respecto al lóbulo principal.
- Nivel de lóbulos secundarios: El nivel del mayor lóbulo secundario respecto al principal y se expresa en dB. Los lóbulos secundarios radian potencia que no es deseada y distintas direcciones y esto ocasiona ciertas interferencias en sistemas de comunicación.
- Ancho del haz principal a -3dB: Este parámetro es el ancho del lóbulo principal entre puntos de potencia mitad en el plano considerado.
- Ancho del haz entre nulos: Es la separación angular existente entre las direcciones en las que el haz del lóbulo principal se hace nulo.
- Relación delante-detrás (*DD*): Cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior.

- Relación lóbulo principal-lóbulo secundario (*NLPS*): Relación entre el lóbulo principal y, normalmente, el lóbulo secundario adyacente al mismo.

2.5.2 ANCHO DEL HAZ

Es una medida de la capacidad que tiene la antena de concentrar la potencia en determinadas direcciones es a través del ancho de haz a mitad de potencia o Half-Power Beamwidth (*HPBW*), también conocido como ancho de haz a -3dB, ver Figura 2.14. En cada plano que contiene la dirección de máxima emisión de radiación del lóbulo principal, se define el ancho del haz a mitad de potencia como la separación angular existente entre las direcciones en las que la potencia de radiación es la mitad de la potencia máxima y se puede demostrar en un esquema normalizado expresado en decibeles corresponde al nivel -3db [8].

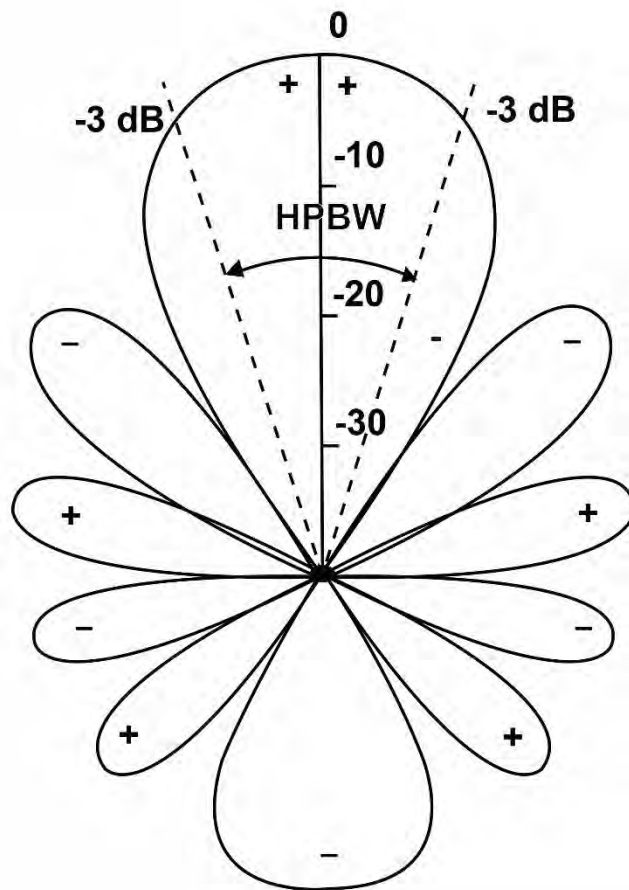


Figura 2.14 Diagrama de radiación de potencia en dB

Una medida alternativa de la anchura relativa del lóbulo principal es el ancho de haz entre primeros nulos First Null Beamwidth (*FNBW*), el cual consiste en la separación angular entre los nulos adyacentes al lóbulo principal del diagrama de radiación como se muestra en la Figura 2.15.

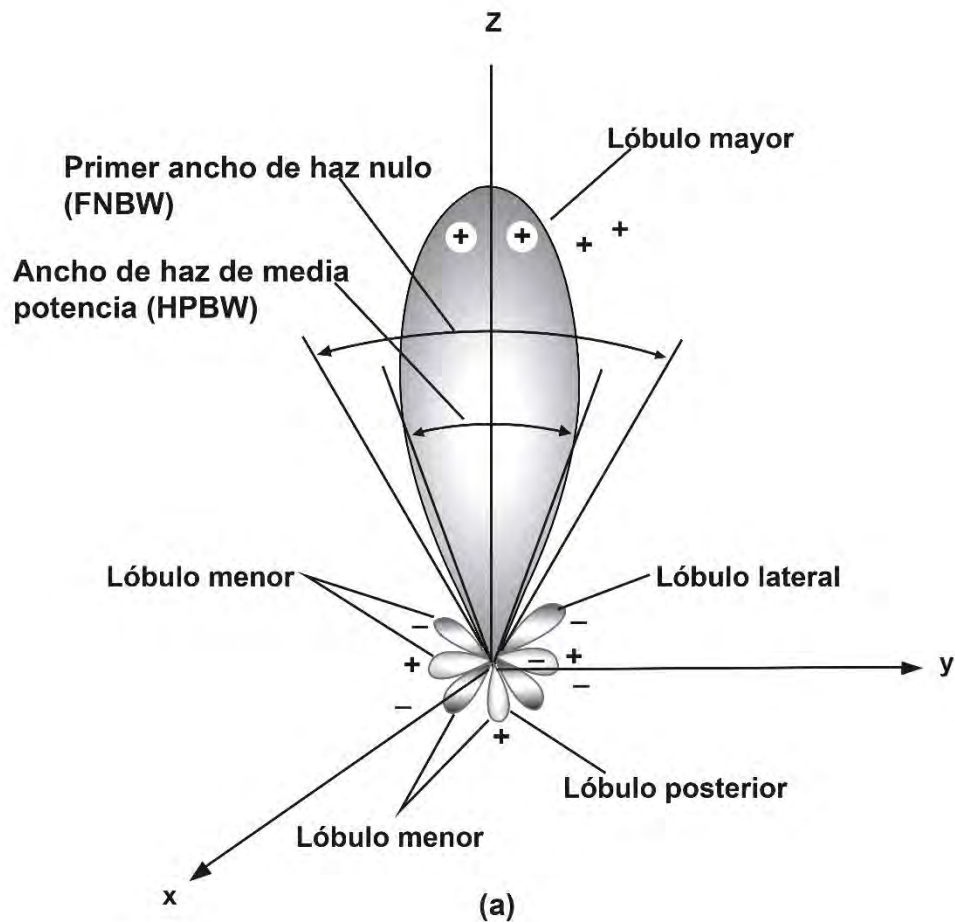


Figura 2.15 Representación tridimensional de un diagrama de radiación

Otras anchuras de haz son aquellas donde el patrón es -10 dB del máximo o cualquier otro valor. Sin embargo, en la práctica, el término ancho de haz, sin otra identificación, generalmente se refiere al HPBW. El ancho de haz de una antena es muy importante y se utiliza como un balance tradeoff entre él y el nivel del lóbulo lateral. Es decir, que mientras la anchura del haz disminuya, el lóbulo lateral aumenta y viceversa. Además, la anchura de haz de la antena también se utiliza para describir las capacidades de resolución de la antena para distinguir entre dos fuentes radiales adyacentes u objetivos de radar, [6].

2.5.3 CAMPOS DE LAS REGIONES.

El espacio que rodea una antena está dividida por tres regiones:

- Región reactiva de campo cercano.
- Región de radiación de campo cercano o zona fresnel.
- Región de campo lejano o región de fraunhofer.

Estas regiones están designadas para identificar la estructura del campo en cada una. Aunque no se observan cambios abruptos en las configuraciones de campo cuando se cruzan los límites, hay diferencias entre ellos. Los límites que separan estas regiones no son únicos, aunque se han establecido diversos criterios y se utilizan comúnmente para identificar las regiones, [6]:

- Región reactiva de campo cercano: Región que está junto a la antena donde predomina el campo reactivo. Para la mayoría de las antenas, el límite exterior de esta región se considera comúnmente que existe a una distancia $R < 0,62\sqrt{D^3 / \lambda}$ de la superficie de la antena, donde λ es la longitud de onda y D es la dimensión más grande de la antena. Para un dipolo muy corto, o un radiador equivalente, el límite exterior se considera comúnmente que existe a una distancia $\lambda / 2\pi$ de la superficie de la antena.
- Región de campo cercano o región Fresnel: Es la región que se encuentre entre la región reactiva de campo cercano y región de campo lejano también conocido como región Fraunhofer en esta región predominan los campos de radiación y en el que la distribución del campo angular depende de la distancia de la antena. Si la antena tiene una dimensión global máxima que es muy pequeña en comparación con la longitud de onda, esta región de campo puede no existir. El límite interno se toma como la distancia $R \geq 0,62\sqrt{D^3 / \lambda}$ y el límite exterior la distancia $R < 2D^2 / \lambda$ donde D es la dimensión más grande de la antena. Este criterio se basa en un error de fase máximo de $\pi/8$. En esta región, el patrón de campo es, en general, una función de la distancia radial y la componente de campo radial puede ser apreciable.
- Región de campo lejano o región de fraunhofer.: Se define como aquella región del campo de una antena donde la distribución del campo angular es esencialmente

independiente de la distancia desde la antena. Si la antena tiene una dimensión global máxima D , la región de campo lejano se considera comúnmente que existe a distancias mayores que $2D^2 / \lambda$ de la antena, siendo λ la longitud de onda. Los patrones de campo lejano de ciertas antenas, como las antenas reflectoras multihaz, son sensibles a variaciones de fase sobre sus aberturas. Para estas antenas $2D^2 / \lambda$ pueden ser inadecuadas. En medios físicos, si la antena tiene una dimensión global máxima, D , que es grande en comparación con $\pi / |\gamma|$, la región de campo lejano puede tomarse para comenzar aproximadamente a una distancia igual a $|\gamma| D^2 / \pi$ de la antena, siendo γ , la constante de propagación en el medio. Para una antena enfocada en el infinito, la región del campo lejano se refiere a veces como la región de Fraunhofer sobre la base de la analogía a la terminología óptica.

Se debe tener en cuenta que el campo lejano es el más importante ya que de esto obtenemos el patrón de radiación de la antena y también es la región de operación para la mayoría de las antenas. En la Figura 2.16 se aprecian las regiones en las que está rodeada la antena.

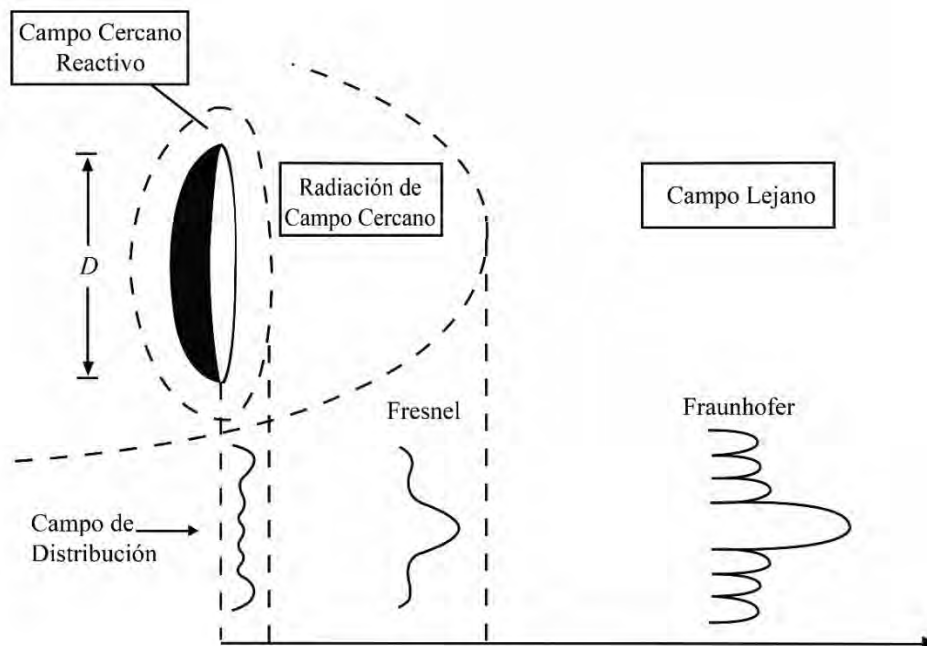


Figura 2.16 Cambios típicos de la forma del patrón de amplitud de la antena desde el campo cercano reactivo hacia el campo lejano

2.5.4 RESISTENCIA Y EFICIENCIA DE RADIACIÓN

No toda la potencia que se suministra en una antena es irradiada, ya que parte de ella se transforma en calor y se disipa. La resistencia de radiación no se puede medir en forma directa. La resistencia de radiación es una resistencia de antena a la corriente alterna y es igual a la relación de la potencia irradiada por la antena entre el cuadrado de la corriente en su punto de alimentación. La ecuación que define la resistencia de radiación es, [2]:

$$R_r = \frac{P_{rad}}{I^2}, \quad (2.1)$$

donde:

R_r : Resistencia de radiación (Ohms)

P_{rad} : Potencia radiada por la antena (Watts)

I : Corriente de la antena en el punto de alimentación (Amperes)

La resistencia de radiación es aquella que si reemplazará a la antena disiparía exactamente la misma potencia que la que irradia la antena. La resistencia de radiación de una antena, tal como se define en la ecuación 2.1, es una cantidad ficticia en cierto sentido porque se refiere a un punto arbitrario de la antena, que tendría distintos valores de corriente para distintos puntos de referencia. Se acostumbra referir la resistencia de radiación al punto de máxima corriente o incluso en ocasiones a la corriente en el punto de alimentación aunque en la mayoría de los casos ambos son el mismo. Cuando se refiere al punto de corriente máxima, la resistencia de radiación se llama en ocasiones resistencia de radiación de lazo o resistencia de radiación antinodo porque un máximo de corriente también es un antinodo de corriente. Es aparente que la resistencia de radiación en ocasiones es un concepto nebuloso por que no se puede medir con facilidad o es un concepto útil solo cuando se puede medir con facilidad y no tiene significado en antenas en las que no hay un valor bien definido que se pueda tomar como referencia, [2].

La eficiencia de la antena es la relación de la potencia irradiada por ella entre a suma de la potencia irradiada y la potencia disipada, o la relación de la potencia irradiada por la antena entre la potencia total de entrada, la ecuación está definida por:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{ent}} \times 100, \quad (2.2)$$

donde:

η : Eficiencia de la antena (Porcentaje)

P_{rad} : Potencia radiada por la antena (Watts)

P_{ent} : Potencia de entrada (Watts)

Aunque también está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_d} \times 100. \quad (2.3)$$

Las antenas de alta eficiencia tiene la mayoría de la potencia presente en la entrada de la antena radiada. Mientras que la antena de baja eficiencia tiene la mayor parte de su potencia absorbida como perdidas dentro de ella o se refleja muy lejos por la incompatibilidad de impedancia, [2].

2.5.5 DENSIDAD DE POTENCIA RADIADA

Las ondas electromagnéticas se utilizan para transportar información a través de un medio inalámbrico o una estructura de guía, de un punto a otro. Entonces es natural asumir que la energía está asociada con campos electromagnéticos.

La cantidad utilizada para describir la potencia asociada con una onda electromagnética es el vector instantáneo de Poynting definido como, [6] :

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.4)$$

donde:

\vec{W} : Vector instantáneo de Poynting (w / m^2)

\vec{E} : Intensidad instantánea del campo eléctrico (V / m)

$\mathbf{\bar{H}}$: Intensidad instantánea del campo magnético (A/m)

Dado que el vector de Poynting es una densidad de potencia, la potencia total, P que cruza una superficie cerrada se puede obtener integrando el componente normal del vector Poynting sobre toda la superficie, [6].

Matemáticamente se expresa de la forma siguiente:

$$\mathbf{P} = \oiint_s \mathbf{\bar{W}} \cdot d\mathbf{\bar{s}} = \oiint_s \mathbf{\bar{W}} \cdot \hat{\mathbf{n}} ds, \quad (2.5)$$

donde:

\mathbf{P} : Potencia instantánea total (W).

$\hat{\mathbf{n}}$: Vector unitario normal a la superficie

ds : Área infinitesimal de la superficie cerrada (m^2)

Para aplicaciones de campos variables en el tiempo, a menudo es más deseable encontrar la densidad de potencia media que se obtiene integrando el vector Poynting instantáneo durante un periodo y dividiéndolo por el periodo, [6].

Para las variaciones tiempo-armónicos de la forma $e^{j\omega t}$, definimos los campos complejos E y H que están relacionados con sus contrapartes instantáneas \mathbf{E} y \mathbf{H} por

$$\mathbf{E}(x, y, z; t) = \text{Re}[\mathbf{E}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.6)$$

$$\mathbf{H}(x, y, z; t) = \text{Re}[\mathbf{H}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.7)$$

Utilizando las ecuaciones (2.6) y (2.7) y la identidad $\text{Re}[Ee^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[Ee^{j\omega t} + E^*e^{-j\omega t}]$,

(2.4) se puede escribir como:

$$\mathbf{W} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}] + \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H} e^{j2\omega t}] \quad (2.8)$$

El primer término de (2.8) no es una función del tiempo y las variaciones de tiempo del segundo son el doble de la frecuencia dada. El vector de tiempo medio de Poynting (densidad de potencia media) se puede escribir como:

$$w_{av}(x, y, z) = \left[\bar{W}(x, y, z; t) \right]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}] \quad (W / m^2) \quad (2.9)$$

El factor $\frac{1}{2}$ aparece en (2.8) y (2.9) porque los campos E y H representan pico valores y debe omitirse para valores RMS.

Basándose en la ecuación (2.9), la potencia media radiada por una antena puede escribirse como:

$$P_{rad} = P_{av} = \oiint_S \vec{W}_{rad} \cdot \vec{ds} = \oiint_S \vec{W}_{av} \cdot \hat{n} ds = \frac{1}{2} \oiint_S \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{ds} \quad (2.10)$$

El patrón de potencia de la antena, es sólo una medida, en función de la dirección, de la densidad de potencia media radiada por la antena. Las observaciones se hacen generalmente en una esfera grande de radio constante que se extiende en el campo lejano. Sin embargo, el rendimiento de la antena se mide en términos de ganancia y en términos de patrones de potencia relativa. Los patrones tridimensionales no pueden ser medidos, pero pueden ser construidos con un número de cortes bidimensionales. Un radiador isotrópico es una fuente ideal que irradia igualmente en todas las direcciones. Aunque no existe en la práctica, proporciona una referencia isotrópica conveniente con la que comparar otras antenas. Debido a su radiación simétrica, su vector Poynting no será una función de los ángulos de coordenadas esféricas θ y ϕ . Además, tendrá sólo un componente radial, [6].

Así, la potencia total irradiada por ella es dada por:

$$P_{rad} = \oiint_S \vec{W}_0 \cdot \mathbf{ds} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[a_r \vec{W}_0(r) \right] \cdot \left[a_r r^2 \sin \theta d\theta d\phi \right] = 4\pi r^2 W_0, \quad (2.11)$$

Y la densidad de potencia por:

$$W_0 = a_r W_0 = a_r \left(\frac{P_{rad}}{4\pi r^2} \right) (W / m^2) \quad (2.12)$$

2.5.6 GANANCIA DIRECTIVA Y GANANCIA DE POTENCIA

Ambos términos son usados mal ya que se malentienden. La ganancia directiva es la relación de la densidad de potencia irradiada en una dirección particular entre la densidad de potencia irradiada al mismo punto por una antena de referencia, suponiendo que ambas antenas estén irradiando la misma cantidad de potencia. La grafica de densidad de potencia de radiación para una antena en realidad es una gráfica de ganancia directiva, si se toma la referencia de densidad de potencia para una antena normal de referencia, que es una antena isotrópica. La ganancia directiva máxima se llama directividad, [2].

La ecuación de definición está dada de la siguiente forma.

$$D = P / P_{ref} , \quad (2.13)$$

donde:

D : Ganancia Directiva (adimensional)

P : Densidad de potencia en un punto, con determinada antena. (*watts / m²*)

P_{ref} : Densidad de potencia en el mismo punto, con una antena de referencia.
(*watts / m²*)

La ganancia de potencia es lo mismo que la ganancia directiva a excepción de que se usa la potencia total alimentada a la antena, es decir que se toma en cuenta la eficiencia de la antena. Se supone que la antena dada y la antena de referencia tienen la misma potencia de entrada y que la antena de referencia no tiene pérdidas ($\eta = 100\%$), [2].

La ecuación de la ganancia de potencia A_p , es:

$$A_p = D\eta \quad (2.14)$$

Si la antena es sin pérdidas esta irradiará 100% de la potencia de entrada y la ganancia de potencia es igual a la ganancia directiva. La ganancia de potencia de una antena también se expresa en decibeles en la relación con una antena de referencia, [2].

Entonces la ganancia de potencia es.

$$A_{p(dB)} = 10 \log \frac{P\eta}{P_{ref}}, \quad (2.15)$$

Una antena tan sólo concentra su potencia irradiada en determinada dirección. Entonces, los puntos en donde la potencia irradiada se concentra obtienen una ganancia aparente, en relación con la densidad de potencia en esos mismos puntos si se usara una antena isotrópica. Si la ganancia se obtiene en una dirección, debe haber una reducción o bien una pérdida de densidad de potencia en otra dirección. La dirección a la que apunta una antena siempre es la de máxima radiación. Como una antena es un dispositivo recíproco, su gráfica de radiación también es su gráfica de recepción. Para alcanzar una potencia capturada máxima, una antena de recepción debe apuntar en la dirección desde donde se desea recibir. En consecuencia, las antenas de recepción tienen directividad y ganancia de potencia, exactamente como las de transmisión, [2].

2.5.7 DIRECTIVIDAD

La directividad de una antena está definida como la relación de la intensidad de radiación en una dirección dada de la antena a la intensidad de radiación promediada en todas las direcciones. La intensidad de radiación media es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π . Si no se especifica la dirección, la dirección de máxima intensidad de radiación está implícita, [6].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi}{P_{rad}}, \quad (2.16)$$

Si la dirección angular no está especificada se entiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación. Por lo tanto.

$$D_{\max} = D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}}, \quad (2.16a)$$

donde:

D : Directividad (Sin dimensiones)

D_0 : Directividad máxima (Sin dimensiones)

U : Intensidad de radiación ($W/Unidad\ de\ ángulo\ sólido$)

U_{max} : Intensidad de radiación máxima ($W/Unidad\ de\ ángulo\ sólido$)

U_0 : Intensidad de radiación de la fuente isotrópica ($W/Unidad\ de\ ángulo\ sólido$)

P_{rad} : Potencia total radiada (W)

Para antenas con componentes de polarización ortogonal, definimos la directividad parcial de una antena para una polarización dada en una dirección dada como la parte de la intensidad de radiación correspondiente a una polarización dada dividida por la intensidad de radiación total promediada en todas las direcciones. Con esta definición de directividad parcial, entonces en una dirección dada la directividad total es la suma de las directividades parciales para dos polarizaciones ortogonales. Para un sistema de coordenadas esférico, la directividad máxima total D_0 para los componentes ortogonal θ y ϕ de una antena puede escribirse como, [6]:

$$D_0 = D_\theta + D_\phi, \quad (2.17)$$

mientras que las directividades parciales D_θ y D_ϕ se expresan como

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi}, \quad (2.17a)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi}, \quad (2.17b)$$

donde

U_θ : Intensidad de la radiación en una dirección dada contenido en componente de campo θ

U_ϕ : Intensidad de la radiación en una dirección dada contenido en componente de campo ϕ

$(P_{rad})_\theta$: Potencia irradiada en todas las direcciones contenidas en la componente de campo θ

$(P_{rad})_\phi$: Potencia irradiada en todas las direcciones contenidas en la componente de campo ϕ

La potencia total radiada se busca usando:

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U(\theta, \phi) d\Omega = B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.18)$$

La expresión general para la directividad y directividad máxima usando (2.17) y (2.17a) respectivamente, como:

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.19)$$

$$D_0 = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)|_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.20)$$

La ecuación (2.20) también se puede escribir de la siguiente manera

$$D_0 = \frac{4\pi}{\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{F(\theta, \phi)|_{\max}}} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.21)$$

Donde Ω_A es el ángulo sólido del haz y está dado por

$$\Omega_A = \frac{1}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F_n(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi, \quad (2.22)$$

$$F_n(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{F(\theta, \phi)|_{\max}}, \quad (2.23)$$

Dividiendo por $F(\theta, \phi)|_{\max}$ simplemente normaliza la intensidad de radiación $F(\theta, \phi)$ y hace su valor máximo unitario.

El ángulo sólido del haz Ω_A se define como el ángulo sólido a través del cual fluiría toda la potencia de la antena si su intensidad de radiación es constante (e igual al valor máximo de U) para todos los ángulos dentro de Ω_A .

2.5.8 POLARIZACIÓN

La polarización de una antena es la orientación del campo eléctrico que se irradia de ella. La antena puede estar polarizada linealmente ya sea horizontal o verticalmente suponiendo que los elementos de la antena están en un plano horizontal o en uno vertical, elípticamente o circularmente. Si la antena irradia una onda electromagnética verticalmente polarizada, se define a la antena como verticalmente polarizada o polarizada verticalmente. Si una antena irradia una onda electromagnética horizontalmente polarizada, se dice que la antena esta polarizada horizontalmente; si el campo eléctrico gira describiendo una elipse, esta elípticamente polarizada; si el campo eléctrico gira en forma circular, esta circularmente polarizada. En la Figura 2.17 se pueden apreciar las diversas polarizaciones, [2].

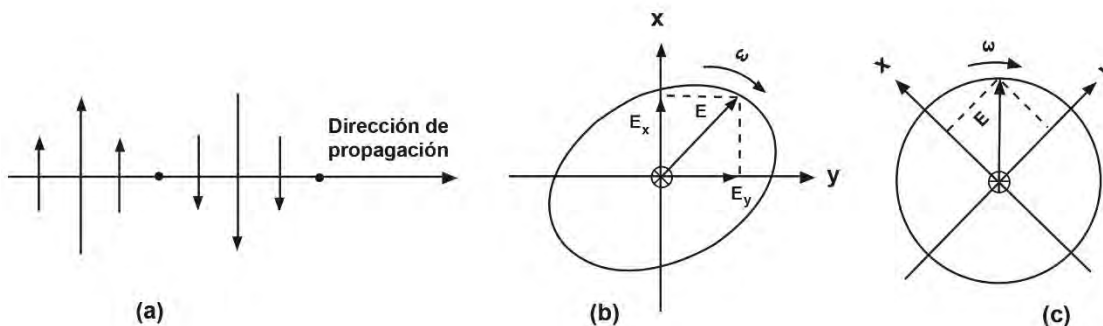


Figura 2.17 Polarización de antena: (a) Lineal; (b) Elíptica; (c) Circular

Polarización lineal: Una onda armónica en el tiempo está polarizada linealmente en un punto dado en el espacio si el vector de campo eléctrico ó campo magnético, en ese punto está siempre orientado a lo largo de la misma línea recta en cada instante de tiempo. Esto se logra si el vector de campo eléctrico o magnético posee [6]:

- Sólo un componente
- Dos componentes lineales ortogonales que están en fase de tiempo o 180° (o múltiplos de 180°) fuera de fase.

Polarización circular: Una onda harmónica en el tiempo está circularmente polarizada en un punto dado en el espacio si el vector de campo eléctrico o magnético, en ese punto traza un círculo en función del tiempo.

Las condiciones necesarias y suficientes para lograr esto son si el vector de campo eléctrico o magnético posee todas las características siguientes [6]:

- El campo debe tener dos componentes lineales ortogonales
- Los dos componentes deben tener la misma magnitud
- Los dos componentes deben tener una diferencia tiempo-fase de múltiplos impares de 90° .

El sentido de la rotación siempre se determina girando el componente que conduce la fase hacia el componente de retraso de fase y observando la rotación del campo a medida que la onda se ve mientras se aleja del observador. Si la rotación es en el sentido de las agujas del reloj, la onda es polarizada circularmente a la derecha o en el sentido de las agujas del reloj; Si la rotación es en sentido contrario a las agujas del reloj, la onda es polarizada circularmente a la izquierda o en sentido contrario a las agujas del reloj. La rotación del componente líder de fase hacia el componente de retraso de fase debe hacerse a lo largo de la separación angular entre los dos componentes que es inferior a 180° . Las fases iguales o mayores de 0° y menores de 180° deben considerarse considerables mientras que aquellas iguales o mayores que 180° e inferiores a 360° deben considerarse retrasadas [6].

Polarización elíptica: Una onda armónica en el tiempo es polarizada elípticamente si la punta del vector de campo eléctrico o magnético, traza un locus elíptico en el espacio.

En varios instantes de tiempo, el vector de campo cambia continuamente con el tiempo de tal manera que describe un locus elíptico. Es polarizado elípticamente a la derecha si el vector de campo gira en el sentido de las agujas del reloj y es polarizado elípticamente a la izquierda si el vector de campo de la elipse gira en sentido contrario a las agujas del reloj. El sentido de rotación se determina usando las mismas reglas que para la polarización circular. Además de la sensación de rotación, las ondas elípticamente polarizadas también se especifican por su relación axial cuya magnitud es la relación entre el eje mayor y el eje menor. Las condiciones necesarias y suficientes para lograr esto son si el vector de campo eléctrico o magnético posee todas las características siguientes [6]:

- El campo debe tener dos componentes lineales ortogonales.
- Los dos componentes pueden ser de la misma o diferente magnitud.
- (1) Si los dos componentes no son de la misma magnitud, la diferencia tiempo-fase entre los dos componentes no debe ser 0° o múltiplos de 180° ya que será lineal.
- (2) Si los dos componentes son de la misma magnitud, la diferencia tiempo-fase entre los dos componentes no debe ser múltiplos impares de 90° ya que será circular.

Si la onda está polarizada elípticamente con dos componentes no de la misma magnitud pero con múltiplos impares de 90° diferencia tiempo-fase, la elipse de polarización no estará inclinada pero estará alineada con los ejes principales de los componentes de campo. El eje principal de la elipse se alineará con el eje del componente de campo que es mayor de los dos, mientras que el eje menor de la elipse se alineará con el eje del componente de campo que es más pequeño de los dos [6].

El campo instantáneo de una onda plana, que se desplaza en dirección negativa, puede escribirse como:

$$\mathbf{E}(z;t) = \hat{a}_x \mathbf{E}_x(z;t) + \hat{a}_y \mathbf{E}_y(z;t) \quad (2.24)$$

Los componentes instantáneos están relacionados con sus contrapartes complejas como se ve a continuación.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_x(z;t) &= \text{Re} \left[\mathbf{E}_x - e^{j(\omega t + kz)} \right] = \text{Re} \left[\mathbf{E}_{x0} e^{j(\omega t + kz + \phi_x)} \right] \\ &= \mathbf{E}_{x0} \cos(\omega t + kz + \phi_x)\end{aligned}\quad (2.25)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_y(z;t) &= \text{Re} \left[\mathbf{E}_y - e^{j(\omega t + kz)} \right] = \text{Re} \left[\mathbf{E}_{y0} e^{j(\omega t + kz + \phi_y)} \right] \\ &= \mathbf{E}_{y0} \cos(\omega t + kz + \phi_y)\end{aligned}\quad (2.26)$$

Donde E_{x0} y E_{y0} son, respectivamente, las magnitudes máximas de las componentes x y y .

- A. Polarización lineal: Para que la onda tenga polarización lineal, la diferencia tiempo-fase entre los dos. Los componentes deben

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.27)$$

- B. Polarización circular: La polarización circular sólo puede lograrse cuando las magnitudes de los dos componentes son iguales y la diferencia de tiempo-fase entre ellos es múltiplos impares de $\pi/2$.

$$|\mathbf{E}_x| = |\mathbf{E}_y| \rightarrow E_{x0} = E_{y0} \quad (2.28)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n=0,1,2,\dots \text{ para CW} \\ -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, & n=0,1,2,\dots \text{ para CCW} \end{cases}, \quad (2.29)$$

$$(2.30)$$

donde

CW: Sentido de las agujas del reloj.

CCW: Sentido antihorario.

Si se invierte la dirección de propagación de la onda es decir, dirección $+z$, las fases en (2.29) y (2.30) para la rotación *CW* y *CCW* deben ser intercambiadas.

- C. Polarización elíptica: La polarización elíptica puede alcanzarse sólo cuando la diferencia de tiempo-fase entre los dos componentes es múltiplos impares de $\pi/2$

y sus magnitudes no son iguales o cuando la diferencia de tiempo-fase entre los dos componentes no es igual a múltiplos de $\pi/2$ y esto es independientemente de sus magnitudes.

Es decir,

$$|\mathbf{E}_x| \neq |\mathbf{E}_y| \rightarrow \mathbf{E}_{x0} \neq \mathbf{E}_{y0} \quad (2.31)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +\left\{\frac{1}{2}+2n\right\}\pi \text{ para CW} \\ -\left\{\frac{1}{2}+2n\right\}\pi \text{ para CCW} \end{cases} \quad (2.31a)$$

$$(2.31b)$$

Cuando $n=1,2,\dots$

O también

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi = \begin{cases} > 0 \text{ para CW} \\ < 0 \text{ para CCW} \end{cases} \quad (2.32)$$

$$n=0,1,2,3,\dots \quad (2.33)$$

Para la polarización elíptica, la curva trazada en una posición dada en función del tiempo es, en general, una elipse inclinada. La relación entre el eje principal y el eje menor se denomina relación axial (AR) y es igual a:

$$AR = \frac{\text{Eje principal}}{\text{Eje menor}} = \frac{OA}{OB}, \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.34)$$

Donde

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ \mathbf{E}_{x0}^2 + \mathbf{E}_{y0}^2 + \left[\mathbf{E}_{x0}^4 + \mathbf{E}_{y0}^4 + 2\mathbf{E}_{x0}^2 \mathbf{E}_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi) \right]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ \mathbf{E}_{x0}^2 + \mathbf{E}_{y0}^2 - \left[\mathbf{E}_{x0}^4 + \mathbf{E}_{y0}^4 + 2\mathbf{E}_{x0}^2 \mathbf{E}_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi) \right]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.36)$$

La inclinación de la elipse, relativa al eje y , está representada por el ángulo τ dado por

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\mathbf{E}_{x0}\mathbf{E}_{y0}}{\mathbf{E}_{x0}^2 - \mathbf{E}_{y0}^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.37)$$

Cuando la elipse está alineada con los ejes principales $[\tau = n\pi/2, n=0,1,2,\dots]$, El eje mayor es igual a $E_{x0}(E_{y0})$ ó $E_{y0}(E_{x0})$ y la relación axial es igual a E_{x0}/E_{y0} o E_{y0}/E_{x0} .

2.5.9 IMPEDANCIA

La radiación de una antena es un resultado directo del flujo de corriente de *RF*. La corriente va hacia la antena pasando por una línea de transmisión, que está conectada con un espacio pequeño entre los conductores que forman la antena. El punto de la antena donde se conecta la línea de transmisión se llama terminal de entrada de la antena, o punto de alimentación. El punto de alimentación presenta una carga de *CA* a la línea de transmisión, llamada impedancia de entrada de la antena. Si la impedancia de salida del transmisor y la impedancia de entrada de la antena son iguales a la impedancia característica de la línea de transmisión, no habrá ondas estacionarias en la línea y se transmitirá una potencia máxima a la antena, potencia que será irradiada. La impedancia de entrada de una antena es solo la relación del voltaje de entrada a la antena a la corriente de entrada a la misma. Se expresa del siguiente modo, [2]:

$$Z_{ent} = \frac{E_i}{I_i}, \quad (2.38)$$

donde

Z_{ent} : Impedancia de entrada a la antena (*ohms*)

E_i : Voltaje de entrada a la antena (*volts*)

I_i : Corriente de entrada a la antena (*amperes*)

La impedancia de entrada a la antena es compleja; sin embargo si el punto de alimentación está en un máximo de corriente y no hay componente reactivo, la impedancia de entrada es igual a la suma de la resistencia de radiación más la resistencia efectiva.

2.5.10 ADAPTACIÓN

En recepción, la antena se conecta a una línea de transmisión o se conecta directo al receptor y su impedancia es la misma que en transmisión. Este es un parámetro que mide la acomodación de las impedancias de entrada así como la de salida del sistema, es decir que permite medir el emparejamiento existente entre la impedancia de la salida de la antena y la impedancia de entrada al receptor, esto con el objetivo de conseguir una máxima transferencia de potencia entre ambos y disminuir las pérdidas de potencia debidas a las reflexiones. Para ello, las impedancias deben ser iguales y tanto la de la antena $Z_a = R_a + jX_a$, como la de la carga del receptor $Z_L = R_L + jX_L$ deben ser complejas conjugadas $Z_L = Z_a^*$, de forma que la máxima potencia entregada a la carga pueda expresarse como:

$$P_{L\max} = \frac{|V_{ca}|^2}{4R_a}, \quad (2.39)$$

Y si no hay adaptación, la potencia entregada a la carga se puede calcular como

$$P_L : P_{L\max} C_a = P_{L\max} (1 - |\rho|^2), \quad (2.40)$$

Donde C_a corresponde al coeficiente de desadaptación y este puede calcularse como:

$$C_a = \frac{4R_a R_L}{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2}, \quad (2.41)$$

Existe otro modo de determinar la adaptación de las antenas y a través de la observación de la representación gráfica del coeficiente de reflexión (S_{11}) de las mismas ya que estas proporcionan información sobre la transferencia de potencia. El coeficiente de reflexión de una antena respecto a la línea de transmisión o el receptor, es un parámetro que describe la amplitud o intensidad de la onda reflejada, que se produce cuando la onda incidente

atraviesa dos medios con propiedades de propagación de onda distintas. Se puede expresar tal y como se describe en la ecuación (2.42) donde Z_a es la impedancia de entrada de la antena y Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión, representándose en escala logarítmica. Para dar por hecho que la antena está adaptada, la gráfica debe presentar un valor inferior a -10 dB en la frecuencia o banda de frecuencias para la que se desea obtener adaptación y esto indica que las pérdidas de reflexión son despreciables y se transmite un mínimo de 90% de la potencia máxima a la carga.

$$\rho = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0}, \quad (2.42)$$

2.5.11 LONGITUD EFECTIVA.

La longitud efectiva de una antena, ya sea una antena lineal o una antena de apertura, es una cantidad que se utiliza para determinar la tensión inducida en los terminales de circuito abierto de la antena cuando una onda incide sobre ella, La longitud efectiva del vector para una antena es generalmente una cantidad vectorial compleja representada por la ecuación 2.43, [6].

$$\mathbf{L}_e(\theta, \phi) = \hat{a}_\theta l_\theta(\theta, \phi) + \hat{a}_\phi l_\phi(\theta, \phi), \quad (2.43)$$

Debe tenerse en cuenta que también se denomina altura efectiva. Es una cantidad de campo lejano y está relacionada con el campo de la zona lejana \mathbf{E}_a radiada por la antena, con la corriente I_{in} en sus terminales.

$$\mathbf{E}_a = \hat{a}_\theta E_\theta + \hat{a}_\phi E_\phi = -j\eta \frac{kl_{in}}{4\pi r} \mathbf{I}_e e^{-jkr}, \quad (2.44)$$

La longitud efectiva representa la antena en sus modos de transmisión y recepción y es particularmente útil para relacionar la tensión de circuito abierto V_{oc} de las antenas de recepción. Esta relación puede expresarse como se observa en la ecuación 2.45.

$$V_{oc} = \mathbf{E}^i \cdot \mathbf{I}_e, \quad (2.45)$$

donde:

V_{oc} : Voltaje de circuito abierto en terminales de antena

\mathbf{E}^i : Campo eléctrico incidente

\mathbf{l}_e : Longitud efectiva del vector

En la ecuación 2.37 V_{oc} puede considerarse como el voltaje inducido en una antena lineal de longitud \mathbf{l}_e cuando \mathbf{l}_e y \mathbf{E}^i están polarizados linealmente. A partir de la relación de (2-93), la longitud efectiva de una antena polarizada linealmente que recibe una onda plana en una dirección dada se define como la relación de la magnitud del voltaje de circuito abierto desarrollado en los terminales de la antena a la magnitud de la intensidad del campo eléctrico en la dirección de la polarización de la antena. Alternativamente, la longitud efectiva es la longitud de un conductor recto delgado orientado perpendicularmente a la dirección dada y paralelo a la polarización de la antena, con una corriente uniforme igual a la de los terminales de antena y produciendo la misma intensidad de campo lejano que la antena en esa dirección., [6].

2.5.12 AREA EFECTIVA.

Con cada antena, podemos asociar un número de áreas equivalentes. Éstas se utilizan para describir las características de captura de energía de la antena cuando una onda incide en ella. Una de estas áreas equivalentes es el área efectiva (abertura), que en una dirección dada se define como la relación entre la potencia disponible en los terminales de una antena receptora y la densidad de flujo de potencia de una onda plana incidente sobre la antena desde esa dirección, estando la onda polarizada con la antena. Si no se especifica la dirección, la dirección de la máxima intensidad de radiación está implícita, [6]. En forma de ecuación se escribe como:

$$A_e = \frac{P_T}{W_i}, \quad (2.46)$$

donde:

A_e : Área efectiva (apertura efectiva) (m^2)

P_T : Potencia suministrada a la carga (W)

W_i : Densidad de potencia de la onda incidente (W / m^2)

CAPITULO III ANTENA YAGI-UDA

El nombre de la antena puede parecer bastante inusual y se derivó de los nombres de sus dos inventores japoneses Yagi y su estudiante Uda, [10]. El uso común a menudo nos hace referirse al Yagi como un haz. Ejemplo: La antena de aquí es un haz de tres elementos o la antena de aquí es un haz tribanda de tres elementos. En general, cuando se oye una antena física conocida como haz, casi siempre se puede interpretar que significa Yagi. Mientras que los términos tales como la anchura del haz pueden pertenecer a las características de cualquier tipo de antena, la antena del haz es invariablemente sinónimo del Yagi, [9]. La primera investigación realizada de la antena de Yagi-uda fue realizada por Shintaro Uda en la Universidad de Tohoku en Sendai, Japón, en 1926 y fue publicada en japonés en 1926 y 1927, [5]. Y sorprendentemente, la Yagi ha existido durante 85 años, habiendo sido descrito por primera vez en público por sus inventores en 1926, [9]. Las antenas Yagi-Uda hoy en día son ampliamente utilizadas como antenas de alta ganancia en las bandas de alta frecuencia (HF), frecuencia muy alta (VHF) y ultra alta (UHF), [11]. Son usadas mayormente para todas las antenas de TV y también son utilizadas por radioaficionados, [10] pero al principio la Yagi no era empleada para las frecuencias altas hasta después de la segunda guerra mundial cuando la disponibilidad de tubos de aluminio fueron factibles para el promedio de los radio aficionados, [9]. Lo que hace muy conocida esta antena es que puede ser diseñado para cumplir con las prestaciones de radiación, tales como alta relación F / B y SLL's bajos sin olvidar la ganancia, directividad, punto de alimentación de elemento único, un ancho de banda relativamente estrecho y todo en un espacio muy pequeño. Además, cuenta con atractivos méritos como peso ligero, bajo costo, fácil de fabricar y también soporta los rigores del clima, [11]. La matriz Yagi-Uda típica consiste en muchos dipolos paralelos con diferentes longitudes y espaciamientos. Sólo se energiza uno de los dipolos, este es su componente fundamental y todos los demás elementos son parasitarios y pueden funcionar respectivamente como reflector o como director, [12]. La forma clásica de la yagi se encuentra ilustrada en la figura 3.1, [1].

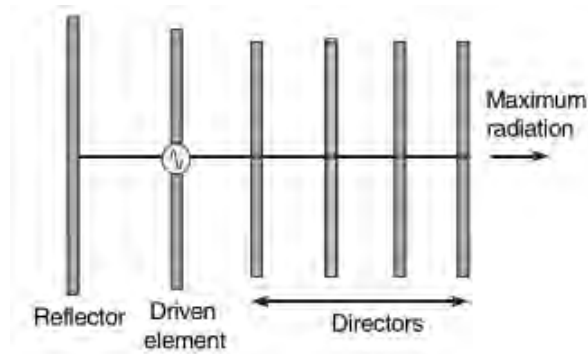


Figura 3.1 Antena Yagi-Uda

Si el elemento parásito se hace inductivo, se verá que las corrientes inducidas están en tal fase que reflejan la potencia. Esto hace que la antena irradie energía más en una dirección que en otra. Un elemento que hace esto se llama un reflector. Se puede hacer inductivo haciéndolo aproximadamente 5% más largo que el elemento irradiante. Este reflector se añade a la antena y un ejemplo se puede ver en la Figura 3.2, [10].

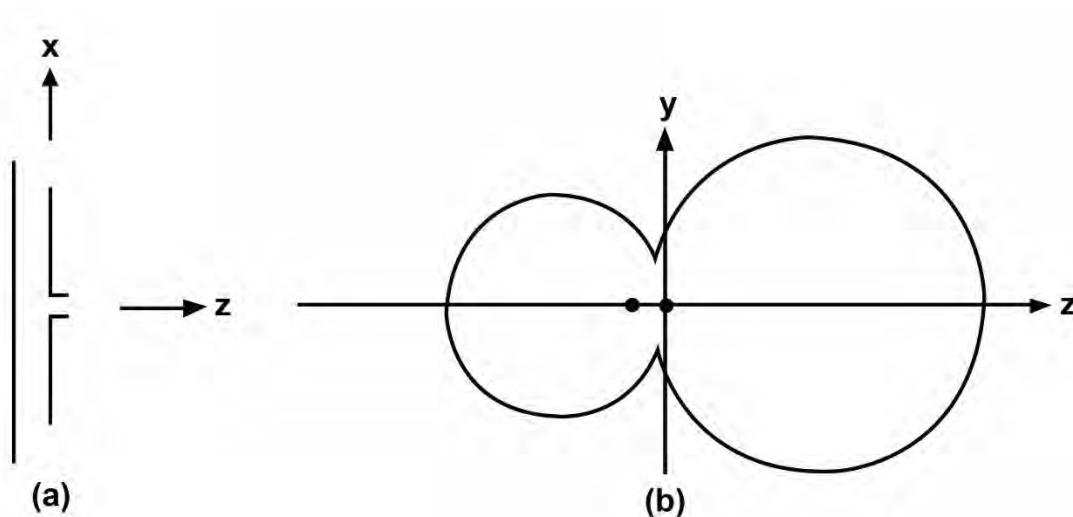


Figura 3.2 Yagi-Uda de dos elementos. Conductor de 0.4781λ y un reflector de 0.49λ . (a) Configuración de la matriz (b) Patrón Plano H.

Si el elemento parásito se hace capacitivo, se verá que las corrientes inducidas están en una fase tal que dirigen la potencia radiada por toda la antena en la dirección del elemento parásito. Un elemento que hace esto se llama un director. Puede hacerse capacitivo comúnmente haciéndolo aproximadamente 5% más corto que el elemento irradiante. Se agrega un director a la antena. Un ejemplo se muestra en la Figura 3.3, [10].

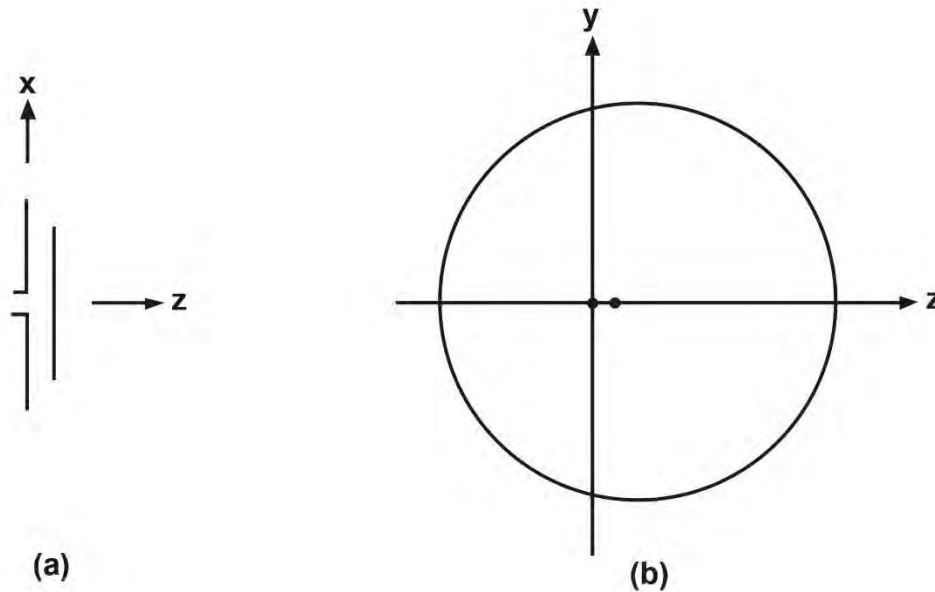


Figura 3. 3 Yagi-Uda de dos elementos. Conductor de 0.4781λ y un director de 0.45λ . (a) Configuración de la matriz (b) Patron Plano H.

El Yagi básica es una antena planar, con todos los elementos que se encuentran en el mismo plano y que comparten la misma orientación. Aunque no existe una regla fija con respecto al número de reflectores o directores, es una práctica común utilizar una combinación de un solo reflector y uno o más directores, además del elemento radiante. Se ha encontrado que más de un reflector proporciona poca mejora. Por otro lado, la adición de más directores aumenta la ganancia. La matriz general Yagi que incluye varios directores se muestra en la Figura 3.4, [5].

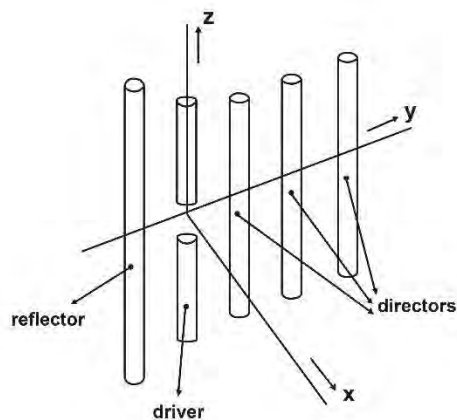


Figura 3. 4 Antena Yagi-Uda de cinco elementos, un reflector, tres directores.

3.1 GANANCIA

La ganancia de un Yagi depende principalmente del número de elementos que tiene la antena. Sin embargo, el espaciamiento entre los elementos también tiene un efecto. En términos de ganancia se encuentra que el espaciamiento no es particularmente crítico. Siempre que se escoge aproximadamente el espaciamiento correcto, el ajuste sólo hará cambios en la ganancia de una fracción de un decibel. Para la mayoría de los propósitos, el espaciado estará en algún lugar en la región de 0,15 a 0,3 de una longitud de onda. La ganancia obviamente variará ligeramente de una antena a otra dependiendo de una serie de factores. Sin embargo, un diseño de dos elementos dará un máximo de alrededor de 5 dB de ganancia sobre un dipolo. Si se agrega un director se puede obtener una ganancia total de alrededor de 7dB. Los directores adicionales darán más ganancia por lo que la cantidad real dependerá de cuántos directores se utilizan. Obviamente, cuantos más directores, mayores son los beneficios. Sin embargo, la cantidad de ganancia que un director adicional dará dependerá de cuántos ya hay. También no hay que olvidar que las longitudes de la alimentación y los elementos del primer director tienen el mayor efecto sobre la ganancia, [10]. A medida que aumenta la ganancia de la antena, la anchura del haz se hace más estrecha. Esto significa que la antena debe colocarse con mucha precisión. A su vez, si hay que recibir estaciones de varias direcciones, esto requiere el uso de un rotador. De hecho, las estaciones de radioaficionados casi seguramente utilizarán un rotador si utilizan una Yagi. Generalmente el rotador será una forma de motor eléctrico que puede ser controlado desde la cabina de radio para apuntar la antena en una dirección dada. Hay una unidad de control en la que el operador establecerá una dirección. El motor girará entonces la antena hasta que la unidad de control detecte que la antena está en la dirección correcta. El sistema de rotores se instalará de modo que la antena no pueda girar más de 360 grados. Y eso es con la intención de que el alimentador no se envuelva alrededor del mástil. Al mirar la ganancia de la antena también es necesario considerar la relación de frente a atrás. Se puede ver desde el diagrama polar típico para una Yagi mostrado en la Figura 3.5 que hay un lóbulo significativo desde la parte posterior de la antena. No es posible obtener un nulo aquí porque el Yagi usa elementos parásitos. Si se usan dos elementos irradiantes, sería posible obtener un nulo ajustando las fases relativas de los dos elementos. Aun así, debería ser posible obtener una relación de frente a atrás de 10 dB en una Yagi, [10]. La ganancia de

una antena yagi-Uda es una función altamente no lineal con respecto a las dimensiones físicas, [11]. Y la directividad máxima depende de la longitud a lo largo de la dirección del haz y no del número de elementos, [13].

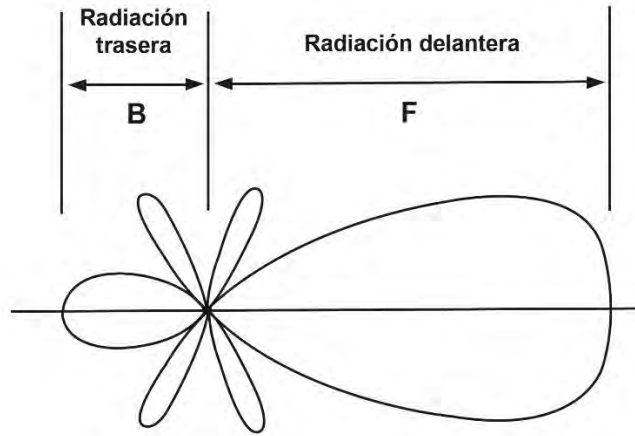


Figura 3.5 Diagrama polar típico de una Yagi-Uda

3.2 IMPEDANCIA DE ALIMENTACIÓN

Aparte de alterar la ganancia, la separación de los elementos altera la impedancia de alimentación de la antena. De hecho, tiene un efecto mucho mayor en esto que la ganancia para la mayoría de los casos. Alterando la separación es posible asegurar que se consigue una buena coincidencia entre el alimentador y la propia antena. La adición de otros elementos complica considerablemente la cuestión, pero generalmente se reducirá la impedancia. En cualquier caso, se necesita una cierta cantidad de experimentación para perfeccionar el diseño. La mayoría de diseños yagi emplean espaciados relativamente estrechos entre los elementos para mantener la longitud del brazo dentro de límites razonables. Con el fin de superar la reducción de la impedancia de alimentación que esto provoca un elemento plegado dipolo irradiante que se utiliza normalmente. Esto tuvo el beneficio adicional de que el ancho de banda se incrementa, [10]. La antena se analiza en el plano E y el plano H. El plano E es el plano que contiene el vector del campo eléctrico y la dirección de la radiación máxima. En la Figura 3.6, el plano E es el plano yz ($\phi = 90^\circ$). El plano H es el plano que contiene el vector del campo magnético y la dirección de máxima radiación. En la Figura 3.6, el plano H es el plano xy ($\theta = 90^\circ$), [14].

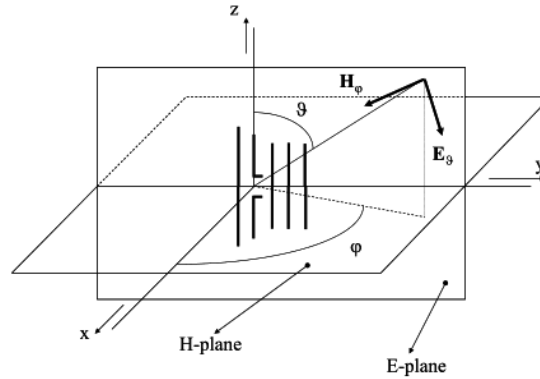


Figura 3.6 Orientación de antena Yagi-Uda.

3.3 OPERACIÓN

La Figura 3.7 muestra el patrón de espacio libre típico de la antena Yagi. La antena, situada en el punto P, genera señales en todas las direcciones, pero el patrón de formación de haz creado por la configuración física de sus elementos hace que la fuerza relativa de la señal sea como se muestra por la envolvente de línea continua en dicha figura, con la dirección de la intensidad máxima de la señal indicada por la flecha. La anchura de haz de la antena se define como el ángulo α entre los puntos en el lóbulo principal que son 3 dB por debajo del pico en el punto C.

Una antena de haz perfecto tendrá sólo el lóbulo principal o haz, pero esa situación no es posible. Todas las antenas no teóricas tienen lóbulos laterales y lóbulos posteriores, también mostrados en la Figura 3.7. Estos lóbulos representan no sólo la energía desperdiciada transmitida en la dirección equivocada durante la transmisión, sino también las oportunidades de interferencia al recibir. El objetivo del diseñador de la antena es aumentar la amplitud del lóbulo principal mientras que disminuye el de los lóbulos laterales y los lóbulos traseros. Afortunadamente, a menudo es posible efectuar una reducción sustancial en los lóbulos laterales y los lóbulos traseros con sólo una ligera reducción en la ganancia del lóbulo principal u otros parámetros deseables tales como ancho de banda ancho o que coincida con la impedancia de la línea de transmisión, [9].

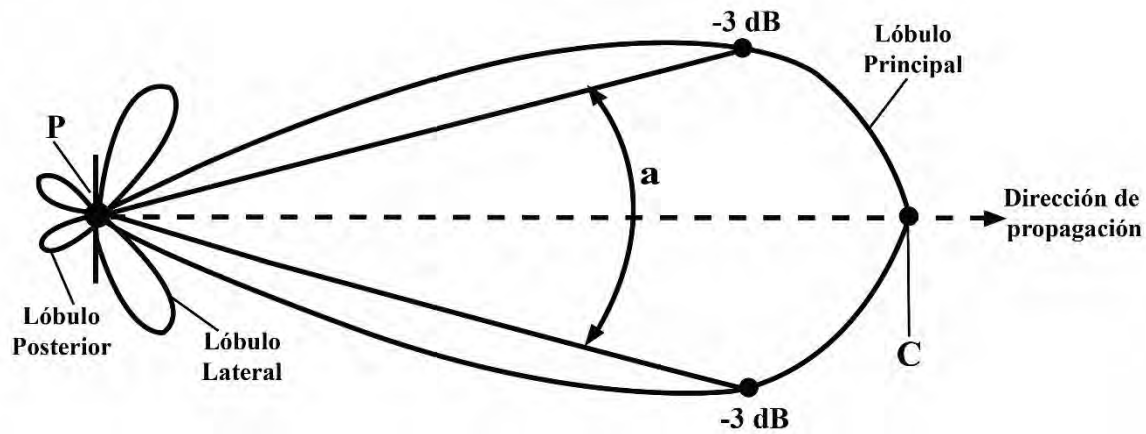


Figura 3.7 Patrón típico de una antena de haz

Además de un elemento irradiante, las antenas Yagi también emplean reflectores y directores y se les llama elementos parasitarios porque no están directamente conectados al alimentador coaxial, [10]. En su lugar, el campo de radiación del elemento irradiante induce corrientes en los parásitos, haciendo que irradien y a su vez vuelven a re-direccionar. La combinación de energía re-emanada de los elementos parásitos con la radiación original del elemento irradiante provoca picos y campos nulos de radiación a una distancia de la antena, [9].

El elemento irradiante de una Yagi-Uda es nada más que un dipolo de media onda. La energía de RF que se le suministra a través de la línea de alimentación conectada en sus terminales centrales crea corrientes de RF y campos magnéticos que irradian desde el elemento. Cuando estos campos de radiación llegan a un elemento parásito ya sea un reflector o un director, inducen campos y corrientes en ese elemento porque es un conductor. Pero debido a que cada elemento parasitario se hace deliberadamente más corto cuando se usa como un director o cuando se usa como reflector se hace más largo que una longitud de onda exacta a la frecuencia de operación, los campos inducidos no establecen las mismas relaciones de amplitud y fase en el elemento parásito que existe en el elemento irradiante. Estas corrientes inducidas hacen cada elemento parásito en un radiador en su propio derecho. Es decir, cada director o cada reflector irradia ahora un campo RF tal como lo hace el elemento irradiante. Sin embargo, la radiación de RF de un reflector, por

ejemplo, tiene una fase diferente de la del elemento irradiante y se origina en un punto diferente en el espacio que ocupa el elemento irradiante.

Los campos radiados creados por los campos inducidos y las corrientes en los elementos parásitos viajan en todas direcciones hacia el espacio. Y en cada punto en el espacio, se combinan linealmente y vectorialmente es decir, tanto en amplitud como en fase, con los campos radiados originales del elemento irradiante. Debido a que la radiación de cada elemento tiene su propia fase y amplitud únicas, la resultante es un patrón de radiación que exhibe picos y nulos.

Por definición un reflector, se coloca detrás del elemento irradiante es decir que se encuentra en el lado del elemento irradiante alejado u opuesto a la dirección de la radiación de señal máxima deseada. Y típicamente es un poco más largo que la mitad de la longitud de onda en el conductor a la frecuencia de operación. Si se utiliza un director, se coloca en la parte delante del elemento irradiante es decir que está en el lado del elemento irradiante que está en la dirección de la radiación máxima deseada. Y finalmente los espaciamientos entre elementos adyacentes de un Yagi típicamente están entre $0,1\lambda$ y $0,25\lambda$, donde λ es la longitud de onda en el aire, [9]. El rendimiento de las antenas Yagi-Uda depende en gran medida de las dimensiones físicas sensibles, como las longitudes de los elementos y los espaciamientos, por lo tanto si esto se elige adecuadamente entonces la radiación de los parásitos y el elemento irradiante agregan constructivamente en una dirección que a su vez estaría produciendo un aumento de la directividad, [1]. Cabe mencionar que la amplitud y la fase de la corriente que se induce en estos elementos depende también de su longitud, posición y del dipolo, [10].

Las características de la antena son controladas por las corrientes distribuidas en el elemento irradiante y las corrientes inducidas en los elementos parásitos a través del acoplamiento electromagnético, [11]. Es necesario mencionar que las características de esta se reflejan en todos los parámetros geométricos de la matriz. Afortunadamente, los cambios menores en la geometría también producen cambios menores en el rendimiento de la Yagi, [5]. El rendimiento de las antenas yagi-Uda depende en gran medida de las dimensiones físicas sensibles, como la longitud de los elementos y los espaciamientos. Los requisitos sobre la exactitud de fabricación para la realización de diseños óptimos imponen

una gran dificultad en la práctica, especialmente para antenas operadas a altas frecuencias, [11].

Las antenas Yagi se montan en un mástil que suele estar construido de aluminio tubular. No es necesario aislar los elementos parásitos del mástil porque muy poca corriente se excitará en él. Por supuesto, el elemento irradiante debe estar aislado para evitar el cortocircuito de los terminales. Cuando se utiliza un mástil de metal puede ser necesario aumentar ligeramente las longitudes de los elementos para lograr un rendimiento óptimo. En la mayoría de los casos, el elemento irradiante es un dipolo plegado. Esto tiene dos propósitos. En primer lugar, se incrementa la impedancia de entrada del controlador. En segundo lugar, el rendimiento eléctrico de la antena se mantendrá estable en un ancho de banda más amplio cuando se utiliza una alimentación de dipolo de carpeta, [5]. Se debe tener en cuenta que no es una tarea fácil proporcionar un buen diseño inicial para objetivos de diseño distintos. Es decir que es difícil desarrollar expresiones de formas cerradas para la determinación de longitudes de elementos y espaciamientos de antenas yagi-Uda para especificaciones de diseño particulares, [11].

3.4 VENTAJAS

El uso de una antena de haz direccional proporciona varias ventajas sobre una antena más omnidireccional, tal como un dipolo o una longitud aleatoria de alambre, [9]:

- La antena de haz proporciona un aumento aparente de la potencia radiada porque enfoca la potencia del transmisor disponible en una sola (o limitada) gama de dirección (s).
- Las antenas son generalmente dispositivos recíprocos, así que trabajarán para recibir muchas aplicaciones como hacen para transmitir. Cuando está dirigida a una fuente de señal deseada, la antena de haz aumenta la amplitud de la señal recibida disponible en la entrada del receptor del propietario en relación con el ruido interno del propio receptor. Esto es de gran importancia en las bandas VHF y UHF y no tan importante en las bandas de HF.
- La directividad de la antena del haz suele estar marcada por uno o más nulos agudos en los patrones de respuesta azimutal y de elevación. Este atributo

constituye la base de algunas técnicas populares de determinación de dirección VHF y UHF.

- El patrón de recepción de un Yagi disminuye sustancialmente la intensidad de las señales y el ruido de banda que viene desde las direcciones de la brújula a los lados y la parte posterior de la ruta de señal deseada, logrando así una mejora en la relación señal / ruido recibida. Este efecto es importante y muy útil en HF.
- Dado que el lóbulo delantero principal es relativamente ancho y el nulo de los lados muy agudo, pequeños cambios en el rumbo del haz para poner señales de interferencia en la parte más profunda del nulo pueden proporcionar un rechazo de 30 o 40 dB de una señal no deseada con una reducción de menos de 1 dB en la intensidad de la señal deseada, una característica extremadamente útil en las bandas de alta frecuencia de hoy en día.

Si se está considerando una actualización de estación pero el fondo es insuficiente como para proporcionar un amplificador y un mejor sistema de antenas, se recomienda invertir en antenas y no en amplificadores, ya que la antena ayuda con la recepción y transmisión.

3.5 RESUMEN

En resumen, algunas de los puntos más importantes a tener en cuenta al trabajar con antenas Yagi son los siguientes: , [9]

- Los espaciamientos inter-elementos exactos no son críticos en un Yagi; son típicamente 0,1 a 0,3 longitudes de onda para diseños comunes.
- Los espaciamientos de elementos proporcionan mayor ancho de banda de SWR y ganancia de avance más constante y relación F / B a través de toda la banda.
- Los espaciamientos de elementos más amplios para una cantidad determinada de elementos, proporcionan un mayor ancho de banda de SWR y una ganancia de avance más constante y una relación F / B en toda la banda.

- La ganancia máxima de avance y la relación F / B máxima rara vez ocurren a la misma frecuencia; en general, las longitudes más largas de la pluma facilitan la optimización de múltiples parámetros en un rango más amplio de frecuencias comunes.
- Como generalidad, la ganancia de una antena Yagi es proporcional al soporte de elementos. Rellenar elementos adicionales sobre una longitud fija del soporte generalmente empeora el rendimiento.
- Un reflector es tres por ciento más largo que la mitad de la longitud de onda en el conductor es un buen punto de partida. Dicho de otra manera, comience con una longitud del reflector que no sea mayor que $\lambda/2$ en el espacio libre o el aire.
- Un primer director es tres por ciento más corto que la mitad de la longitud de onda en el conductor, esto es un buen punto de partida.
- La mayoría de las antenas Yagis que están en la banda VHF y UHF usan elementos de un solo diámetro, por lo que los efectos de reducción no son un problema.. Sin embargo, el método exacto de pasar el centro del elemento a través, sobre o alrededor de la longitud de la antena puede tener un efecto significativo sobre la longitud eléctrica del elemento y el rendimiento de Yagi en esas frecuencias.
- Los elementos de alambre serán más largos que los elementos hechos de tubos de mayor diámetro, pero los elementos de diámetro escalonado son más largos que los de diámetro único.
- La longitud del elemento irradiante desempeña un papel relativamente menor en la optimización de los atributos únicos de Yagi como la ganancia directa, relaciones F / B y F / S , parte resistiva de la impedancia de punto de alimentación y en la mayoría de los diseños, la longitud del elemento irradiante se ajusta después de todos los demás ajustes, para hacer que la parte reactiva de la impedancia del punto de alimentación pase a cero.
- Aunque sea inherentemente una antena balanceada, una antena Yagi puede ser alimentada directamente con una línea desequilibrada tal como un cable coaxial con poco impacto en la ganancia hacia adelante; puede haber alguna

pérdida menor de simetría en el diagrama de radiación y probablemente será necesario añadir inductores de línea de alimentación en una o más ubicaciones a lo largo del cable para minimizar la captación en modo común y la radiación por la línea de alimentación.

- Los métodos de alimentación de una antena Yagi son: balun, la unión gamma, la unión T y la combinación de horquilla también llamada como unión beta.
- Existen muchos modelos de la antena Yagi comerciales con elementos acortados se encuentran disponibles. Los elementos acortados es con la intención de disminuir la carga del viento, el par de giro y el peso. Los métodos más comunes para acortar elementos incluyen trampas, bobinas de carga y cables de carga lineal.
- Montado en la parte superior de un soporte, las antenas Yagi son un objetivo primordial para las descargas de relámpagos y la estática de precipitación eólica. Además, las antenas Yagis en una torre pueden ya sea inadvertidamente o deliberadamente ser parte de un sistema capacitivo de carga superior de 160 o 80 m cuando la torre se utiliza como una vertical de transmisión en cualquiera de esas bandas. Los diseños de Yagi que mejor abordan estas preocupaciones tienen ambos lados de todos los elementos conectados al boom, ya sea directamente o a través de la red de coincidencia.

CAPITULO IV DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA YAGI

En este capítulo se describe el procedimiento realizado para el diseño de una antena Yagi mediante el software de simulación CST Studio para ello se utilizó una antena ya fabricada como referencia para comparar sus correspondientes parámetros simulados y medidas.

4.1 DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS Y CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE LA ANTENA

Para el diseño de la antena Yagi fue necesario como primer punto, determinar parámetros, como: número de elementos, medida de los elementos y la separación entre los mismos. Para este caso la antena contará con seis elementos básicos, como se aprecia en la Figura 4.1: un reflector, un dipolo y cuatro directores.

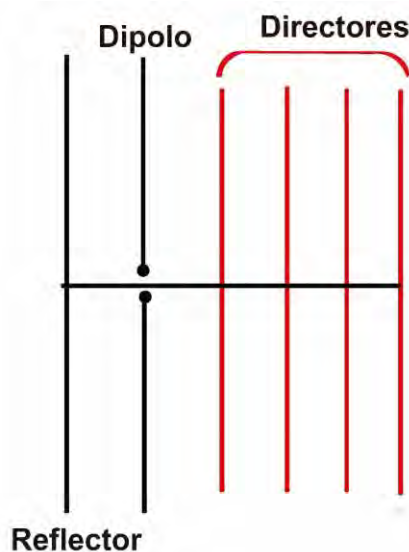


Figura 4.1 Antena Yagi de seis elementos

La fórmula de la longitud de onda está definida por:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4.1)$$

Por lo tanto, se tiene que $\lambda = 214.28 \text{ mm}$

Y con el valor de λ se obtienen los elementos básicos.

Tabla 4. 1 Cálculos de elementos

Elementos	Cálculos
Reflector	$\frac{\lambda}{2} = \frac{150}{f} [m] = 0.10714m$
Dipolo	$0.95 \frac{\lambda}{2} = 0.10171m$
1er Director	$0.9 \frac{\lambda}{2} = .09642m$
2do Director	$0.885 \frac{\lambda}{2} = .095m$
3er Director	$0.867 \frac{\lambda}{2} = .09285m$
4to Director	$0.860 \frac{\lambda}{2} = .09214m$

Ya obtenidos los elementos básicos es necesario también obtener la separación de cada elemento.

Tabla 4.2 Calculo de separación de elementos

Elementos	Separación
Dipolo-Reflector	$0.18\lambda = \frac{54}{f} [m] = .038571$
Dipolo- 1er Director	$0.09\lambda = \frac{27}{f} [m] = .01928m$
Directores consecutivos	$0.18\lambda = \frac{54}{f} [m] = .038571m$

4.2 SIMULACIÓN DE LA ANTENA

Para el diseño mediante simulación computacional de la antena propuesta, se siguieron los siguientes pasos:

Paso 1: Se inicia el software, lo primero que se apreciará es una ventana con diversas opciones, ver Figura 4.2. Se elegirá la opción New Template que permite crear un nuevo proyecto.

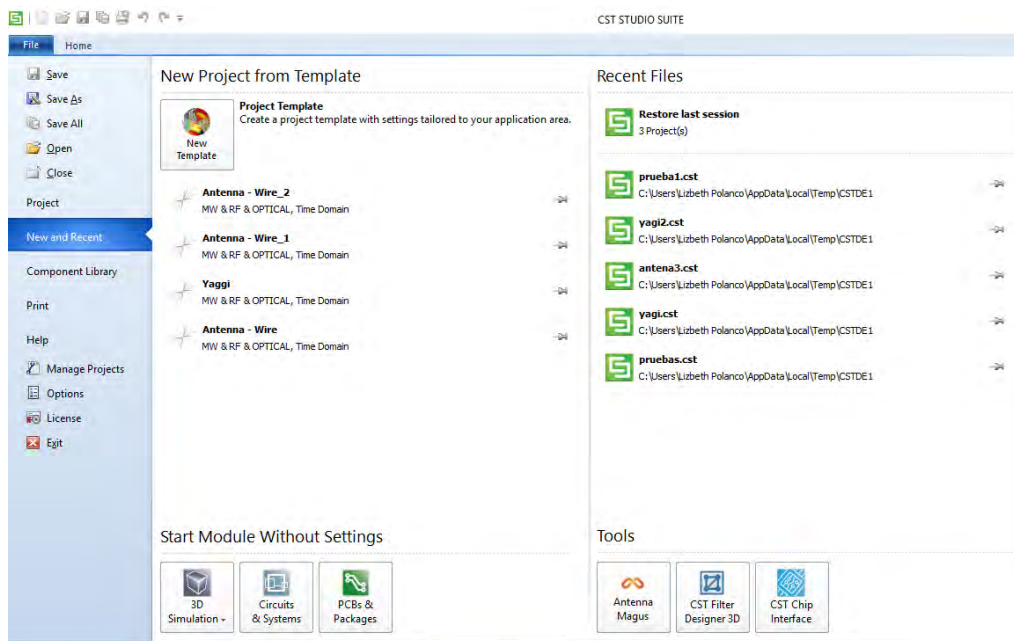


Figura 4.2 Ventana de nuevos proyectos

Paso 2: Cuando se da clic a la opción New Template, se desplegará una ventana que permitirá elegir un área de aplicación que está constituida por cinco opciones. Ver Figura 4.3.

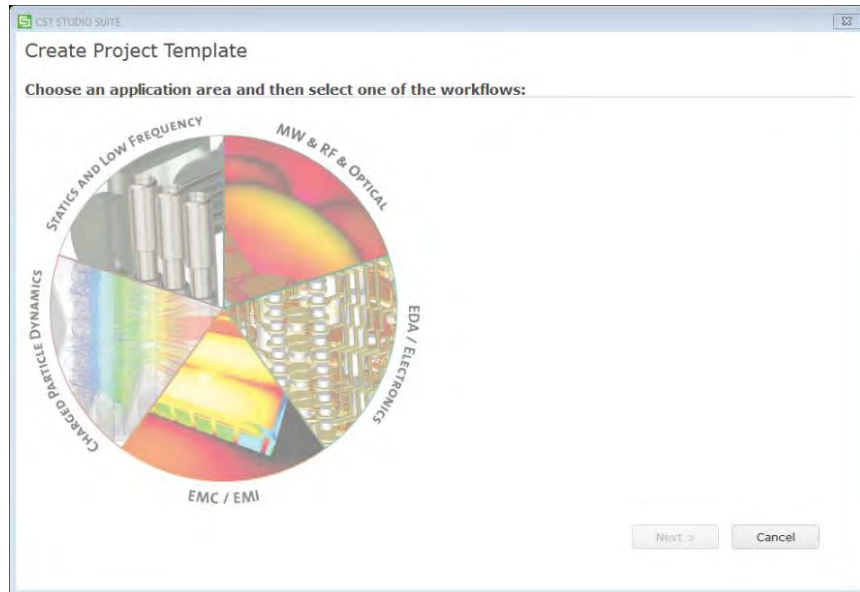


Figura 4.3 Ventana para elegir un área de aplicación

Paso 4: Se elegirá el área nombrada MW & RF & OPTICAL, por lo que al dar clic se mostrarán diversas opciones de aplicación. Ver la Figura 4.4.

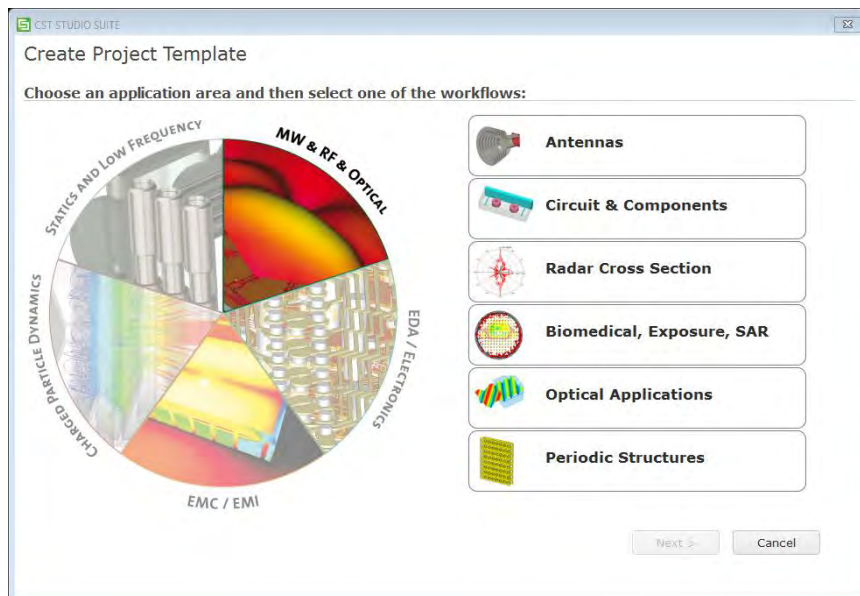


Figura 4.4 Opciones de área de aplicación

Paso 5: Se elige la opción de Antennas por que se desea simular una antena.

Paso 6: Lo siguiente es seleccionar el *workflow*, para esto se da clic la opción wire y se da en siguiente, como se aprecia en la Figura 4.5.

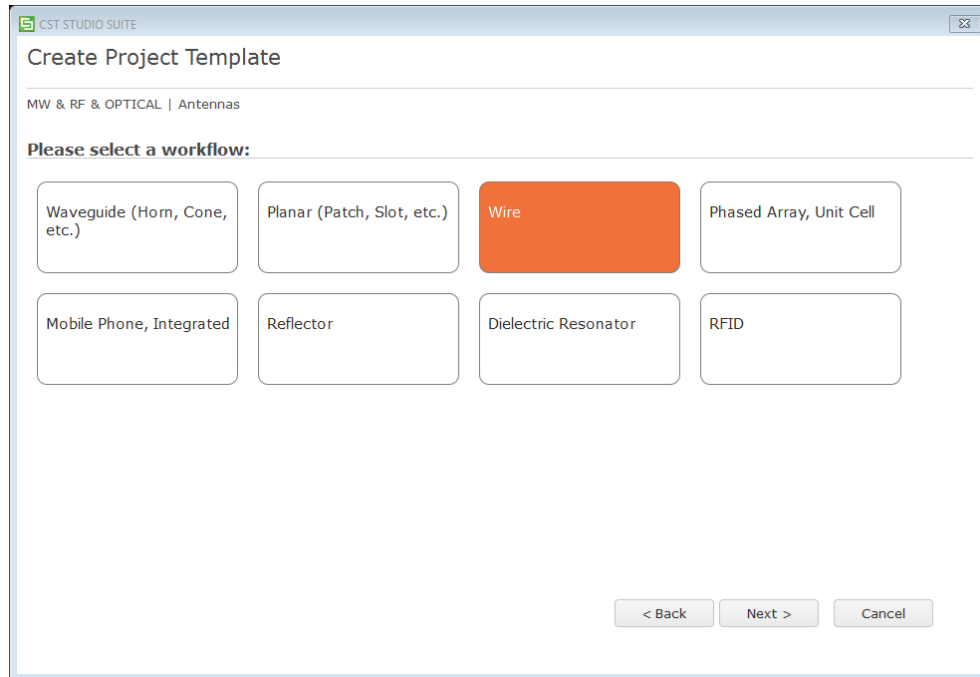


Figura 4. 5 Ventana para elegir workflow

Paso 7: Aparecerá otra ventana que permitirá elegir el *solver*. Como se puede observar en la Figura 4.6, se eligió la opción *Time domain* ya que es para antenas de cable.

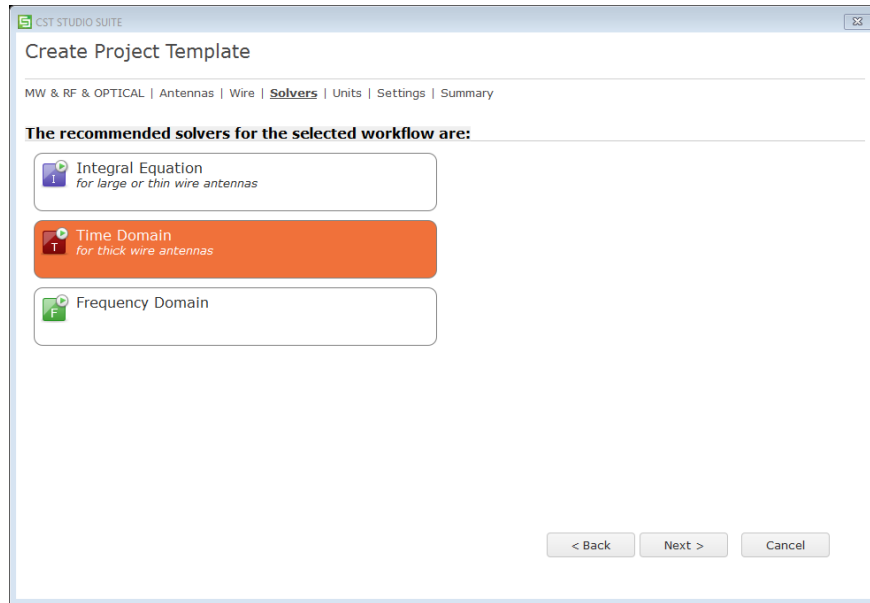


Figura 4.6 Ventana para elegir solver.

Paso 8: Lo siguiente que se realizará es establecer las unidades, por lo que solamente se optará por cambiar algunas opciones como dimensiones y frecuencia ya que se emplearan los milímetros (MM) y frecuencia (MHz) respectivamente como se logra apreciar a continuación en la Figura 4.7.

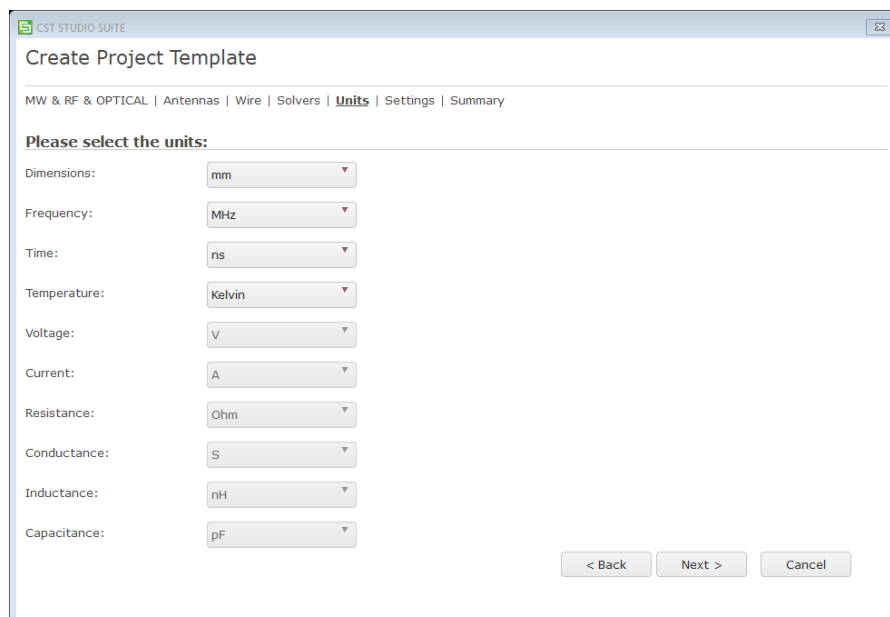


Figura 4.7 Ventana para establecer unidades

Paso 9: Ahora se establecerá el rango de la frecuencia en la que la antena estará, que para este caso será de 0 a 1.4 GHz como se ve a continuación en la Figura 4.8.

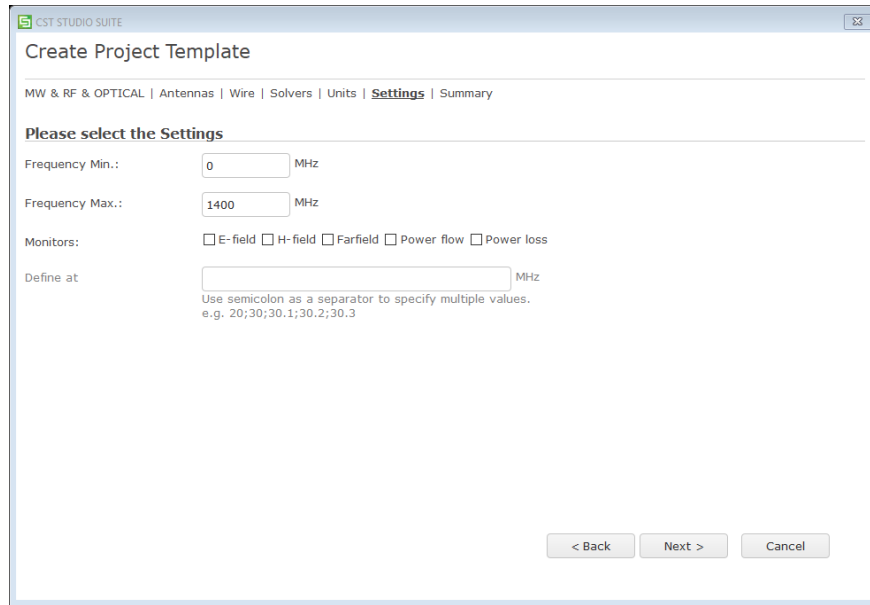


Figura 4.8 Ventana para establecer la frecuencia

Paso 10: Finalmente al establecer las configuraciones necesarias, se podrá visualizar un resumen de los parámetros que se configuraron y le damos Finalizar. Como en la Figura 4.9.

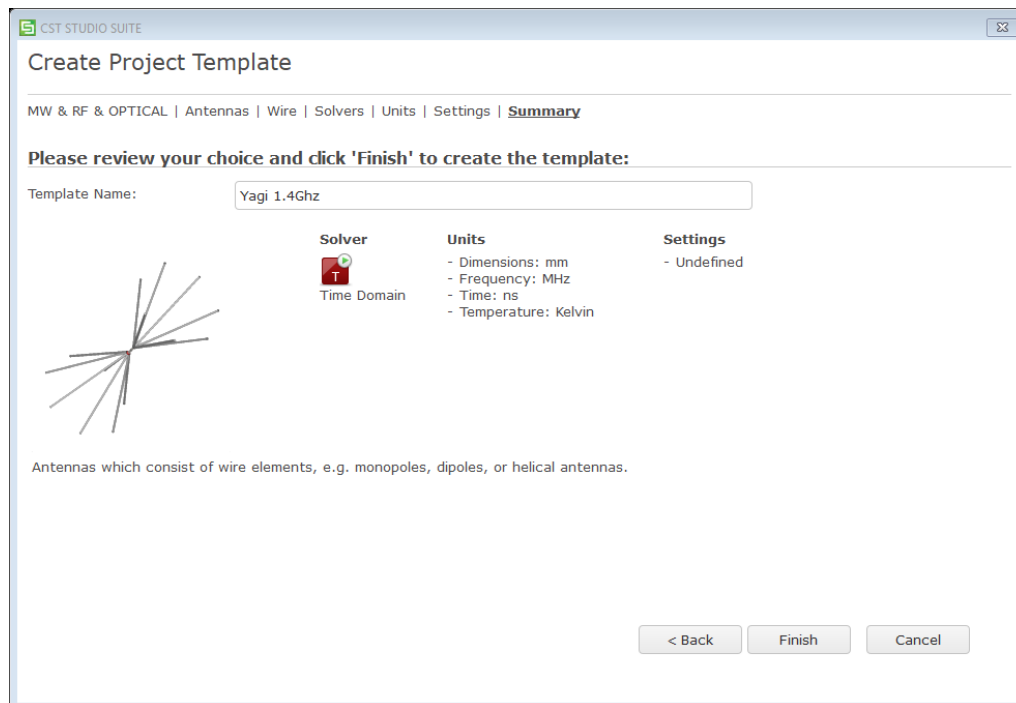


Figura 4.9 Resumen de configuraciones

Paso 11: Se podrá observar como carga el área de trabajo en la que se diseñara la antena, como se aprecia en la Figura 4.10.

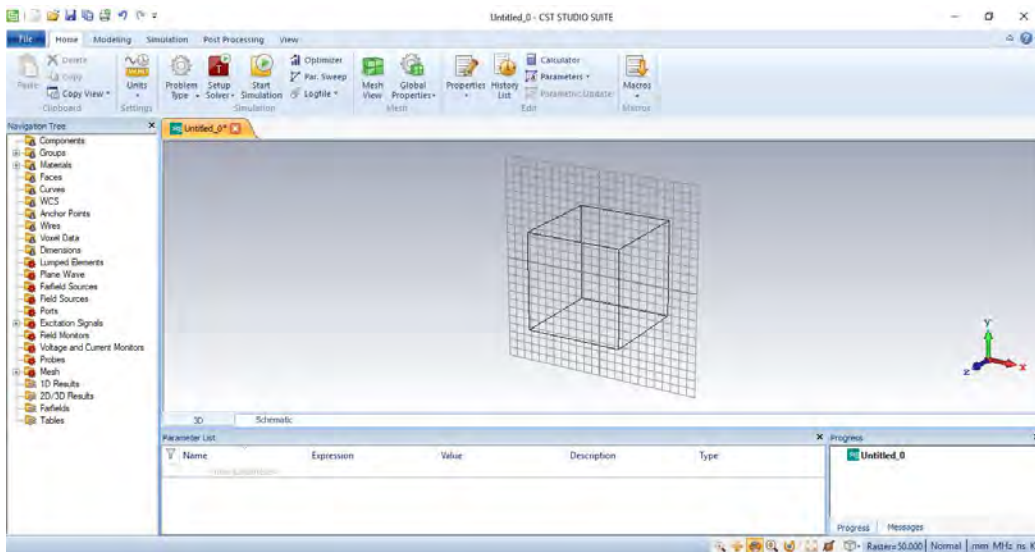


Figura 4.10 Área de trabajo del CST Studio.

Paso 12: Se ingresarán la lista de parámetros que se obtuvieron con los cálculos de las Tablas 4.1 y 4.2. Para llevar acabo esto es necesario situarse en la parte inferior del software y podremos ver un recuadro que se llama Parameter list. Ver Figura 4.11.



Figura 4. 11 Recuadro de lista de parámetros.

Paso 13: Se añadirán parámetros obtenidos con los cálculos de las Tablas 4.1 y 4.2 para realizar esto basta con solo darle clic en new parameter en la parte inferior del software y así sucesivamente para los demás elementos. Por lo que al finalizar después de añadir los parámetros se debe apreciar como en la Figura 4.12.

Name	Expression	Value	Description	Type
Frecuencia	= 1400	1400	Frecuencia	Frequency
Lambda	= 300000/1400	214.285714285...	Longitud de o...	Length
Reflector	= .5*Lambda	107.142857142...	Reflector	Length
Dipolo	= .475*Lambda	101.785714285...	Dipolo	Length
Director1	= .45*Lambda	96.4285714285...	Director 1	Length
Director2	= .4425*Lambda	94.8214285714...	Director 2	Length
Director3	= .4335*Lambda	92.8928571428...	Director 3	Length
Director4	= .43*Lambda	92.1428571428...	Director 4	Length
Sep1	= .18*Lambda	38.5714285714...	Reflector-Dip...	Length
Sep2	= .09*Lambda	19.2857142857...	Dipolo-Direct...	Length
Sep3	= .18*Lambda	38.5714285714...	Director1-Dire...	Length
Sep4	= .18*Lambda	38.5714285714...	Director2-Dire...	Length
Sep5	= .18*Lambda	38.5714285714...	Director3-Dire...	Length
R	= .003669*Lambda...	0.78621428571...	R Dipolo	Length
SepP	= 0.025*Lambda	5.35714285714...	Separacion	Length

Figura 4.12 Lista de parámetros

Paso 14: Finalizado lo anterior, se procede a añadir los elementos de la antena. Para esto se sitúa en la parte superior del software, en la pestaña denominada Modeling se apreciarán diversas figuras y se elegirá el cilindro que representarán las varillas de dicha antena.

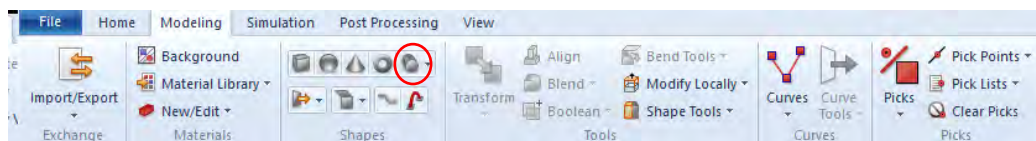


Figura 4.13 Herramientas del software

Enseguida el software pedirá ubicar el cilindro que será el reflector y para esto hay dos maneras, una es colocar con el puntero de manera libre en el área de trabajo o la otra es usando la tecla Esc, el cual permitirá visualizar la información del cilindro y de este modo usar las medidas que se obtuvieron. Por lo que en esta ocasión se optará por presionar la tecla ESC y aparecerá un recuadro con opciones de orientación como se puede ver en la Figura 4.14.

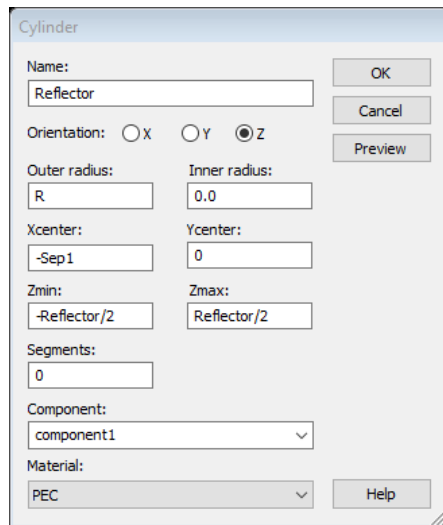
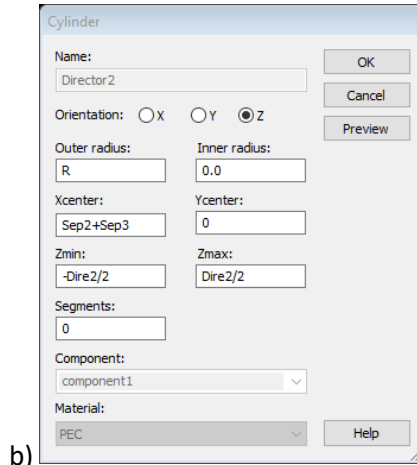
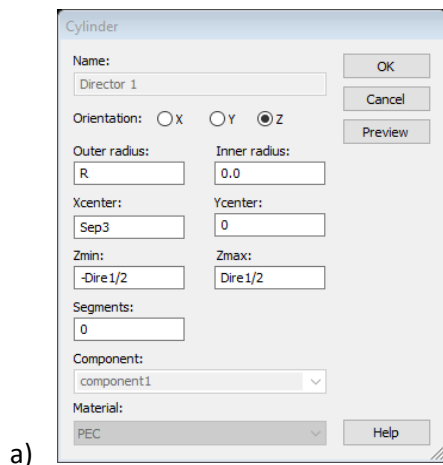


Figura 4.14 Configuración del Reflector.

Como se puede ver, los datos que se ingresaron son los que fueron obtenidos desde el principio en las Tablas de cálculo 4.1 y 4.2.

Paso 15: Lo siguiente será agregar todos los directores tal como se hizo con el reflector, lo que variará serán los parámetros obtenidos de las tablas. Ver Figuras 4.15.



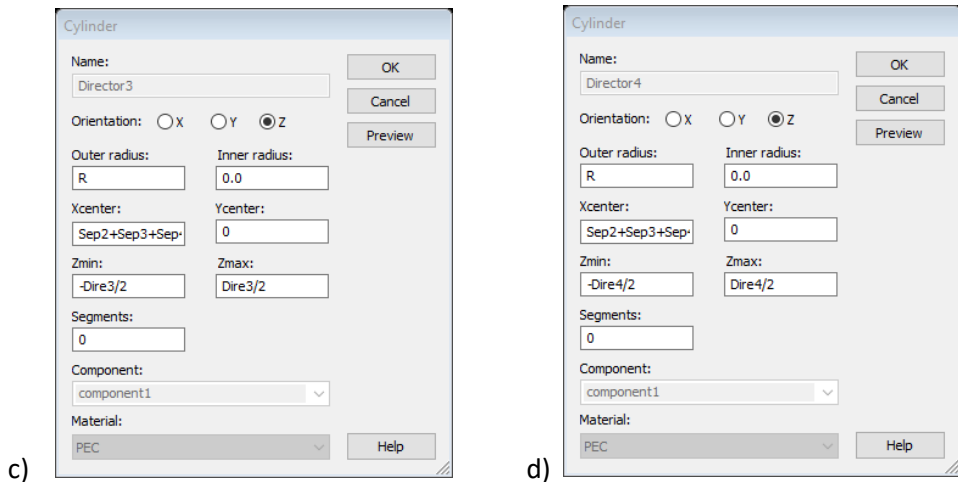


Figura 4.15 Configuración de directores. a) Director 1 b) Director dos c) Director tres d) Director cuatro

Ya una vez que se haya terminado de anexas los elementos con sus respectivos parámetros, se podrán visualizar los elementos correctamente añadidos en la siguiente área de trabajo.



Figura 4.16 Elementos de la antena

Paso 16: Se procede a añadir el último elemento faltante que es el dipolo. Para añadir este elemento será necesario simular un corte de un cilindro, para esto será necesario añadir un cubo el cual se encargará de realizar dicha simulación de corte ya que el software no permite realizar esta instrucción. Para añadir el cubo se ubica la opción en la pestaña Modeling y enseguida apreciamos la forma del cubo como se puede ver en la Figura 4.17.

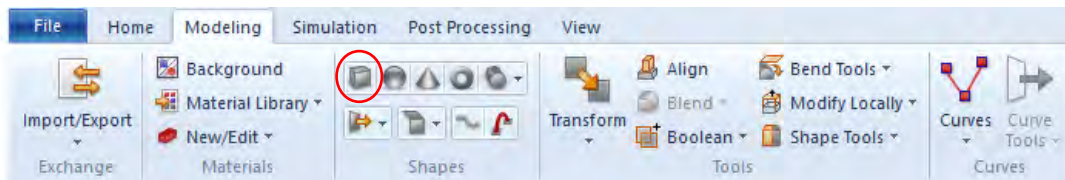


Figura 4.17 Herramientas del software.

Paso 17: El proceso de añadir el cubo es similar al de añadir los cilindros se presiona la tecla ESC. La configuración del cubo está dada por las Tablas de cálculo 4.1 y 4.2 y se puede apreciar en la Figura 4.18.

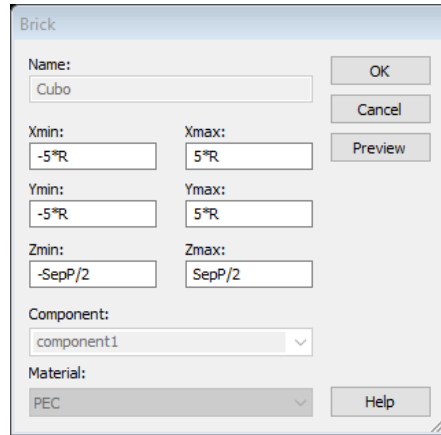


Figura 4.18 Configuración del cubo.

Paso 18: Ahora se necesita agregar el cilindro que será el dipolo y simulará estar cortado, de igual modo los parámetros que se ingresen son los que se obtuvieron en las tablas de cálculo. Por lo que se podrá visualizar como en la Figura 4.19.

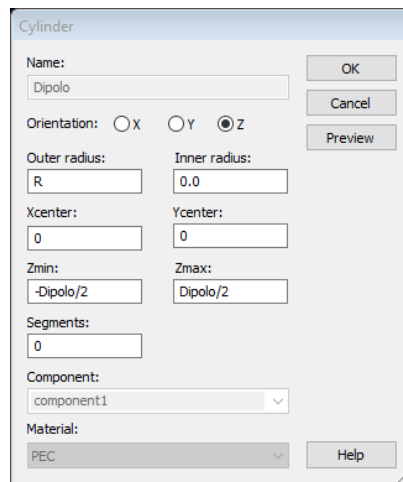


Figura 4. 19 Configuración del dipolo.

De este modo se podrá visualizar el cubo que simulará el corte del cilindro anterior que será el dipolo, como a continuación se visualiza.

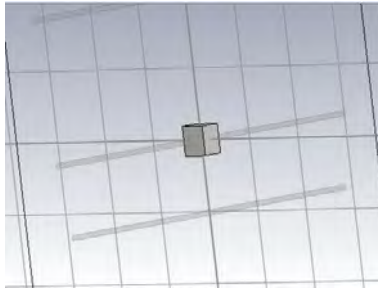


Figura 4.20 Construcción del dipolo.

Paso 19: Lo siguiente que se tiene que hacer es ir a la pestaña Modeling, se busca la opción Boolean para seguidamente elegir la opción Subtract que se encargará de simular el corte con el cubo y cilindro añadido. Se procede a elegir el cilindro llamado Dipolo y posteriormente el cubo. Se presiona enter y se podrá visualizar como en la Figura 4.21.



Figura 4.21 Dipolo construido.

Para verificar que la configuración haya salido correctamente podemos revisar el *History Tree* del dipolo, ver Figura 4.22.

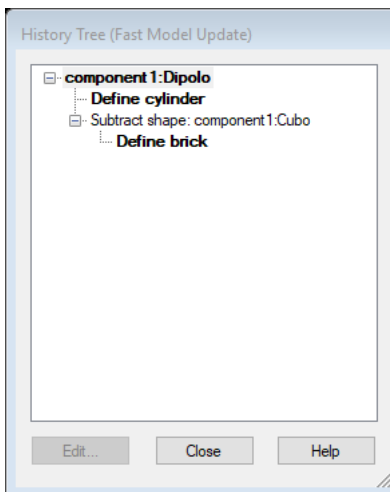


Figura 4.22 History tree del dipolo

Paso 20: Ahora bien, ya que se tienen los elementos insertados, lo siguiente es agregar la excitación que se refiere a la ubicación del puerto. Para llevar a cabo esto se tienen que añadir un par de pick points en el dipolo, que como se pudo observar el cubo está simulando un corte. Para agregar los pick points buscamos a la pestaña Simulation que se encuentran en la parte superior del software y en esa pestaña se procede a buscar una opción llamada Pick points que al seleccionarla se desplegarán diversas opciones, y se seleccionará la opción Pick Circle Center.

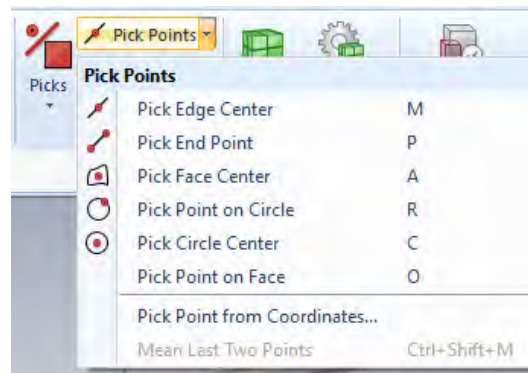


Figura 4.23 Opciones de pick points

Ya que se hayan añadido ambos pick points, se podrán visualizar como en la Figura 4.24.

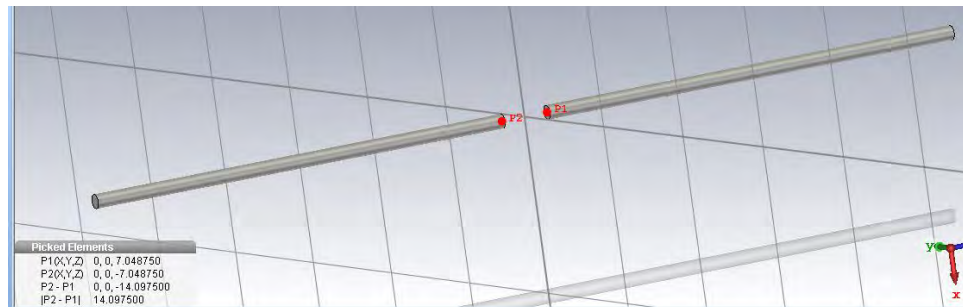


Figura 4.24 Pick points añadidos

Paso 21: Ahora se agregará la opción Discrete port, esta opción también se encuentra en la pestaña de simulación como se puede apreciar a continuación en la Figura 4.25.



Figura 4.25 Puerto discreto.

Paso 22: Al seleccionar la opción Discrete Port en automático se abrirá una pequeña ventana con diversas opciones pero en lo que se debe tener cuidado es en la localización del puerto. Usualmente viene definido pero debemos cambiar los valores de Z por la longitud exacta del puerto que viene en las tablas de cálculo ya que en ocasiones suele variar. Ver Figura 4.26.

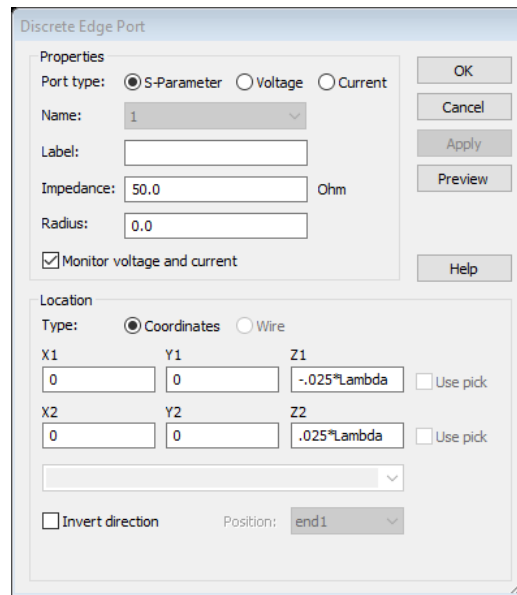


Figura 4.26 Configuración de puerto discreto

Ya que se haya configurado, se añadirá el puerto y se podrá visualizar como en la Figura 4.27.

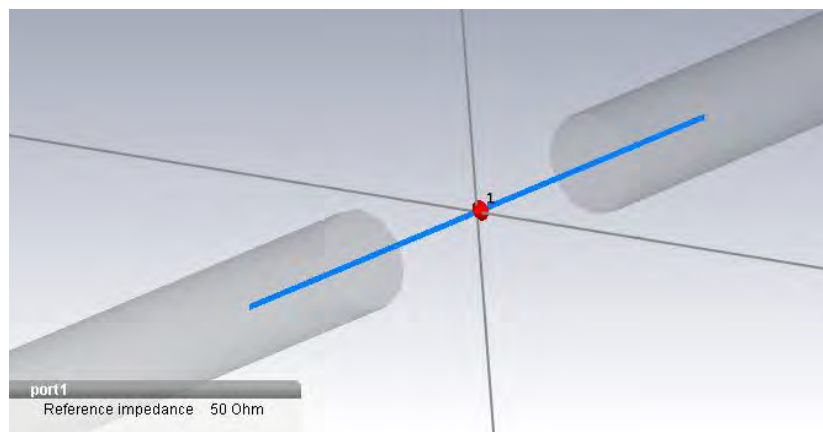


Figura 4.27 Puerto discreto agregado

Una de las funciones del software es que proporciona una guía rápida, el cual permite saber si el avance es correcto o si le falta algo. Esta opción se encuentra en la parte superior izquierda en un signo de interrogación, al elegirla se desglosa un menú y se buscará la opción QuickStar Guide, ver Figura 4.28.

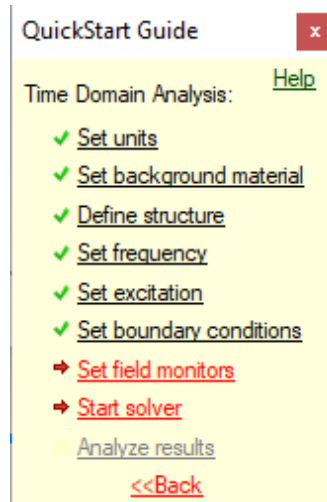


Figura 4.28 QuickStar Guide del software

Paso 23: Como se observa en la Figura 4.28, hace falta asignar monitores de campo. Por lo que se elige y en automático proporciona a una ventana de configuración. Y se puede ver como en la Figura 4.29.

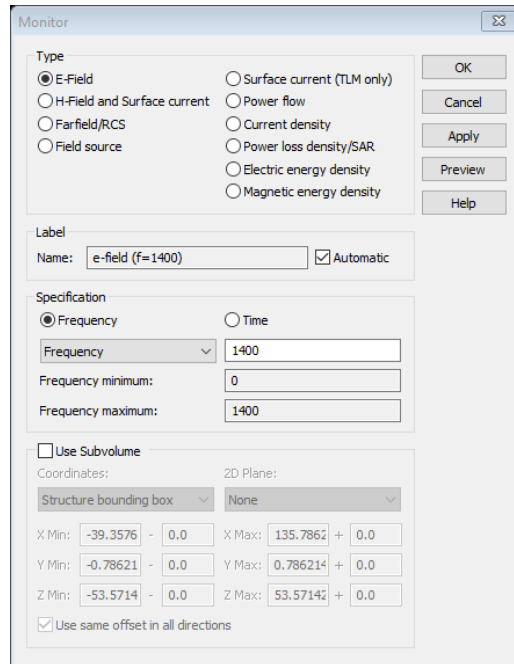


Figura 4.29 Opciones de monitores de campo.

Paso 24: Lo último que queda por hacer es generar los resultados que se obtienen de la simulación, para esto se sitúa en la pestaña Simulation y seguidamente buscar la opción Setup Solver.



Figura 4.30 Configuración de la simulación

Paso 25: Al hacer clic en Setup Solver enseguida se abrirá una ventana con diferentes parámetros que son configurables para la simulación como se logra apreciar en la Figura 4.31

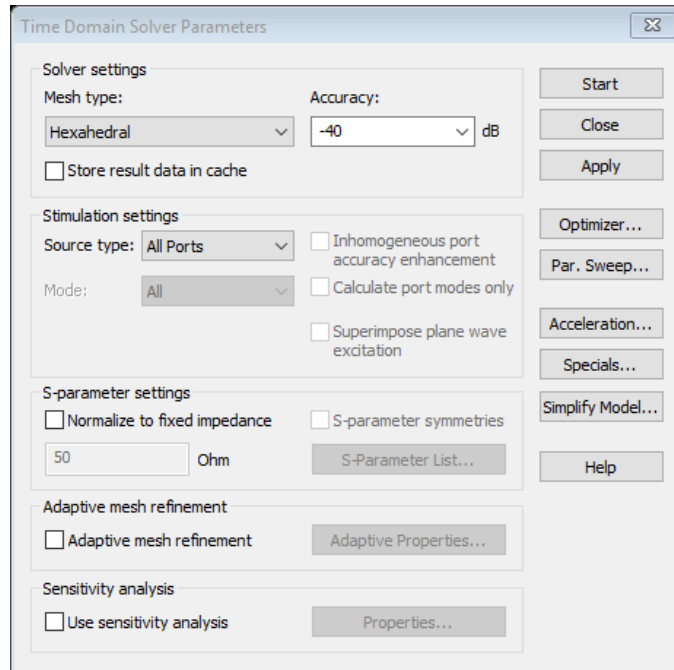


Figura 4.31 Parámetros del solver.

Se opta por dejarlo con los parámetros preestablecidos y se inicia con la simulación. La obtención de resultados suele ser un poco tardado esto depende directamente del equipo en el que se trabaje y características. El proceso se aprecia en la figura 4.32.

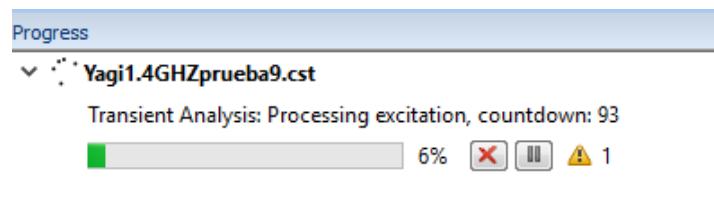


Figura 4.32 Progreso de la simulación.

Finalmente el software al terminar el proceso, mostrará los resultados de la antena simulada. En la Figura 4.33 se puede apreciar el patrón de radiación y diversos parámetros como la directividad y la frecuencia, los cuales toman los valores de 9.089 dB y 1.4Ghz, respectivamente.

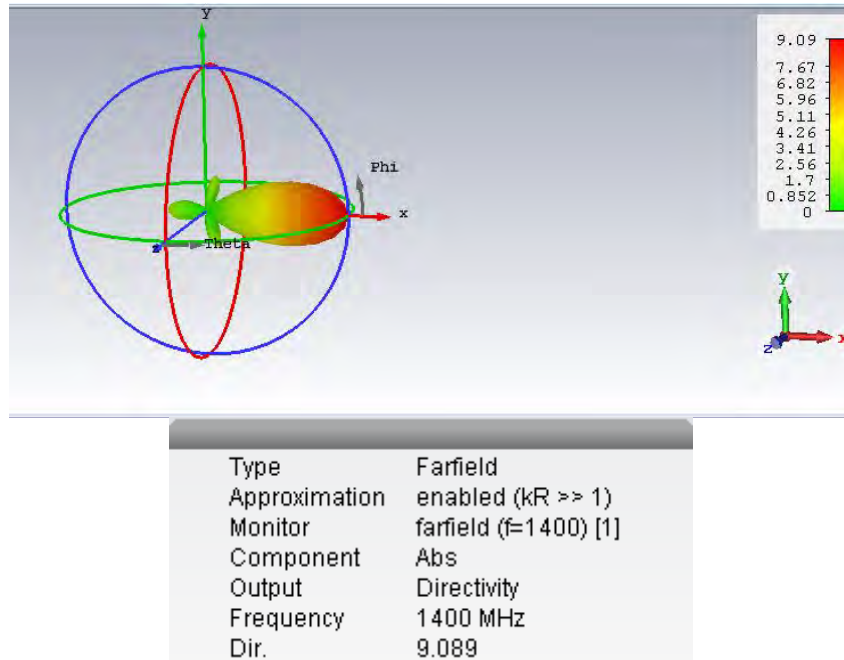


Figura 4.33 Simulación en 3D del software

En la figura 4.34 se muestra un patrón de radiación en 2D donde se muestran el comportamiento de la directividad en coordenadas

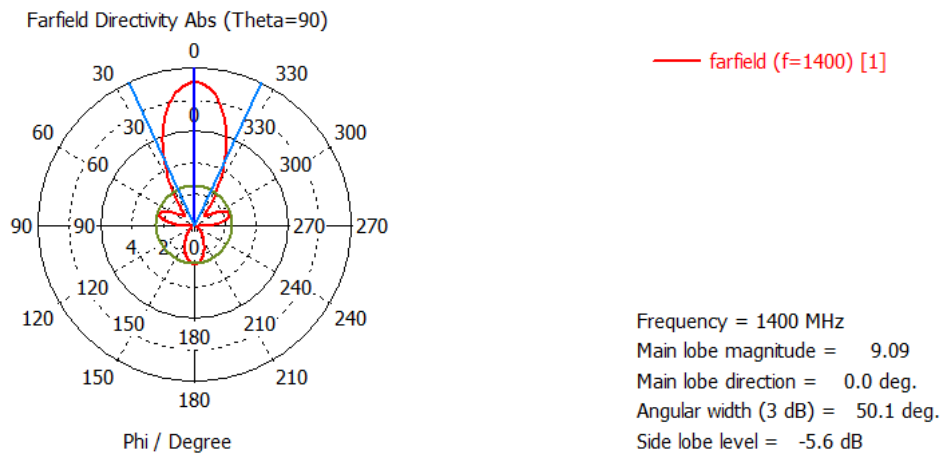


Figura 4.34 Diagrama polar de la antena

Otro tipo de diagrama que se genera es el cartesiano, como se puede apreciar en la Figura 4.35.

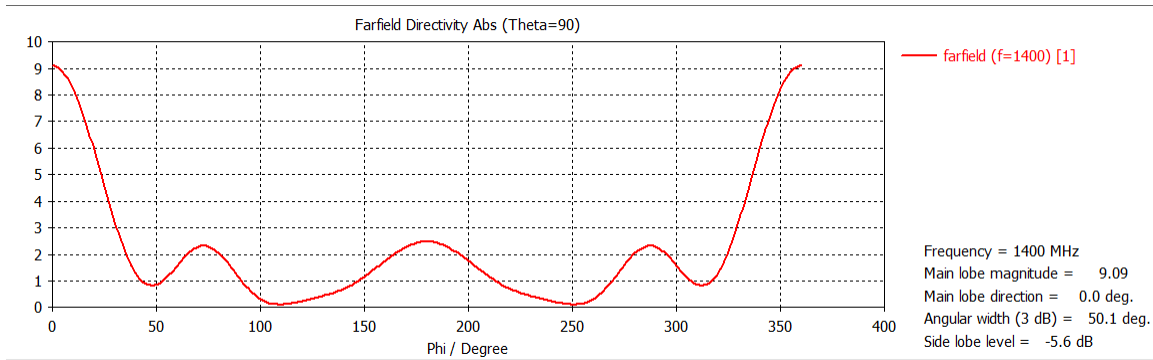


Figura 4.35 Diagrama cartesiano.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA MEDIANTE EL ANALIZADOR DE ESPECTROS

En la siguiente sección se describe paso a paso la medición de los principales parámetros de una antena Yagi física, sintonizada a la frecuencia de 1.4 GHz.

Los instrumentos utilizados para realizar dichas mediciones son los siguientes:

- **Analizador de espectro Rigol DSA815:** Es un equipo de medición electrónica que permite visualizar en una pantalla las componentes espectrales en un espectro de frecuencias de las señales presentes en la entrada, pudiendo ser ésta cualquier tipo de ondas eléctricas, acústicas u ópticas.
- **Puente VSWR Rigol VB120:** Diseñado para la determinación de la relación de las ondas estacionarias y del factor de reflexión de objetos de medida con una impedancia de 50 Ω .
- **Adaptador BNC-Hembra**
- **Pigtail RG-58:** Conector hembra jack SMA para cable RG58. Se utiliza para antenas Wifi.

A continuación se describe el proceso paso a paso:

Paso 1: Lo primero que hay que hacer es conectar adecuadamente el analizador de espectro Rigol DSA815. Como se aprecia en la Figura 4.36.

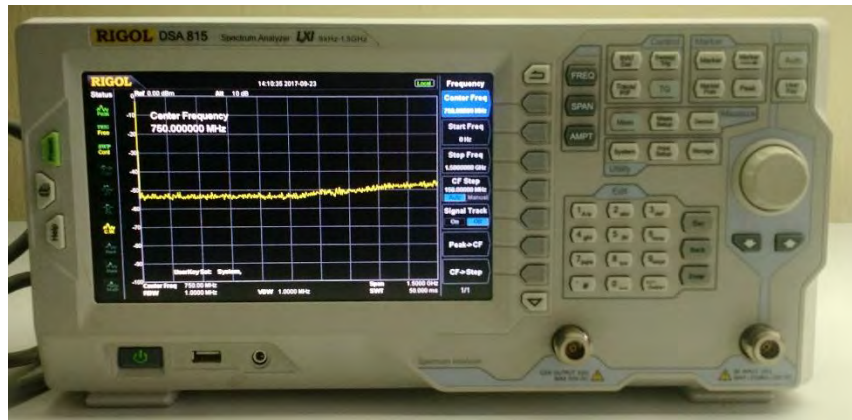


Figura 4.36 Analizador de espectro Rigol DSA81

Paso 2: Instalación del puente SWR usando sus adaptadores.

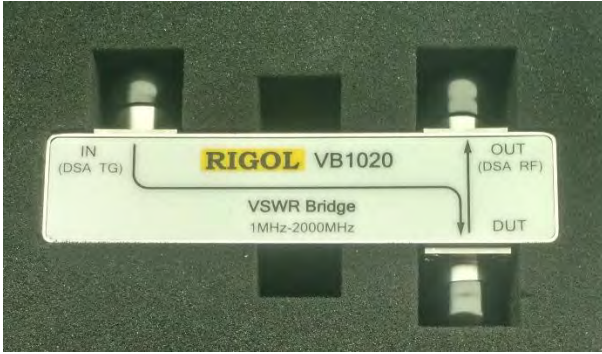


Figura 4.37 Puente VSWR Rigol VB 1020

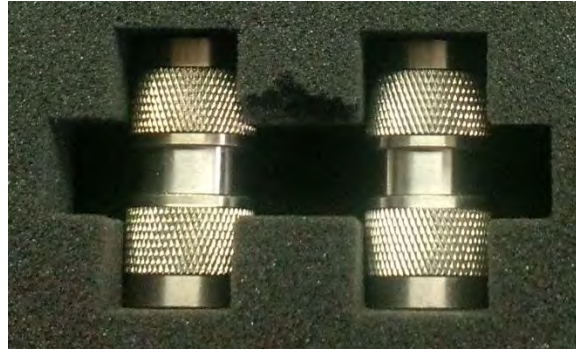


Figura 4.38 Adaptadores del puente VSWR

Paso 3: Se conectará el puente VSWR con ambos adaptadores (N male- N male) que son utilizados para calcular la frecuencia resonante y VSWR de la antena.



Figura 4.39 Adaptadores del puente VSWR

Paso 4: Con todo a mano se procederá a conectar el puente VSWR con el analizador de espectro. Como se puede ver en las Figura 4.40.



Figura 4.40 Puente VSWR conectado al analizador de espectro

Paso 5: Lo siguiente es conectar el pigtail RG-58 al puente VSWR que a su vez está conectado con el analizador de espectro. Como se aprecia en la Figura 4.41.



Figura 4.41 Pigtail RG-58

Paso 6: La conexión del analizador de espectro con el puente VSWR y el pigtail, se puede apreciar en la Figura 4.42.

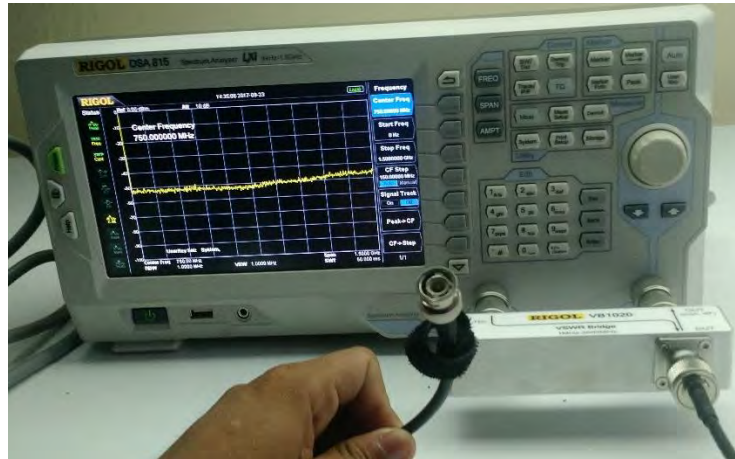


Figura 4.42 Pigtail conectado

Paso 7: Ahora se realiza la configuración en el analizador de espectro, para eso se oprime el botón BW/DET que será el que se encargará de configurar a 100 KHz.

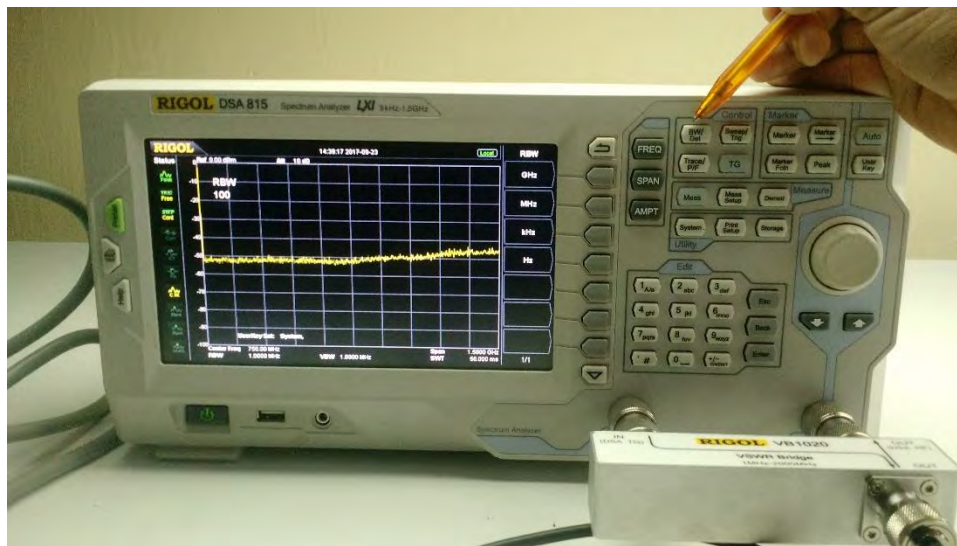


Figura 4.43 Configuración del ancho de banda en el analizador de espectro

Paso 8: Lo siguiente que se hará es oprimir la tecla Meas y de este modo se habilitará la opción de activar el VSWR.

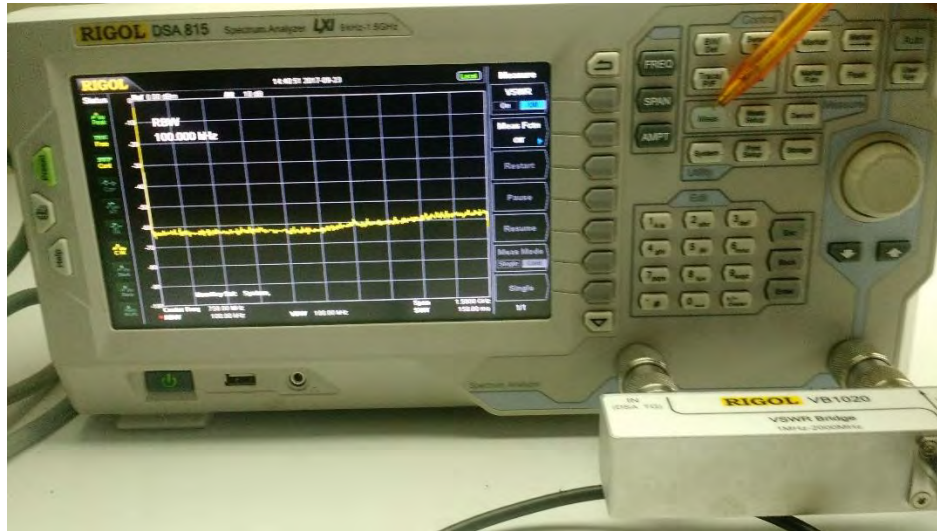


Figura 4.44 Configuración del analizador de espectro.

Una vez activado, aparecerá una línea morada y así se notará que está activado el VSWR, como se muestra en la Figura 4.45.

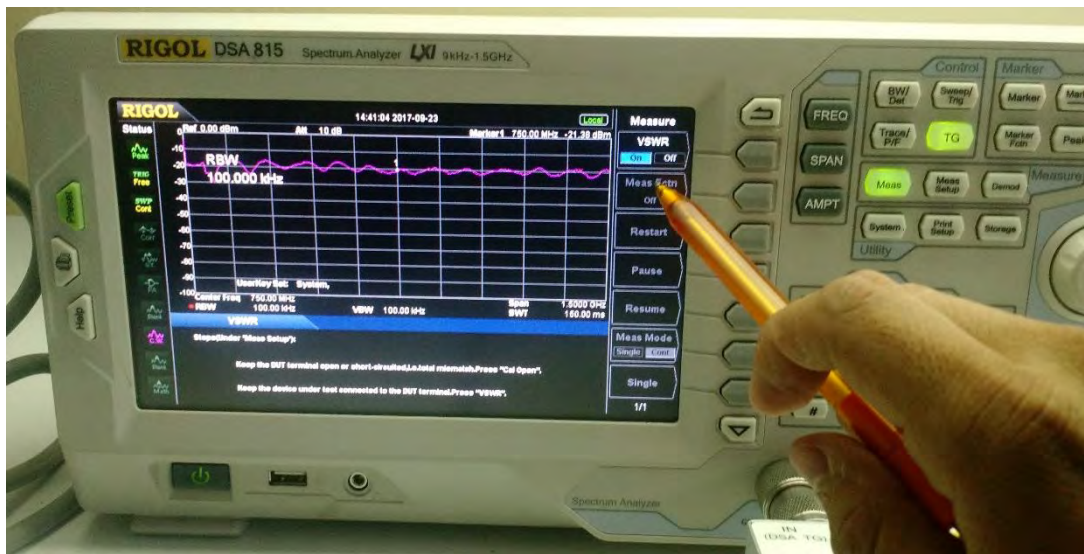


Figura 4.45 VSWR activado en el analizador de espectro

Paso 9: El paso siguiente es oprimir el botón Meas Setup que nos ayudara para calibrar, es relativamente fácil ya que solamente se oprime el botón Cal-Open. Algo muy importante que se tiene que tener en cuenta es cuidar que el pigtail no se enrolle ya que esto puede alterar los resultados.



Figura 4.46 Configuración del analizador de espectro

Paso 10: Lo siguiente es conectar el analizador de espectro con la antena como se puede observar en la Figura 4.47.

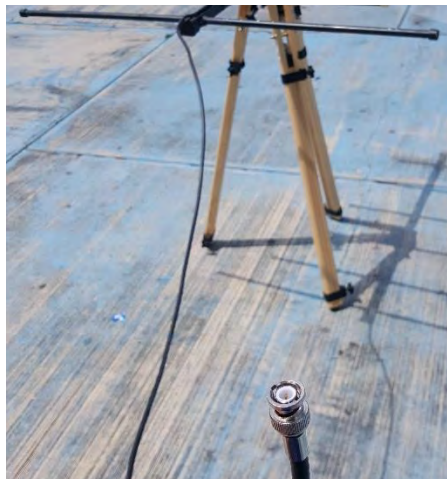


Figura 4.47 Conexión con la antena yagi

Paso 11: Para llevar a cabo la conexión de la antena con el pigtail, es necesario un adaptador BNC hembra que es como se aprecia en la Figura 4.48.



Figura 4.48 Adaptador BNC hembra

Con esto la conexión entre los instrumentos y la antena yagi se ha realizado correctamente y se podrá ver en la Figura 4.49.



Figura 4.49 Conexión de la antena con el BNC hembra

Paso 12: Ahora en el analizador de espectro se elegirá la opción VSWR. Ya que con esto se podrá obtener más información.



Figura 4.50 Opción VSWR en el analizador de espectro

Una vez que se haya seleccionada la opción VSWR, se aprecian distintas señales, de las cuales se sabe que la verde es la pérdida de retorno, la amarilla es la VSWR y finalmente el pico más bajo es la resonancia eléctrica (ver Figura 4.51).



Figura 4.51 Función VSWR activada

Paso 13: Para poder apreciar los picos más bajos adecuadamente podemos realizar una configuración y para eso buscamos la opción Ref Lvl que nos ayudará a apreciar mejor los picos y de este modo visualizar mejor la información obtenida (Figura 4.52).



Figura 4.52 Opción Ref Lvl en el analizador de espectro

Paso 14: Para ajustar las señales se necesita mover la perilla del mismo analizador de espectro y en su pantalla podremos acomodarlo adecuadamente para una mejor visualización.



Figura 4.53 Ajuste de las señales

Después del ajuste, se puede apreciar mucho mejor la información, como se observa en la Figura 4.54.



Figura 4.54 Ajuste realizado en el analizador de espectro

Paso 15: Con los ajustes realizados, se pueden observar los picos más bajos, que como se dijo anteriormente es el VSWR (ver Figura 4.55).

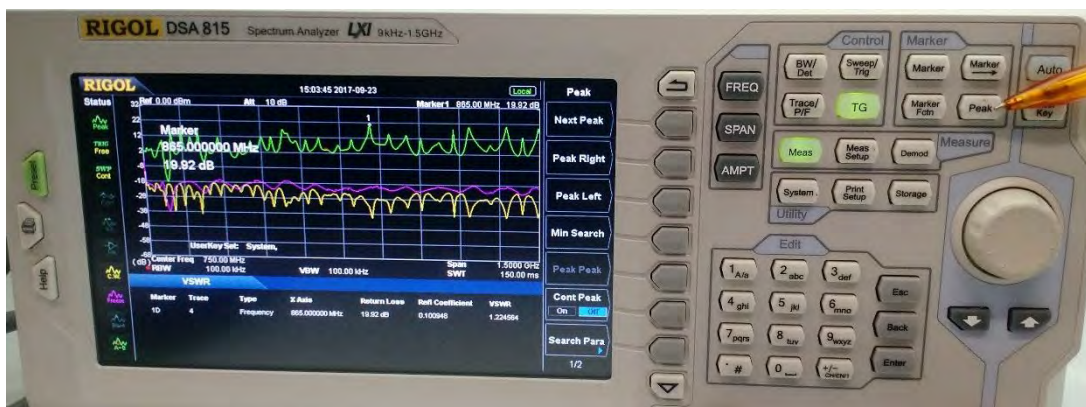


Figura 4.55 Tecla peak para ubicar puntos más bajos

Paso 16: Para marcar los Peaks más bajos, buscamos la opción Marker State que será de utilidad para visualizar información de los picos sin perderlos y seguidamente se activa.



Figura 4.56 Función Marker State activada

Paso 17: Ahora bien para ubicar los demás peaks, simplemente se oprime la tecla Peak y en automático aparece el primer peak más alto, como se logra apreciar a continuación en la Figura 4.57.



Figura 4.57 Peak número uno.

Paso 18: Para seguir guardando los Peaks es necesario regresar a las opciones anteriores y para esto presionamos la tecla de retroceso en el analizador de espectro.



Figura 4.58 Retorno a opciones anteriores.

Paso 19: En las opciones vemos la opción Marker con los primeros cuatro números, como se sabe el número uno es el Peak 1, y así sucesivamente. Al oprimir Marker se cambiará al dos y el proceso es el mismo para los Peaks restantes.



Figura 4.59 Función Marker

Paso 20: Presionamos la tecla Peak y luego la función Next Peak, el cual se encargará de ubicar el siguiente peak más bajo y de este modo marcarlos fácilmente.



Figura 4.60 Funciones del Peak

En las Figuras 4.61- 4.64 se muestran las mediciones del parámetro VSWR, mediante el analizador de espectros en cuatro instantes de tiempo diferentes, como se puede observar en los resultados obtenidos, los valores de dicho parámetro son 1.153393, 1.145259, 1.151782 y 1.130823, con sus correspondientes valores de pérdida de retorno 22.95dB, 23.39 dB, 23.03 dB y 24.24 dB, así como sus correspondientes valores de frecuencias 1425 Mhz, 1425 Mhz, 1425 Mhz, y 1375 Mhz. Los valores medidos de VSWR se encuentra en el rango de 1.13 a 1.24; comparando la relación de los valores teóricos de VSWR, pérdida de retorno y potencia proporcionados por la tabla [H6], se puede observar que a un valor de VSWR de 1.13, le corresponde un valor de pérdida de retorno de 24.3dB y una potencia de 99.6%, de igual manera, a un valor de VSWR de 1.15, le corresponde un valor de pérdida de retorno de 23.1dB y una potencia de 99.5%. Con base a lo anterior, podemos concluir que la antena propuesta se encuentra operando en el rango de la frecuencia a la que fue diseñada, así también, se puede observar que los valores de pérdida son mínimos, por tanto la transmisión se realiza de manera eficiente.

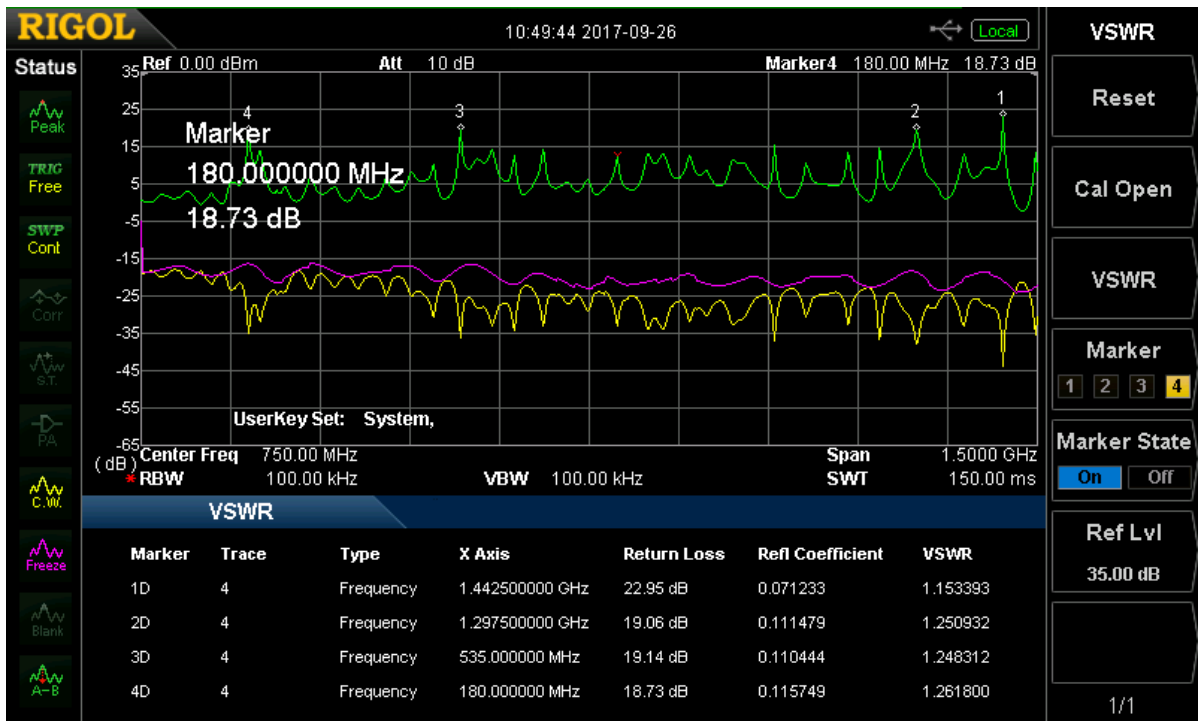


Figura 4.61 Grafica de la relacion de onda estacionaria

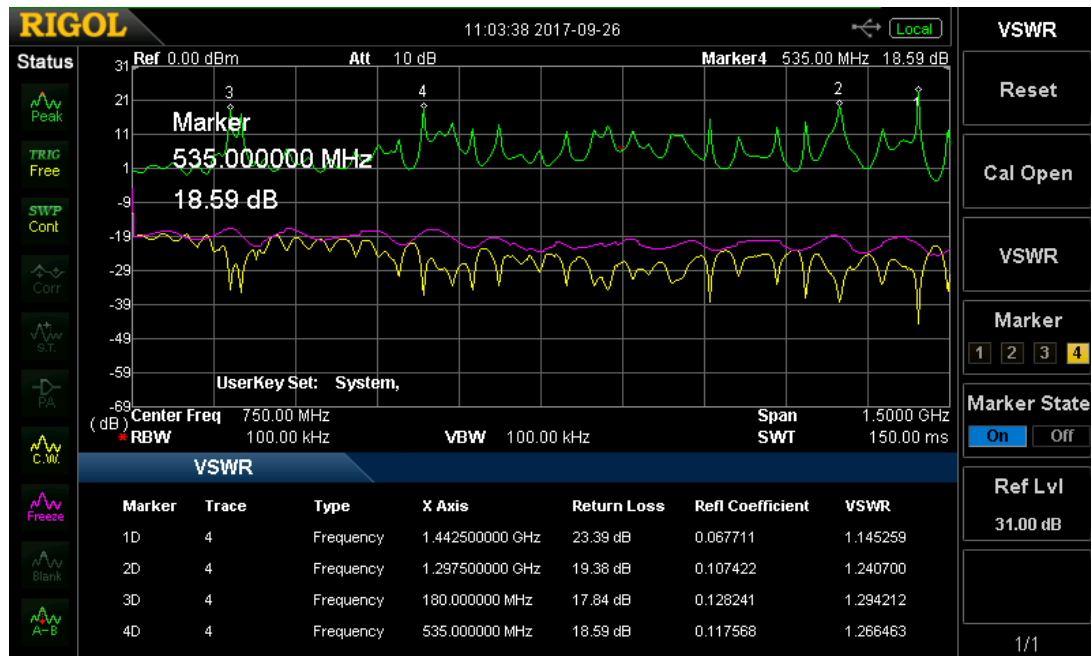


Figura 4.62 Grafica de la relacion de onda estacionaria

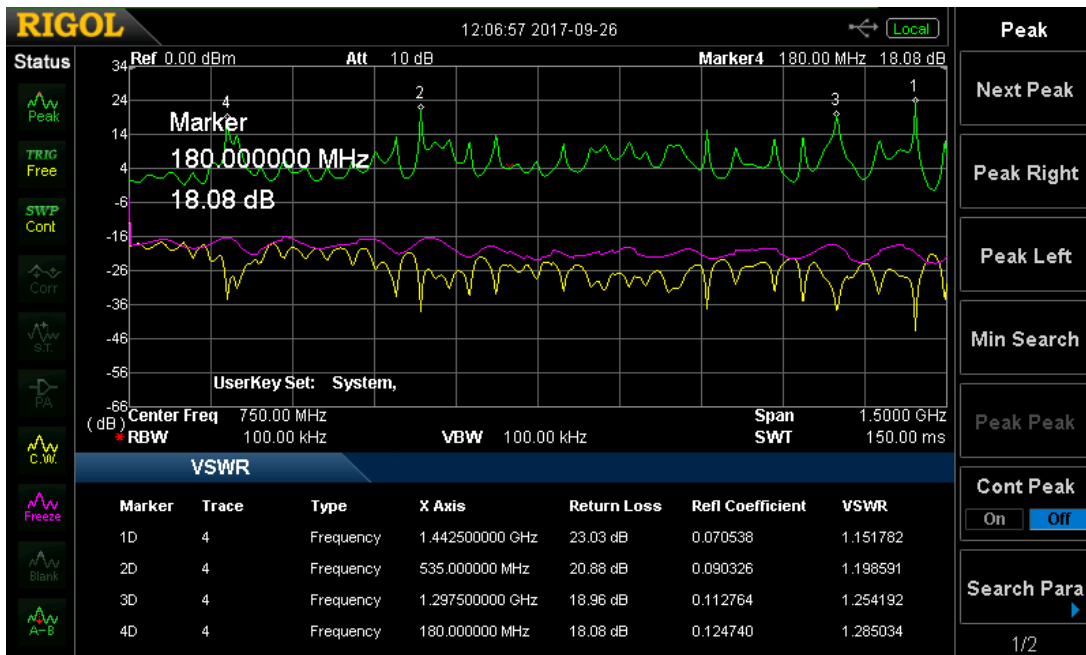


Figura 4.63 Grafica de la relacion de onda estacionaria



Figura 4.64 Grafica de la relacion de onda estacionaria

4.4 CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA MEDIANTE EL ANALIZADOR DE ANTENAS

En la siguiente sección se describe paso a paso la medición de los principales parámetros de una antena Yagi física, sintonizada a la frecuencia de 1.4 GHz.

Los instrumentos utilizados para realizar dichas mediciones son los siguientes:

- **Kit de calibración que incluye: P501NFNF.1 THRU-FEMALE, 5CO501NM.1 OPEN/SHORT calibration estándar (male-male), CL501NM.1 LOAD calibration standar (male), CO501NF.1 OPEN calibration standar (female) y CS506NF.1 SHORT calibration standar (female):** Útiles para llevar a cabo la calibración de una antena y de este modo obtener resultados más exactos (ver Figuras 4.65-4.69).
- **Analizador de antenas de la marca RigExpert AA-1400:** es un dispositivo compuesto de dos componentes básicos (ver Figura 4.70): Un generador sinusoidal de radiofrecuencia, de frecuencia conocida. Un puente de impedancias, donde una de las cuatro impedancias del puente es de la antena que se quiere medir.
- **Pigtail:** Conector hembra jack SMA para cable RG58. Se utiliza para antenas Wifi.
- **Computadora**
- **Adaptadores SMA HEMBRA-SMA HEMBRA, Barrilit SMA HEMBRA-N MACHO**
- **Antena Yagi en la banda UHF**



Figura 4.65 Kit de calibración

5CO501NM.1
OPEN/SHORT
calibration standard
(male-male)

CL501NM.1 LOAD
calibration standard
(male)

CO501NF.1
OPEN
calibration
standard (female)

CS506NF.1
SHORT
calibration
standard (female)



Figura 4.66
5CO501NM.1
OPEN/SHORT



Figura 4.67
CL501NM.1 LOAD



Figura 4.68
CO501NF.1
OPEN



Figura 4.69
CS506NF.1
SHORT



Figura 4.70 Analizador de antenas de la marca RigExpert AA-1400

A continuación se describe el proceso paso a paso:

Paso 1: Se conecta el pigtail al analizador de antenas, como se muestra en la Figura 4.71.



Figura 4.71 Pigtail conectado al analizador de antenas

Paso 2: Ahora se procede a realizar la conexión con el cable usb entre la computadora y el analizador de antenas. Ver Figura 4.72.



Figura 4.72 Conexión del analizador de antenas con la computadora

Paso 3: En la computadora es necesario instalar un software llamado ANSCOPE, ya que este nos permitirá interpretar y almacenar los resultados obtenidos.

Paso 4: Ahora en el analizador de antenas, se procede a activar la opción PC-MODE que se encontrará en la pantalla principal del dispositivo y nos permitirá la comunicación con el equipo de cómputo. Ver Figura 4.73.



Figura 4.73 Pantalla principal de analizador de antenas

Paso 5: Ya activada la opción PC-MODE, se logrará apreciar en la pantalla principal del dispositivo la imagen de una computadora y de este modo damos por realizada la conexión con la computadora. Ver Figura 4.74.



Figura 4.74 Función PC MODE activada

Paso 6: Se procede a ejecutar software que previamente fue instalado en la computadora. Si la conexión es satisfactoria el mismo software lo detectara en la parte inferior izquierda, como se aprecia en la Figura 4.75. Si no aparece este mensaje es necesario ir al Administrador de dispositivos para verificar que número puerto serial fue asignado al conectar el analizador a la antena, en esta caso, COM4. Con esta información ir al menú de

opciones de Anscope y elegir la opción de Configure, seleccionar COM port... y elegir el puerto COM4.

Detected RigExpert AA-1400 on COM4

Figura 4.75 Analizador de antenas detectado

Paso 7: Ir nuevamente a la pestaña Configure, saldrá una lista con distintos modelos de analizadores y se elegirá el modelo AA-1400, ya que es el modelo de dispositivo que se usará. Ver Figura 4.76.

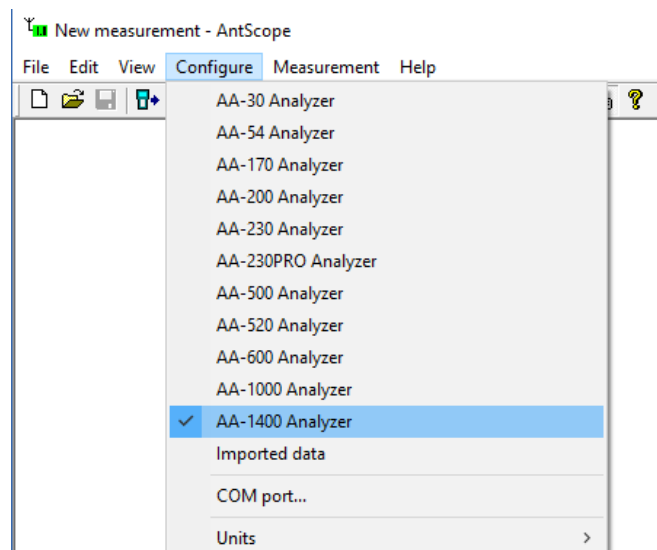


Figura 4. 76 Modelos de analizadores disponibles en el software

La calibración es crítica para realizar buenas mediciones, si bien el analizador de antenas es un receptor altamente lineal y tiene una pureza espectral suficiente en sus fuentes para realizar buenas mediciones, hay una serie de imperfecciones que limitan las mediciones realizadas sin calibraciones, entre ellas están los efectos creados por el cable coaxial y los conectores utilizados en la medición. La calibración permite compensar estos efectos para obtener mediciones más precisas.

Paso 8: Para realizar la calibración es necesario conectar el cable coaxial y los conectores utilizados por la antena. El cable coaxial no debe estar enrollado ya que esto ocasiona efectos de inducción que afectarán la calibración. La calibración se realiza utilizando la

carta de Smith, para esto se da clic a la pestaña View y posteriormente se selecciona Smith chart o simplemente basta con presionar la tecla F8, ver figura 4.77.

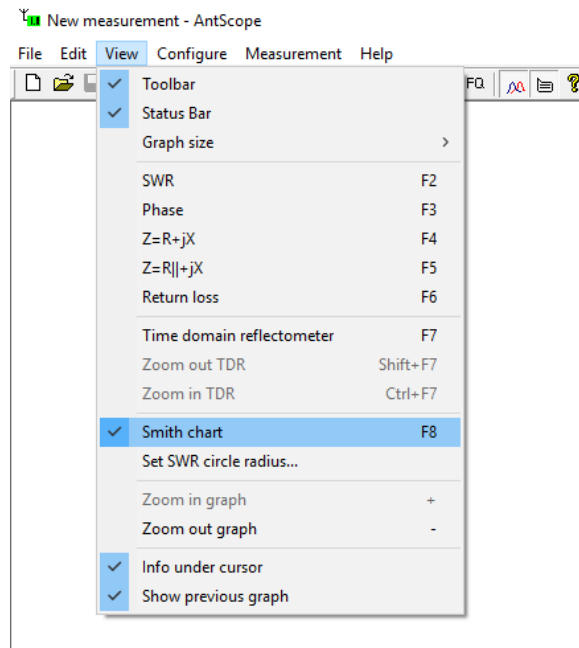


Figura 4.77 Selección para obtener la carta de Smith

Paso 9: Son tres tipos de calibraciones que se tienen que realizar: en circuito abierto, cerrado y con carga. No existe un orden establecido ya que cada resultado de la calibración se guarda independientemente. Para llevar a cabo la calibración se hace uso de un adaptador BNC hembra a N macho, como el que se muestra en la figura 4.78.



Figura 4.78 Barrilito SMA HEMBRA- N Macho

Paso 10: Ahora con el adaptador se conectará el circuito abierto, como se muestra en la Figura 4.79.



Figura 4.79 Circuito abierto

Paso 11: Antes de comenzar a realizar las calibraciones se establecerá la frecuencia en la que se trabajara y el numero puntos. Mientras más puntos sean, mayor resolución de frecuencia se obtendrá. Para realizar esto, en la parte superior del software buscamos Measurement posteriormente se observará una lista de opciones y se elegirá la opción Range, que servirá para establecer el rango de la frecuencia. Ver Figura 4.80.

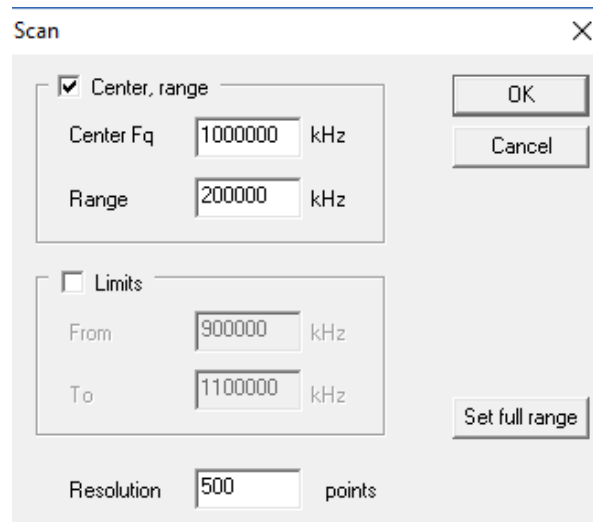


Figura 4.80 Rango de la frecuencia

Paso 12: Seleccionar un directorio para almacenar los resultados que se van obteniendo en cada calibración, por lo que se da clic a la opción Configure y se selecciona Save last measured data, posteriormente Select folder for calibration files y se elige el directorio de preferencia.

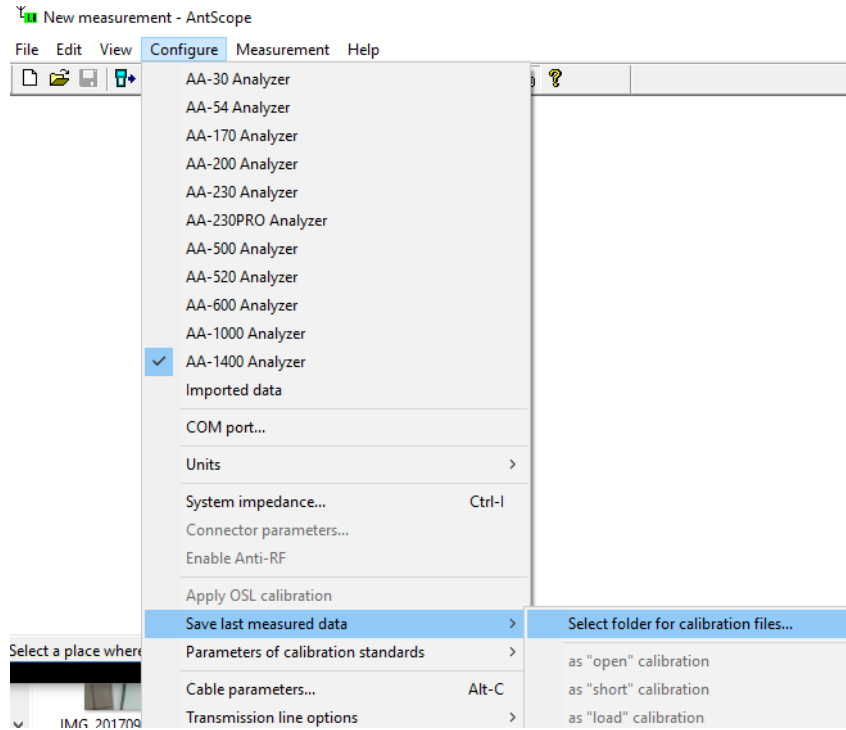


Figura 4.81 Elección de un directorio

Paso 13: Realizadas las configuraciones anteriores, se procede a iniciar el proceso de recolección de resultados para esto se presiona la tecla F8 o bien el botón Start/Stop en la parte superior del software, como se aprecia a continuación en la Figura 4.82.

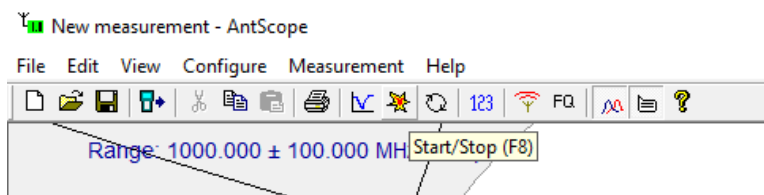


Figura 4.82 Inicio de proceso para obtención de datos.

El proceso para obtener los datos de calibración se puede demorar y esto va dependiendo de las especificaciones del equipo con el que se trabaja. Al culminar el proceso se podrán visualizar los resultados obtenidos del circuito abierto. Ver Figura 4.83.

Range: 1000.000 ± 100.000 MHz, 500 points

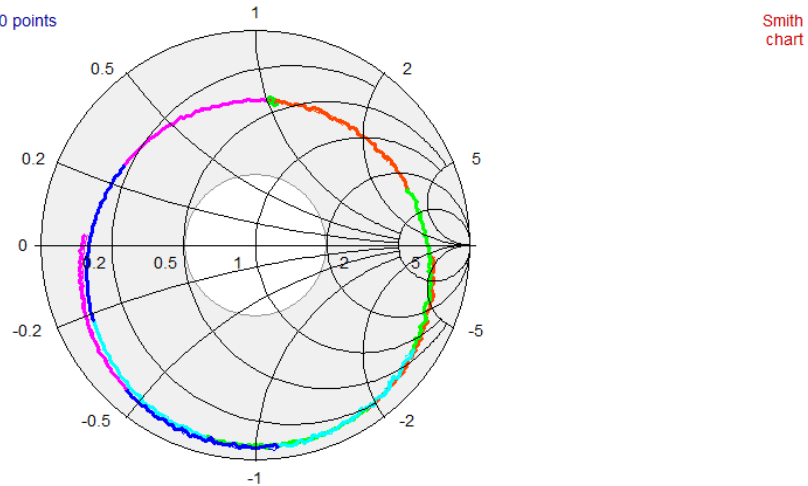


Figura 4.83 Carta smith del circuito abierto

Paso 14: Se procede a guardar los resultados que se obtuvieron, mediante la opción Configure en la parte superior del software, se desglosarán diversas opciones, se elige la opción Save last measured data y se selecciona as “open” calibration como se ve en la Figura 4.84.

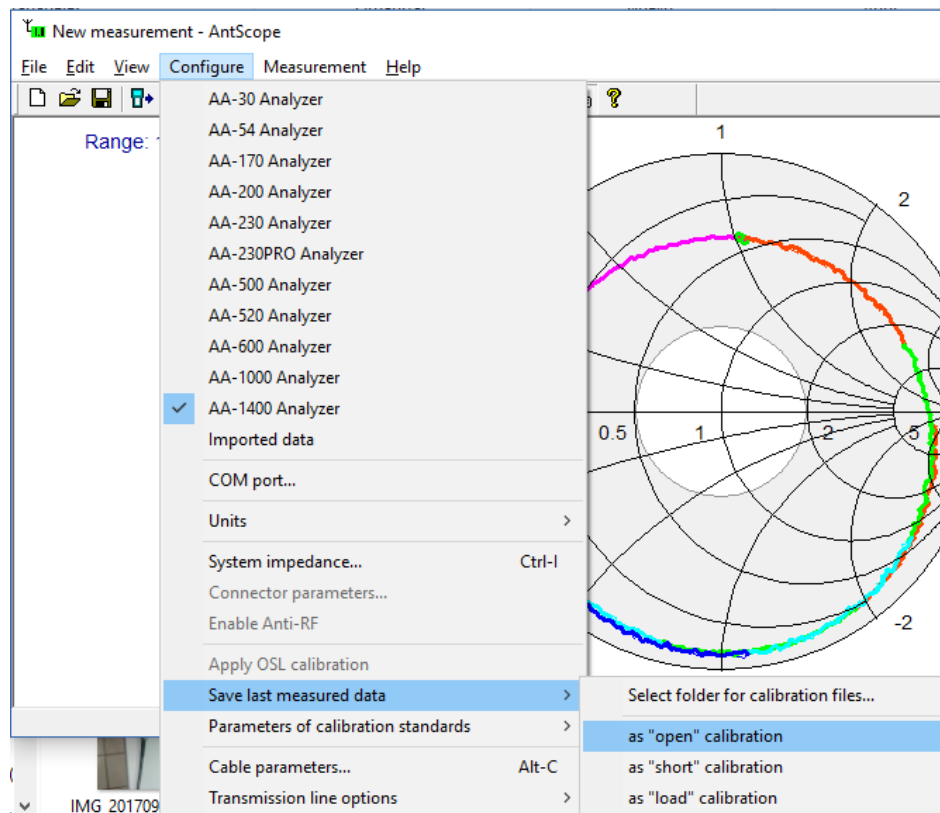


Figura 4.84 Almacenamiento de resultados obtenidos

Paso 15: Se desconecta el circuito abierto y posteriormente se conecta en circuito cerrado para obtener sus correspondientes resultados. Ver Figura 4.85.



Figura 4.85 Circuito cerrado conectado.

Para obtener los resultados del circuito cerrado es muy similar al del abierto, ver paso 13. El proceso del cálculo de resultados comienza y se obtiene la carta Smith del circuito cerrado que se puede visualizar del siguiente modo en la Figura 4.86.

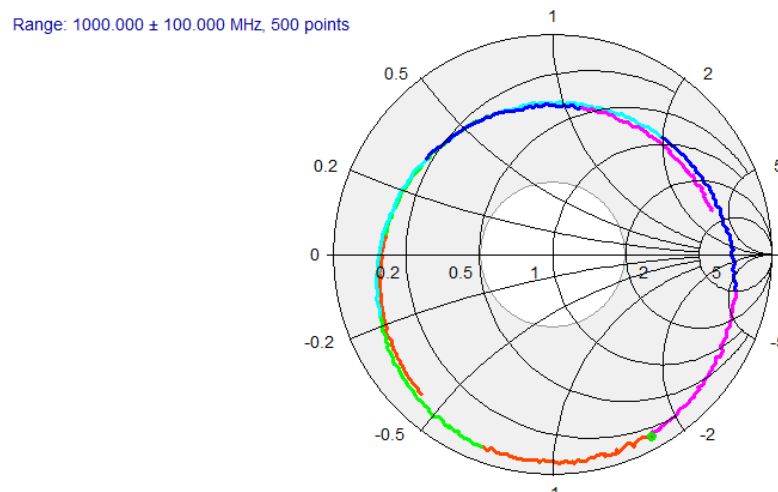


Figura 4.86 Carta smith del circuito cerrado

Paso 16: Se proceden a guardar los resultados obtenidos del circuito cerrado, que es similar el proceso de almacenamiento de resultados, ver paso 14. Sin embargo, hay una variante que es elegir la opción: as “short” calibration, ver figura 4.87.

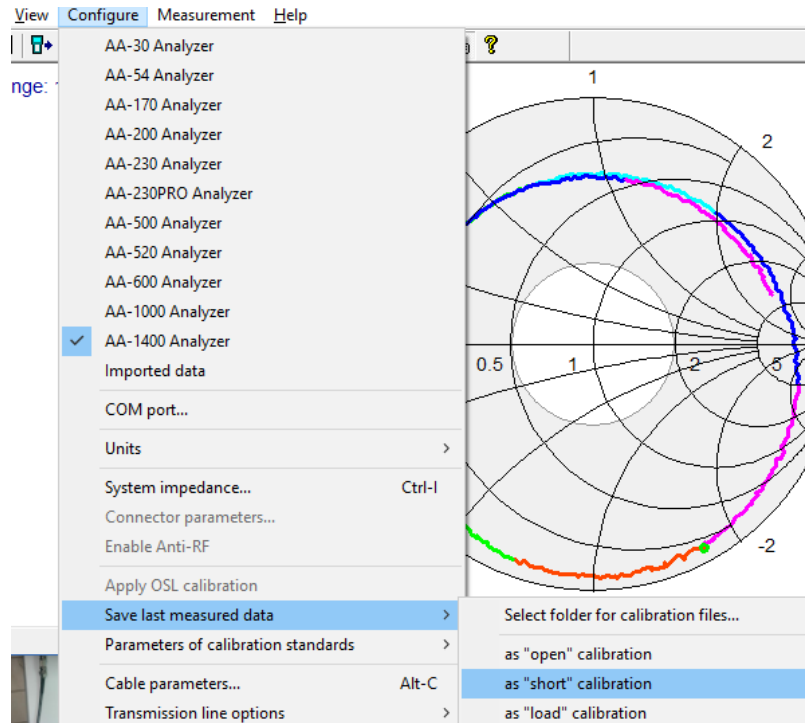


Figura 4.87 Almacenamiento de resultados obtenidos del circuito cerrado

Paso 17: Para la última calibración se utiliza el terminador de carga de 50 ohms. Para ello se necesitan un par de adaptadores, ver imágenes 4.88 y 4.89.



Figura 4.88 Barrilito N male-SMA Female



Figura 4.89 Adaptador P501NFNF.1

Paso 18: Se realiza la conexión de adaptadores y el circuito de carga, como se muestra en la Figura 4.90.



Figura 4.90 Circuito de carga con sus respectivos adaptadores

Paso 19: Se procede a conectar el pigtail a la carga con los adaptadores



Figura 4.91 Circuito de carga conectado con el pigtail

El proceso de obtención de datos para el circuito de carga es similar a los anteriores, ver paso 13. Por lo que se espera a obtener el diagrama de Smith y cuando se hayan obtenido los resultados, se visualizan como en la figura 4.92.

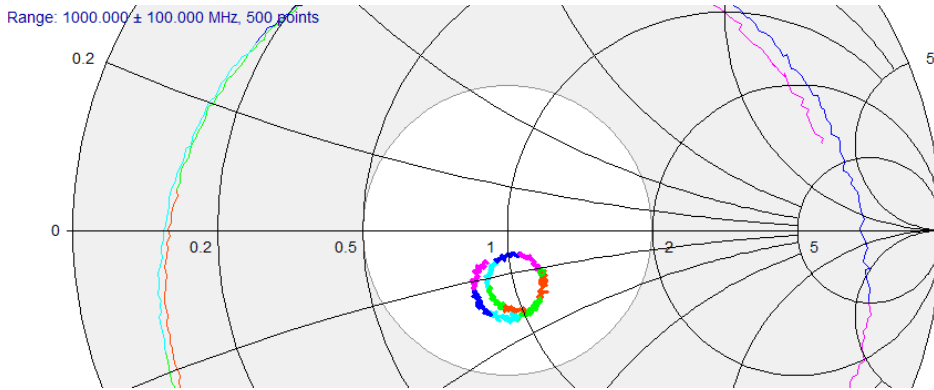


Figura 4.92 Carta smith del circuito de carga

Paso 20: Se almacenaran estos resultados, ver paso 14. Con la variante de que se guardará como as “load” calibration.

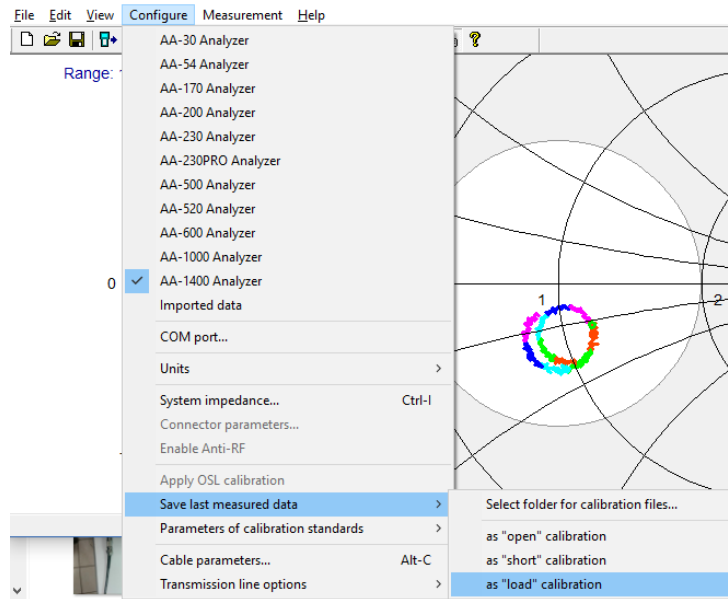


Figura 4.93 Almacenamiento de resultados obtenidos

Paso 21: Concluida la calibración se procede a realizar la conexión de la antena con el analizador, por lo que será necesario un cople BNC Hembra-hembra, ver figuras 4.94

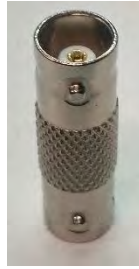


Figura 4.94 Adaptador SMA hembra- SMA hembra

Por lo que una vez ya realizada la conexión se podrá apreciar como en la Figura 4.95.



Figura 4.95 Conexión de analizador de antenas y la antena.

Paso 22: Ahora se procede a cargar los archivos de calibración, para esto es necesario situarse seleccionar configure, se desglosará una lista y se elige la opción Parameters of calibration standards y mostraran las opciones para cargar cada uno de los archivos que se obtuvieron de las calibraciones.

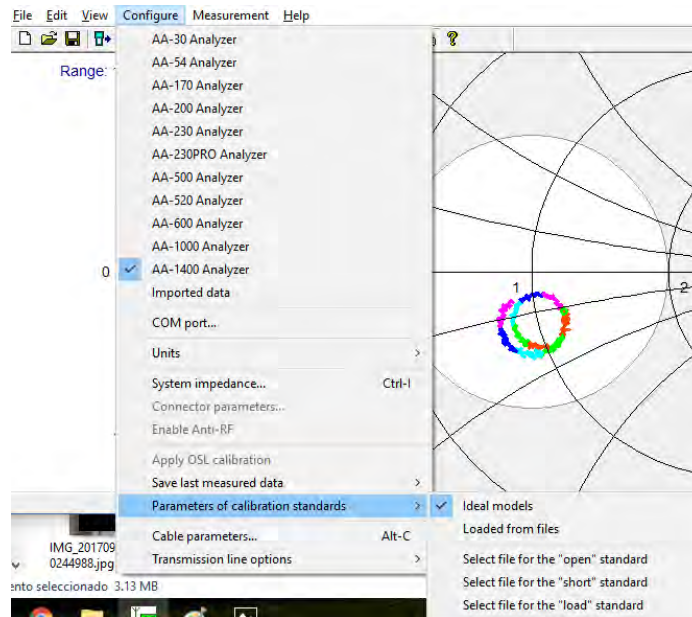


Figura 4.96 Carga de resultados obtenidos

Paso 23: Una vez seleccionados los archivos de calibración se procede a comenzar el proceso de obtención de la carta de Smith de la antena presionando la tecla F8 u oprimiendo el botón Start/Stop en la parte superior del software.

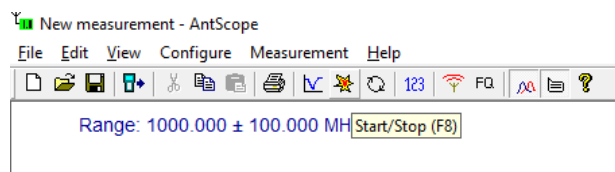


Figura 4.97 Inicio de proceso para obtención de carta Smith

Finalmente se obtiene la carta Smith de la antena y se visualiza como en la Figura 4.98.

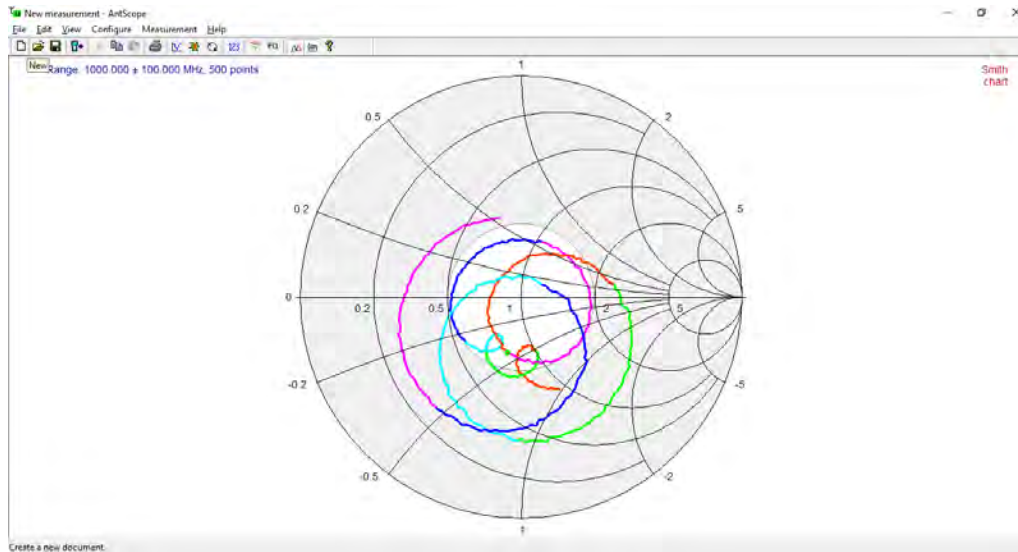


Figura 4.98 Carta smith de antena yagi

Con el objetivo de tener un segundo criterio de caracterización, en las figuras 4.99- 4.102 se muestran las cartas Smith de cuatro mediciones realizadas en diferentes instantes de tiempo, mediante el analizar de antenas y el software ANTSCOPE.

El punto central de la carta de Smith corresponde a una impedancia normalizada de 1 ohms, es decir a 50 ohms reales. Al posicionar el cursor en un punto de la curva que pasa por este punto se obtiene un cuadro informativo con el valor de frecuencia que corresponde al mejor acoplamiento de la antena. Como se puede observar en los resultados obtenidos, los valores del parámetro VSWR son 1.10, 1.17, 1.28 y 1.25, con sus correspondientes valores de pérdida de retorno 26.60dB, 22.17 dB, 18.32 dB y 19.02 dB, así como sus correspondientes valores de frecuencias 1320 Mhz, 1235 Mhz, 1315 Mhz, y 1310 Mhz. Los valores medidos de VSWR se encuentra en el rango de 1.10 a 1.28; comparando la relación de los valores teóricos de VSWR, pérdida de retorno y potencia proporcionados por la tabla [H6], se puede observar que a un valor de VSWR de 1.10, le corresponde un valor de pérdida de retorno de 26.4dB y una potencia de 99.8%, de igual manera, a un valor de VSWR de 1.28, le corresponde un valor de pérdida de retorno de 18.2dB y una potencia de 98.5%. Con base a lo anterior, podemos concluir que la antena propuesta se encuentra operando en un valor muy cercano a la frecuencia que fue diseñada, así también, se puede observar que los valores de pérdida son mínimos, por tanto la transmisión se realiza de manera eficiente.

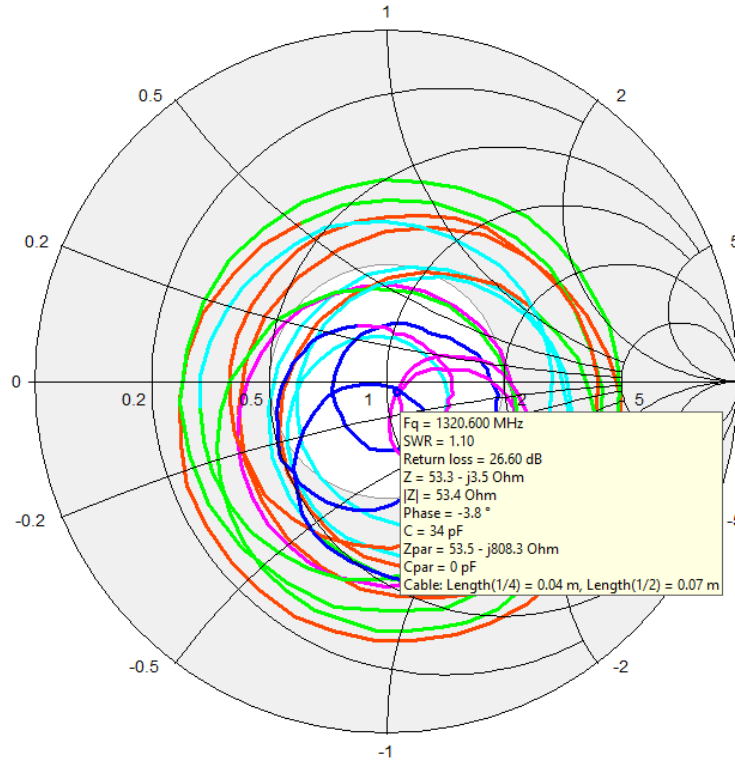


Figura 4.99 Información de la carta smith

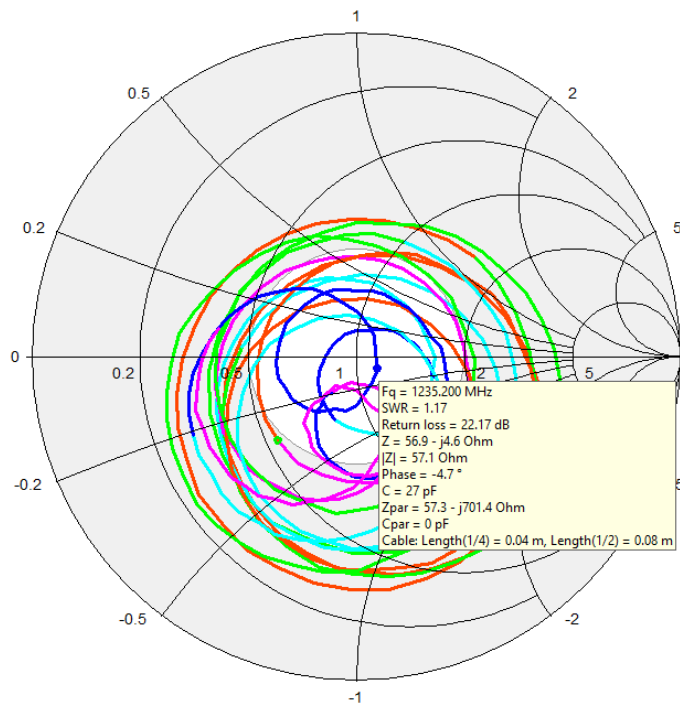


Figura 4.100 Información de la carta smith

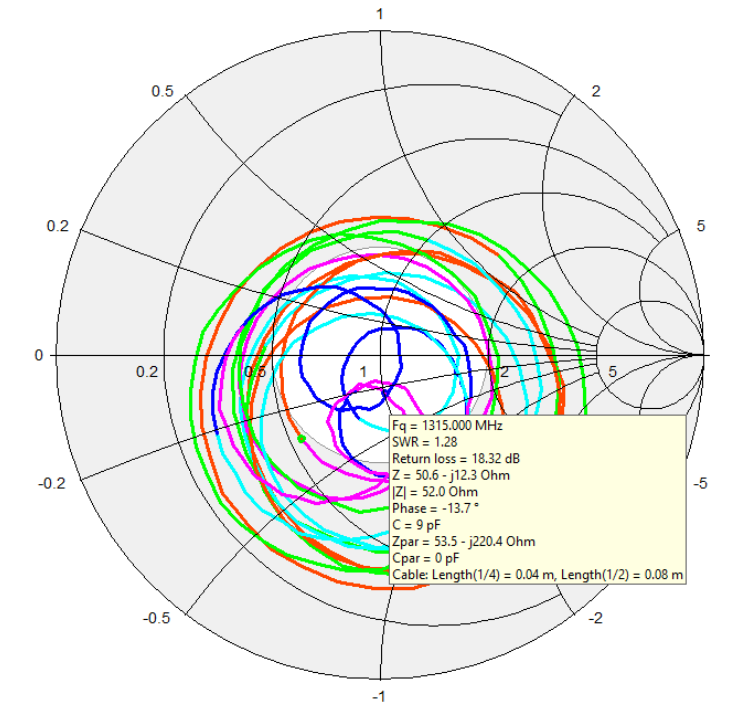


Figura 4.101 Información de la carta smith

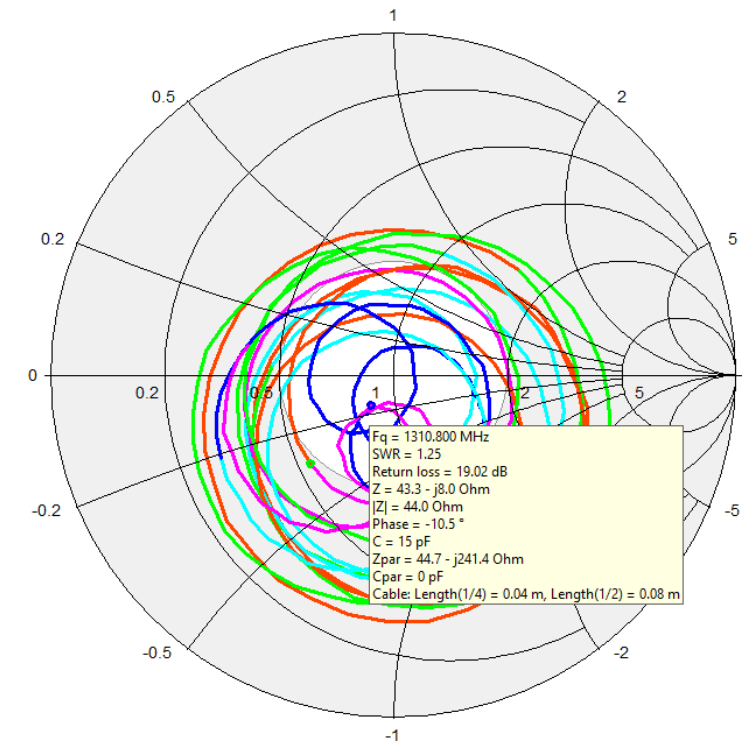


Figura 4.102 Información de la carta smith

4.5 PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA

A continuación se describe los instrumentos y método utilizado para la construcción del diagrama de radiación de la antena bajo estudio. El material y equipo utilizado se lista a continuación:

- **Generador de señales Rigol DSG815:** Es un dispositivo electrónico de laboratorio que genera patrones de señales periódicas o no periódicas tanto analógicas como digitales. Se emplea normalmente en el diseño, prueba y reparación de dispositivos electrónicos
- **Analizador de espectro Rigol DSA815:** Es un equipo de medición electrónica que permite visualizar en una pantalla las componentes espectrales en un espectro de frecuencias de las señales presentes en la entrada, pudiendo ser ésta cualquier tipo de ondas eléctricas, acústicas u ópticas.
- **Antena Yagi**
- **2 Adaptadores barrilito SMA hembra- SMA hembra, N-macho a SMN-Hembra.**
- **Antena**
- **Pig tail:** Conector hembra jack SMA para cable RG58. Se utiliza para antenas Wifi.

A continuación se describe el proceso paso a paso:

Paso 1: Instalar los equipos necesarios como el analizador de espectro y el generador de señales.



Figura 4.103 Analizador espectro



Figura 4.104 Generador de señales

Paso 2: Se procede a generar energía desde el generador de señales pero antes es necesario configurar la frecuencia en la que la antena se encuentra que es 1.4 GHz y para realizar esto se oprime la tecla **FREQ** y se teclea 1.4 GHz. Ver Figura 4.105.



Figura 4.105 Configuración de la frecuencia en el generador de señales

Paso 3: Lo siguiente es configurar la amplitud, se ubicará hasta los 20 dBm, que es el valor máximo generado.



Figura 4.106 Configuración de la amplitud en el generador de señales

Paso 4: Ahora para poder realizar la conexión del pig tail con el generador de señales es necesario el uso de un adaptador N-macho a SMN-Hembra. Ver Figura 4.107.



Figura 4.107 Adaptador N-macho a SMN-Hembra

Paso 5: Ya conectado el adaptador, se procede también a realizar la conexión del pigtail como se aprecia en la Figura 4.108.



Figura 4.108 Conexión del generador de señales y el pigtail.

Paso 6: Suministrar la energía a la antena Yagi para ello se presiona la tecla *RF/ON*, ver figura 4.109.



Figura 4.109 Activación de la salida RF

Paso 7: Configurar el analizador espectro y conectar una antena.

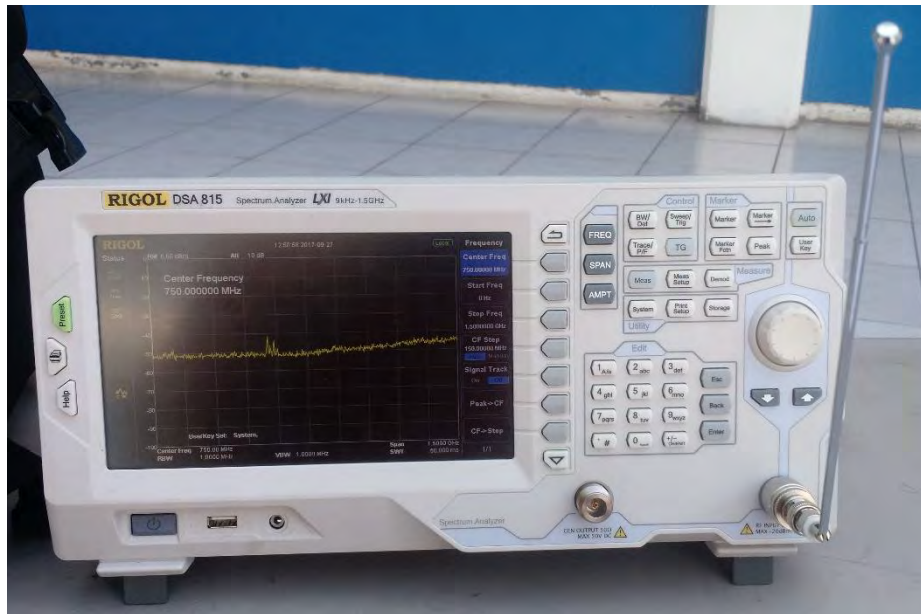


Figura 4.110 Analizador de espectro con antena conectada

Paso 8: Configurar la frecuencia en el analizador de espectros se presiona la tecla FREQ, y se elige una frecuencia central igual a la frecuencia de resonancia de la antena, es decir 1.4 GHz.



Figura 4.111 Configuración de frecuencia en el analizador de espectro

Paso 9: Configurar la amplitud usando la función AMPT y posteriormente el botón de más opciones, ver figura 4.112.



Figura 4.112 Configuración de amplitud en el analizador de espectro

Paso 10: Se elige la opción de pre-amplificación activando RF PREAMP. También se selecciona la opción Auto Range por lo que al presionarse se podrá apreciar como en la Figura 4.113.

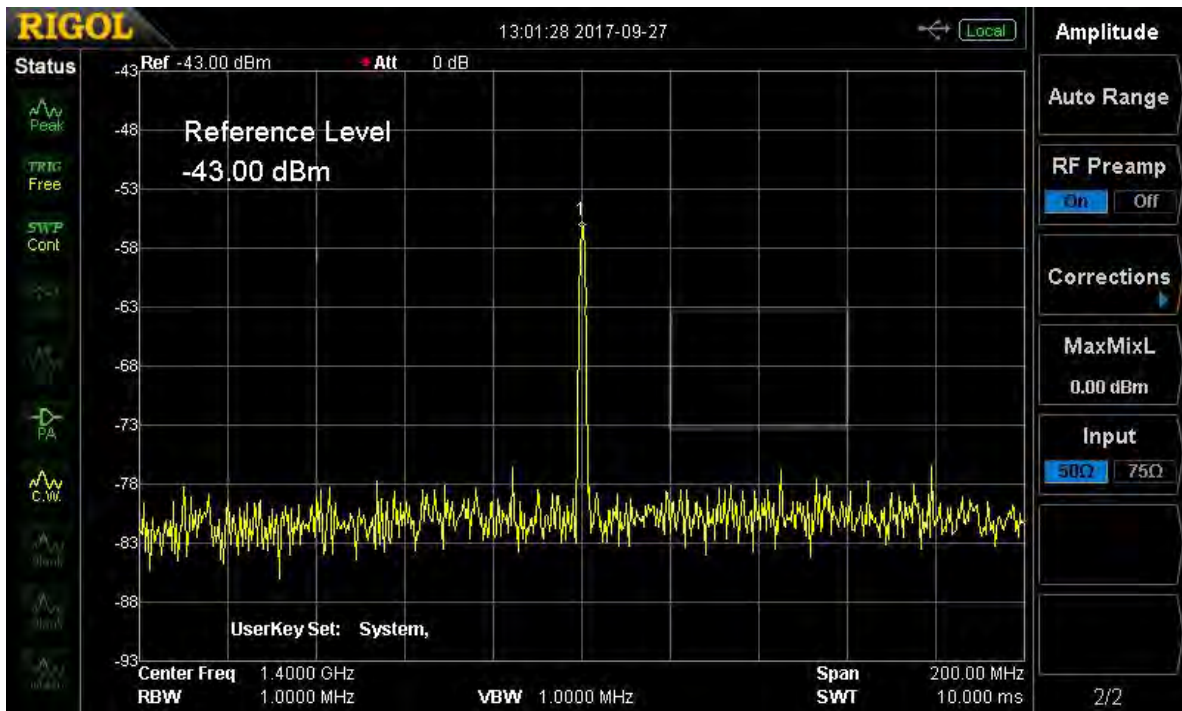


Figura 4.113 Configuración final del analizador espectro

Paso 11: Presionar la tecla PEAK del analizador espectro y de este modo se observará en pantalla el valor de potencia para ese pico de señal, en la imagen 4.114 se puede apreciar que la potencia es de -56.30 dBm.

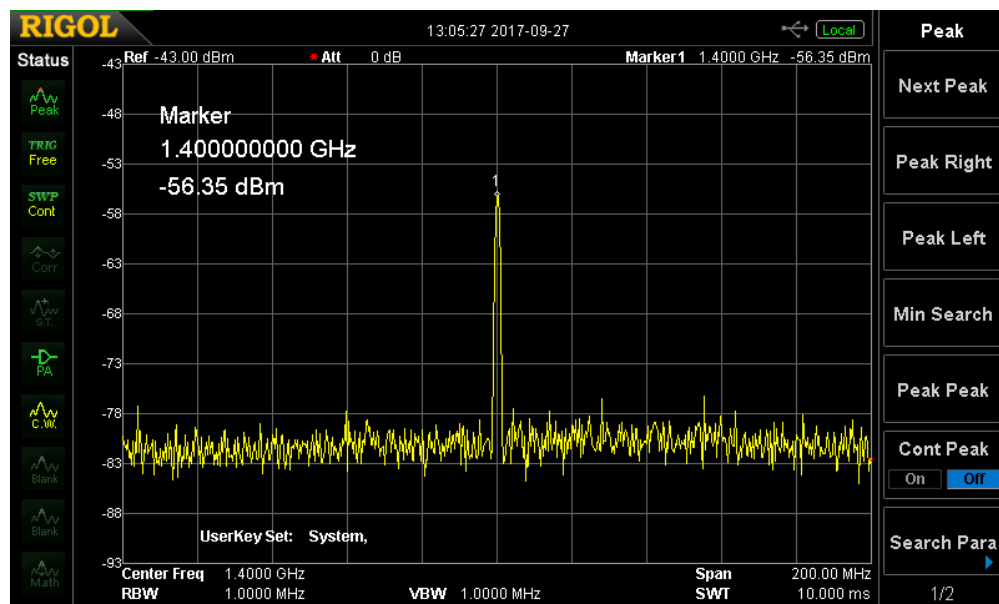


Figura 4.114 Resultados de la potencia de la antena Yagi.

Paso 12: Los resultados que se obtienen hasta ahora son inestables, entonces se recurre a realizar una configuración. Se ubica la tecla TRACE/P/F que permite establecer los parámetros relacionados con la traza, al presionar saldrán diversas opciones por lo que se elegirá la función Trace Type y finalmente la función Max Hold que permite visualizar el máximo barrido múltiple de cada punto de la traza y actualiza los datos si se genera un nuevo máximo de barridos sucesivos. Ver imagen 4.115.

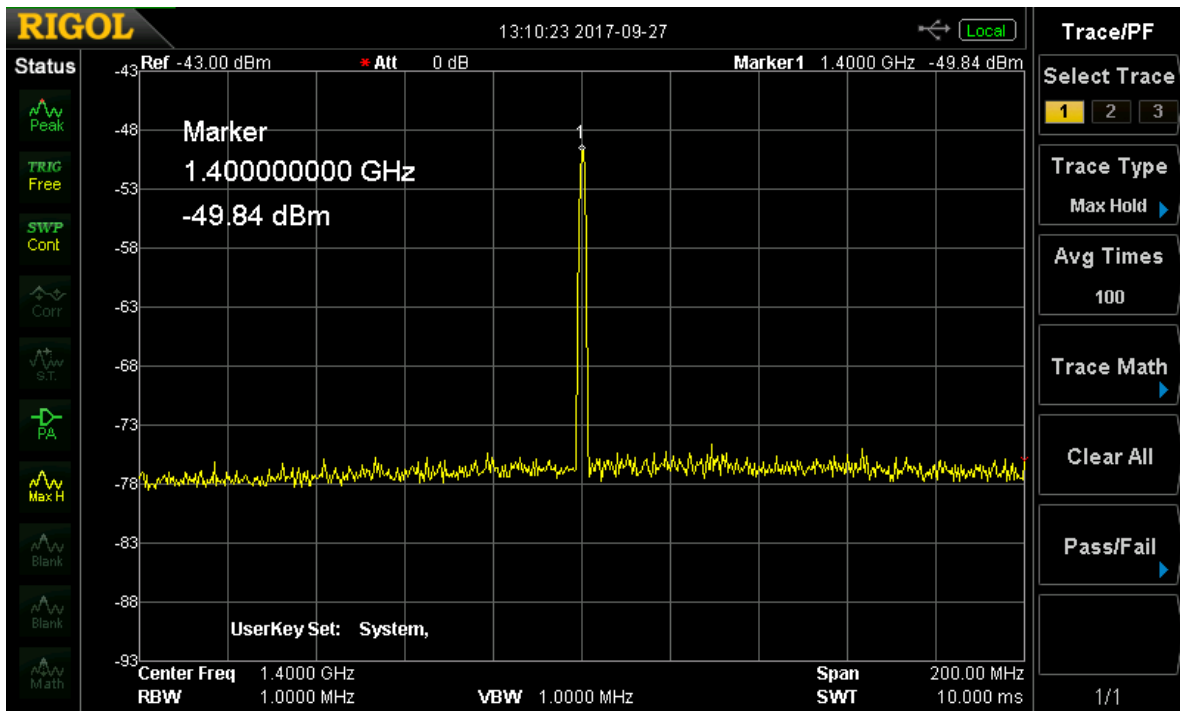


Figura 4.115 Mejora de resultados por la función Max Hold

Paso 13: Ahora se posiciona la antena girándola diez grados para realizar una nueva medición de potencia, repitiendo este procedimiento para incrementos de 10 grados hasta completar una rotación completa. Los valores obtenidos de potencia para los grados considerados son registrados en una tabla. La medición contempla con la antena polarizada horizontal y verticalmente, ver figuras 4.116 y 4.117.



Figura 4.116 Antena Yagi polarizada horizontalmente



Figura 4. 117 Antena Yagi polarizada verticalmente

Las mediciones de potencia obtenidas se presentan en la Tabla 4.3. y son utilizados en el diagrama polar para construir el patrón de radiación que se muestran en las figuras 4.118 y 4.119.

Tabla 4. 3 Tabla plano horizontal

Ángulo (grado)	Nivel RF (dBm)	Ángulo (grado)	Nivel RF (dBm)
10	-44.26	190	-55.02
20	-47.92	200	-58.42
30	-49.43	210	-61.03
40	-51.32	220	-58.52
50	-54.96	230	-56.67
60	-55.42	240	-58.24
70	-54.80	250	-60.00
80	-53.58	260	-59.60
90	-52.88	270	-56.66
100	-55.53	280	-54.07
110	-53.01	290	-50.86
120	-54.14	300	-53.01
130	-56.40	310	-55.92
140	-57.00	320	-53.01
150	-61.47	330	-51.54
160	-57.60	340	-48.04
170	-56.74	350	-44.50
180	-52.49	360	-41.09

Tabla 4. 4 Tabla plano vertical

Ángulo (grado)	Nivel RF (dBm)	Ángulo (grado)	Nivel RF (dBm)
10	-62.59	190	-58.11
20	-62.27	200	-56.40
30	-60.96	210	-46.09
40	-54.92	220	-44.63
50	-53.64	230	-44.15
60	-55.23	240	-45.78
70	-56.86	250	-48.47
80	-56.88	260	-57.13
90	-60.44	270	-55.13
100	-58.45	280	-53.21
110	-57.63	290	-55.75
120	-55.94	300	-60.70
130	-55.05	310	-54.16
140	-52.23	320	-60.44
150	-54.91	330	-56.70
160	--50.64	340	-54.96

170	-57.74	350	-58.45
180	-59.10	360	-55.43

Como se puede observar en las Figuras 4.118 y 4.119, los patrones de radiación obtenidos nos indican que la antena cumple con el propósito de concentrar la radiación de energía en una dirección establecida, en función de sus respectivos lóbulos. Donde en lóbulo principal se ilustra que se concentra la mayor cantidad de potencia radiada, mientras que en los lóbulos secundarios, laterales y trasero muestran las pérdida de energía producidas, las cuales son bajas en comparación con el lóbulo principal de la antena propuesta.

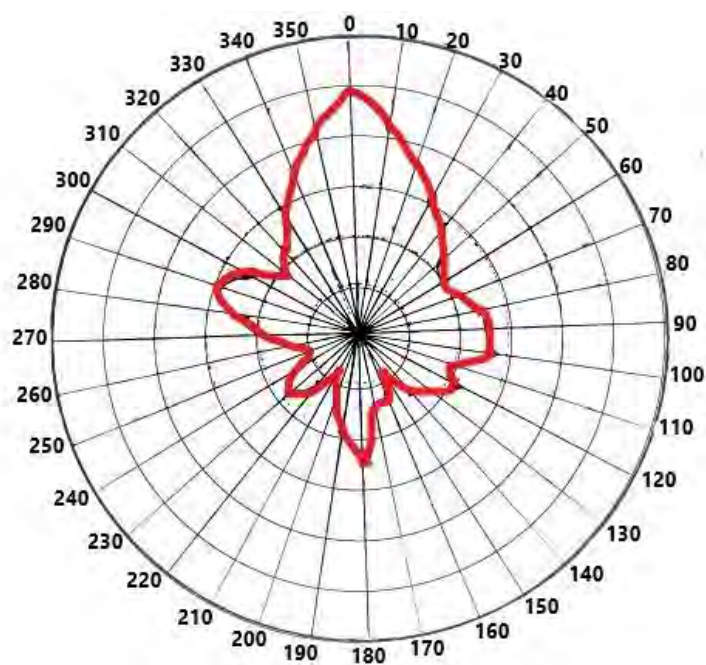


Figura 4.118 Diagrama plano vertical

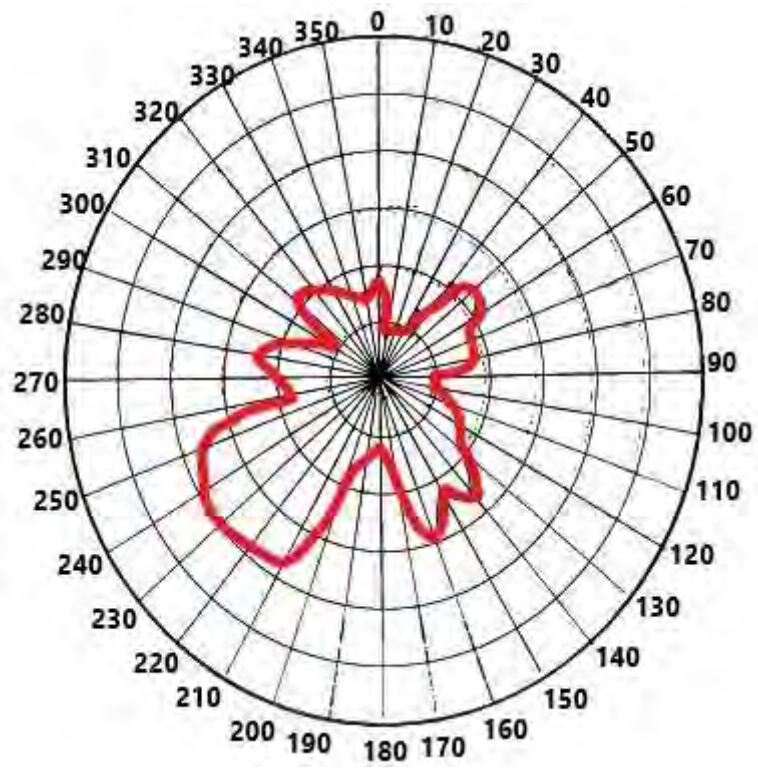


Figura 4.119 Diagrama plano horizontal

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este proyecto de tesis se realizó una revisión amplia acerca de los diferentes tipos de antenas. Se tuvo la oportunidad de revisar los tipos de antenas que existen, sus parámetros, su modo de operación, sus usos e incluso saber la importancia que tienen en el área de telecomunicaciones. Se realizó también una investigación más detallada acerca de las antenas Yagi, de sus elementos que la conforman como son el reflector, los directores e incluso el espaciamiento que debe existir entre cada elemento, debido a que si estos datos no son calculados adecuadamente, los resultados obtenidos pueden ser no deseados. Después de efectuar la investigación del estado del arte, se realizó el diseño de una antena Yagi mediante el uso de paquetes de cómputo que son orientados al diseño asistido por computadora (CAD). Y gracias a esto se ha podido simplificar la simulación con el software llamado CST STUDIO SUITE 2017, el cual es un software que por sus características y los resultados que proporciona en la simulación, puede ser ampliamente utilizado para propósitos didácticos, principalmente para introducir a estudiantes en el diseño, caracterización y la optimización de antenas que operan en las bandas de frecuencia de HF, VHF y UHF. Cabe mencionar que diseñar la antena en el software fue sencillo, sin embargo para realizar dicho diseño es necesario obtener las medidas adecuadas de los elementos de la antena, por tanto, se realizaron los cálculos pertinentes. Se debe tener en cuenta que la teoría debe ser fundamental para la comprensión a fondo al momento de realizar la antena. Al finalizar las simulaciones se logró obtener los principales parámetros mediante el software, por lo que se procedió a familiarizarse con los instrumentos necesarios para poder contrastar los resultados de la simulación con los resultados medidos en una antena Yagi física, en la banda UHF de frecuencia 1.4 GHz. Para realizar dicha medición se utilizó un generador de señales, el cual nos permitió generar una señal y mediante el analizador de espectros medir la pérdida de retorno, el VSWR y la frecuencia de operación.

Con el objetivo de tener un segundo criterio de caracterización, se realizaron mediciones mediante el analizador de antenas y el software ANTSCOPE para visualizar los resultados en la carta Smith.

Con base a las mediciones realizadas, podemos concluir que la antena propuesta se encuentra operando en un valor muy cercano a la frecuencia que fue diseñada, así también, se puede observar que los valores de pérdida son mínimos, por tanto la transmisión se realiza de manera eficiente.

Finalmente, se midieron los patrones de radiación de la antena a diferentes ángulos y se dibujaron los diagramas de radiación. Como se puede observar en los diagramas de radiación, los patrones de radiación obtenidos nos indican que la antena cumple con el propósito de concentrar la radiación de energía en una dirección establecida, en función de sus respectivos lóbulos. Donde en lóbulo principal se ilustra que se concentra la mayor cantidad de potencia radiada, mientras que en los lóbulos secundarios, laterales y trasero muestran las pérdida de energía producidas, las cuales son bajas en comparación con el lóbulo principal de la antena propuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. A. Simon R. S Aunders, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Inglaterra: Wyley, 2005.
- [2] W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, 4 ed., Mexico: PEARSON EDUCACIÓN, 2003.
- [3] I. T. U. (ITU), Radio Regulations, 2012.
- [4] J. D. Kraus, Antennas, Estados Unidos: McGraw-Hill Companies, 1988.
- [5] W. L. Stutzman, Antenna Theory and Design, Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc, 2012.
- [6] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Hoboken, New Jersey.: John Wiley & Sons, 2005.
- [7] A. C. Aznar, Antenas, UPC, 2002.
- [8] S. G. Vázquez, Elementos de sistemas de telecomunicaciones, España: Paraninfo, 2015.
- [9] G. H. Joseph Carr, Practical Antenna Handbook, EUA: MC Graw Hill, 1989.
- [10] I. Poole, Antennas For VHF and UHF, Great Britain: Radio Society of Great Britain, 1994.
- [11] Y. C. a. C. Wang, Characteristic Modes: Theory and Applications in Antenna Engineering, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2015.
- [12] R. C. Johnson, Antenna Engineering Handbook, New York: McGraw-Hill, inc., 1993.
- [13] T. A. Milligan, Modern Antenna Design, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC, 2005.
- [14] H. J. Visser, Array and Phased Array Antenna Basics, Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [15] E. C. Jordan, Electromagnetic Waves and Radiating Systems, 2 ed., Englewood Cliffs New Jersey: Prentice Hall, 1950.
- [16] D. K. Cheng, Fundamentos de Electromagnetismo para Ingenieria, Mexico: Pearson Education , 1997.
- [17] M. F. Zanuy, Sistemas de Comunicaciones, Mexico: Marcombo, 2001.

REFERENCIAS DE INTERNET

H1. ZELAND IE3D Disponible en: <https://www.rfglobalnet.com/doc/zeland-ie3d-version-212-features-rfid-antenn-0001>

H2. Ansoft HFSS Disponible en: <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>

H3. Microwave Studio CST Disponible en: <https://www.cst.com/products/cstmws>

H4. FEKO Disponible en: <https://www.feko.info/>

H5. Antenna Magus Disponible en: <http://www.antennamagus.com/>

H6. Tabla de relación VSWR y perdida de retorno Disponible en: <http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/VSWRreturn.pdf>

ANEXOS



RECONOCIMIENTO

A REYES ARTURO POLANCO TORRES

Por su participación como **Ponente** en el **Quinto Encuentro de Jóvenes Investigadores**, efectuado del 17 al 19 de Octubre 2017.

Chetumal, Quintana Roo, 19 de Octubre 2017.


Ing. Víctor Manuel Alcérreca Sánchez
Director General del COQCYT

