



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Diseño y Fabricación de una antena Cuasi-Fractal para la
Banda UHF

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

PRESENTA

ING. OSKAR THOMÁS CERÓN DURÁN

Director

Dr. Jorge Roberto Sosa Pedroza

Ciudad de México, Noviembre 2017





RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño de una antena cuasi fractal, utilizando los principios teóricos y características de una antena tipo cruz, reduciendo sus dimensiones mediante los principios básicos de un fractal, buscando mantener un diagrama de radiación, además de un acoplamiento óptimo para ser utilizada dentro de la banda de ultra alta frecuencia (VHF), con dimensiones menores a la antena utilizada actualmente en la estación terrena de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica - Zacatenco. También se presenta un análisis de diferentes parámetros del diseño propuesto, tales como grosor del conductor, tamaño del plano de tierra, separación entre la estructura y el plano de tierra, etc., utilizando la herramienta computacional de simulación CST Microwave Studio, así como la construcción y caracterización de la antena.

En el Capítulo 1 se describen algunos de los principales parámetros de una antena los cuales son necesarios para entender el comportamiento de una antena.

En el Capítulo 2 se refiere al estado del arte de este trabajo, por lo que se explican las diferentes bandas de frecuencias existentes en el espectro radioeléctrico, una breve descripción del sistema de antenas de una estación terrena, tipos de antenas, la antena utilizada en la estación terrena de ESIME-Zacatenco, antenas de cruz, y antenas fractal.

En el Capítulo 3 se propone una estructura, la cual se introduce a un proceso de análisis paramétrico para conocer las dimensiones y parámetros óptimos para que la estructura propuesta cumpla con los objetivos de este trabajo.

En el Capítulo 4 se describe el proceso de construcción y caracterización de la antena Cuasi-Fractal, para después realizar la comparación de resultados entre los valores simulados y los valores caracterizados, además de comparar la estructura propuesta con la antena utilizada en la estación terrena de ESIME-Zacatenco.

Por último, se exponen las conclusiones del trabajo realizado.



ABSTRACT

This work presents the design of a Quasi-Fractal antenna, using the theoretical principles and characteristics of a cross antenna type, Reducing its dimensions through the basic principles of a fractal, Looking to keep its radiation diagram, as well as an optimal coupling to be used within ultra-high frequency (VHF) band, with dimensions smaller than the antenna currently used in the Earth station of the Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica - Zacatenco. Also presented an analysis of different parameters using The Computational Simulation Tool CST Microwave Studio to the proposed design such as conductor thickness, ground plane size, separation between structure and ground plane, etc., as well as the construction and characterization of the proposed antenna; The above in order to check the simulated theoretical designs with a real physical design.

The Capítulo 1 describes some of the main parameters of an antenna which are necessary to understand the behavior of an antenna.

The Capítulo 2 describes the state of the art of this work, which explains the different bands of frequencies existing in the radio spectrum, a brief description of the antenna system of an earth station, types of antennas, the antenna used in the station terrestrial of ESIME-Zacatenco, cross antennas type, and fractal antennas.

The Capítulo 3 proposes a structure, which is introduced to a parametric analysis process to know the dimensions and parameters optimal for the proposed structure to meet the objectives of this work.

In the Capítulo 4 It describes the process of construction and characterization of the quasi-Fractal antenna, and then perform the comparison of results between the simulated values and the values characterized, in addition to comparing the proposed structure with the antenna used in the Earth station of ESIME-Zacatenco.

Finally, the conclusions of the work carried out are exposed.



A mis padres





AGRADECIMIENTOS



A mis padres, Margarita Durán Gallegos y Tomas Cerón Hernández por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de nuestra vida, por permitirme seguir mis mestas y sobre todo, por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mis asesores, el Dr. Jorge Roberto Sosa Pedroza, por su apoyo, paciencia, consejos y enseñanzas, por compartirme de su sabiduría así como por proporcionarme de las herramientas necesarias para mi desarrollo en la maestría.

A el comité tutorial conformado por el M. en C. Miguel Sanchez, el Dr. Eloy Ramírez, El Dr. Manuel Rodríguez y al el M. en C. Luis Carrión, por sus valiosas opiniones, comentarios, depuraciones, consejos, propuestas, soluciones para desarrollar un trabajo de calidad.

A mis compañeros y amigo de la Sección de Estudios de postgrado e Investigación, que hicieron amena mi estadía en la maestría.

A mis hermanos por su apoyo incondicional.

A Marlene y Laurita por su apoyo y ayuda en los procesos y tramites escolares.

A el equipo de trabajo del Laboratorio Nacional de Telecomunicaciones y Antenas por su apoyo para realizar la caracterización de las antenas diseñadas.

Al la Escuela Superior de ingeniería Mecánica y Eléctrica, por el financiamiento a través de proyectos BEIFI y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento a través de la beca CONACYT.





OBJETIVO

- Diseñar y construir una antena de ganancia media, con un diagrama de radiación directivo, polarización circular, capaz de ser utilizada para la banda de ultra alta frecuencia (UHF) con dimensiones menores a la antena utilizada actualmente en la estación terrena de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco.

Objetivos Particulares

- Proponer una antena que proporcione una ganancia media y polarización circular, capaz de trabajar en la banda UHF.
- Reducir las dimensiones de la estructura propuesta.
- Mediante el uso del software comercial CST Microwave Studio, modelar y simular y la estructura para conocer el comportamiento de sus parámetros principales.
- Realizar uno o más análisis paramétricos que permitan obtener una estructura, ganancia media, con un diagrama de radiación directivo, polarización circular, capaz de ser utilizada para la banda de ultra alta frecuencia (UHF).
- Construir la estructura.
- Caracterizar la estructura.
- Comparar parámetros principales obtenidos en la simulación con los caracterizados.
- Comparar parámetros y características de la estructura propuesta contra la antena utilizada en la estación terrena de ESIME-Zacatenco.



Contenido

OBJETIVO	I
Objetivos Particulares.....	I
Contenido.....	II
JUSTIFICACIÓN.....	V
INTRODUCCIÓN	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE VARIABLES, ACRONIMOS Y SIGLAS	XIII
Capítulo 1 Parámetros de las antenas	1
Introducción.....	1
Principales parámetros de antenas	2
Impedancia de entrada.....	2
Coeficiente de Reflexión y SWR (Standing Wave Ratio)	3
Coeficiente de Reflexión.....	4
Relación de Onda estacionaria (SWR por sus siglas en inglés).....	5
Ancho de Banda	7
Diagrama de radiación	8
Diagrama de radiación Isotrópico	9
Diagrama de radiación Omnidireccional	9
Diagrama de radiación Direccional.....	10
Lóbulos en el diagrama de radiación	11
Diagrama del campo	11
Diagrama de potencia	11
Ancho de Haz.....	12



Densidad de potencia Radiada	12
Ganancia	13
Directividad	13
Polarización.....	14
Ecuación de transmisión de Friis.....	15
Capítulo 2 Estado del arte	16
Introducción.....	16
Banda de Frecuencias	16
Sistema de antenas de una estación terrena	17
Tipos de antenas	18
Antenas de alambre.....	18
Antenas de apertura.....	19
Antenas de Microcinta.....	19
Antena UHF utilizada en la estación terrena de ESIME-Zacatenco.....	20
Antena de Cruz.....	21
Antena de Ocho Brazos	23
Antena Rómbica de Cruz.....	24
Antena trébol de cuatro hojas	25
Antenas fractales	26
Capítulo 3 Diseño y Modelado	30
Introducción.....	30
Diseño Propuesto.....	31
Análisis paramétrico de la constante de entonación, K	37
Análisis paramétrico de la separación del plano de tierra y comparación de resultados de una estructura simétrica y una asimétrica.	46



Análisis Paramétrico de la localización del puerto de alimentación	57
Análisis paramétrico de las dimensiones del plano de tierra	63
Análisis paramétrico del grosor del conductor	67
Dimensiones finales de la estructura Cuasi-Fractal	69
Diseño y Modelado final de la estructura Cuasi-Fractal en UHF	71
Capítulo 4 Fabricación y Caracterización	76
Introducción.....	76
Fabricación.....	76
Material y Equipo de fabricación	76
Elaboración de la estructura de alambre de acuerdo al diseño y dimensiones de la estructura Cuasi-Fractal.....	78
Elaboración del plano de tierra de la a estructura Cuasi-Fractal	81
Colocación del puerto de alimentación y montaje de la estructura de alambre y el plano de tierra.....	82
Caracterización de la antena Cuasi-Fractal.....	84
Comparación de resultados entre simulación y caracterización	92
Comparación de resultados entre la antena Quasi-Fractal y la antena Yagi ..	95
CONCLUSIONES	97
TRABAJO A FUTURO.....	98
Bibliografía	99
Anexos.....	103



JUSTIFICACIÓN

Regularmente una estación terrena utiliza antenas que operan en la banda de VHF (Very-High Frequency) y UHF (Ultra-High Frequency) que sean directivas y que tengan una buena ganancia, siendo ésta última un aspecto muy importante para la comunicación satelital. La antena tipo Yagi es comúnmente utilizadas para cubrir las comunicaciones entre una estación terrena y un satélite pequeño, pero lamentablemente, las dimensiones de este tipo de estructuras son de gran tamaño

Tomando en cuenta que las antenas de microcinta o parche no son la mejor opción para un sistemas de comunicación en UHF ya que requiera niveles altos de potencia y que comúnmente las antenas diseñadas para la banda UHF del espectro electromagnético son en general de gran tamaño y peso lo que conlleva problemas de inestabilidad en la estructura y en el sistema de montaje, este problema recae en el sistema de montaje generando la necesidad de tener sistemas de montaje más complejos y bastante robustos, en algunos casos se utilizan rotores para controlar y/o corregir el apuntamiento del diagrama de la antena. A causa del diseño de su estructura de estas antenas al momento de ser manipuladas por un rotor, se vuelven inestables con el movimiento de este, ya que su estructura se mantiene en un estado de vibración, perdiendo precisión en el apuntamiento. Además de que este tipo de situaciones influyen en la vida útil del rotor, asimismo no se debe de perder la conexión en un sistema de comunicación por lo que el remplazo de un rotor genera pérdidas de información y tiempo de reparación.

Un ejemplo de esto es la antena Yagi utilizada en la estación terrea de la Escuela Superior Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, tiene una longitud mayor a 5 metros, por lo que al realizar el seguimiento del satélite pequeño se genera un brazo de palanca, lo cual provoca un error de apuntamiento con el satélite además de llegar a forzar el rotor de seguimiento.



Con base a esto es necesario tener una antena de dimensiones pequeñas y de peso ligero que mantenga sus características de ganancia, directividad y sea capaz de trabajar en la banda UHF, que permita tener una menor resistencia al viento y una mayor estabilidad en su estructura y en su sistema de montaje, ya sea fijo o de rotor, en comparación a la antena actualmente en uso.



INTRODUCCIÓN

Este trabajo propone una estructura capaz de trabajar en la banda UHF, con dimensiones menores a la antena utilizada actualmente en la estación terrena de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco y que permita tener una menor resistencia al viento y una mayor estabilidad en su estructura.

Por lo anterior, una antena de cruz es una buena opción al ser una estructura de ganancia media y polarización circular, que consiste en un conductor en forma de una cruz sobre un plano de tierra, pero esta estructura sigue teniendo dimensiones grandes por lo que en este trabajo se utiliza un método para reducir sus dimensiones.

Desafortunadamente, las técnicas de reducción de dimensiones más conocidas están orientadas principalmente a estructuras de microcinta planas, el cambio de sustrato se realiza convenientemente en función de las propiedades del material y permitividad, para obtener menores dimensiones.

Por lo que se propone realizar una reducción a las dimensiones de la antena de cruz utilizando los principios básicos de Reoderer así como los principios básicos de una geometría fractal.

Sin embargo, lo anterior no es tarea fácil ya que es imprescindible reducir el tamaño de una antena de alambre, mientras se mantienen sus métricas más importantes tales como parámetros de reflexión, diagrama de radiación o ganancia y es por eso por lo que también se realizan una serie de análisis paramétrico de la estructura para buscar un funcionamiento óptimo de la misma.



LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Modelo equivalente en circuitos de la impedancia de entrada de una antena*
- Figura 1.2 Descripción grafica de una onda incidente y reflejada en una línea de transmisión*
- Figura 1.3 Desarrollo de una onda estacionaria en una línea de transmisión: a) Onda Incidente, b) Onda reflejada, c) Onda estacionaria*
- Figura 1.4 Ancho de Banda*
- Figura 1.5 Antena Hipotética que radia en todas las direcciones*
- Figura 1.6 Diagrama de radiación Omnidireccional emitido por una antena*
- Figura 1.7 Diagrama de radiación Direccional emitido por una antena*
- Figura 1.8 Lóbulos en un diagrama de radiación directivo*
- Figura 1.9 Representación de un diagrama de radiación mediante*
- Figura 1.10 Tipos de polarización*
- Figura 2.1 Tipos de antenas de alambre*
- Figura 2.2 Tipos de antenas de apertura*
- Figura 2.3 Antenas de Microcinta*
- Figura 2.4 Elementos de una antena Yagi*
- Figura 2.5 Diseño de Reodere de una antena de cruz*
- Figura 2.6 Antena de Cruz de Ocho Brazos*
- Figura 2.7 Dimensiones de una Antena Cruz Rómbica [18]*
- Figura 2.8 Antena trébol de Curato Hojas [18]*
- Figura 2.9 Curva de Koch; K_0) Línea sin Iteración, K_1) Línea con una Iteración*
- Figura 2.10 Curva de Koch; K_0) Línea sin Iteración, K_1) Línea con una Iteración, K_2) Línea con dos Iteraciones, K_3) Línea con tres Iteraciones*
- Figura 2.11 Geometrías Fractales : a) Triángulo Sierpinski, b) Alfombra de Sierpinski, c) Curva de Koch, d) Curva Minkowski, e) Curva de Hilbert*
- Figura 3.1 Dimensiones de una antena de cruz*
- Figura 3.2 Reducción del segmento de $\lambda/4$, utilizando una geometría cuadrada*
- Figura 3.3 Reducción del segmento de $\lambda/2$, utilizando una geometría cuadrada*
- Figura 3.4 Dimensiones de las modificaciones propuestas*
- Figura 3.5 Propuesta para evitar los puntos de contacto (corto)*
- Figura 3.6 Dimensiones de las modificaciones propuestas (Evitando Cortos)*
- Figura 3.7 Modificación de las proporciones de las figuras euclidianas*
- Figura 3.8 Dimensiones de la estructura Cuasi-Fractal*
- Figura 3.9 Comparativa de las dimensiones del diseño propuesto*



- Figura 3.10 Dimensiones del Diseño Cuasi-Fractal, utilizando la constante de redimensionamiento K*
- Figura 3.11 Comportamiento del coeficiente de reflexión con respecto a la constante de redimensionamiento K*
- Figura 3.12 Porcentaje de reducción de acuerdo a la constante K*
- Figura 3.13 Dimensiones de la antena Cuasi Fractal diseñada a 145.5 MHz*
- Figura 3.14 Coeficiente de Reflexión de la antena Cuasi-Fractal diseñada a 2.4 GHz*
- Figura 3.15 Diagrama de radiación en polar en corte $\Phi=0$ de la antena QF diseñada a 2.4 GHz.*
- Figura 3.16 Diagrama de radiación en polar en corte Azimut=0 de la antena QF diseñada a 2.4 GHz*
- Figura 3.17 Diagrama de radiación en 3D de la antena QF diseñada para operar en 2.4 GHz.*
- Figura 3.18 a) Estructura no simétrica, b) Estructura simétrica*
- Figura 3.19 Coeficiente de reflexión entre la antena simétrica y la no simétrica*
- Figura 3.20 Diagrama de radiación en 3D ubicado en 3 GHz*
- Figura 3.21 Resultados del coeficiente de reflexión en relación a la separación del plano de tierra*
- Figura 3.22 Dimensiones de la antena Cuasi-Fractal Simétrica a 2.4 GHz*
- Figura 3.23 Resultados del coeficiente de reflexión de la estructura simétrica*
- Figura 3.24 Diagrama de radiación en 3D de la antena Cuasi-Fractal en 2.4 GHz*
- Figura 3.25 Diagrama de radiación en 3D de la antena Cuasi-Fractal simétrica a 2.4 GHz en el plano; a) azimut, b) ϕ*
- Figura 3.26 Dimensiones de la antena Cuasi-Fractal con una frecuencia de operación de 434 MHz*
- Figura 3.27 Antena Cuasi-Fractal a 434 MHz con el puerto de alimentación en la parte inferior central*
- Figura 3.28 Vista Frontal del diagrama de radiación con el puerto de alimentación en la parte inferior central*
- Figura 3.29 Antena Cuasi-Fractal a 434 MHz con el puerto de alimentación en la parte inferior derecha*
- Figura 3.30 Vista Frontal del diagrama de radiación con el puerto de alimentación en la parte inferior derecha*
- Figura 3.31 Antena Cuasi-Fractal a 434 MHz con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda*
- Figura 3.32 Vista Frontal del diagrama de radiación con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda*
- Figura 3.33 Diagrama de radiación en polar del plano Φ y Azimut del diagrama de radiación resultante con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda.*
- Figura 3.34 Relación axial y diagrama de radiación en $\Phi=0$ y Azimut=0 normalizado con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda.*
- Figura 3.35 Representación gráfica del análisis paramétrico del plano de tierra*
- Figura 3.36 Análisis del diagrama de radiación en polar con respecto a las dimensiones del plano de tierra*
- Figura 3.37 Representación gráfica de la relación que existe entre la ganancia y N*



Figura 3.38 Análisis de S11 con respecto a las dimensiones del plano de tierra

Figura 3.39 Diagrama para el análisis del grosor del conductor de la estructura Cuasi-Fractal

Figura 3.40 Coeficiente de reflexión del análisis paramétrico de $Nr = 0.5$ ($Rc = 0.17$ cm) hasta $Nr = 1.5$ ($Rc = 0.5$ cm)

Figura 3.41 Diagrama de radiación resultante del análisis de Nr

Figura 3.42 Dimensiones ideales de la estructura Cuasi-Fractal en función de λ

Figura 3.43 Radio ideal del conductor de la estructura Cuasi-Fractal

Figura 3.44 Dimensiones Generales en función de λ de la estructura Cuasi-Fractal y el plano de tierra

Figura 3.45 Separación del plano de tierra con respecto a la estructura Cuasi-Fractal en función de λ .

Figura 3.46 Dimensiones Generales de la Estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Figura 3.47 Parámetros S11 de la estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Figura 3.48 Diagrama de radiación en 3D de la estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Figura 3.49 Diagrama de radiación en polar en corte Phi y Azimut de la estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Figura 3.50 Relación axial del diagrama de radiación del corte Phi y Azimut normalizadas de la estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Figura 4.1 Conector hembra tipo N

Figura 4.2 Hoja A0 con el diseño de la estructura Cuasi-Fractal, pegada en la tabla de 70 cm x 70 cm

Figura 4.3 Clavos en cada esquina interna del diseño de la estructura

Figura 4.4 Doble del alambre en el perímetro del diseño de la estructura

Figura 4.5 Proceso de doblado terminado y material utilizado en el proceso

Figura 4.6 Marco de ángulos de aluminio de 105 cm x 105cm

Figura 4.7 Plano de tierra de la estructura Cuasi-Fractal

Figura 4.8 Unión de las 2 Caras de la placa de cobre

Figura 4.9 Antena Cuasi-Fractal vista frontal

Figura 4.10 Antena Cuasi-Fractal vista lateral

Figura 4.11 Medición del Coeficiente de reflexión

Figura 4.12 Montaje de la antena Cuasi-Fractal en el mástil de la cámara anecoica

Figura 4.13 Montaje de la antena logarítmica en el mástil de la cámara anecoica.

Figura 4.14 Colocación de la antena para realizar la medición del a) Plano Phi y el b) Plano Azimut del diagrama de radiación.

Figura 4.15 Diagrama de radiación medida del plano Phi y Azimut

Figura 4.16 Relación axial y diagramas de radiación normalizados del plano Azimut y Phi.

Figura 4.17 Comparación del coeficiente de reflexión medido contra el simulado

Figura 4.18 Comparación del diagrama de radiación en el plano Azimut



Figura 4.19 Comparación del diagrama de radiación del plano Phi

Figura 4.20 Comparación de la relación axial

Figura 4.21 Dimensiones Quasi-Fractal vs Yagi



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Símbolos y nombres de las 9 bandas de Frecuencia

Tabla 3.1 Datos de Simulación

Tabla 3.2 Tabla comparativa de la primera optimización

Tabla 3.3 Parámetros utilizados para el modelado y simulación de la antena de referencia

Tabla 3.4 Tabla Comparativa de la segunda optimización

Tabla 3.5 Datos para el modelado de la simulación en CST de la tercera optimización

Tabla 3.6 Tabla comparativa de los resultados de la tercera optimización

Tabla 3.7 Datos de modelado para el análisis del plano de tierra

Tabla 3.8 Datos de modelado para el análisis del grosor del conductor

Tabla 3.9 Comparación de resultados del análisis paramétrico del grosor del conductor

Tabla 3.10 Datos de simulación y modelado para la antena Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Tabla 4.1 Material y equipo utilizados en la fabricación

Tabla 4.2 Características del conector tipo N

Tabla 4.3 Datos de la antena Logarítmica

Tabla 4.4 Datos de medición de la antena transmisora Tx y receptora Rx

Tabla 4.5 Comparación de los resultados simulados y medidos

Tabla 4.6 Comparación de parámetros de la antena Quasi-Fractal y la antena Yagi



LISTA DE VARIABLES, ACRONIMOS Y SIGLAS

E_{max} : Campo eléctrico máximo.	G_R : Ganancia de la antena receptora.	P_R : Potencia recibida.
*.DFX: Formato de diseños asistidos por computadora.	G_T : Ganancia de la antena transmisora.	$P_{radiada}$: Potencia Radiada.
2D: Dos dimensiones.	H: Campo Magnético. ,	P_t : Potencia de transmisión.
3D: Tres dimensiones.	HPBW: Ancho de haz de media potencia.	PEC: Perfect Electric Conductor.
A_e : Área efectiva.	I: Corriente.	r_c : Radio del conductor.
BW: Bandwidth.	I_i : Corriente incidente.	R_e : Resistencia de entrada.
CENAM: Centro Nacional de Metrología.	I_L : Corriente de la carga.	R_r : Resistencia de Radiación.
CNIES: Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas.	I_r : Corriente reflejada.	R_{Ω} : Pérdidas óhmicas.
CST: Computer Simulation Technology.	IPN: Instituto Politécnico Nacional.	RA: Relación axial.
d: separación entre la antena receptora y la transmisora.	K: Constante de redimensionamiento.	RF4: Tipo de sustrato.
D: Directividad.	K_n : n iteraciones de la curva de Koch.	RL: Return Losses, Pérdidas de retorno.
dB: Decibeles.	L: Pérdidas por propagación en espacio libre.	RMS: (Root Mean Square) Valor cuadrático medio.
E: Campo Eléctrico. ,	LaNTA: Laboratorio Nacional en Telecomunicaciones y Antenas.	ROE: Relación de Onda Estacionaria.
E_{min} : Campo eléctrico mínimo.	MW: MicroWave.	Rx: Antena Receptora.
ESIME: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.	$N*\lambda/18$: Variable de redimensionamiento del plano de tierra, 68	S_{11} : Parametro de dispersión RL.
$F(\theta, \phi)$: Función de distribución relativa del campo eléctrico o potencia con dominio θ y ϕ .	NEC: Numerical Electromagnetic Code.	SEPI: Sección de Estudios de Postgrado e Investigación.
f_{max} : Frecuencia máxima.	Nr: Variable del redimensionamiento del conductor.	SWR: Standing Wave Ratio.
f_{min} : Frecuencia mínima.	$P_{entregada}$: Potencia entregada.	Tx: Antena Transmisora.
F_o : Frecuencia optima de operación.	P_{in} : Potencia total de entrada (aceptada).	$U(\Phi, \theta)$: Intensidad de radiación.
$F_{\phi}(0, \phi)$: Plano Azimuthal ϕ de la función de distribución relativa del campo eléctrico o potencia.	$P_{pérdidas}$: Potencia de pérdidas.	UHF: Ultra High Frequency, Ultra Alta Frecuencia.
		V_i : Tensión eléctrica incidente.
		V_L : Tensión eléctrica en la carga.
		V_{max} : Tensión eléctrica máxima.
		V_{min} : Tensión eléctrica mínima.
		V_r : Tensión eléctrica reflejada.
		VHF: Very High Frequency.
		VSWR: Voltaje Standing Wave Ratio, Tensión eléctrica de la relación de onda estacionaria.
		X_e : Reactancia de entrada.



Z_0 : Impedancia característica de la línea de transmisión.

Z_e : Impedancia de entrada.

Z_L : Impedancia de la carga.

Γ : Coeficiente de reflexión.

θ : Teta.

λ/n : Variable de redimensionamiento de la separación entre el plano de

tierra y la

estructura Cuasi-Fractal

λ_0 : o λ es longitud de Onda de la frecuencia de operacion.

ϕ : Phi.



Capítulo 1 Parámetros de las antenas

Introducción

Una antena es una estructura hecha de material metálico capaz de convertir la energía eléctrica de una línea de transmisión en una onda electromagnética la cual se propaga en el espacio libre o viceversa, También una antena forma parte de un sistema de trasmisión o recepción diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas, por lo que una antena es un dispositivo importante para las comunicaciones inalámbricas.

Una antena es un dispositivo pasivo y en base al teorema de reciprocidad sabemos que sus característica y desempeño son similares tanto para la recepción como para la transmisión, éstas características conocidos también como parámetros principales de una antena se explicaran más adelante y pueden ser la ganancia, directividad, frecuencia de operación, el ancho de banda, polarización, impedancia de entrada, etc.

El diseño de una antena depende de sus principales parámetros, por ejemplo, una radiodifusora busca tener una cobertura con antena de diagrama omnidireccional, mientras que, en una comunicación fija, se utiliza una antena directiva.

Las diversidades de sus parámetros principales han permitido desarrollar una gran variedad de diseños de antenas para una gran cantidad de aplicación ya sea para una comunicación aeroespacial, aérea, móvil, naval, terrestre, etc. Al tener una gran cantidad de diseños para una gran cantidad de aplicación, las antenas de dividen en varios tipos de antena donde las más comunes son las antenas de alambre, microcinta, de apertura, de reflectores o arreglos de antena[1]–[5].



Principales parámetros de antenas

Impedancia de entrada

En el punto de alimentación de la antena se presenta una carga, denominada impedancia de entrada Z_e puede ser afectada por otras antenas u objetos cercanos, pero en este caso se considera que la antena es aislada, la impedancia Z_e es una notación fasorial la cual depende de la frecuencia y posee una parte real $R_e(\omega)$ y una parte Imaginaria $X_e(\omega)$, ecuación (1.1), en el caso de que la impedancia Z_e no tenga una parte reactiva se considera que es una antena resonante.

$$Z_e = R_e + X_e \quad (1.1)$$

La resistencia de entrada R_e es causada por la disipación de la potencia, la cual considera pérdidas de calentamiento en la estructura, pérdidas por el material conductor y pérdidas por radiación de la energía. Mientras que la reactancia X_e representa la potencia que se encuentra en el campo cercano de la antena.

Si la impedancia de entrada de la antena y la impedancia de salida de la fuente de alimentación son iguales a la impedancia de la línea de transmisión, se entregará una potencia máxima a la antena y ésta se radiará.

A la pérdida de potencia en la resistencia de entrada (R_e) causada por radiación de energía, se le considera como una resistencia de radiación (R_r), definida como la resistencia que disipa de manera óhmica la potencia radiada por la antena ($P_{radiada}$), esta potencia se puede conocer mediante la potencia de radiación R_r y la corriente I de la antena tal y como se muestra en la ecuación (1.2).

$$P_{radiada} = I^2 R_r \quad (1.2)$$

También existen pérdidas Óhmicas R_Ω en la R_e de una antena y por lo general son por el conductor, generando pérdidas de potencia $P_{pérdidas}$, en consecuencia, la suma de la potencia radiada y la potencia de pérdidas será igual a la potencia entregada $P_{entregada}$, ecuación (1.3).



$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_{perdida} = I^2 R_e = I^2 R_r + I^2 R_{\Omega} \quad (1.3)$$

A causa de las pérdidas de potencia existentes, no toda la potencia entregada es radiada y por lo que se puede definir una eficiencia η , ecuación (1.4).

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}} \quad (1.4)$$

El comportamiento de la reactancia X_e de una antena se puede considerar como una carga de impedancia compleja igual que en teoría de circuitos. Por lo que si una antena que es eléctricamente menor, que la longitud de onda de su frecuencia de operación, está tiene una mayor reactancia y poca resistencia de radiación. En la Figura 1.1 se muestra el modelo equivalente en circuitos que representa la impedancia de entrada de una antena[2]–[5].

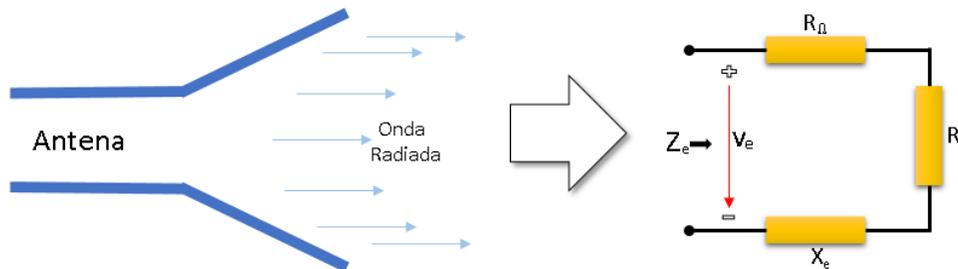


Figura 1.1 Modelo equivalente en circuitos de la impedancia de entrada de una antena

Coefficiente de Reflexión y SWR (Standing Wave Ratio)

Para realizar una transmisión de información en un sistema de comunicación inalámbrico, una fuente o generador envía señales eléctricas a través de una línea de transmisión que se conecta a una antena que convierte la energía eléctrica en ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio libre. Mientras que para la recepción una antena convierte las ondas electromagnéticas en señales eléctricas a una línea de transmisión.



En una línea de transmisión la potencia que se propaga desde la fuente a la carga Z_L (impedancia de entrada de una antena) se conoce como potencia incidente, cuando la carga no es igual a la impedancia característica de la línea Z_0 , parte de la potencia incidente es absorbida por la carga y otra es reflejada a la fuente, en el caso en que la carga sea un circuito abierto o cerrado, toda la potencia incidente se refleja a la fuente, en la Figura 1.2 se muestra una descripción grafica de este comportamiento con una fuente Ideal.

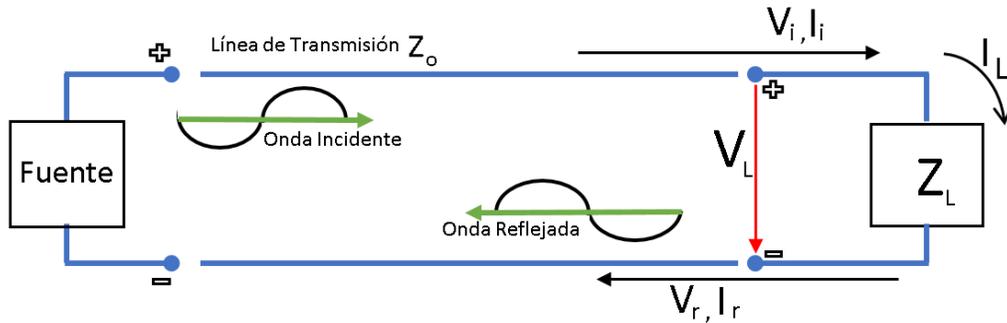


Figura 1.2 Descripción grafica de una onda incidente y reflejada en una línea de transmisión

En este caso se supone que el generador está acoplado con la línea de transmisión, de modo que no existe una potencia reflejada entre la línea y el generador.

Coeficiente de Reflexión

El Coeficiente de reflexión se define como la relación entre el tensión eléctrica reflejada V_r con respecto a el tensión eléctrica incidente V_i o también entre la corriente reflejada I_r con respecto a la corriente incidente I_i y es representada por la letra Γ , ecuación (1.5).

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \tag{1.5}$$

Con base a la Figura 1.2 se puede considera al tensión eléctrica de la carga V_L como la suma de tensión eléctrica incidente y reflejado, ecuación(1.6) .

$$V_L = V_i + V_r \tag{1.6}$$



De igual manera se puede considerar que la corriente de la carga I_L con la ecuación (1.7).

$$I_L = I_i - I_r = \frac{V_i}{Z_0} - \frac{V_r}{Z_0} \quad (1.7)$$

Por lo tanto, la impedancia de la carga Z_L se describe con la ecuación (1.8).

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{V_i + V_r}{\frac{V_i}{Z_0} - \frac{V_r}{Z_0}} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} Z_0 \quad (1.8)$$

El tensión eléctrica reflejada se obtiene en la ecuación (1.9); despejando V_r de la ecuación (1.8).

$$V_r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} V_i \quad (1.9)$$

Por lo que al sustituir la ecuación(1.9) en la ecuación (1.5) se tiene el coeficiente de reflexión en la ecuación (1.10).

$$|\Gamma| = \frac{V_r}{V_i} = \frac{\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} V_i}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1.10)$$

Al tener una potencia que es reflejada y no es consumida por la carga, se tiene una pérdida de potencia y a esta pérdida se le conoce como pérdidas de retorno RL (en inglés *return losses*) que se define en dB, ecuación (1.11) [3], [6].

$$RL = -20 \text{Log}_{10} |\Gamma| \quad (1.11)$$

Relación de Onda estacionaria (SWR por sus siglas en inglés)

Al tener una potencia incidente y una reflejada en una línea de transmisión, se tienen sus respectivas ondas incidentes o reflejadas, ya sea de tensión eléctrica o corriente que viajan en sentido contrario en la línea, cuando estas se traslapan, se producen patrones estacionarios de tensión eléctrica y corriente en la línea de transmisión que se conocen como ondas estacionarias, porque parecen permanecer fijas en la



línea, y sólo varían en amplitud. Una onda estacionaria tiene nodos los cuales están separados por media longitud de onda y antinodos también separados por media longitud de onda, en la Figura 1.3, se muestran una descripción gráfica y desarrollo de una onda estacionaria.

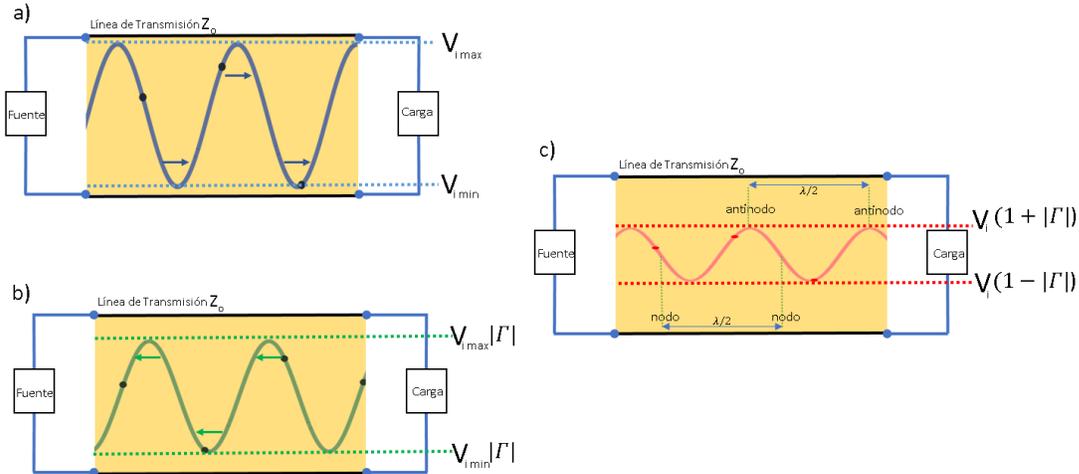


Figura 1.3 Desarrollo de una onda estacionaria en una línea de transmisión:
 a) Onda Incidente, b) Onda reflejada, c) Onda estacionaria

La relación de onda estacionaria (SWR, por sus siglas en inglés), se define como la relación entre el tensión eléctrica o corriente máxima y el tensión eléctrica o corriente mínima, de una onda estacionaria en una línea de transmisión, ecuación (1.12).

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \tag{1.12}$$

La tensión eléctrica máximo V_{max} de una onda estacionaria se obtiene cuando la onda incidente y la onda reflejada están en fase por lo que estas dos ondas se suman, ecuación (1.14) ,

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \tag{1.13}$$

Mientras que para la tensión eléctrica mínima V_{min} de la onda estacionaria, la onda incidente y reflejada al estar desfasadas por 180° se restan entre si, ecuación (1.15)



$$V_{\max} = V_i + V_r = V_i + V_i |\Gamma| \quad (1.14)$$

$$V_{\min} = V_i - V_r = V_i - V_i |\Gamma| \quad (1.15)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1.14) y (1.15) en la ecuación (1.12) se obtiene la ecuación (1.16), la cual representa al SWR.

$$SWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_i + V_i |\Gamma|}{V_i - V_i |\Gamma|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1.16)$$

Este valor también es conocido como VSWR (voltage standing-wave ratio), y en la ecuación 1.11 se puede observar que el valor de SWR puede estar entre 1 e ∞ . En donde si $SWR=1$ significa que no existe reflexión ($\Gamma = 0$) y que la carga esta acoplada con la línea de transmisión[3], [6], [7].

Ancho de Banda

Una antena se limita a operar en cierto intervalo de frecuencias, intervalos que no sobrepasan los límites de acoplamiento, esta característica es conocida como ancho de banda que es determinado como como la diferencia entre la frecuencia máxima f_{\max} y frecuencia mínima f_{\min} de operación.

Para ciertas aplicaciones en el campo de las comunicaciones estos límites de acoplamiento tienen unas pérdidas de retorno de $S_{11} = -10 \text{ dB}$ o de $S_{11} = -6 \text{ dB}$. Para el caso de los -10 dB , este valor indica que en los límites de acoplamiento el 10% de la potencia proporcionada por la fuente se refleja mientras que el 90% es consumida por la antena, mientras que para el caso de los -6 dB , el 25% de la potencia proporcionada por la fuente se refleja mientras que el 75% es consumida por la antena, en la figura 1.4 se observa una representación gráfica del ancho de banda[3], [4], [8].

Dependiendo de los límites de acoplamiento elegidos el ancho de banda BW se calcula como, ecuación (1.17).

$$BW = f_{\max} - f_{\min} \quad (1.17)$$



El ancho de banda también se representa como un porcentaje de la frecuencia óptima F_0 de operación de esa antena, ecuación (1.18).

$$BW = 100 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0} \quad (1.18)$$

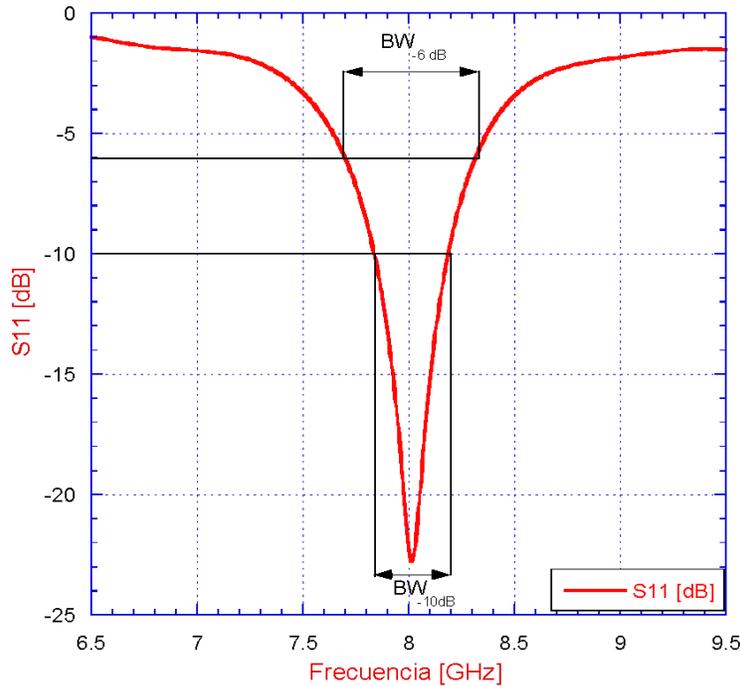


Figura 1.4 Ancho de Banda

Diagrama de radiación

A la distribución relativa del campo eléctrico o potencia, que radia una antena en el espacio es comúnmente conocida como diagrama de radiación. Generalmente es determinado en la región de campo lejano utilizando una escala lineal o logarítmica [dB] y es representado en un plano tridimensional con una función $F(\theta, \phi)$, ecuación (1.19), el diagrama de radiación también puede ser mostrado de forma bidimensional mediante dos planos ortogonales principales $F_{\theta}(\theta, 0)$ (Plano de Elevación, θ) o $F_{\phi}(0, \phi)$ (Plano Azimutal, ϕ), también conocidos como plano E y plano H [1], [6], [9].

$$F(\theta, \phi) = F(\theta, 0)F(0, \phi) \quad (1.19)$$



En la Figura 1.5, Figura 1.6 y Figura 1.7 se puede observar la representación gráfica de la ecuación (1.19) en un diagrama tridimensional. El plano E muestra la amplitud máxima y dirección del vector del haz del diagrama de radiación del campo eléctrico mientras que el plano H muestra la amplitud máxima y dirección del vector del haz del diagrama de radiación del campo magnético.

Diagrama de radiación Isotrópico

Un diagrama de radiación Isotrópico es definido como "Una antena Hipotética sin pérdidas que radia en todas las direcciones"[1] la Figura 1.5 se muestra como el diagrama de radiación de una antena hipotética tiene la misma amplitud de potencia o campo eléctrico en todas direcciones dando la apariencia de una esfera uniforme.

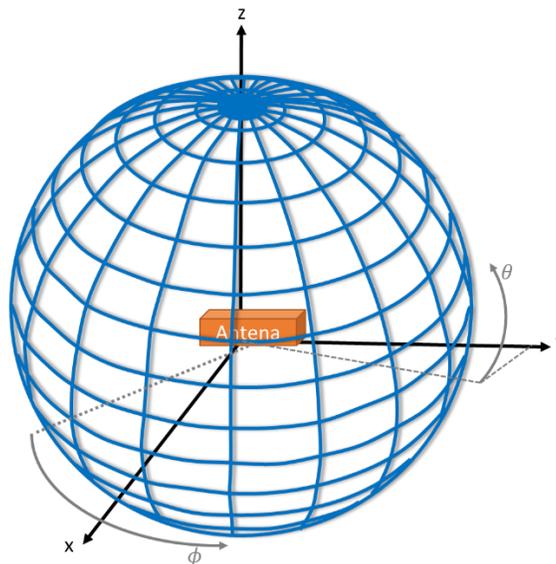


Figura 1.5 Antena Hipotética que radia en todas las direcciones

Diagrama de radiación Omnidireccional

Un diagrama de radiación Omnidireccional se observa "Cuando se tiene un diagrama esencialmente no direccional en un plano dado y un diagrama direccional en cualquier plano ortogonal"[1] en la Figura 1.6 se muestra como el diagrama de radiación tiene la misma amplitud de potencia o campo eléctrico en todas las direcciones del plano ϕ mientras que en el plano ortogonal θ hay puntos en el que se pierde dicha amplitud.

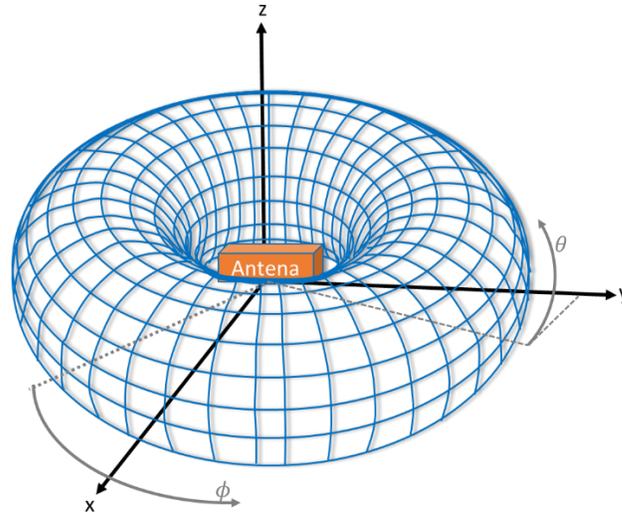


Figura 1.6 Diagrama de radiación Omnidireccional emitido por una antena

Diagrama de radiación Direccional

Una antena direccional o directiva es aquella “Que tiene la propiedad de radiar o recibir ondas electromagnéticas más eficazmente en algunas direcciones que en otras...”[1] en la Figura 1.7 se muestra un diagrama de radiación que tiene su amplitud de potencia o campo eléctrico máximo en dirección al eje Z.

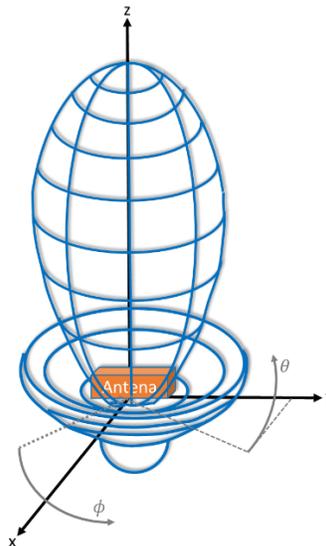


Figura 1.7 Diagrama de radiación Direccional emitido por una antena



Lóbulos en el diagrama de radiación

El diagrama de radiación típico de una antena tiene un lóbulo principal definido como el “lóbulo que contiene la dirección de la radiación máxima, lóbulos laterales, lóbulos menores, un lóbulo trasero y puntos nulos de potencia [1], [2], en la Figura 1.8 se puede observar una descripción grafica de cada uno de estos lóbulos.

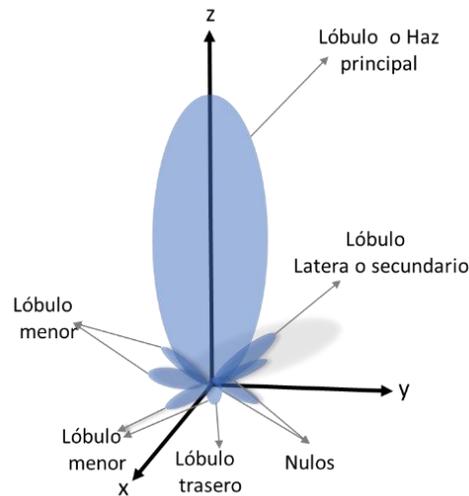


Figura 1.8 Lóbulos en un diagrama de radiación directivo

Diagrama del campo

Este diagrama de radiación representa de manera gráfica la magnitud del campo eléctrico o magnético en el espacio tal y como se muestra en la Figura 1.9a) [1], [2].

Diagrama de potencia

Este diagrama de radiación representa de manera gráfica la potencia en escala lineal el cuadrado de la magnitud del campo eléctrico o magnético en el espacio tal y como se muestra en la Figura 1.9.b) [1], [2]. También existe el diagrama de radiación con escala logarítmica (dB) y representa la magnitud del campo eléctrico o magnético en dB en el espacio tal y como se muestra en la Figura 1.9.c) [1], [2].



Ancho de Haz

El ancho de haz HPBW (Half Power Beamwidth), o ancho de haz de potencia media se refiere al punto desde donde se obtiene la potencia media que existe en el lóbulo principal del diagrama de radiación, a veces es representado por $\Delta\theta$ para el plano Azimuth o con $\Delta\phi$ para el plano Phi y se puede calcular como 0.707 veces el valor máximo del diagrama del campo (en forma lineal) ver Figura 1.9.a), o 0.5 veces el valor máximo del diagrama de potencia (en forma lineal), ver Figura 1.9.b) y así mismo desde los -3dB con respecto al valor máximo del diagrama de potencia (en dB) Figura 1.9.c) [1], [2].

Densidad de potencia Radiada

“La rapidez con la que la energía pasa a través de una superficie dada se le denomina como densidad de potencia”[3], la densidad de potencia se considera como la energía por unidad al tiempo y unidad de área ($\frac{W}{m^2}$) la cual es representada en la ecuación (1.20) , en donde E es la intensidad RMS del campo eléctrico ($\frac{V}{m}$) y H es la intensidad en RMS del campo magnético ($\frac{A}{m}$) .

$$P = EH \left[\frac{W}{m^2} \right] \tag{1.20}$$

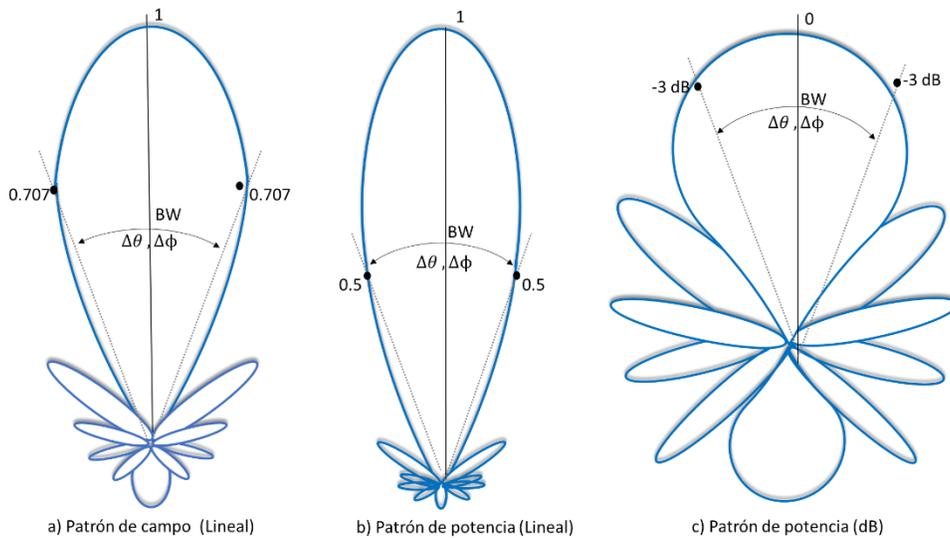


Figura 1.9 Representación de un diagrama de radiación mediante



Ganancia

Es un valor unidimensional y comúnmente la ganancia se define como “la relación de la intensidad en una dirección $U(\Phi, \theta)$ dada, de la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada P_{in} por la antena fuera radiada isotrópicamente. La intensidad de radiación correspondiente a la potencia radiada isotrópicamente es igual a la potencia aceptada por la antena dividida por 4π ” y se representa en la ecuación (1.21) [1], [5].

$$Ganancia = 4\pi \frac{\text{Intensidad de radiación}}{\text{Potencia total de entrada (aceptada)}} = \frac{U(\phi, \theta)}{P_{in}} \quad (1.21)$$

La ganancia también se puede definir como la relación existente entre la máxima intensidad de radiación y la máxima intensidad de radiación de una antena de referencia con la misma potencia de entrada [5], [10].

Directividad

La directividad depende únicamente del diagrama de radiación, por lo que para hallarla es preciso conocerlo.

Un método es hallar la directividad D a partir de sus expresiones aproximadas en función del ancho de haz sólido equivalente. Este último se puede estimar como el producto de los anchos de haz a -3 dB de la antena en sus planos ortogonales principales.

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta * \Delta\Phi} \quad (1.22)$$

Entre más directiva y menor cantidad de lóbulos secundarios tenga el diagrama de radiación de una antena, la aproximación de la ecuación (1.22) es mejor [1], [4], [11].



Polarización

La polarización de las ondas radiadas o recibidas por una antena corresponden a la orientación de su vector eléctrico, que siempre es perpendicular a la dirección de propagación y existen tres tipos de polarización; la polarización circular, la elíptica y la lineal (vertical, horizontal) en la Figura 1.10. Se pueden observar de manera gráfica cada una de estas polarizaciones [1], [3], [5].

Una forma de determinar la polarización de una antena, es mediante la relación axial RA que se define como la relación entre los ejes del campo eléctrico máximo E_{max} , y el Campo eléctrico mínimo E_{min} de la elipse del campo de una onda elípticamente polarizada y toma valores comprendidos entre uno e infinito [4], esta relación puede ser representada por la ecuación (1.23).

$$RA = \frac{E_{max}}{E_{min}} \tag{1.23}$$

Los sistemas de antenas normalmente se diseñan para operar con polarización lineal, en la cual idealmente RA es infinita, por lo que el vector eléctrico no gira, o con polarización circular en cual idealmente $RA = 1$, estas relaciones son casos extremos de la polarización elíptica, Figura 1.10.

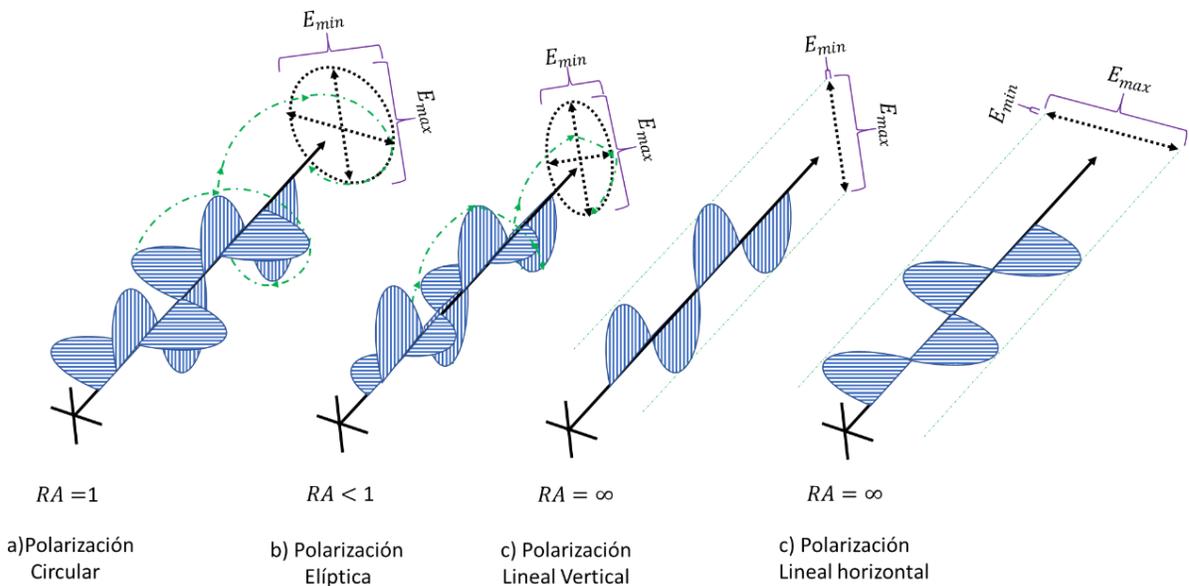


Figura 1.10 Tipos de polarización



Ecuación de transmisión de Friis

En el espacio libre, las pérdidas de transmisión se pueden calcular fácilmente considerando que una antena isótropa que recibe una potencia P_t radiará de forma que a una distancia d se tendrá una densidad de potencia. Si la antena tiene una ganancia G_T en la dirección de la antena receptora, la densidad de potencia aumenta a $G_T = \frac{P_T}{4\pi d^2}$, donde d es la separación entre la antena receptora y la transmisora. Si la antena receptora tiene un área efectiva $A_e = G_R \lambda^2 / 4\pi$, donde G_R es la ganancia de la antena receptora, entonces la potencia recibida P_R será:

$$P_R = G_T * G_R * \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 * P_T \quad (1.24)$$

$$P_{R_{dB}} = G_{T_{dB}} + G_{R_{dB}} + L_{dB} + P_{T_{dB}} \quad (1.25)$$

Se define la pérdida de transmisión básica o pérdida por propagación para el espacio libre L en dB, como:

$$L_{dB} = -20 * \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (1.26)$$

$$L_{dB} = -32,45 - 20 \log f_{[MHz]} - 20 \log d_{[km]} \quad (1.27)$$

Por lo que con base a la ecuación (1.24), (1.25), (1.26), (1.27). se puede conocer la ganancia de la antena trasmisora, ecuación (1.28) [1], [2], [11], [12].

$$G_{T_{dB}} = P_{R_{dB}} - G_{R_{dB}} - L_{dB} - P_{T_{dB}} \quad (1.28)$$



Capítulo 2 Estado del arte

Introducción

Existe una gran variedad de antenas las cuales están diseñadas para trabajar en ciertas bandas de frecuencias que forman parte del intervalo del espectro electromagnético, con características necesarias para una aplicación específica. Comúnmente el tamaño de una antena conlleva una relación directa con la longitud de onda de su frecuencia de operación, por lo que una antena diseñada para trabajar en la banda UHF puede tener una longitud de onda de entre 1 y 10 metros.

Una antena de cruz tiene la característica de ser una antena de onda progresiva por lo que es capaz de tener una polarización circular, además de tener una ganancia media, esta antena ha sido estudiada con anterioridad y modificada para obtener un mejor desempeño en alguna de sus características principales.

Además, una antena fractal posee rasgos que mejoran su comportamiento en algunas de sus características principales de acuerdo al número de repeticiones que tenga por cada figura diagrama.

Banda de Frecuencias

La energía electromagnética generada por una antena se propaga en formas de ondas de radio emitidas en el espacio libre, la energía electromagnética se distribuye en un intervalo casi infinito de frecuencias.

El espectro electromagnético de frecuencias abarca desde las ondas subsónicas hasta los rayos cósmicos ($10^{22} Hz$).

Un espectro de frecuencias se puede dividir en bandas, las cuales son subsecciones de frecuencias y cada banda tiene un nombre y un límite.

Las frecuencias exactas asignadas a diversos servicios se actualizan constantemente, para cumplir con las necesidades de comunicación de una nación además de que el espectro electromagnético es la representación de toda la gama



de frecuencias en que puede presentarse cualquier forma de energía electromagnética [3].

Por su parte las ondas radioeléctricas son ondas electromagnéticas cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de los 300 GHz y que propaga por el espacio libre, conforme al reglamento internación, el espectro radioeléctrico se subdivide en nueve bandas de frecuencias tal y como se muestra en la Tabla 2.1, en donde se indican las bandas correspondientes, así como su longitud de onda en metros.

Símbolos	Nombre	Gama de Frecuencias	Sub división métrica
VLF	Very low frequency	3 a 30 KHz	Ondas milimétricas ($10^4 m$)
LLF	Low frequency	30 a 300 KHz	Ondas kilométricas ($10^3 m$)
MF	Medium Frequency	300 a 3000 KHz	Ondas hectométricas ($10^2 m$)
HF	High Frequency	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas ($10 m$)
VHF	Very High Frequency	30 a 300 MHz	Ondas métricas ($10^{-2} m$)
UHF	Ultra-High Frequency	300 a 3000 MHz	Ondas decimétricas ($10^{-3} m$)
SHF	Super High Frequency	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas ($10^{-2} m$)
EHF	Extremely High Frequency	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas ($10^{-3} m$)
---	NA	300 a 3000 GHz	Ondas decimilimétricas ($10^{-4} m$)

Tabla 2.1 Símbolos y nombres de las 9 bandas de Frecuencia

Sistema de antenas de una estación terrena

El sistema de antena es de gran importancia para el diseño de una estación grande o mediana capacidad y complejidad, además de que no puede modificarse y es muy costosa su sustitución y los objetivos principales del sistema de antenas de una estación terrena son:

- Lograr suficiente ganancia de transmisión y recepción con las menores dimensiones posibles.



- Tener un bajo efecto de interferencia a otros sistemas en transmisión, y baja captación de interferencias en recepción.
- La menor captación posible de ruido térmico por radiación de suelo; emisión y recepción con gran pureza de polarización.
- Mínima deformación de reflector por cambios de temperatura y por movimiento de orientación de la antena.
- Resistencia al viento, y relativamente alta eficiencia, hasta donde es compatible con los demás objetivos.

Para las estaciones que operen con satélites en orbitas diferentes a la geoestacionaria requieren de un sistema de seguimiento continuo, por lo que para reorientación de la antena de la estación terrena es común el empleo de sistemas automáticos con motores que se controlan remotamente o se propagan para un movimiento previsto[13], [14].

Tipos de antenas

Una antena es capaz de radiar la potencia suministrada hacia una dirección deseada, por lo que en la práctica existen diferentes tipos de estructuras, en donde cada una puede alcanzar las características de radiación que se requieran para un tipo de aplicación en específico [1].

Algunos tipos de antenas más comunes, utilizadas dependiendo del tipo de aplicación para la cual se va a utilizar son: Antenas de alambre, Antenas de apertura, Antenas de parche, entre otras.

Antenas de alambre

Este tipo de antenas se pueden encontrar en cualquier lugar, en automóviles, construcciones, barcos, aviones, satélites, etc. Existen muchos diseños, como los dipolos, los helicoidal o los cerrados (este diseño puede tener forma rectangular, elíptica, circular o de cualquier otra configuración) [1]. Estos tipos de antenas de alambre se pueden observar en la Figura 2.1.

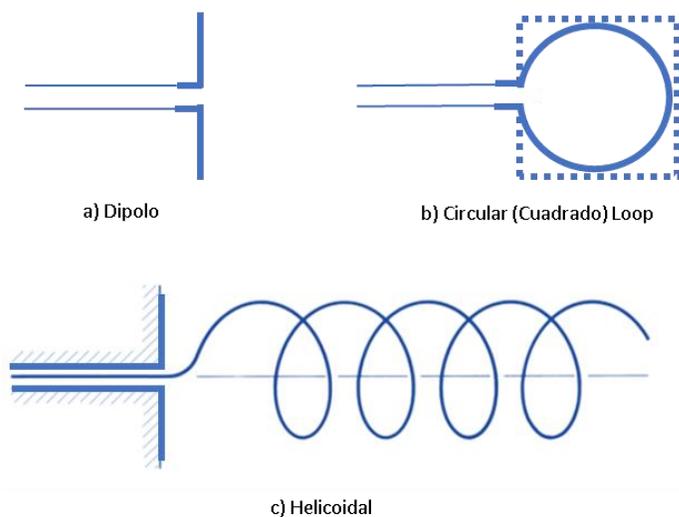


Figura 2.1 Tipos de antenas de alambre

Antenas de apertura

En la Figura 2.2 se muestran las antenas de apertura más comunes. Este tipo de estructura son muy utilizadas en las naves espaciales y aeronaves, ya que por su diseño son fácilmente montadas en la superficie de las naves espaciales y aeronaves [1].

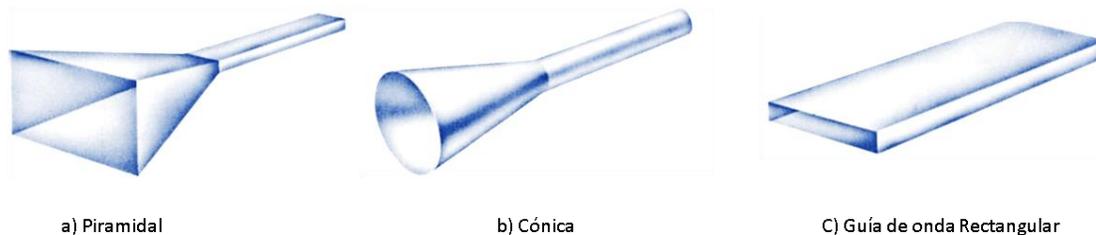


Figura 2.2 Tipos de antenas de apertura

Antenas de Microcinta

Este tipo de antenas son muy populares en aplicaciones espaciales y comerciales, su diseño consiste en un parche metálico sobre un sustrato con conexión a tierra. El parche metálico puede tener diferentes configuraciones y las más comunes o básicas son las de configuración circular y rectangular tal y como se observa en la Figura 2.3, además de que son antenas versátiles en términos de frecuencia de



resonancia, polarización, impedancia y diagrama de radiación, son utilizados comúnmente en naves espaciales, aeronaves, satélites, automóviles, incluso en celulares[1].

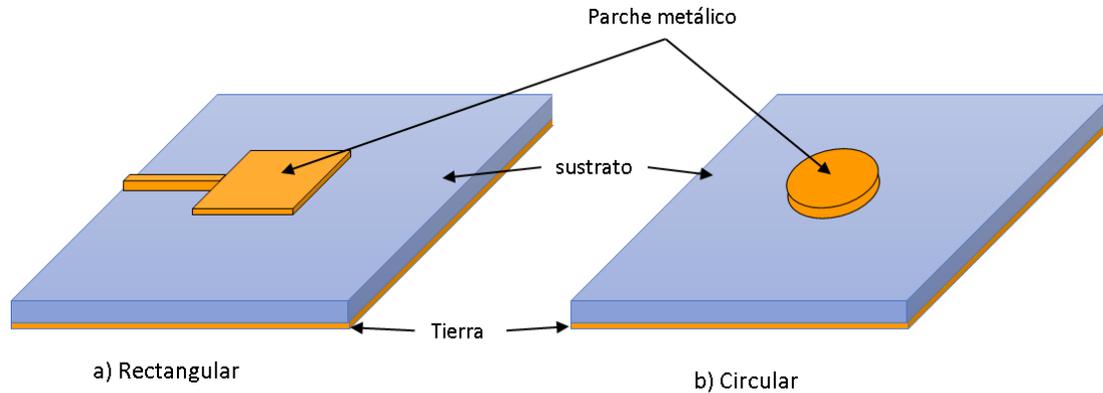


Figura 2.3 Antenas de Microcinta

Antena UHF utilizada en la estación terrena de ESIME-Zacatenco

Las antenas que se encuentran en la banda de UHF y VHF son comúnmente utilizadas para la transmisión y recepción de información, así como de telemetría entre un satélite y una estación terrena. Usualmente para esta aplicación es necesario utilizar un diagrama de radiación directivo por lo que es muy común que se emplee una antena tipo Yagi de polarización circular la cual es compuesta por arreglos de dipolos (elementos activos), algunos colocados verticalmente y otros horizontalmente con un desfase de 90° para conseguir una polarización circular además de contener elementos parásitos no alimentados, que actúan como reflectores o como directores [11].

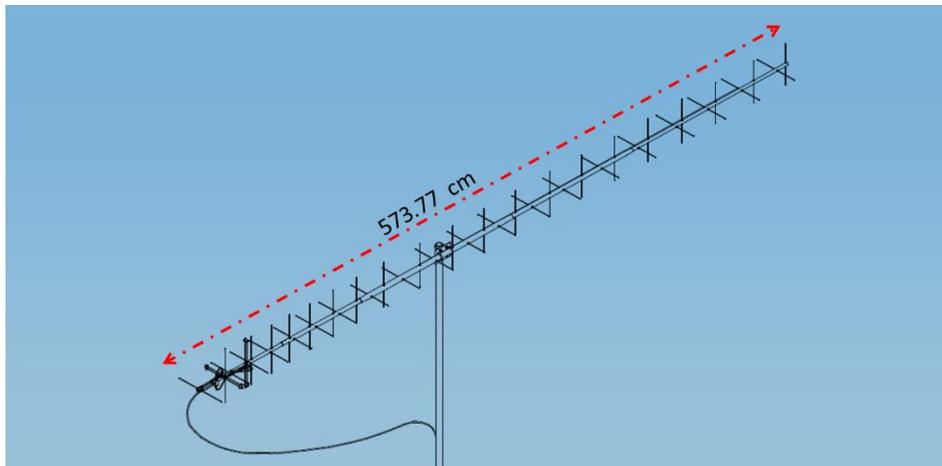


Figura 2.4 Elementos de una antena Yagi

En la Figura 2.4 se muestra una antena Yagi, la cual es utilizada en la estación terrena de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco y esta diseñada para trabajar en una frecuencia de operación de 434 MHz de la banda UHF con aproximadamente 21 elementos en vertical y 21 elementos en horizontal, proporcionando una ganancia de entre 11.74 dB – 16.76 dB dependiendo de la cantidad de elementos, proporciona una polarización circular y con una longitud de 573.77cm, en el anexo 1 se puede observar la hoja de datos de la antena.

Antena de Cruz

La antena de cruz propuesta por Reoderer es una estructura de geometría arbitraria que ha tenido gran aplicación en el campo de las comunicaciones, que consiste de un conductor o cinta sobre un plano de tierra que sigue el contorno de una cruz con cuatro o más ramas y un diámetro de aproximadamente 1.3λ , además provee de una ganancia media y polarización circular, que consiste en un conductor elevado sobre un plano de tierra que forma una cruz con cuatro o más brazos y es una antena de onda progresiva.

Esta estructura es alimentada por una línea coaxial y con una al final de esta tiene una carga que tiene una impedancia. El propósito de esta antena fue un diseño para



la banda L (1500 MHz), también puede ser usada como radiador primario de reflectores parabólicos.

Esta antena al ser un radiador de onda progresiva posee una polarización circular derecho o izquierda dependiendo de la posición de la alimentación de la carga, además al tener una ganancia media (entre 12 - 15 dBi), tiene dimensiones menores ala de una antena de hélice o corneta.

Una antena de cruz posee características muy llamativas tales son:

- Geometría simple
- Dimensiones pequeñas
- Bajo costo de construcción
- Ganancia media
- Fácil construcción

Las aplicaciones típicas de esta antena se encuentran en automóviles, Naves aéreas, incluso en satelitales [13], y esto se debe a que en estas aplicaciones es indispensable que una antena posea una polarización circular, un diagrama de radiación directivo [16] .

La estructura presentada por Antonie Reoderer denominada como antena de cruz fue presentada en Mayo de 1990, en donde se muestra la el diseño geométrico de una antena de cruz, tal y como se observa en la Figura 2.5, además explica que esta estructura puede ser construida con alambre o incluso impresa, sobre un plano de tierra a una distancia de una fracción de longitud de onda de la frecuencia de operación. Asimismo, este diseño es alimentado por uno de los extremos, por medio de un cable coaxial.

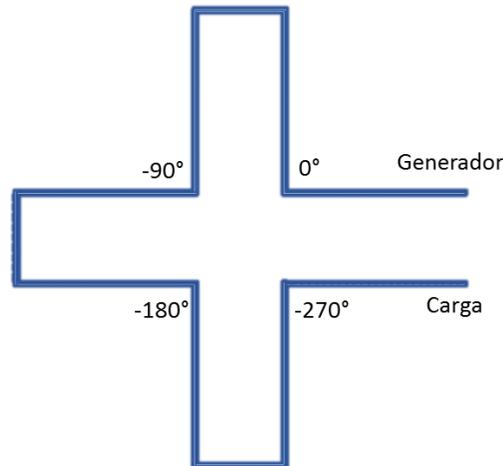


Figura 2.5 Diseño de Reoderer de una antena de cruz

En la Figura 2.5 se muestra una antena de cuatro brazos, en donde cada uno de los brazos tienen una dimensión de $\lambda_o/2 * \lambda_o/4$ y en donde λ_o representa la longitud de onda de la frecuencia de operación a la cual se diseña la antena, la longitud de cada una de las ramas de la Cruz, permiten que exista un desfaseamiento en la corriente, entre una y la contigua. Como el campo eléctrico radiado por cada una de las ramas está girando, el campo total tendrá polarización circular dado el caso en el que no existe una atenuación a lo largo de la cinta.

Las ondas reflejadas por dobleces sucesivos tienden a cancelarse entre sí, por lo que su influencia es pequeña en el comportamiento total del radiador, otro elemento importante de la antena es su impedancia en la cual Reoderer menciona que el ajuste de impedancia de carga puede reducir la polarización cruzada [16].

Antena de Ocho Brazos

La antena de ocho brazos es una variante de la cruz de Reoderer, la cual fue diseñada y analizada en el Instituto Politécnico Nacional en la Sección de Estudios y Postgrado e Investigación en el departamento de Telecomunicaciones, la cual es una estructura simétrica de una sola vuelta con ocho brazos.



Esta estructura está formada por 8 brazos en donde las dimensiones de cada uno de sus brazos son de $0.53\lambda_o * 0.136\lambda_o$ con una separación del plano de tierra de entre $0.0625\lambda_o$ y $0.1\lambda_o$, tal y como se muestra en la Figura 2.6.

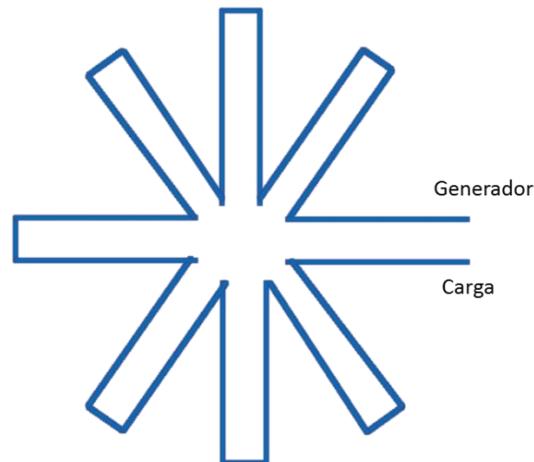


Figura 2.6 Antena de Cruz de Ocho Brazos

Los resultados obtenidos mediante la herramienta computacional Software Nec-Win Pro Version 1.1 (Numerical Electromagnetic Code), el cual es un software que se utiliza para el análisis de problemas electromagnéticos, donde es posible obtener la distribución de corrientes de la antena, la impedancia de entrada, la Relación de onda estacionaria (ROE), y el diagrama de radiación

Fueron de una ROE de 1.5, una impedancia de 82.4 Ohm y una Ganancia de 15 dB. Mientras que los resultados reales de medición fueron de una ROE de 2.4 una impedancia de entrada de 70.15 Ohm y una Ganancia de 14.8 dB [15].

Antena Rómbica de Cruz

La antena Rómbica de Cruz es otra variación de la antena de Cruz, la Cual fue desarrollada en el Instituto Politécnico Nacional en la Sección de Estudios de Postgrado e Investigación en el área de telecomunicaciones, esta estructura se basa en reemplazar los brazos rectangulares, por rombos, y utilizando alambre de cobre como conductor, el cual es separado por una fracción de la λ_o del plano de tierra, por lo que al continuar siendo una antena de onda progresiva, proporciona



una polarización circular y una ganancia media, y al igual que la antena de Cruz se alimenta en uno de los extremos de la estructura [17].

En la Figura 2.7 se muestra el diseño y las dimensiones de la antena rómbica, en función de la longitud de onda, así como los grados de separación de cada esquina. antena Rómbica

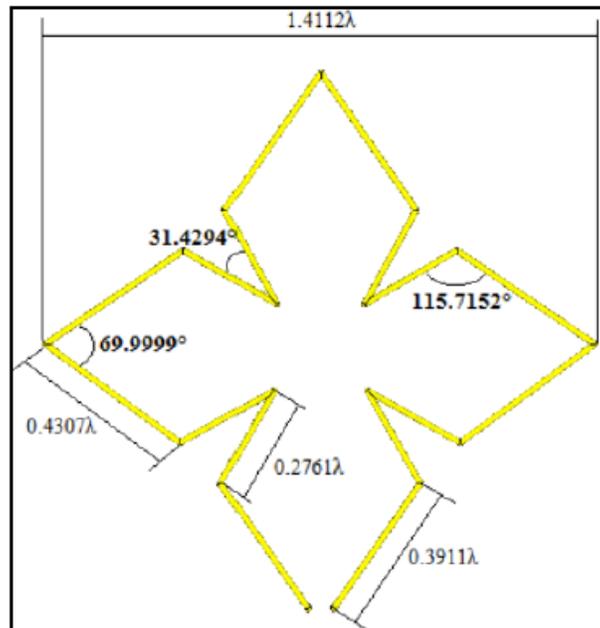


Figura 2.7 Dimensiones de una Antena Cruz Rómbica [18]

Para el análisis de esta estructura se utilizó el código NEC, en donde se obtuvo que el mejor comportamiento de esta antena se encuentra cuando el plano de tierra y la estructura tienen una separación de $\lambda_o/11$. Además se observó que el comportamiento óptimo de este diseño se encuentra cuando se conecta en corto circuito, proporcionando una ganancia de hasta 14.2 dB con un acoplamiento de -15.46 dB, así como su comportamiento utilizando el Sustrato de Rogers Duroid RT5880 proporcionando una ganancia de 10 dB, y un acoplamiento de -13 dB [19].

Antena trébol de cuatro hojas

La antena trébol de cuatro hojas es otra variación de la antena de Cruz, la Cual fue desarrollada en el Instituto Politécnico Nacional en la Sección de Estudios de Postgrado e Investigación (SEPI-ESIME unidad Zacatenco) en el área de



telecomunicaciones, esta estructura se basa en remplazar los brazos rectangulares, por pétalos ovalados, además de evitar dobleces de 90° , buscando mejor el acoplamiento de la antena, además de utilizar alambre de cobre como conductor, el cual es separado por una fracción de λ_0 el plano de tierra, por lo que al continuar siendo una antena de onda progresiva, proporciona una polarización circular y una ganancia media, y al igual que la antena de cruz se alimenta en uno de los extremos de la estructura. En la Figura 2.8 se muestra el diseño de esta estructura denominada como antena trébol de cuatro hojas.

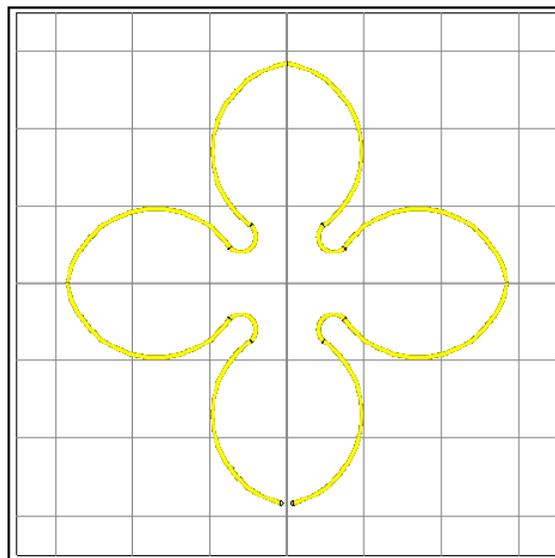


Figura 2.8 Antena trébol de Curato Hojas [18]

Para el análisis de esta estructura se utilizó La herramienta computacional, CST Microwave Studio, en donde se obtuvo como resultado una Ganancia de Hasta 10.8 dB pero con una ventaja de un ancho de banda de hasta 220 MHz además de mostrando como resultado un diagrama de radiación directivo [20].

Antenas fractales

El termino fractal fue designado por Benoit Mandelbrot, quien describió el termino fractal, para describir la clase de geometrías complejas que se crean a través de sucesivas iteraciones de una base euclidiana simple o geometría inicial.



Un ejemplo claro para poder explicar esta definición es el fractal Koch, mostrado en la Figura 2.9, la cual divide la línea K_0 en tres y crea una forma triangular que es una geometría euclidiana. Por lo de la línea K_1 del fractal de Koch tiene una longitud mayor con un factor de $1:4/3$, en comparación a la línea K_0 .

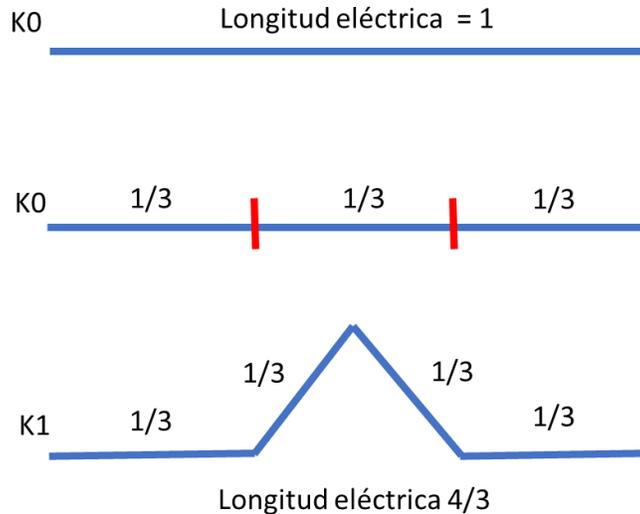


Figura 2.9 Curva de Koch; K_0) Línea sin Iteración, K_1) Línea con una Iteración

La figura triangular generada en la línea se considera como la geometría inicial o base, de las siguientes iteraciones, para el caso de la línea K_2 EN la Figura 2.10 se observa que cada segmento de la línea K_1 es dividida en tres secciones para crear una nueva forma triangular por segmento. Este procedimiento se puede volver a repetir como se observa en la línea K_3 , a esta repetición de la geometría inicial se le denomina iteración por lo que K_n representa el número de iteraciones de la curva de Koch .

Habitualmente la longitud inicial del contorno o perímetro de un fractal, incrementa por cada iteración que se tiene, por lo que un fractal ideal, al tener un número infinito de iteraciones tiene una longitud infinita.

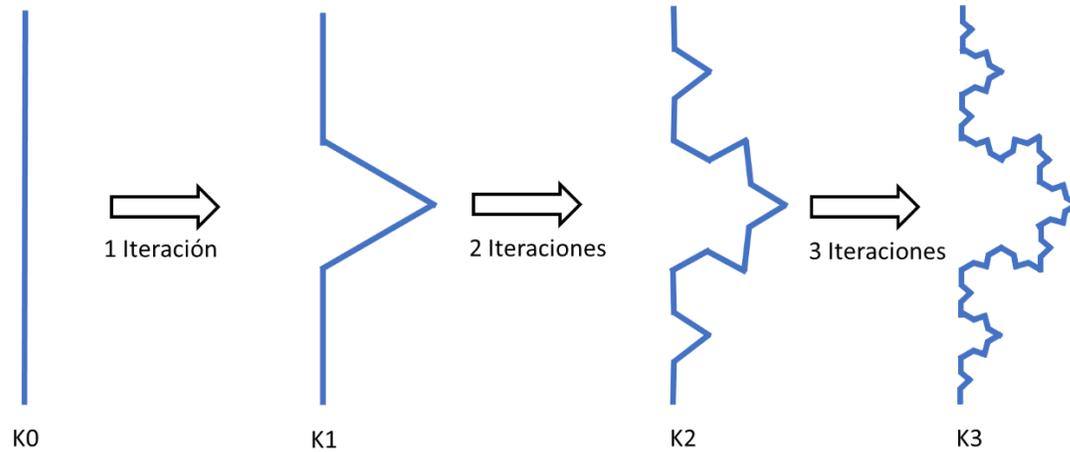


Figura 2.10 Curva de Koch; K_0) Línea sin Iteración, K_1) Línea con una Iteración, K_2) Línea con dos Iteraciones, K_3) Línea con tres Iteraciones

En general, no hay reglas estrictas sobre qué formas geométricas constituyen la geometría fractal. Sin embargo, Hay un número de propiedades geométricas utilizadas para caracterizar o describir fractales

Un de estas características es la de auto-similitud, en la que pequeñas regiones de la geometría duplican toda la geometría, sólo a escala reducida. Otra es la característica de la auto-afín, en la que pequeñas regiones de la geometría no son idénticas a toda la geometría, sino que están sesgadas distorsionadas y en diferentes escalas [21].

El concepto de Fractal se ha aplicado a muchas ramas de la ciencia y la ingeniería, incluyendo la electrodinámica fractal para la radiación, la propagación y la dispersión, estos conceptos fractales se han extendido a la teoría y diseño de antenas, y allí han sido muchos estudios e implementaciones de diferentes elementos de antena fractal y arreglos, y muchos otros.

Los fractales se pueden clasificar en dos categorías: determinista y aleatoria. Deterministas, como el fractal de Koch, el cual se genera de varias copias reducidas de la geometría base inicial, mientras que los fractales aleatorios también contienen elementos aleatorios que permiten simular fenómenos naturales.

Las antenas fractales al tener la característica de aumentar la longitud de la curva inicial por cada iteración que tiene, pueden usarse para miniaturizar elementos



clásicos de antena, como dipolos y bucles, y superar algunas de las limitaciones de las antenas pequeñas.

La línea que se utiliza para representar el fractal puede serpentear de tal manera que efectivamente llenar el espacio disponible, dando lugar a curvas que son eléctricamente más largas, pero compactadas en un pequeño espacio físico. Además de que, aunque estas estructuras están compactadas, pueden resonar y exhibir una impedancia de entrada mayor o en otros puntos, a comparación de las geometrías clásicas de dipolos, bucles, etc. [1]. En la Figura 2.11 se Muestran algunas de las geometrías fractal más utilizadas: la alfombra Sierpinski, el triángulo de Sierpinski, la curva de Hilbert, la curva de Koch, la curva Minkowski.

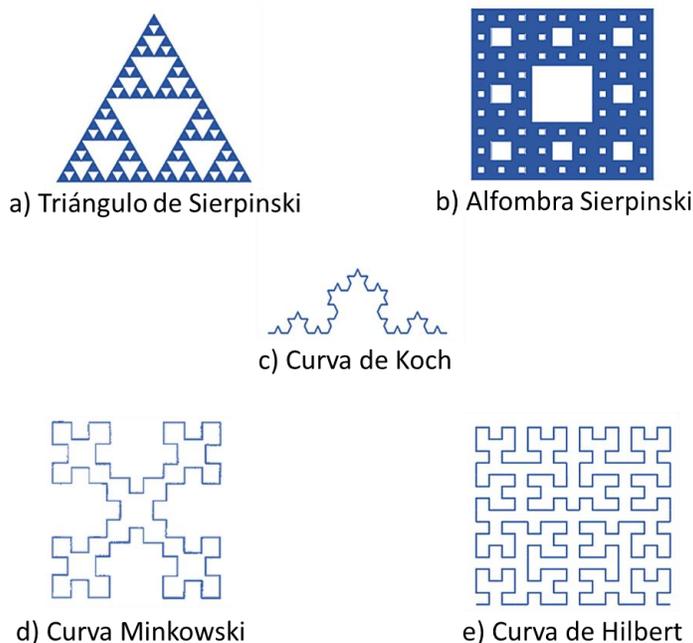


Figura 2.11 Geometrías Fractales : a) Triángulo Sierpinski, b) Alfombra de Sierpinski, c) Curva de Koch, d) Curva Minkowski, e) Curva de Hilbert

Las antenas Fractales no están limitadas en su uso hacia antenas de mono polos o dipolos. Algunas geometrías fractales son utilizadas para obtener una antena de parche multi-banda y hasta de banda ancha, además la combinación de dos o más geometrías fractales pueden ser muy eficientes en el diseño de antenas miniaturizadas [22]–[29].



Capítulo 3 Diseño y Modelado

Introducción

El hecho de que las antenas de alambre diseñadas para la banda VHF y UHF del espectro electromagnético son de gran tamaño y peso, generan la necesidad de diseñar sistemas de montaje o posicionamiento más complejos y bastante robustos.

Con base a lo anterior es imprescindible reducir el tamaño las antenas que trabajan en estas frecuencias, buscando mantener sus métricas más importantes tales como el coeficiente de reflexión, diagrama de radiación, polarización y ganancia.

Desafortunadamente, las técnicas de reducción de dimensiones, actualmente conocidas, están orientadas esencialmente a estructuras de microcinta planas donde la posibilidad de cambio de sustrato se realiza convenientemente en función de las propiedades del material, permitividad, para obtener menores dimensiones[9].

Por lo anterior, la estructura de Cruz definida por Reoderer la cual es comúnmente conocida por ser una antena de ganancia media y polarización circular, que consiste en un conductor que forma una cruz sobre un plano de tierra [16], debido su simplicidad en construcción la hace una opción ideal para reducir su tamaño, para esto se propone usar un método utilizado en las antenas fractales en el cual se plantea reducir la dimensión de la cruz. Debido a que una antena fractal se basa en la repetición de una figura principal la cual, generalmente es una geometría euclidiana, que se repite en el contorno de una estructura y es conocida como diagrama, aumentando su longitud eléctrica y con base a Reoderer en donde el funcionamiento de una antena de cruz se basa en que la longitud eléctrica de la cruz debe de tener una relación con los múltiplos de longitud de onda, permiten realizar una reducción en tamaño de una antena de cruz tratando de mantener sus principales características.



Diseño Propuesto

Con base al termino definido por Benoit Mandelbrot, en el cual se explica que un fractal es formado por sucesivas iteraciones de una base euclidiana simple o geometría inicial y además de que existen antecedentes de que al utilizar la definición de un fractal como un método de optimización o reducción de tamaño en las antenas de alambre y parche que permite tener grandes ventajas, tales como, la posibilidad de aumentad la longitud eléctrica de la antenas ya sea para lograr reducir su tamaño, o mejorar el acoplamiento de la antena, con la viabilidad de poder trabajar en múltiples bandas estrechas, recorrer su frecuencia de operación, o hasta incluso en algunos casos aumentar el ancho de banda, además de la posibilidad de lograr una optimización en el diagrama de radiación, o incluso mantener sus características iniciales, ya sea utilizando geometrías euclidianas básicas, modificadas o incluso en otros casos proponiendo como figura básica a la combinación de dos o más geometrías euclidianas, o incluso modificando los ángulos entre cada intersección de las geometrías, permitiendo proponer nuevas estructuras fractales [21], [27]–[37].

Con base a lo anteriormente mencionado el diseño propuesto se basa en que una antena fractal se define por repetir una figura inicial en su contorno [38] y en que esa figura básica puede ser una geometría euclidiana o incluso la combinación una o más y tomando en cuenta que la estructura de la Cruz de Reoderer es formada por 4 brazos rectangulares, se propone que la geometría básica sea una figura rectangular, por lo que habrá un rectángulo en cada sección del perímetro teniendo así 3 geometrías básicas por brazo, a excepción del brazo inferior que solo tendrá 2 geometrías básicas.

La estructura de cruz es de un diseño muy simple, cada sección de la antena esta definía por $\lambda/2$ y $\lambda/4$ los cuales forman un brazo de la antena dando un total de cuatro brazos, tal y como se presentó en el capítulo 2 y se muestra en la Figura 3.1.

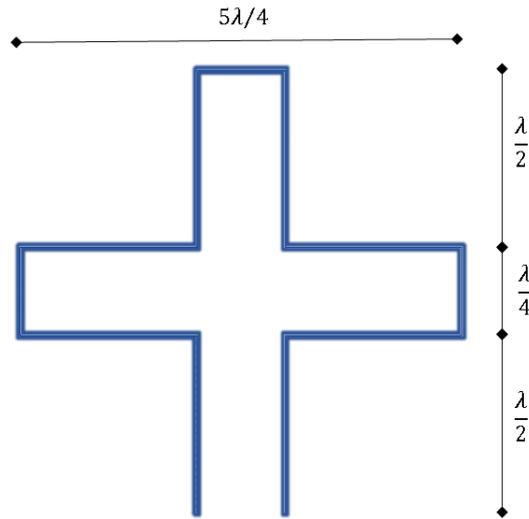


Figura 3.1 Dimensiones de una antena de cruz

Por lo tanto, si se toma cada sección de $\lambda/2$ y de $\lambda/4$ de cada brazo de la antena y se le agrega una figura no euclidiana rectangular a cada una de las secciones, esto permite mantener la longitud eléctrica en el perímetro de la estructura pero también permite obtener una reducción del tamaño de la misma, en la Figura 3.2 se puede observar como la dimensión un segmento o sección del brazo que mide $\lambda/4$ se reduce utilizando una figura euclidiano cuadrada permitiendo que se mantenga la misma longitud eléctrica de $\lambda/4$ pero reduciendo su tamaño original en $3\lambda/20$.

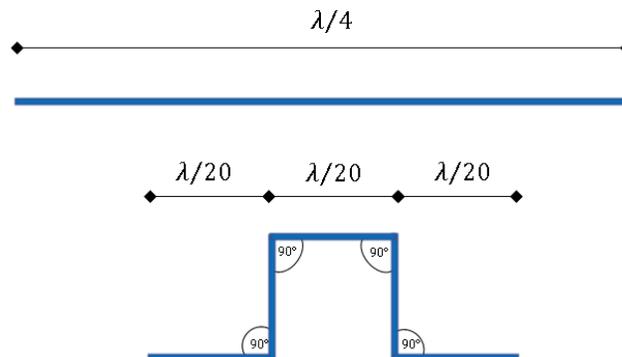


Figura 3.2 Reducción del segmento de $\lambda/4$, utilizando una geometría cuadrada



Se puede observar como las dimensiones en el segmento de $\lambda/2$ se reducen utilizando una figura no euclidiana cuadrada manteniendo la misma longitud eléctrica de $\lambda/2$, tal y como se muestra en la Figura 3.3.

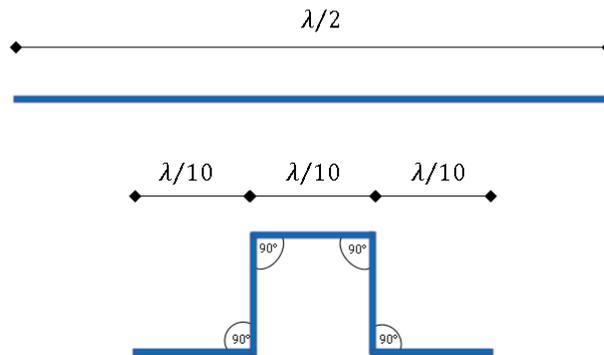


Figura 3.3 Reducción del segmento de $\lambda/2$, utilizando una geometría cuadrada

Las dimensiones de la antena de cruz definidas por Reoderer son de $5\lambda/4 \times 5\lambda/4$ de la estructura tal y como se muestra en la Figura 3.3 y estas dimensiones equivalen a $1.562\lambda^2$ en su área por lo que después de agrgar una figura no euclidiana a cada una de las secciones de cada uno de los brazos de la antena permite reducir el tamaño de la figura principal, obteniendo una dimensión de $17\lambda/20 \times 16\lambda/20$ tal y como se muestra en la Figura 3.4 ,la cual equivale a $0.68\lambda^2$ en área, de esta forma no se pierde la longitud eléctrica que es definida por Reoderer en el diseño de la antena de cruz, pero se logra reducir el tamaño de esta estructura.

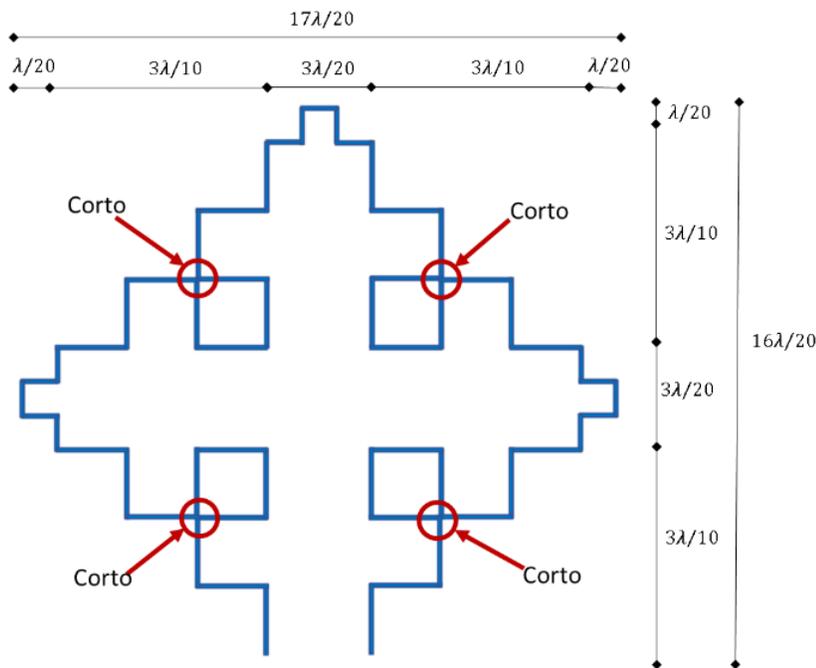


Figura 3.4 Dimensiones de las modificaciones propuestas

Pero en la Figura 3.4 se observa que el brazo superior, inferior y los laterales entran en contacto por lo que existen cuatro puntos donde se genera un corto que modifican la trayectoria de la corriente, y por lo tanto esos puntos de contacto modifican el comportamiento de la antena, tanto en acoplamiento, ganancia y polarización.

Una forma de lograr resolver el inconveniente de los cuatro puntos de contacto es modificando la posición de la figura euclidiana que se agregó en la sección de $\lambda/2$ de cada uno de los brazos, para evitar que estas figuras euclidianas entren en contacto con alguna parte de la estructura, de modo que se propone elevar esta figura no euclidiana en cada uno de los brazos de la antena, buscando mantener las mismas dimensiones para evitar que se modifique la longitud eléctrica en cada brazo, tal y como se muestra en la Figura 3.5 por lo que al realizar esta modificación permite que el diseño de la antena sea una estructura cuasi fractal.

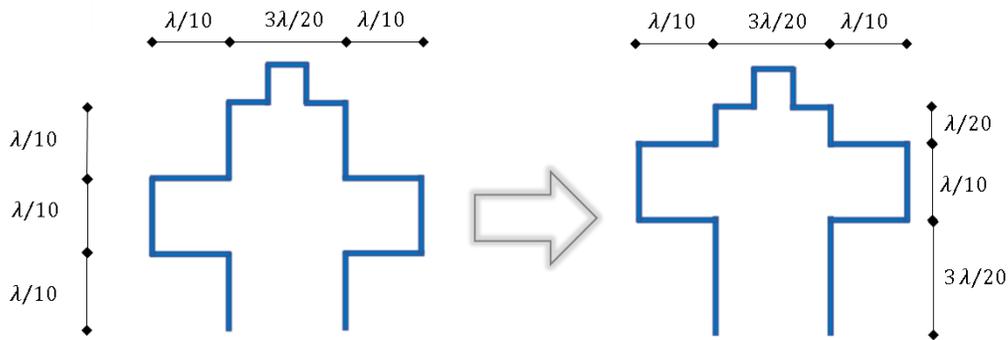


Figura 3.5 Propuesta para evitar los puntos de contacto (corto)

De esta manera se mantiene la misma longitud eléctrica y se evita un contacto entre cada uno de los brazos tal y como se muestra en la Figura 3.6.

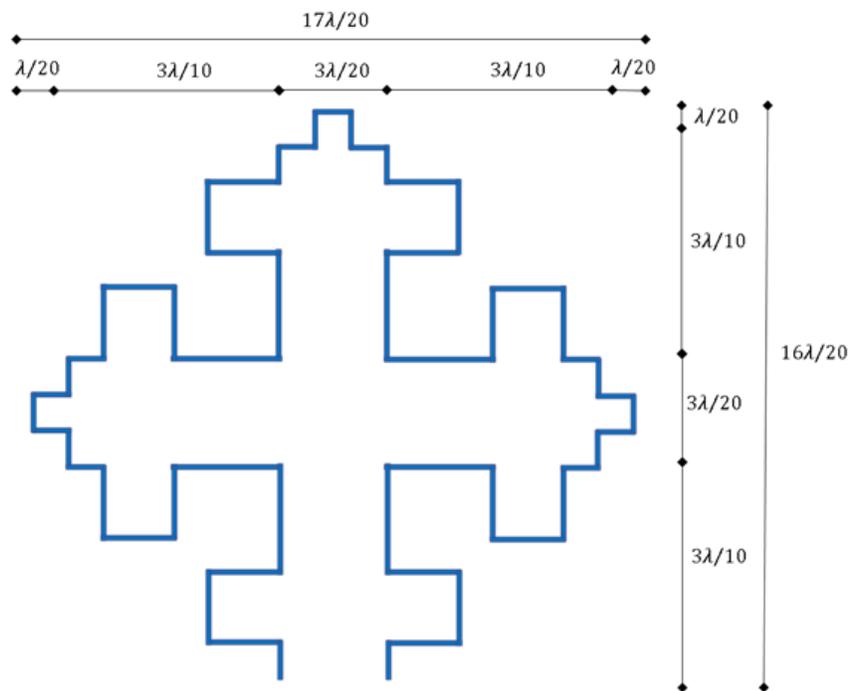


Figura 3.6 Dimensiones de las modificaciones propuestas (Evitando Cortos)

Analizando la estructura se observa que es posible realizar una reducción mayor en las dimensiones de la antena por lo que se propone modificar las proporciones de las figuras euclidianas cuadradas de las secciones de $\lambda/2$ en cada uno de los brazos de forma que estas figuras sean más largas y angostas de modo que en



general se tiene una reducción en la altura de los brazos sin necesidad de perder la longitud eléctrica de la estructura de modo que al realizar esta modificación, se obtienen figuras rectangulares, tal y como se observa en la Figura 3.7.

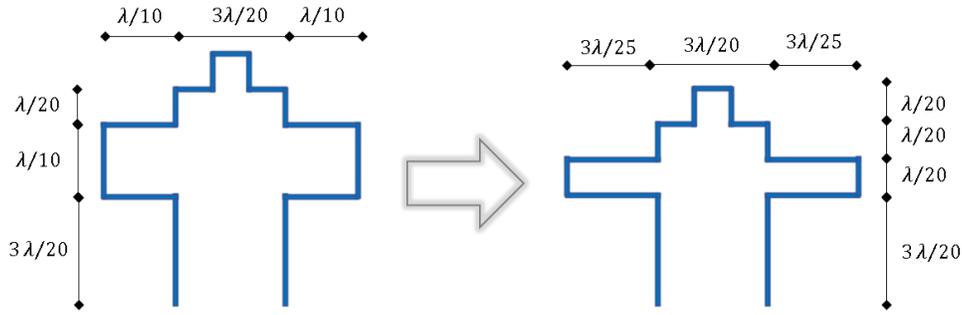


Figura 3.7 Modificación de las proporciones de las figuras euclidianas

Una vez realizada esta modificación en cada uno de los brazos de la antena se observa que la modificación permite que se reduzcan las dimensiones de la estructura cuasi fractal anterior, obteniendo dimensiones de $15\lambda/20 \times 14\lambda/20$ las cuales equivalen a $0.525 \lambda^2$ del área de la estructura por lo que es fácil percatarse de que existe una reducción mayor en el diseño, como se observa en la Figura 3.8.

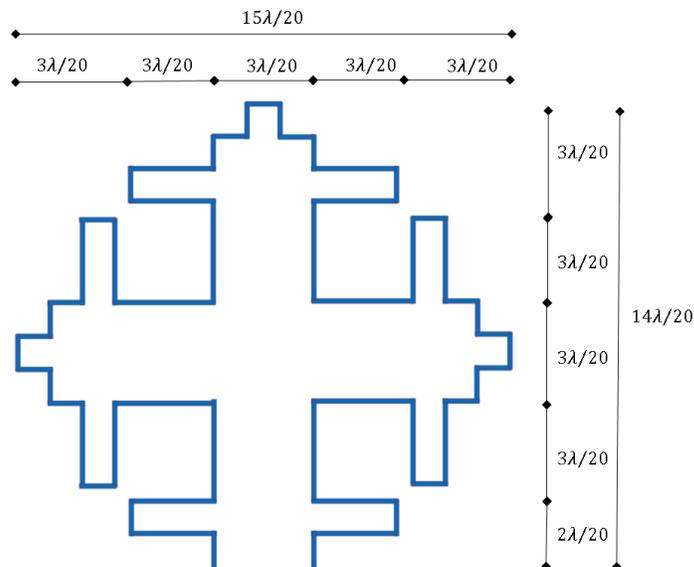


Figura 3.8 Dimensiones de la estructura Cuasi-Fractal



Esta modificación de la estructura principal permite una reducción propuesta de hasta un 33% con respecto al tamaño original de la antena de cruz y en la Figura 3.9 se puede observar el proceso de reducción de tamaño de acuerdo a las modificaciones propuestas.

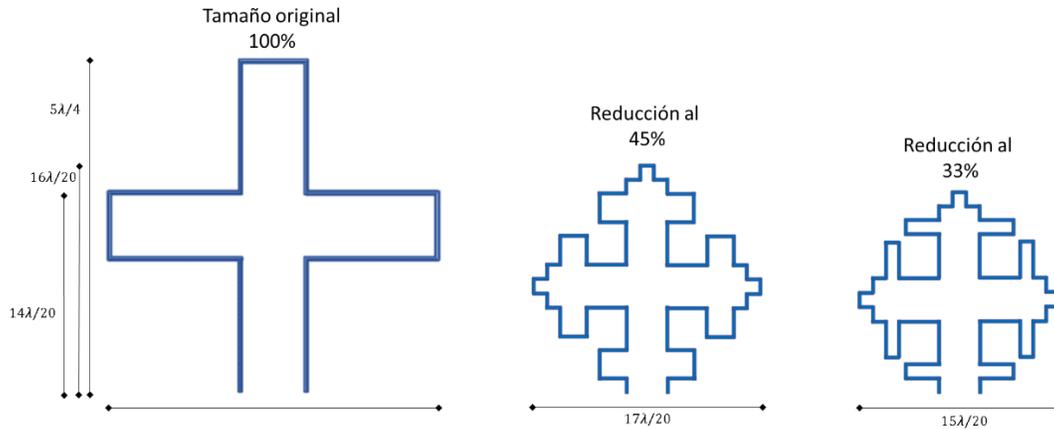


Figura 3.9 Comparativa de las dimensiones del diseño propuesto

Análisis paramétrico de la constante de entonación, K

La complejidad de diseño y construcción de algunas antenas hace factible utilizar herramientas computacionales de simulación que permitan determinar la distribución de corriente que atraviesa en estructura de la antena, con el desarrollo tecnológico e investigación actual, es posible conocer el comportamiento de diferentes tipos de antenas con geometrías arbitrarias.

Para realizar una análisis preliminar de las características de esta antena, se modeló la estructura cuasi fractal propuesta y se realizó la simulación de la misma utilizando la herramienta computacional CST Micro Wave Studio, para propósito de estudio se propone realizar el diseño de esta simulación preliminar para una frecuencia de VHF en el intervalo de 145.5 MHz, con el fin de comprobar que las características de la antena original de Reoderer se mantenían con solo cambiar el valor de las longitudes de onda en las dimensiones del diseño, en pocas palabras se realiza esta primera prueba, para comprobar que la antena cuasi fractal al igual que la Cruz de



Reoderer es escalable, el modelado se realiza utilizando un conductor de 0.16mm de radio, la estructura esta modelada para trabajar a 145.5MHz por lo que la longitud de onda de esta estructura es de 2.06 m, la separación del plano de tierra es de $\lambda/9$, y el material utilizado en la simulación es Perfect Electric Conductor, Conductor eléctrico perfecto (PEC por sus siglas en inglés) estas características se pueden observar en Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos de simulación de la antena Cuasi-fractal

Datos	Cuasi-Fractal
Frecuencia de Diseño	145.5 MHz
Longitud de Onda	2.06 m
Diámetro del conductor	3.2 mm
Separación del Plano de tierra	0.22 m
Material de Modelado	PEC

Después de realizar el modelado de la estructura cuasi fractal se encontró que el coeficiente de reflexión se encontraba desacoplada esto se puede observar en la Figura 3.11 cuando $K=1$, al observar que el punto de operación de la antena se encontraba a la derecha de la frecuencia de operación, se optó por aumentar el tamaño de la estructura, para esto se optó por utilizar una constante denominada como K para redimensionar el tamaño de la estructura y así conseguir el acoplamiento deseado en la frecuencia de operación. En la Figura 3.10 se muestra la posición de la constante de redimensionamiento K en el diseño de la estructura.

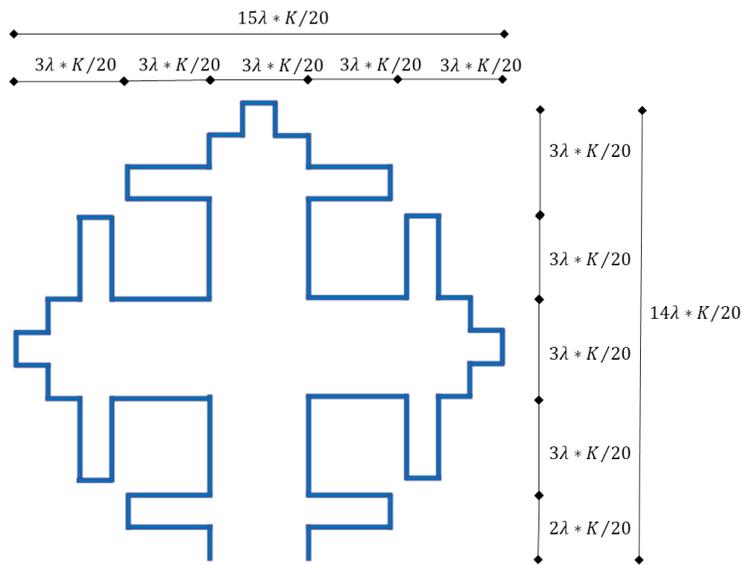


Figura 3.10 Dimensiones del Diseño Cuasi-Fractal, utilizando la constante de redimensionamiento K
 Y en la Figura 3.11 se puede observar como al aumentar 1.122 veces las dimensiones de la estructura, se logra recorrer el acoplamiento a la izquierda en la frecuencia de operación requerida.

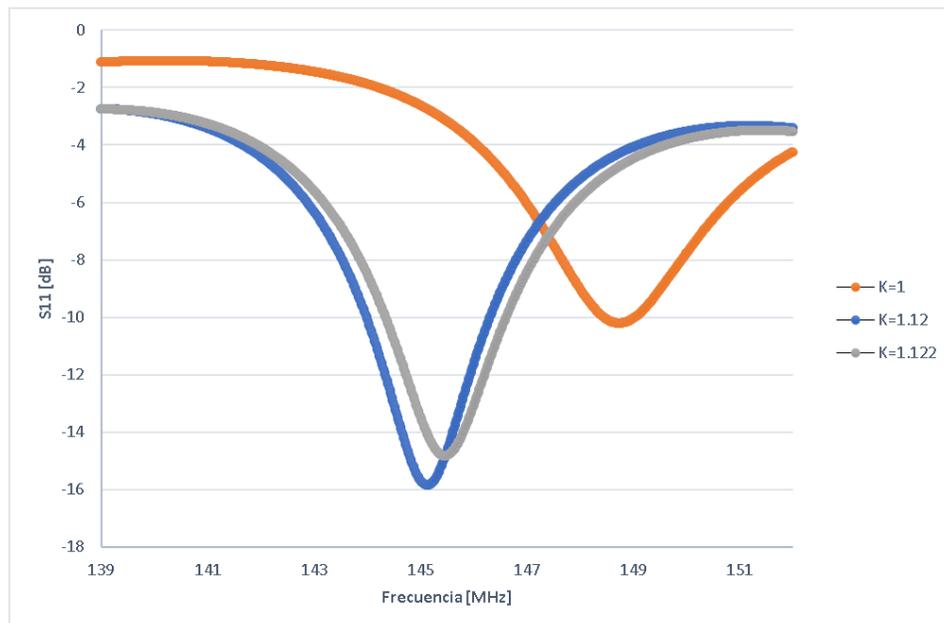


Figura 3.11 Comportamiento del coeficiente de reflexión con respecto a la constante de redimensionamiento K



Una vez realizado el análisis de dimensionamiento utilizando la constante K de entonación, se encontró que las dimensiones de la antena aumentaron, obteniendo un tamaño del 45% tal y como se muestra en la Figura 3.12.

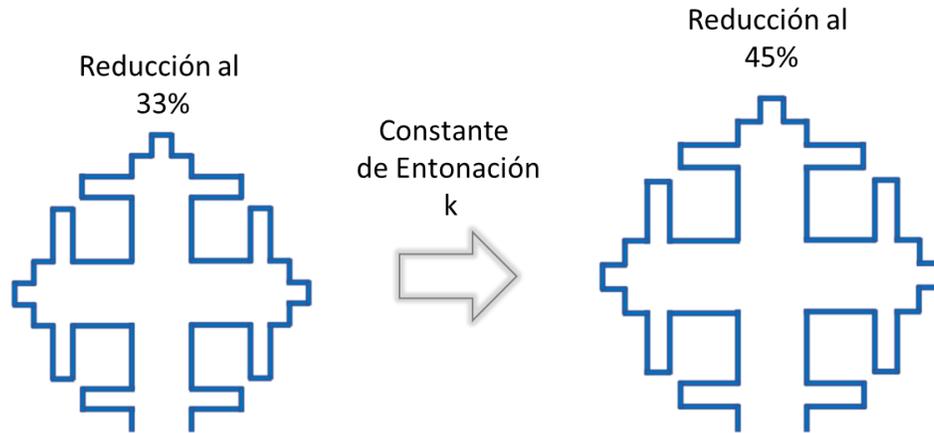


Figura 3.12 Porcentaje de reducción de acuerdo a la constante K

En la Figura 3.13 se pueden observar las dimensiones de la estructura que trabaja en la frecuencia de 145.5 MHz, como se puede observar las dimensiones de esta antena están en metros.

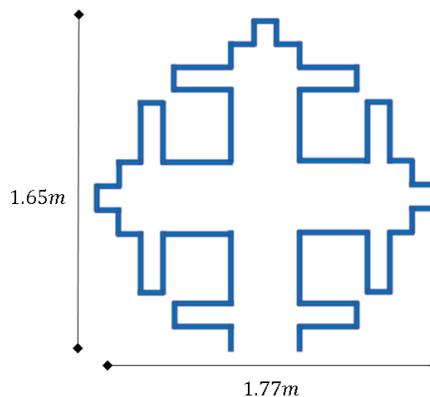


Figura 3.13 Dimensiones de la antena Cuasi Fractal diseñada a 145.5 MHz

Se observa que su tamaño ocupa un área de solo 2.92 metros cuadrados, con dimensiones de 1.65 metros x 1.77 metros.



En la Figura 3.1 se observa que la apertura del lóbulo principal del diagrama de radiación es de 43 grados, además de que es una antena directiva, mientras que en la Figura 3.2 se puede observar el diagrama de radiación en un plano 2D y se obtiene una ganancia de 12.16 dB. Y en la Figura 3.3 se puede observar el diagrama en 3D que esta genera.

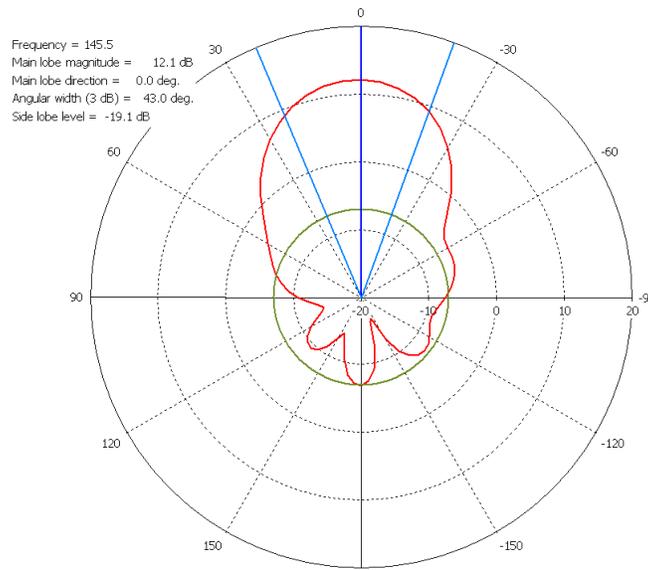


Figura 3.1 Diagrama de radiación de la antena Cuasi Fractal diseñada a 145.5 MHz

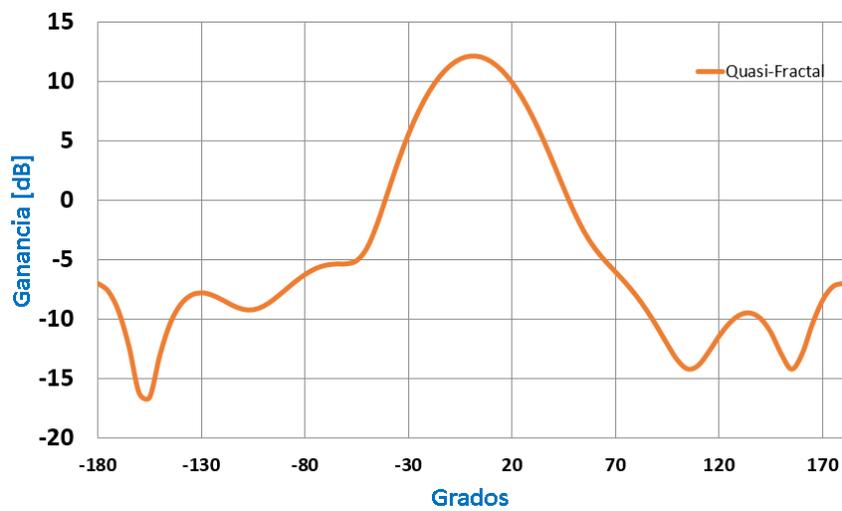


Figura 3.2 Diagrama de radiación de la antena Cuasi fractal a 145.5 MHz en 2D

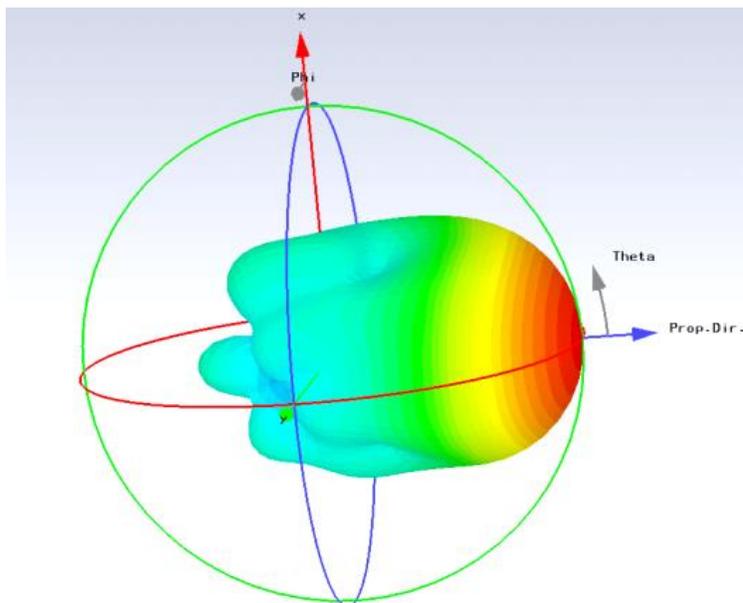


Figura 3.3 Diagrama de radiación en 3D de la Cuasi-Fractal tipo Cruz de Reoderer a 145.5Mhz en 3D

La ganancia exhibida por la estructura final es de 12.16 dB con un ancho de haz en el lóbulo principal de 43 grados.

En el artículo Presentado en el 15to Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES 2015), titulado “Antena Quasi - fractal Tipo Cruz de Reoderer para una estación terrena en VHF” [39], se presentaron los resultados de estas simulaciones, junto con un análisis paramétrico en el que se encontró que las geometrías euclidianas cuadradas, en cada uno de las puntas de los brazos de la antena podían afectar las características y comportamiento de la antena, esto se debe a que existe un desfaseamiento en cada uno de los dobleces de la antena. Por lo que con base a ese análisis se encontró que se podía tener una nueva estructura, por lo cual se denominó como antena tipo fractal, tal y como se muestra en la Figura 3.4.

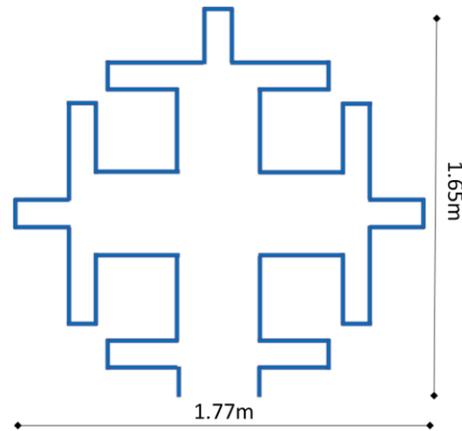


Figura 3.4 Antena Fractal tipo Cruz de Reoderer diseñada a 145.5 MHz

En la Figura 3.5 se observa el diagrama de radiación en forma polar de esta antena una ganancia de 11.98 dB Mientras que en la Figura 3.6 se observa el diagrama de radiación de esta antena en forma rectangular con una apertura de 49.5° Mientras que en la Figura 3.7 se aprecia su diagrama de radiación en 3D de esta antena demás en la Figura 3.9 se muestra que la encuentra se encuentra acoplada mostrando su parámetro de reflexión.

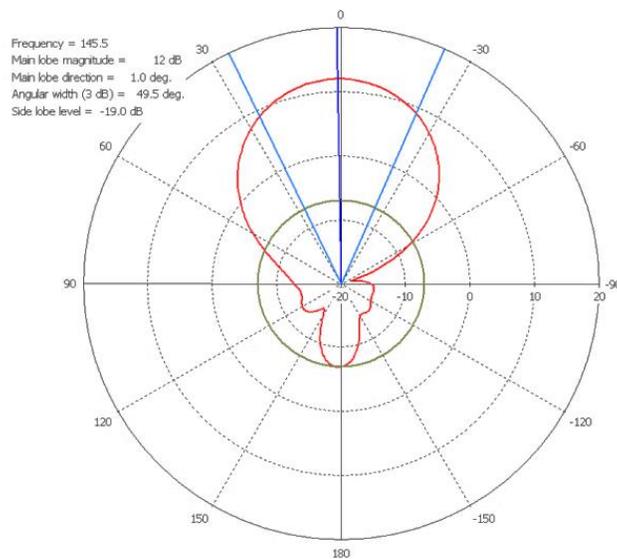


Figura 3.5 Diagrama de radiación para una Antena Cruz de Reoderer fractal a 145.5 MHz

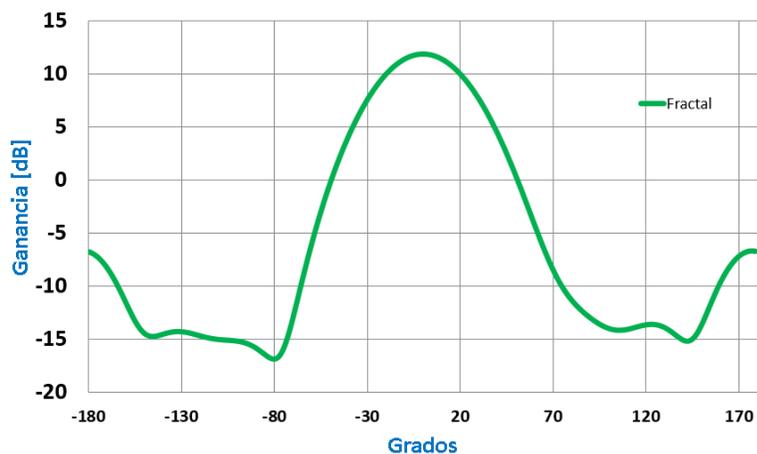


Figura 3.6 Parámetro de reflexión S11 para una Antena Cruz de Reoderer fractal a 145.5 MHz

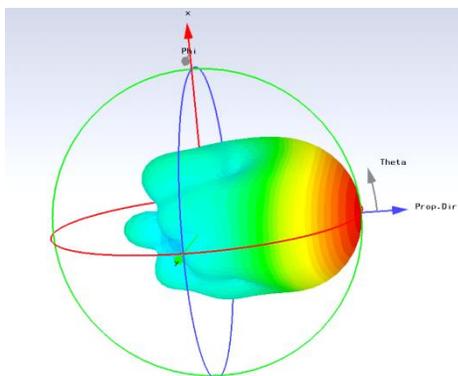


Figura 3.7 Diagrama de radiación en 3D de la Fractal tipo Cruz de Reoderer a 145.5Mhz

La antena Cruz de Reoderer, la antena Cruz-Fractal y Fractal fueron modeladas en CST MWS para su análisis. Las dimensiones que se utilizaron se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos de Simulación

Datos	Cruz	Fractal	Cuasi-Fractal
Frecuencia de Diseño	145.5 MHz	145.5 MHz	145.5 MHz
Longitud de Onda	2.06 m	2.06 m	2.06 m
Diámetro del alambre	3.2 mm	3.1 mm	3.2 mm
Separación del Plano de tierra	0.22 m	0.22	0.22 m
Material de Modelado	PEC	PEC	PEC



En la Figura 3.8 se pueden observar los resultados gráficos del Diagrama de radiación en 2D de la antena fractal, cuasi-fractal y la cruz, en la que se observa que el diagrama de ambos además de ser directivo, es similar en cuanto a ganancia, mientras que el cuasi-fractal tiene una ganancia de 12.16 dB la cruz tiene una de 13.1 dB y la fractal 11.98 dB.

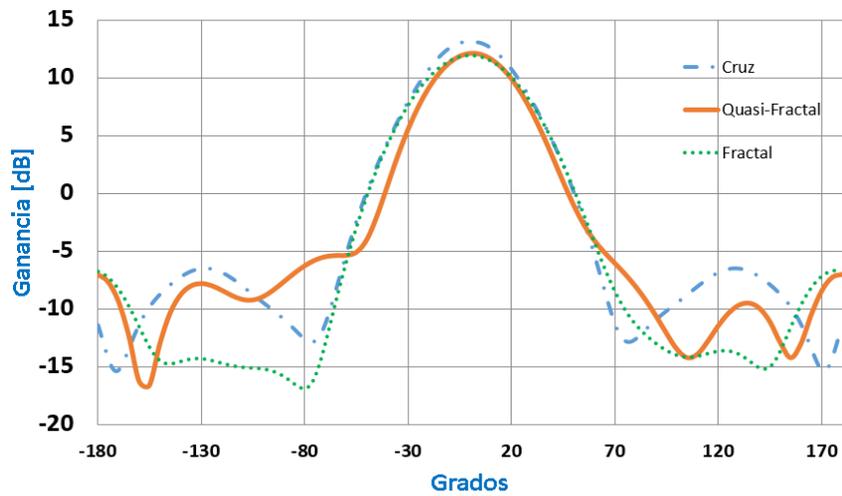


Figura 3.8 Diagrama de radiación en 2D de la antena Fractal, cuasi-fractal y la antena tipo Cruz de Reoderer diseñada a 145.5 MHz

En la Figura 3.9 se muestra el Coeficiente de reflexión o parámetros S11 de las antenas, en la cual se puede observar que están acopladas, pero se puede apreciar que al reducir la antena de Cruz de Reoderer afecto el acoplamiento de esta.

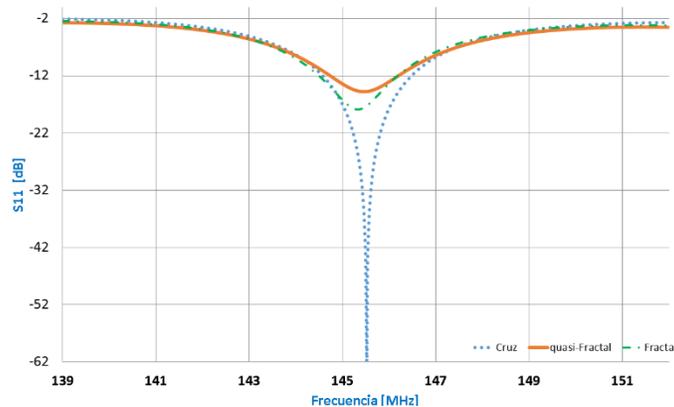


Figura 3.9 Coeficiente de Reflexión o Parámetros S11 de; la antena Fractal (línea punteada con guion), Quasi-Fractal (línea continua) y la antena tipo Cruz de Reoderer (línea punteada).



En la Tabla 3.2 se muestran los datos obtenidos en las simulaciones tanto para la antena de Cruz der Reoderer así como para la antena Fractal.

Tabla 3.2 Tabla comparativa de la primera optimización

Datos	Cruz	Fractal	Cuasi-Fractal
Tipo de Antena	Directiva	Directiva	Directiva
Frecuencia de Operación	145.5 MHz	145.5 MHz	145.5 MHz
Ganancia	13.1 dB	11.9 dB	12.16 dB
S11	-61.8 dB	-18 dB	-14.83 dB

Análisis paramétrico de la separación del plano de tierra y comparación de resultados de una estructura simétrica y una asimétrica.

En el modelado a escala de antenas, las características tales como impedancia, diagrama de radiación, polarización, etc. son invariantes a un cambio del tamaño físico si se realiza también un cambio similar en la frecuencia o longitud de onda operativa.

Por ejemplo, si todas las dimensiones físicas se reducen en un factor de dos, el rendimiento de la antena permanecerá sin cambios si la frecuencia de funcionamiento se incrementa en un factor de dos. En otras palabras, el rendimiento es invariante si las dimensiones eléctricas permanecen sin cambios [1].

Con base a esto se propone realizar el siguiente análisis paramétrico utilizando una frecuencia de operación de 2.4 GHz, por lo que al ser de una frecuencias mayores, las dimensiones de esta antena disminuyen y se vuelve una opción viable para poder manipular al momento de su construcción física en comparación de la antena diseñada en VHF la cual tiene dimensiones demasiado grandes.

Por lo que en la Figura 3.10 se muestran las dimensiones de la estructura Cuasi-Fractal diseñada para trabajar en 2.4 GHz.

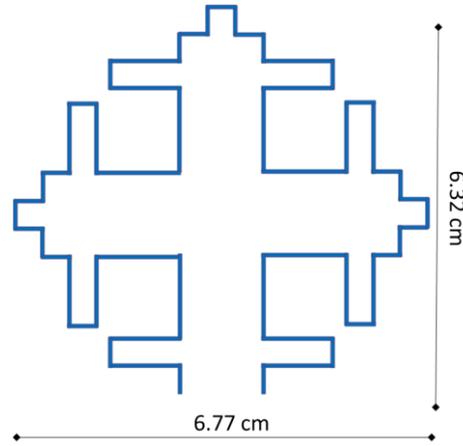


Figura 3.10 Dimensiones de una antena Cruz Cuasi-Fractal diseñada a 2.4GHz

En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros utilizados para el modelado y simulación de esta antena en el software comercial CST MW Suit Studio, tales como la frecuencia de operación, el radio del conductor r_c , la longitud de onda λ_o , el tamaño de la estructura, el tamaño del plano de tierra, así como la separación del plano de tierra.

Tabla 3.3 Parámetros utilizados para el modelado y simulación de la antena de referencia

Frecuencia de Operación	Radio del conductor r_c	Longitud de onda λ_o	Tamaño de la estructura	Tamaño del plano de tierra	Separación del plano de tierra (S)
2.4 GHz	0.32 mm	12.5 cm	6.7cm x 6.3cm	6.7+ 2*S cm x 6.3+2*S cm	$\lambda/8$ cm
Material de Modelado				PEC	

Una vez realizada la simulación en la herramienta computacional CST Studio, se observa en la Figura 3.14 el coeficiente de reflexión simulado de esta antena, en donde se puede apreciar que la antena se encuentra acoplada a 2.4 GHz mostrando un ancho de banda de 31 MHz y un acoplamiento de -31.85dB.

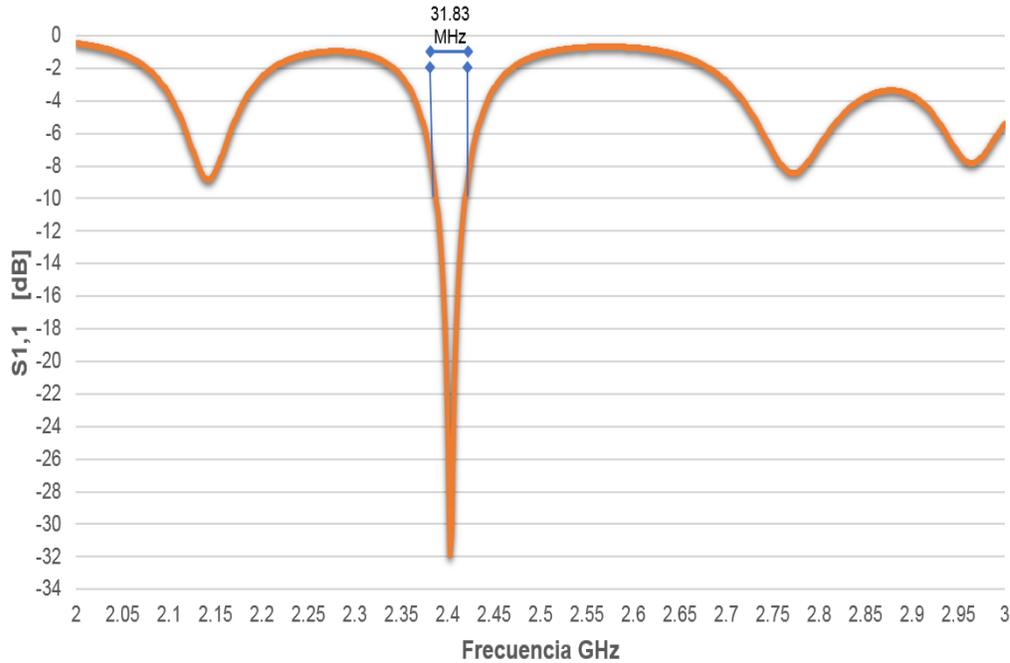


Figura 3.14 Coeficiente de Reflexión de la antena Cuasi-Fractal diseñada a 2.4 GHz

Además en la Figura 3.15 se puede observar el grafico en polar del diagrama de radiación en el plano $\Phi=0$ con una apertura o ancho de haz de 58.5° en el lóbulo principal.

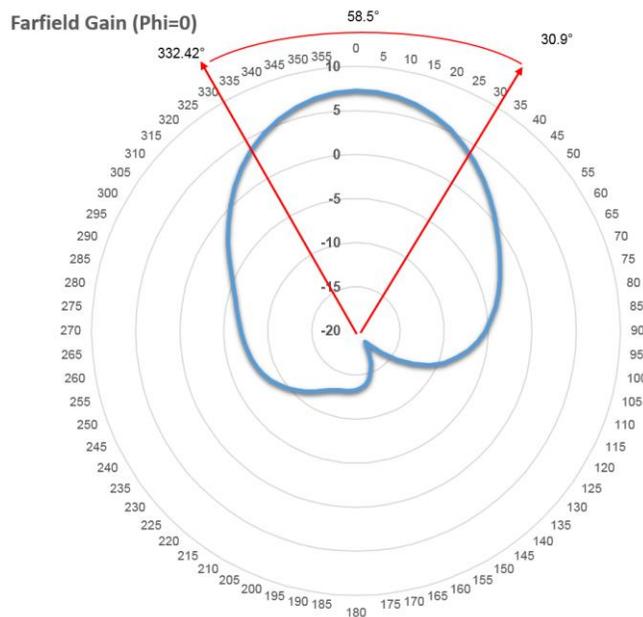


Figura 3.15 Diagrama de radiación en polar en corte $\Phi=0$ de la antena QF diseñada a 2.4 GHz.

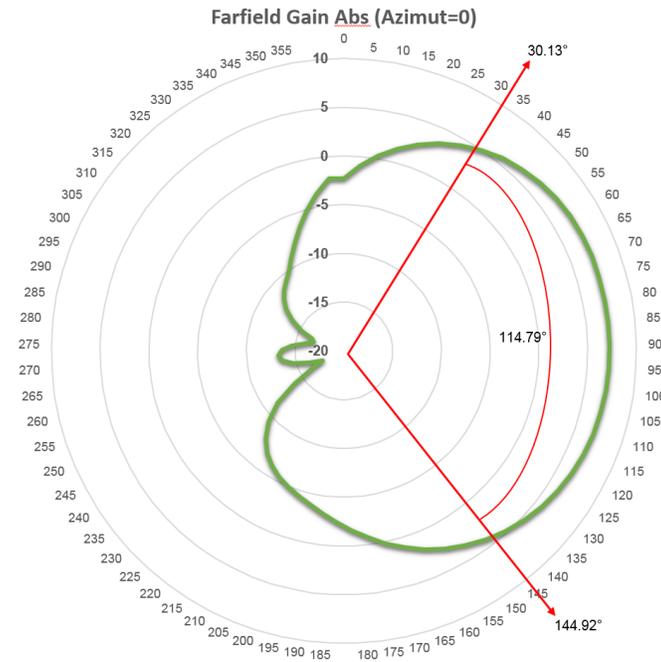


Figura 3.16 Diagrama de radiación en polar en corte Azimut=0 de la antena QF diseñada a 2.4 GHz

En la Figura 3.16 se observa el diagrama de radiación en forma polar en corte azimut=0 donde se observa que la antena tiene un ancho de Haz de 114.79° en el lóbulo principal.

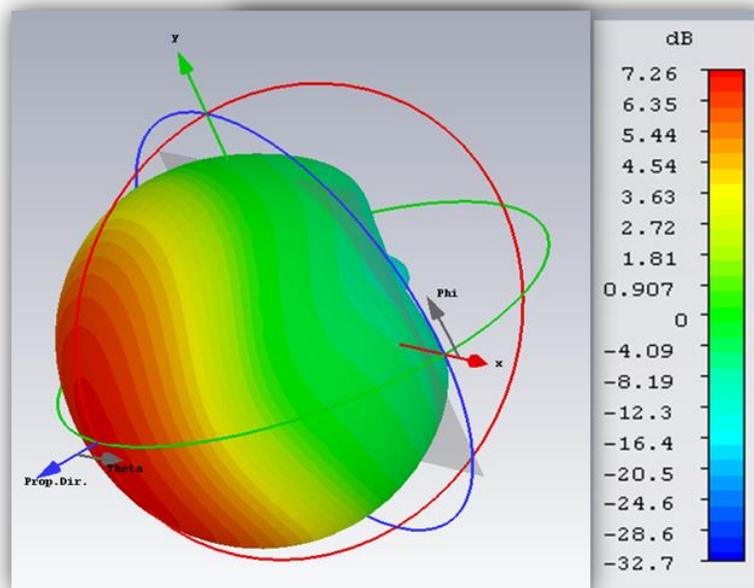


Figura 3.17 Diagrama de radiación en 3D de la antena QF diseñada para operar en 2.4 GHz.



Mientras que en la Figura 3.15 y Figura 3.16 se observa el diagrama de radiación en forma polar, en la Figura 3.17 se observa el diagrama de radiación de la antena, diseñada a 2.4 GHz la cual muestra una ganancia de 7.26dB.

Con base a estos resultados obtenidos, es fácil percatarse que la apertura del lóbulo principal en el plano de azimut=0 es más grande que la apertura existente en el plano $\phi=0$, por lo que a esta apertura se le atribuye a que la estructura no es completamente simétrica, es por eso que se propone una modificación a la estructura buscando una simetría en todos sus brazos.

Tomando en cuenta que la longitud del conductor de la estructura es un múltiplo de la longitud de onda λ_0 [1], [16], [21], [38], [39], se propone que esta antena se modifique, para tener una estructura simétrica, permitiendo que el brazo inferior sea similar a los brazos superiores tal y como se muestra en la Figura 3.18, aumentando la longitud del conductor, corrigiendo la apertura del lóbulo principal más amplio, localizado en Azimut=0.

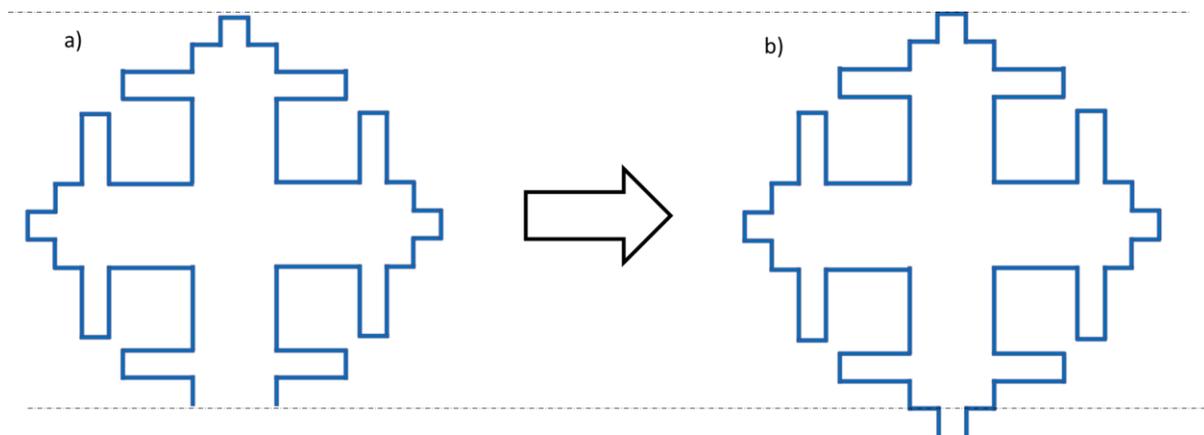


Figura 3.18 a) Estructura no simétrica, b) Estructura simétrica

Al realizar y simular de este cambio, se observa en la Figura 3.19 que el acoplamiento en 2.4 GHz disminuye a -17.6 dB pero se encontró que el diagrama en este punto de 2.4 GHz se mantenía con las mismas características pero también se encontró un diagrama directivo en una frecuencia más alta a la diseñada, para ser más exactos en la frecuencia de 3 GHz el cual se puede observar en la Figura



3.20 con una ganancia de 12.5 dB, pero el coeficiente de reflexión en ese punto de la antena simétrica es de -5.8dB por lo que no se encuentra acoplada.

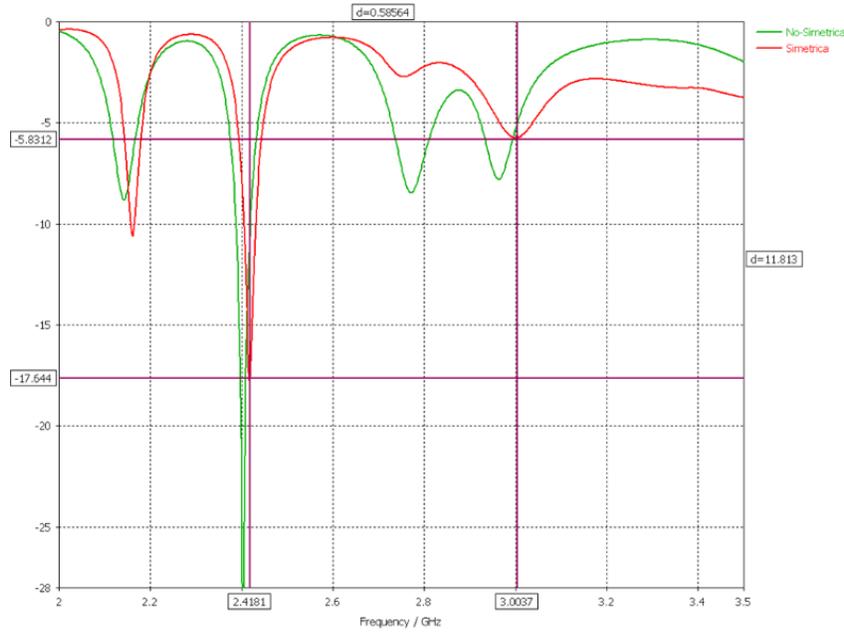


Figura 3.19 Coeficiente de reflexión entre la antena simétrica y la no simétrica

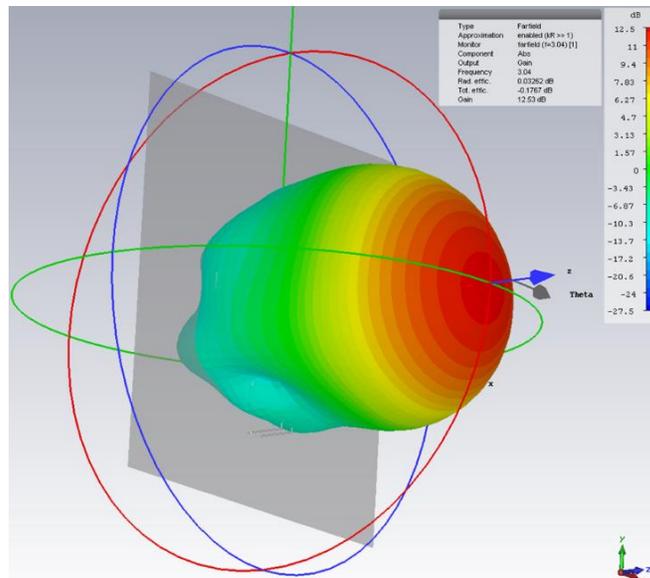


Figura 3.20 Diagrama de radiación en 3D ubicado en 3 GHz

Se observa claramente que aunque la ganancia es mayor y que la apertura del lóbulo principal es menor, se encuentra que la estructura no está acoplada, es por eso que con base a los resultados obtenidos en el artículo “A 2.4 GHz Cross Rhombic Antenna for a Cube Satellite Application” [40], cuya estructura se basa en



principios de una antena de cruz en donde se realizaron pruebas modificando el grosor del sustrato que a su vez es la separación entre la estructura y el plano de tierra, se mostró que esa separación puede modificar el comportamiento del coeficiente de reflexión de una antena de cruz, esta separación se modificó utilizando las bases teóricas de la cruz de Reoderer donde se propone que la separación de este plano debe estar entre $\lambda/4$ y $\lambda/25$ [16].

Por lo tanto se propone realizar un análisis entre la separación que existe entre el plano de tierra y la estructura Cuasi-Fractal donde se propone que la separación sea de λ/n , donde $n=4, 5, 6, 7, \dots, 25$, en la Figura 3.21 se muestran algunos de resultados del coeficiente de reflexión modificando la separación entre el plano de tierra donde n es el cociente de la relación antes mencionada.

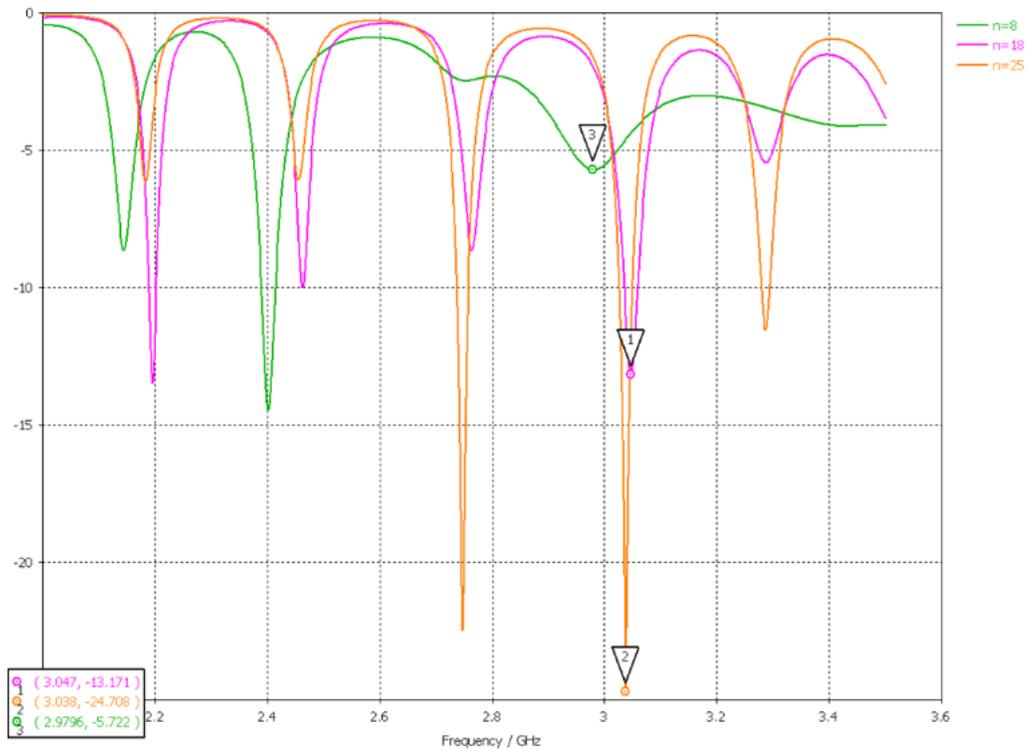


Figura 3.21 Resultados del coeficiente de reflexión en relación a la separación del plano de tierra



Después de varias simulaciones, los resultados concluyeron que $\lambda/18$ es un valor óptimo para esta separación ya que mantiene unos buenos parámetros de acoplamiento.

Como se había mencionado, el punto óptimo de esta estructura se encontraba en la frecuencia de 3 GHz, por lo que se volvió a utilizar la constante de redimensionamiento K para lograr entonar la estructura para que trabaje a 2.4 GHz. Las dimensiones de la antena Cuasi Fractal se modificaron, las cuales se pueden observar en la Figura 3.22.

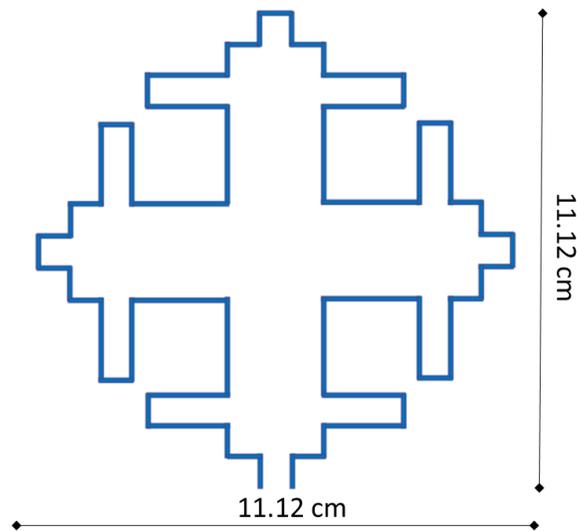


Figura 3.22 Dimensiones de la antena Cuasi-Fractal Simétrica a 2.4 GHz

Del resultado de este redimensionamiento en la Figura 3.23 se puede observar que existe un acoplamiento en la frecuencia de 2.4 GHz además tiene un ancho de banda de 21 MHz un coeficiente de reflexión de -15.88 dB.

En la Figura 3.24 se muestra el diagrama de radiación de esta antena trabajando en 2.4 GHz con una ganancia media de 12.4 dB, además se observa que tiene un diagrama directivo y simétrico.

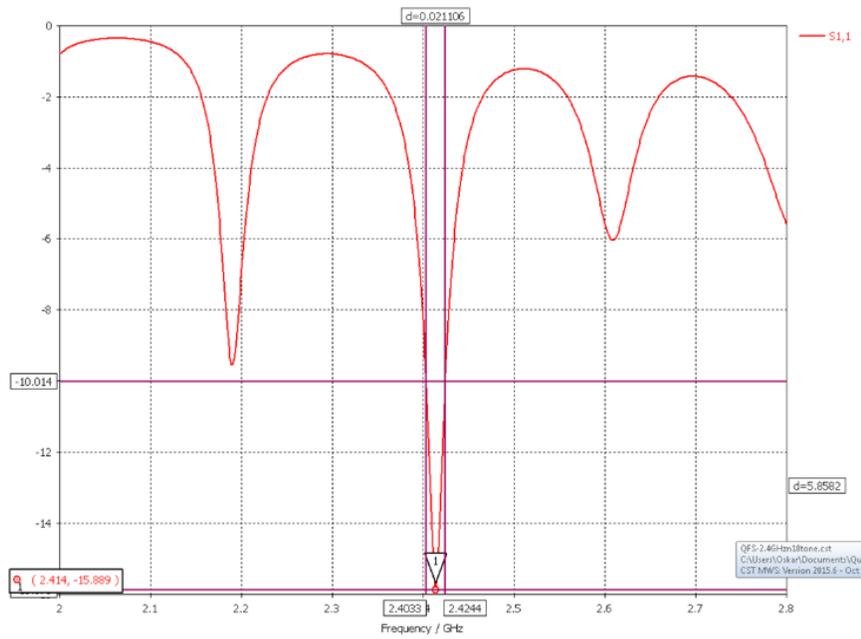


Figura 3.23 Resultados del coeficiente de reflexión de la estructura simétrica

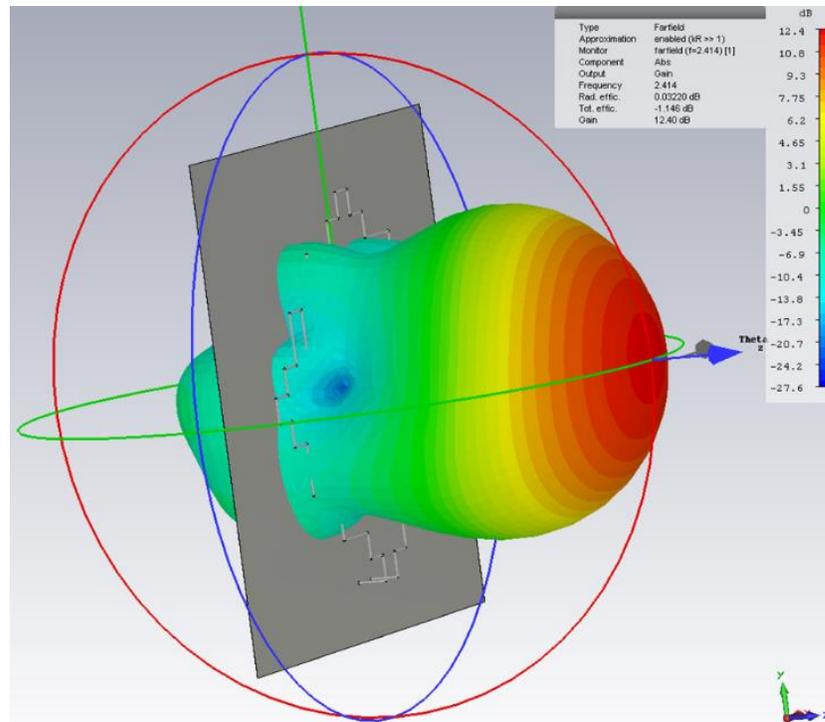


Figura 3.24 Diagrama de radiación en 3D de la antena Cuasi-Fractal en 2.4 GHz



En la Figura 3.25.a) se observa que el diagrama de radiación en azimut tiene una apertura 43.4° y en el plano phi, Figura 3.2511.b) tiene una apertura de 45.5° .

Con base a estos resultados se comprueba que la apertura del lóbulo principal tanto en el plano phi como el azimut son similares por lo que el diagrama es casi simétrico.

Por lo que los resultados de esta optimización presentan un ancho de banda de 20 MHz, una ganancia de 12.4 dB y un acoplamiento de -15.88 dB, tal y como se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Tabla Comparativa de la segunda optimización

Datos	QF inicial	QF Simétrica Optimizada
Tipo de Antena	Directiva	Directiva
Frecuencia de Operación	2.4 GHz	2.4 GHz
Ganancia	7.2 dB	12.4 dB
S11	-31.85dB	-15.88 dB
Dimensiones	6.77 x 6.32 cm	11.12 x 11.12 cm
Separación del plano de tierra	$\lambda/8$	$\lambda/18$

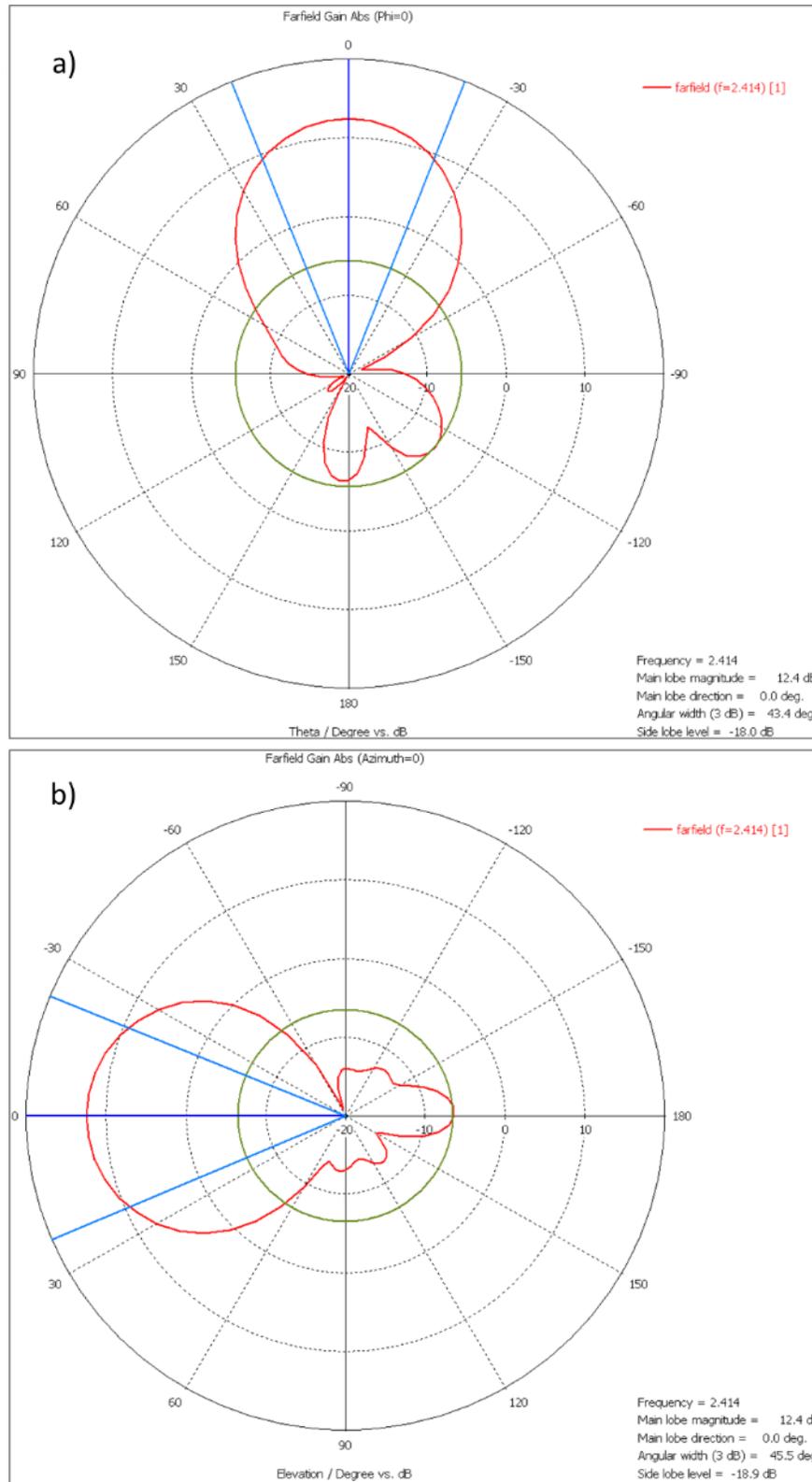


Figura 3.25 Diagrama de radiación en 3D de la antena Cuasi-Fractal simétrica a 2.4 GHz en el plano; a) azimut, b) phi



Análisis Paramétrico de la localización del puerto de alimentación

Como se mencionó en el análisis anterior el modelado a escala de antenas, las características tales como impedancia, diagrama, polarización, etc. son invariantes a un cambio del tamaño físico si se realiza también un cambio similar en la frecuencia o longitud de onda operativa, por lo que para este análisis se realizan pruebas en la banda UHF.

Este análisis se busca conocer el comportamiento de la simetría axial del diagrama de radiación, ya que como se sabe la relación axial del diagrama de radiación de una antena permite conocer la polarización de la misma.

En algunos análisis de estructuras fractales de parche se buscó mejorar el acoplamiento de las antenas modificando la posición del puerto de alimentación, pero algo que se observa pero no se menciona en algunos trabajos, es que el punto de alimentación también puede mejorar la simetría del diagrama de radiación [26], [27].

Con base a lo anteriormente mencionado, se propone realizar un análisis de la posición del puerto de alimentación, y comparar el diagrama de radiación de la antena en una vista frontal.

Con base a que la antena cuasi-fractal es una estructura simétrica, significa el comportamiento de los parámetros de la antenas serán los mismos o similares, si se alimentan en cualquiera de sus brazos.

Es por eso que solo se muestran las pruebas realizadas, modificando la posición del puerto de alimentación en solo uno de sus brazos.

En la Figura 3.26 se muestran las dimensiones de la antena cuasi-fractal, diseñada para trabajar en la frecuencia de operación de 434 MHz. Mientras que en la Tabla 3.5 Datos para el modelado de la simulación en CST y se muestran los datos de simulación de la antena diseñada en UHF (434 MHz) utilizados en la herramienta computacional CST Suit Studio.



Tabla 3.5 Datos para el modelado de la simulación en CST de la tercera optimización

Frecuencia de Operación	Radio del conductor r_c	Longitud de onda λ_o	Tamaño de la estructura	Separación del plano de tierra (S)	Tamaño del plano de tierra
434 MHz	0.326 cm	69.12 cm	66.84 cm x 66.84 cm	$\lambda/18$ cm	66.84 + S cm x 66.84 + S cm
Material de Modelado				PEC	

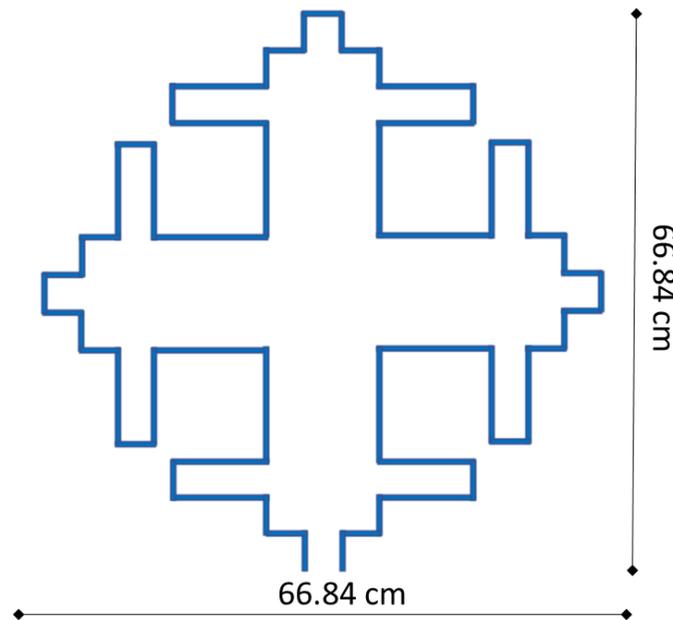


Figura 3.26 Dimensiones de la antena Cuasi-Fractal con una frecuencia de operación de 434 MHz

Con base a los datos mencionados en la Tabla 3.5 y colocando el puerto discreto de alimentación en la parte inferior central de la antena, tal y como se muestra en la Figura 3.27 Se encuentra que el diagrama de radiación en vista frontal no es simétrico tal y como se muestra en la Figura 3.28.

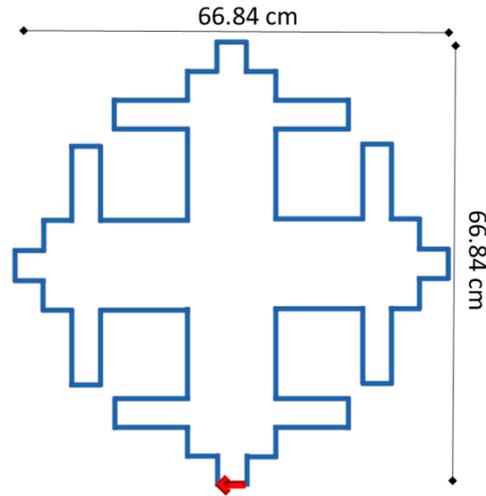


Figura 3.27 Antena Cuasi-Fractal a 434 MHz con el puerto de alimentación en la parte inferior central

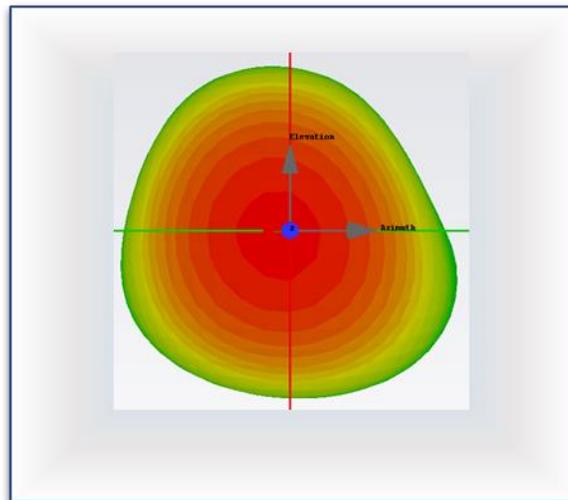


Figura 3.28 Vista Frontal del diagrama de radiación con el puerto de alimentación en la parte inferior central

La vista frontal del diagrama de radiación mostrado en la Figura 3.28, de acuerdo a los datos de simulación presentados en la Tabla 3.5, presenta una ganancia de 11.42 dB, además de que a simple vista se observa que la simetría axial de la antena no es simétrica. Después se propone colocar el puerto de alimentación de la antena en el lado inferior derecho de la estructura tal y como se muestra Figura 3.29.

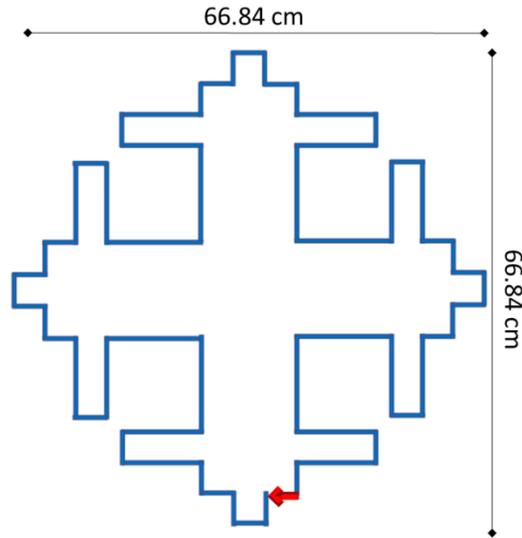


Figura 3.29 Antena Cuasi-Fractal a 434 MHz con el puerto de alimentación en la parte inferior derecha

En la Figura 3.30 se observa que el diagrama de radiación del puerto alimentado en la parte inferior derecha, es ovalado por lo que la relación axial de la antena no es simétrica, además este diagrama de radiación presenta una ganancia de 11.58 dB, un poco mayor a la ganancia de la alimentación en la parte inferior central.

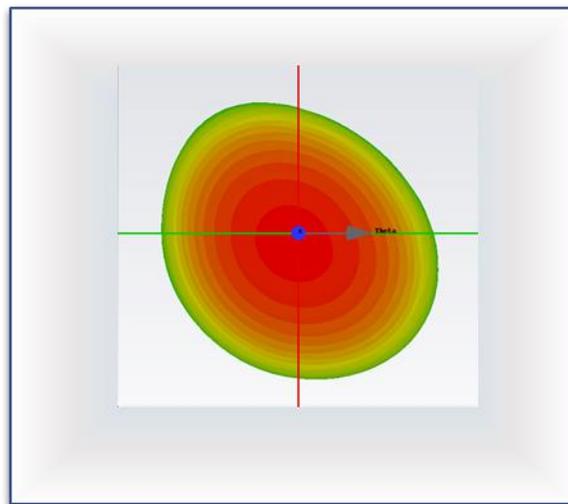


Figura 3.30 Vista Frontal del diagrama de radiación con el puerto de alimentación en la parte inferior derecha

En vista de que los diagramas de radiaciones mostrados en la Figura 3.28 y Figura 3.30 no presentan a simple vista una simetría axial simétrica, se propone que el puerto de alimentación se coloque en una posición alterna a los extremos de su



brazo, por lo que en la Figura 3.31 se muestra la posición del puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda.

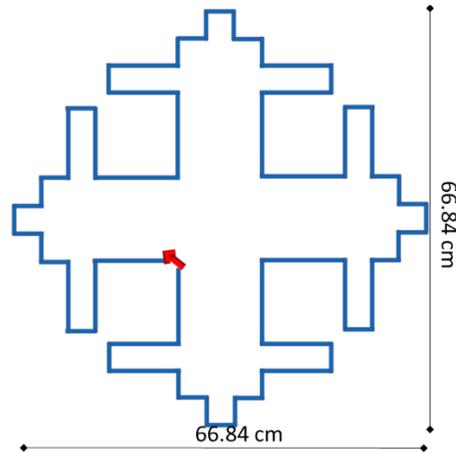


Figura 3.31 Antena Cuasi-Fractal a 434 MHz con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda

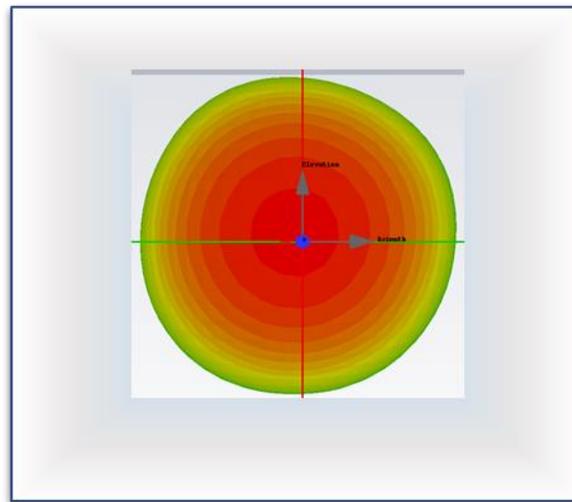


Figura 3.32 Vista Frontal del diagrama de radiación con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda

En la Figura 3.32 se observa que la vista frontal del diagrama de radiación es circular presentando una ganancia de 11.62 dB por lo que se puede deducir que la relación axial de la antena es mayormente simétrica por lo que la estructura proporcionaría una polarización circular, además se observa que la ganancia de esta posición del puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda es un poco mayor que la ganancia de las dos opciones anteriormente presentada.



Solo se muestran los resultados de las tres propuestas de la posición del puerto de alimentación, debido a que la estructura al ser simétrica, significa que al colocar el puerto de alimentación en su contraparte simétrica se tienen los mismos resultados pero de forma simétrica.

En la Figura 3.33 se muestra diagrama de radiación en polar del plano Phi y Azimut obtenido con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda y se puede observar que ambos cortes son casi idénticos presentando una ganancia de 11.62 dB y un Ancho de haz de 49° en el lóbulo principal.

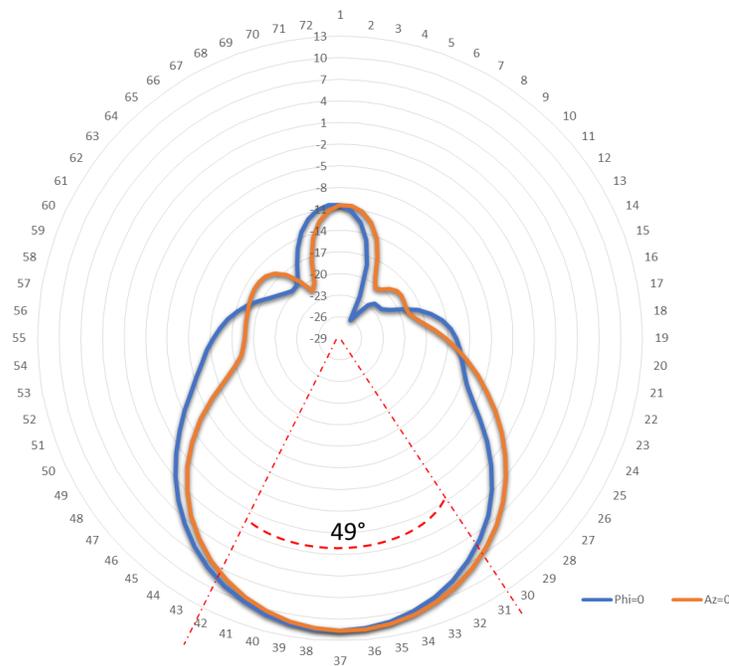


Figura 3.33 Diagrama de radiación en polar del plano Phi y Azimut del diagrama de radiación resultante con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda.

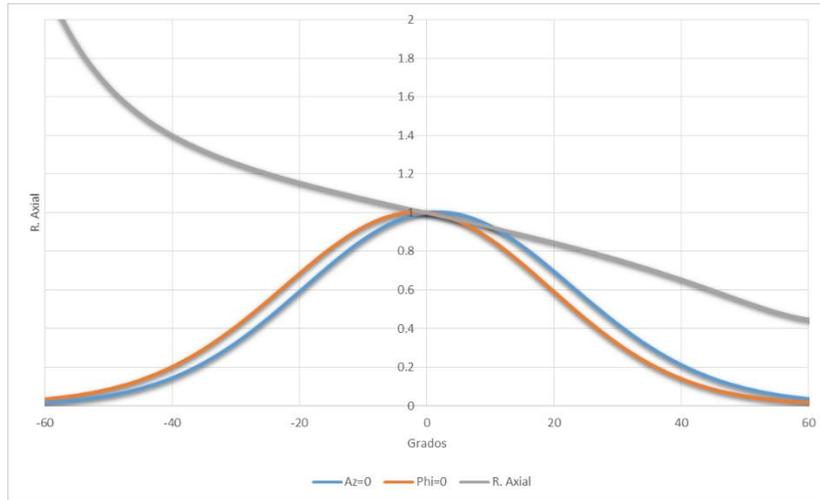


Figura 3.34 Relación axial y diagrama de radiación en $\Phi=0$ y Azimut=0 normalizado con el puerto de alimentación en la esquina central inferior izquierda.

En la Figura 3.34 se muestra un gráfico donde se puede observar el diagrama de radiación en $\Phi=0$ y azimut=0 normalizado en un su forma rectangular, y se observa que la relación axial de este diagrama de radiación es aproximadamente 1 en la zona directiva.

Tabla 3.6 Tabla comparativa de los resultados de la tercera optimización

Datos	Posición 1	Posición 2	Posición 3
Tipo de Antena	Directiva	Directiva	Directiva
diagrama de radiación (Vista Frontal)	No Definida	Ovalado	Circular
Ganancia	11.42 dB	11.58 dB	11.62 dB
Frecuencia de operación	434 MHz	434 MHz	434 MHz

Con base a la Tabla 3.6 Tabla comparativa de los resultados de la tercera optimización se observa que el mejor comportamiento del diagrama de radiación tanto para la ganancia como para su relación axial, se encuentra cuando el puerto de alimentación está colocado en la esquina central inferior izquierda.

Análisis paramétrico de las dimensiones del plano de tierra

En esta optimización se propone analizar el tamaño ideal del plano de tierra para obtener el mejor comportamiento en cuanto a ganancia de la antena.



La Tabla 3.7 Muestra los datos de modelado utilizados para realizar la simulación en el software CST MW Studio, mientras que en la Figura 3.35 se muestra el análisis paramétrico del plano de tierra basado en aumentar sus dimensiones, manteniendo la estructura cuasi-fractal en la posición central, tomando como tamaño inicial, las mismas dimensiones de la estructura, y adicionando un tamaño $N * \lambda/18$, donde $N = 0, 1, 2, \dots, 6$, donde $\lambda/18$ representa el valor de la separación óptima entre el plano de tierra y la estructura Cuasi-Fractal.

Tabla 3.7 Datos de modelado para el análisis del plano de tierra

Frecuencia de Operación	Radio del conductor r_c	Longitud de onda λ_o	Tamaño de la estructura	Separación del plano de tierra (S)	Tamaño del plano de tierra
434 MHz	0.326 cm	69.12 cm	66.84 cm x 66.84 cm	$\lambda/18$ cm	66.84 + $N * \lambda/8$ cm x 66.84 + $N * \lambda/8$ cm
Material de Modelado				PEC	

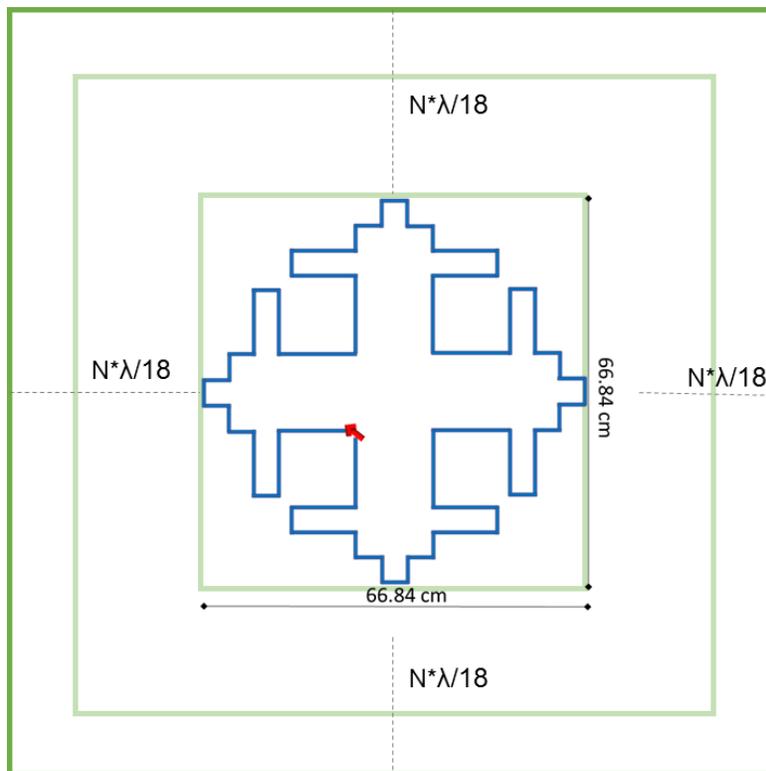


Figura 3.35 Representación gráfica del análisis paramétrico del plano de tierra



La Figura 3.36 muestra el comportamiento del diagrama de radiación, conforme aumentan las dimensiones del plano de tierra, y se observa que conforme este incrementa sus dimensiones, la ganancia de la antenna aumenta y los lóbulos traseros disminuyen.

En la Figura 3.37 se muestra una gráfica en donde se puede observar como la ganancia de la antenna aumenta proporcionalmente al valor de N, además de que existe un punto en el que la ganancia se empieza a mantener constante con 13 dB.

Con base a la Figura 3.36 y Figura 3.37 se observa que el comportamiento óptimo de la ganancia de la antenna se encuentra cuando N es mayor o igual a 4.5, por lo que las dimensiones ideales deben ser mayores o iguales a $4.5 \cdot N/18 + 0.6684$ m donde 0.6684 m es la dimensión de la estructura diseñada a 434 MHz.

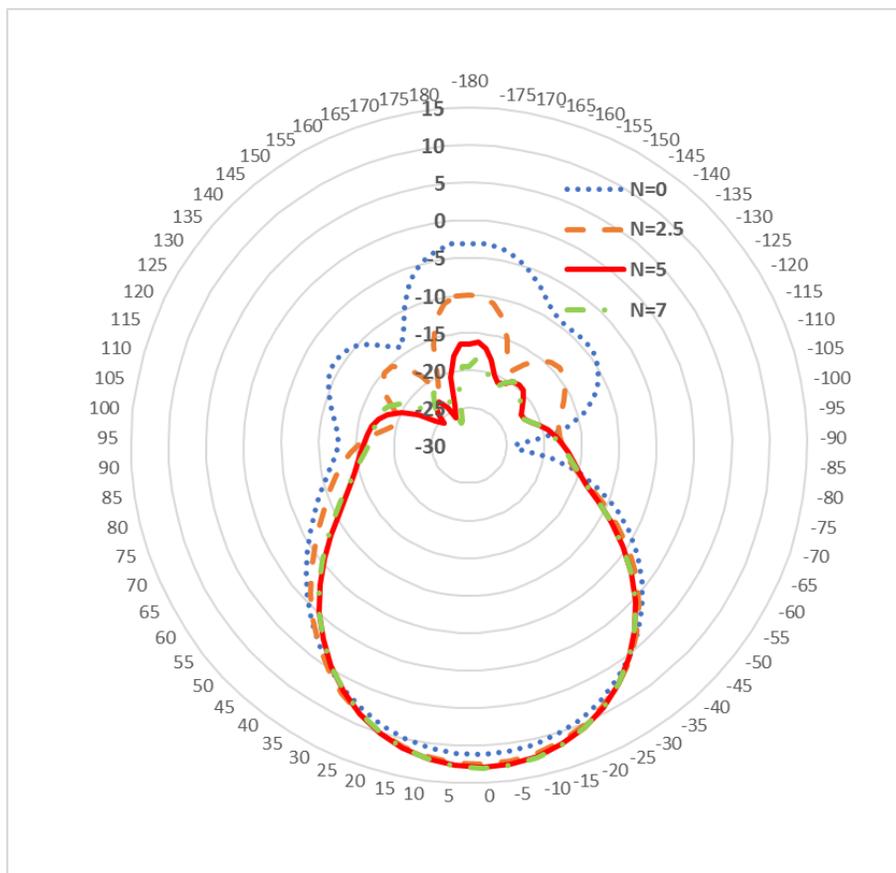


Figura 3.36 Análisis del diagrama de radiación en polar con respecto a las dimensiones del plano de tierra

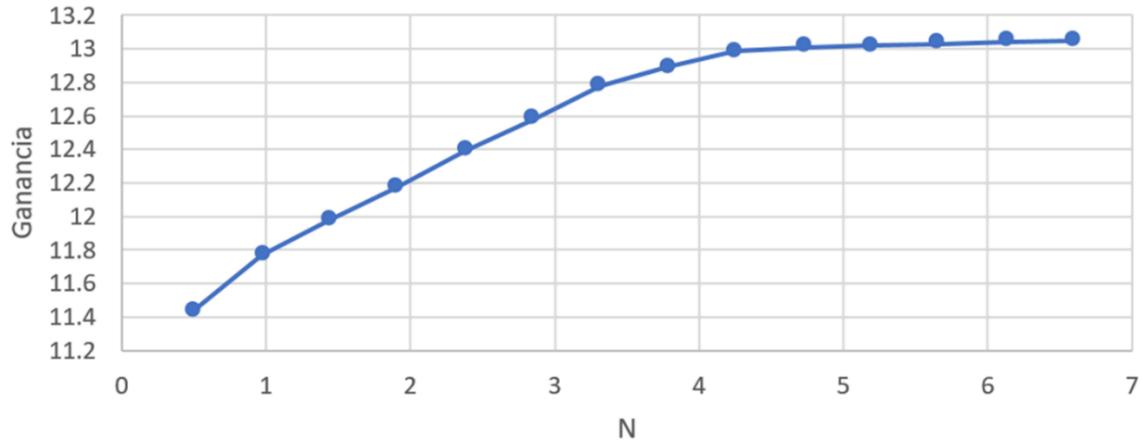


Figura 3.37 Representación gráfica de la relación que existe entre la ganancia y N

En la Figura 3.38 se muestra una gráfica en donde se puede observar como la el coeficiente de reflexión no cambia a partir de N=5, que el ancho de banda es el mismo sin importar la dimensión del plano de tierra y solo afecta la resonancia.

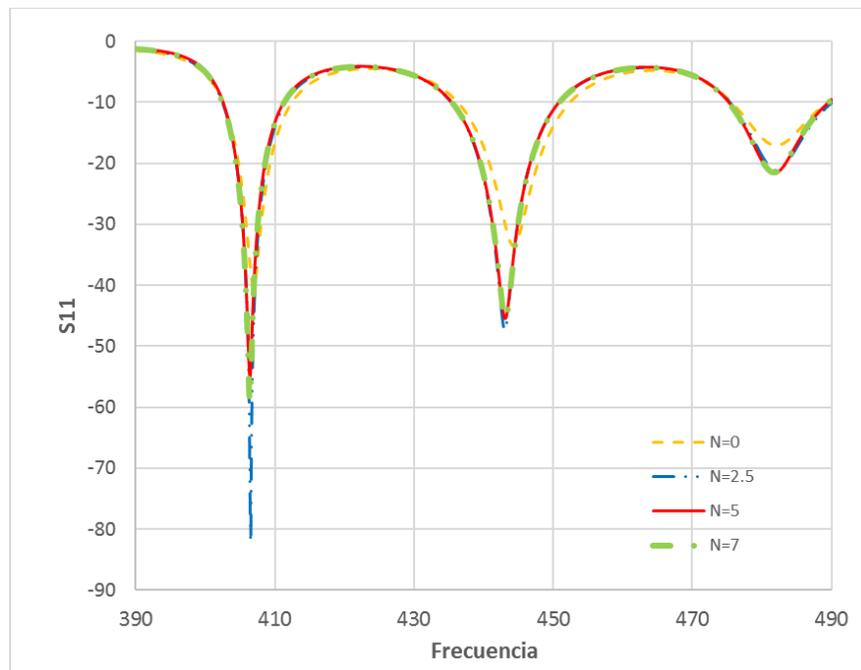


Figura 3.38 Análisis de S11 con respecto a las dimensiones del plano de tierra



Análisis paramétrico del grosor del conductor

En esta optimización se propone analizar el comportamiento de la antena, modificando las dimensiones del radio del conductor r_c de la estructura, para esto se propone utilizar una contante de redimensionamiento $Nr = 1...1.5$ la cual multiplica el radio actual de la antena el cual es de 0.362 cm, en la Figura 3.39 se muestra una representación gráfica de esta propuesta.

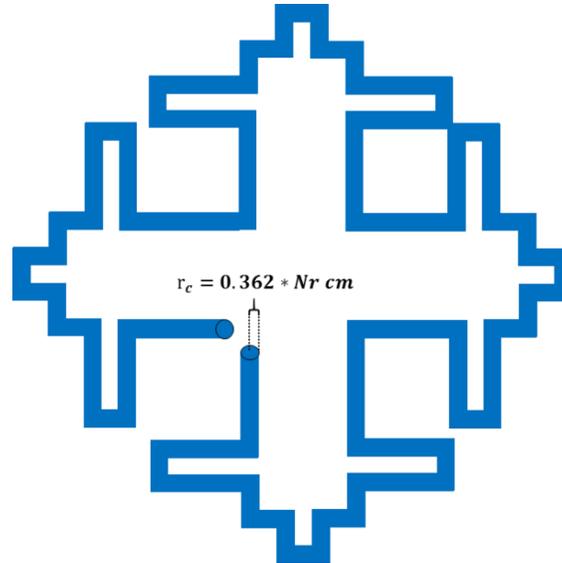


Figura 3.39 Diagrama para el análisis del grosor del conductor de la estructura Cuasi-Fractal

La Tabla 3.8 Muestra los datos de modelado utilizados para realizar la simulación en el software CST Suit Studio, donde constante Nr tiene un intervalo de entre 0.5 y 1.5.

Tabla 3.8 Datos de modelado para el análisis del grosor del conductor

Frecuencia de Operación	Radio del conductor r_c	Longitud de onda λ_0	Tamaño de la estructura	Separación del plano de tierra (S)	Tamaño del plano de tierra
434 MHz	$0.362 * Nr \text{ cm}$	69.12 cm	66.84 cm x 66.84 cm	$\lambda/8 \text{ cm}$	105 cm x 105 cm
Material de Modelado				PEC	



En la Figura 3.40 se muestra el coeficiente de reflexión del análisis del paramétrico del grosor del conductor de la estructura desde $Nr = 0.5$ hasta $Nr = 1.5$ y se puede observar que el mejor acoplamiento se encuentra cuando $Nr = 1$, además de que el acoplamiento disminuye en cualquier otro valor de Nr pero cuando Nr disminuye, el acoplamiento se recorre a la izquierda, pero si Nr aumenta, el acoplamiento de la antena se recorre a la derecha.

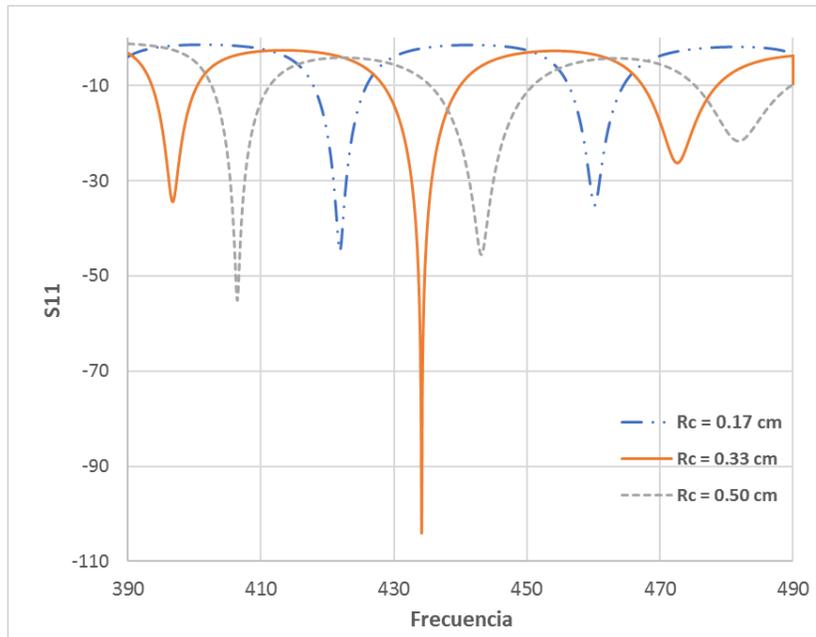


Figura 3.40 Coeficiente de reflexión del análisis paramétrico de $Nr = 0.5$ ($R_c = 0.17$ cm) hasta $Nr = 1.5$ ($R_c = 0.5$ cm)

También en la Figura 3.41 se muestra el comportamiento del diagrama de radiación de la antena cuando cambia el grosor del conductor, en este diagrama se observa la ganancia de la antena no se afectada demasiado por este análisis, aunque se observa que si el grosor aumenta, la ganancia también, pero que si el grosor disminuye, la ganancia también disminuye, estas diferencias en ganancia son pequeñas y se pueden observar mejor en la Tabla 3.9.

Con base a los resultados de la Tabla 3.9 se intuye que el mejor comportamiento de la ganancia de la antena y su acoplamiento, se encuentran cuando el radio del conductor r_c de la antena es igual a 0.00476λ .

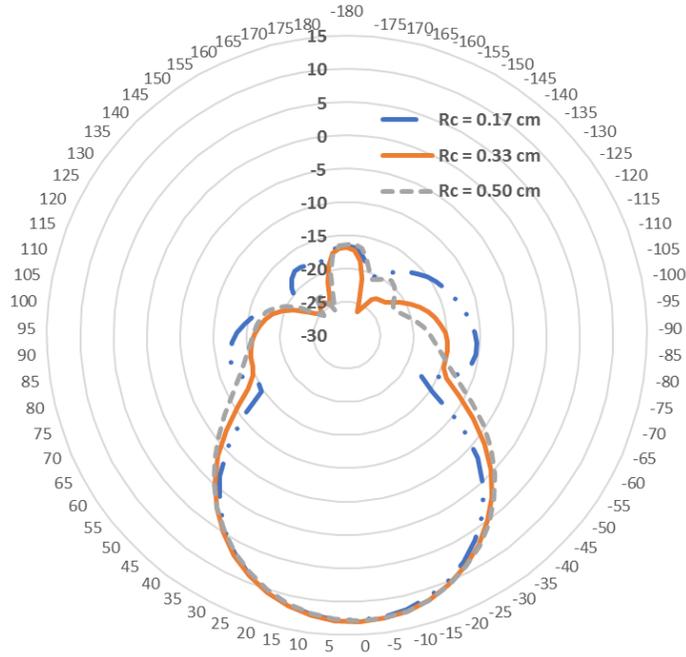


Figura 3.41 Diagrama de radiación resultante del análisis de Nr

Tabla 3.9 Comparación de resultados del análisis paramétrico del grosor del conductor

Frecuencia de Operación	$Nr = 0.5$	$Nr = 0.75$	$Nr = 1$	$Nr = 1.25$	$Nr = 0.5$
Frecuencia	434 MHz	434 MHz	434 MHz	434 MHz	434 MHz
Ganancia	12.87 dB	13.07 dB	13.05 dB	13 dB	12.93 dB
S11	-22.18 dB	-28.77 dB	-52 dB	-27.73 dB	-22.49 dB

Dimensiones finales de la estructura Cuasi-Fractal

Con base al análisis y las optimizaciones realizadas con anterioridad tomando y cuenta la constante de redimensionamiento K se obtuvieron las dimensiones ideales de la estructura cuasi-fractal en función de λ , las cuales se muestran en la Figura 3.42, además de que el radio ideal del grosor del conductor para la estructura Cuasi-Fractal debe ser de 0.0476λ , tal y como se muestra en la Figura 3.43.

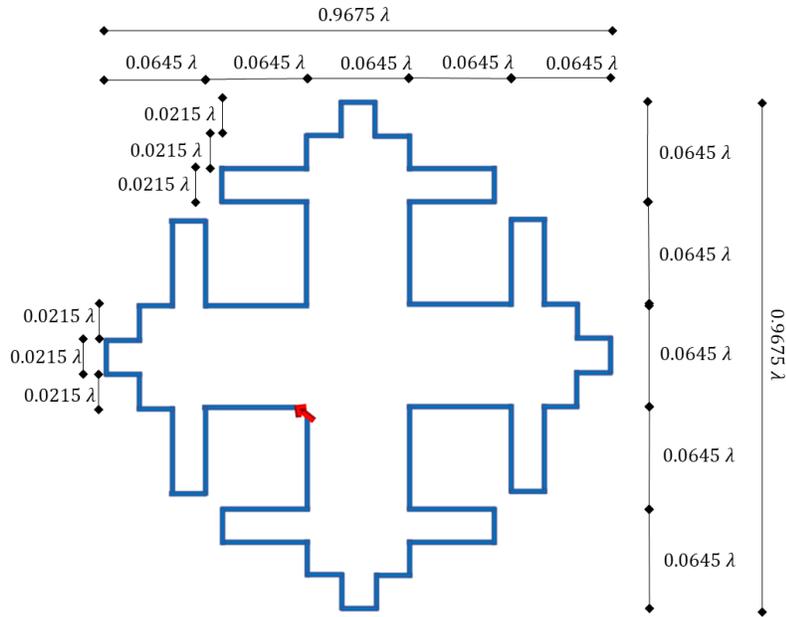


Figura 3.42 Dimensiones ideales de la estructura Cuasi-Fractal en función de λ

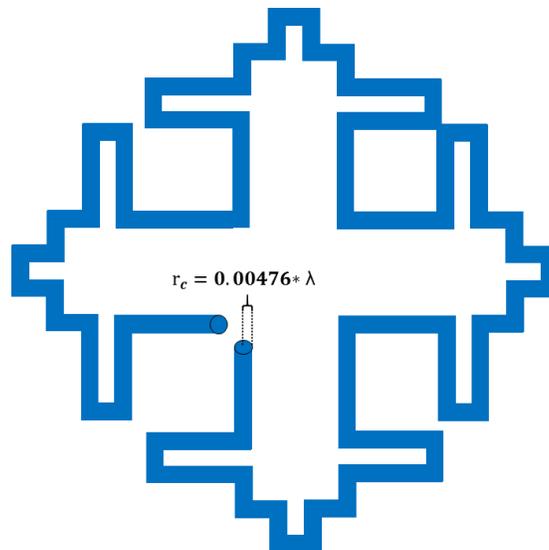


Figura 3.43 Radio ideal del conductor de la estructura Cuasi-Fractal

También se conoce que las dimensiones ideales del plano de tierra deben ser $\geq 1.53 \lambda$ para tener una ganancia y directividad óptima, por lo que en la Figura 3.44 se muestra que la estructura Cuasi-Fractal tiene unas dimensiones de $0.9675 \lambda \times 0.9675 \lambda$ mientras que en la Figura 3.45 se muestra que la separación óptima que existe entre el plano de tierra y la estructura Cuasi-Fractal debe ser de 0.056λ .

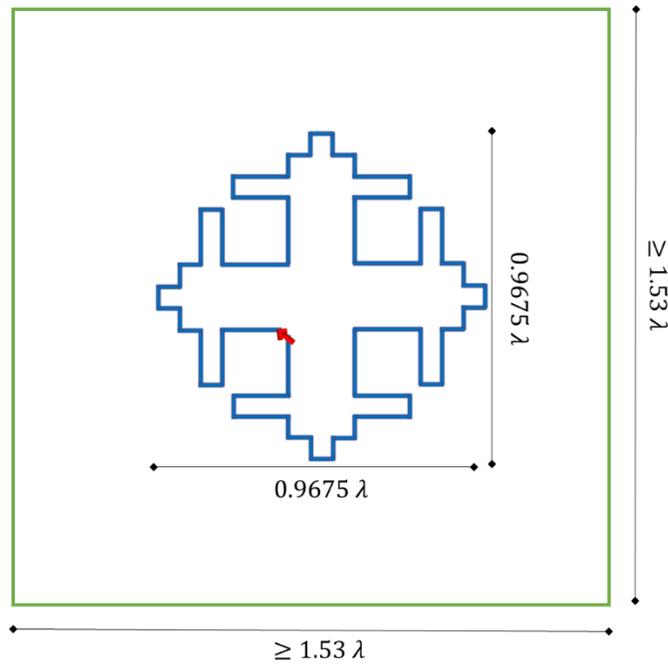


Figura 3.44 Dimensiones Generales en función de λ de la estructura Cuasi-Fractal y el plano de tierra

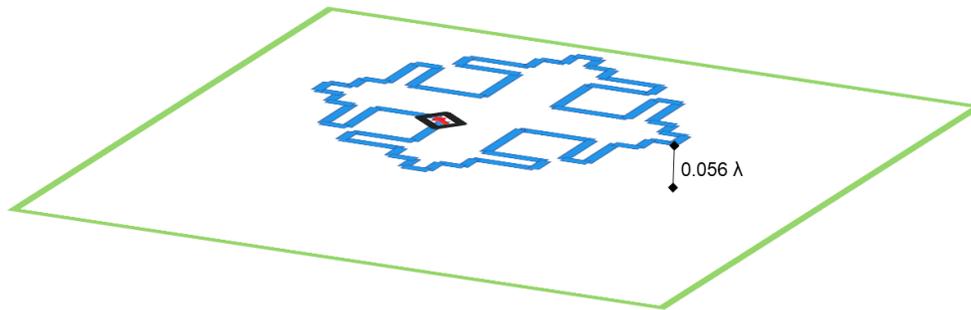


Figura 3.45 Separación del plano de tierra con respecto a la estructura Cuasi-Fractal en función de λ .

Diseño y Modelado final de la estructura Cuasi-Fractal en UHF

Conociendo las dimensiones ideales de la estructura cuasi-fractal, se realiza el modelado de la estructura en la herramienta computacional CST Microwave Suit Studio, por lo que los datos utilizados para la simulación se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Datos de simulación y modelado para la antena Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Frecuencia de Operación	Radio del conductor r_c	Longitud de onda λ_0	Tamaño de la estructura	Separación del plano de tierra (S)	Tamaño del plano de tierra
-------------------------	---------------------------	------------------------------	-------------------------	------------------------------------	----------------------------



434 MHz	0.362 cm	69.12 cm	66.84 cm x 66.84 cm	N/18 8.64 cm	105 cm x 105 cm
Material del Modelado				Cobre	

Con base a los datos de simulación de la Tabla 3.10 se obtuvieron las dimensiones generales de la estructura cuasi-fractal, la cuales se muestran en la Figura 3.46.

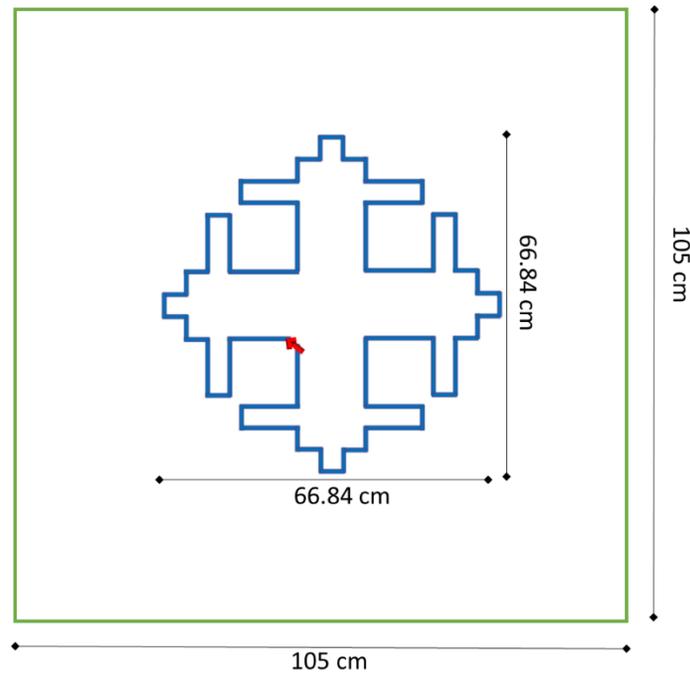


Figura 3.46 Dimensiones Generales de la Estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Una vez realizada la simulación con las dimensiones ideales de la estructura Cuasi-Fractal se obtuvo un acoplamiento de -52.62 dB en la Frecuencia de 434 MHz y un ancho de banda de 5.97 MHz, estos resultados se pueden observar en la Figura 3.47.

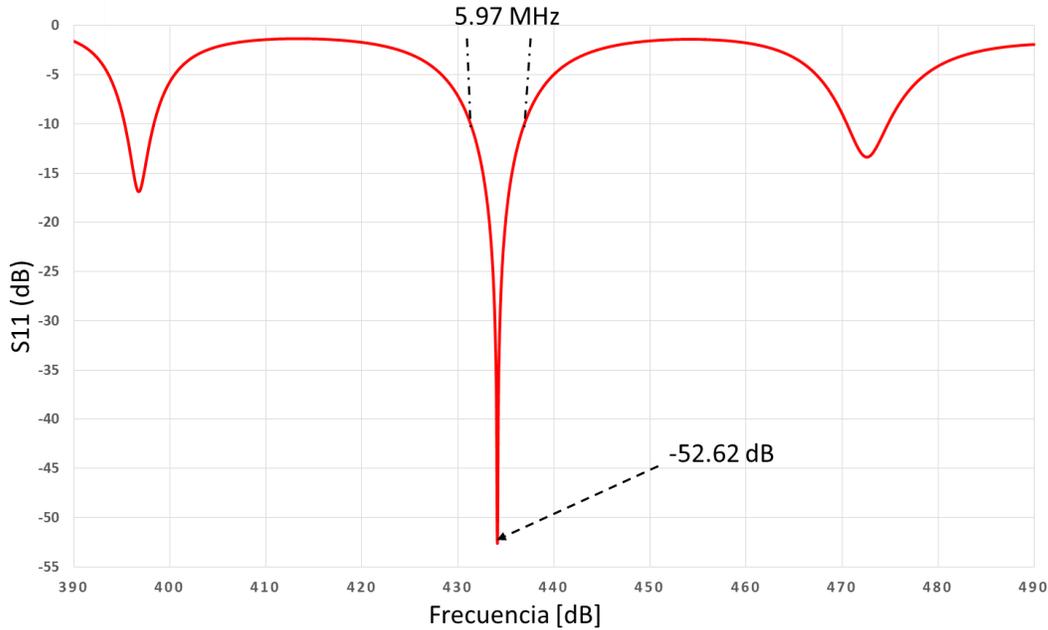


Figura 3.47 Parámetros S11 de la estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

Además se observa que se tiene un diagrama de radiación directivo capaz de otorgar 13 dB de ganancia, tal y como se observa en la Figura 3.48, por otro lado la Figura 3.49 muestra que el diagrama de radiación del corte phi y azimut, son idénticos con un ancho de haz de 45° en el lóbulo principal, por lo que al realizar la normalización del diagrama de radiación del plano phi y del plano azimut mostrados en la Figura 3.50, se observa que su relación axial es menor a uno en el intervalo de -70 y 70 grados del diagrama de radiación, por lo que el haz principal de la estructura al encontrarse dentro de este intervalo, se comprueba que la antena es de polarización circular.

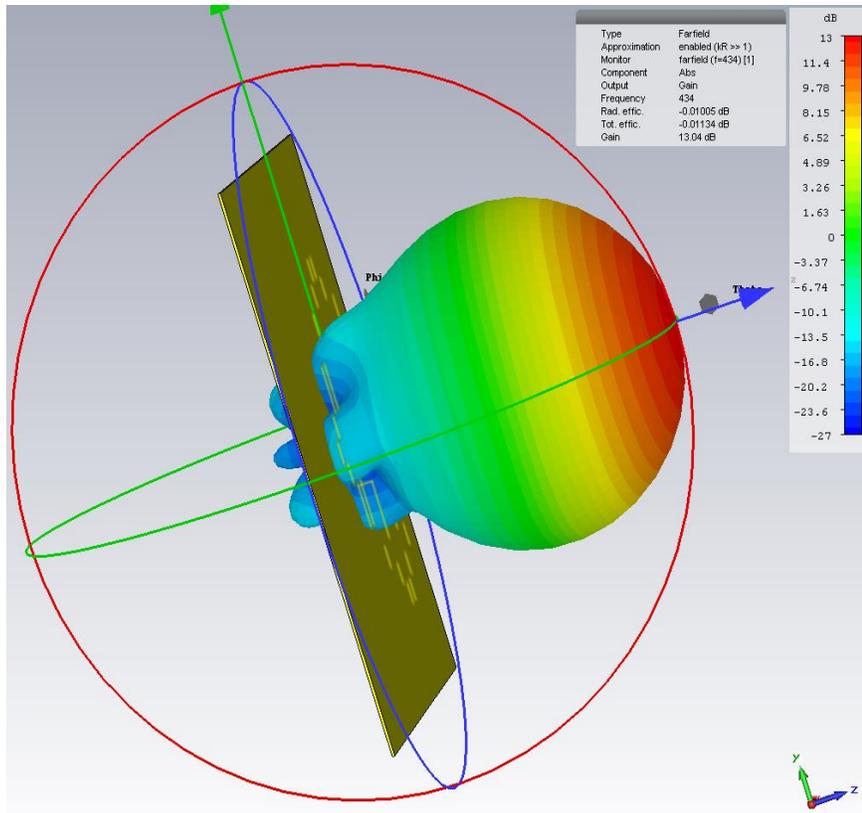


Figura 3.48 Diagrama de radiación en 3D de la estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

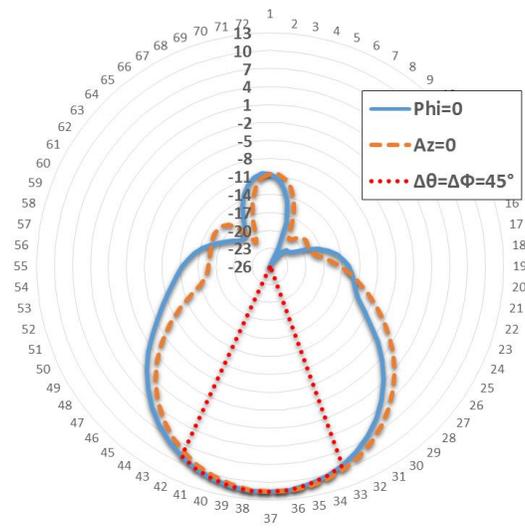


Figura 3.49 Diagrama de radiación en polar en corte Phi y Azimut de la estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz

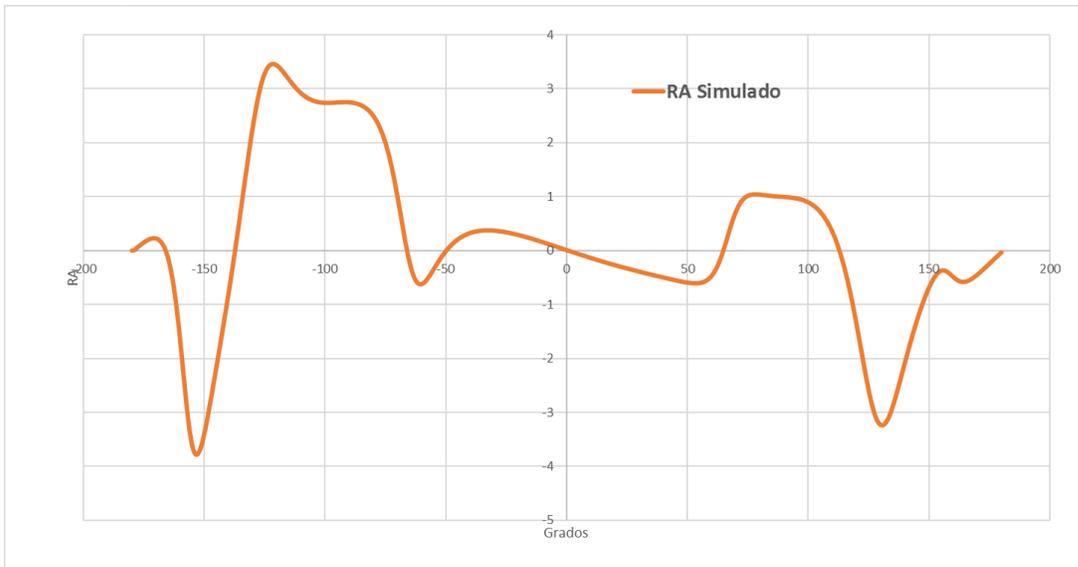


Figura 3.50 Relación axial del diagrama de radiación del corte Phi y Azimut normalizadas de la estructura Cuasi-Fractal, diseñada a 434 MHz



Capítulo 4 Fabricación y Caracterización

Introducción

En este capítulo se muestra el proceso de fabricación de la antena, así como el proceso de caracterización de los resultados obtenidos mediante las mediciones hechas en la cámara anecoica del Laboratorio Nacional en Telecomunicaciones y Antenas (LaNTA), perteneciente a el Instituto Politécnico Nacional, así mismo son mostrados, analizados y comparados con los resultados de simulación finales obtenidos previamente en el Capítulo 3.

En el proceso de fabricación se busca reproducir las dimensiones generales de acuerdo a las dimensiones ideales calculadas para trabajar en UHF, buscando utilizar el material pertinente que sea lo más ligero posible ya que al ser una antena de dimensiones grandes es necesario que esta cumpla el objetivo de ser una antena ligera en comparación a otras de actual uso.

Fabricación

El proceso de fabricación de la estructura cuasi-fractal, consiste en elegir y adquirir el material que se utilizara para su construcción, seguido del proceso de doblado del alambre, el proceso de construcción del plano de tierra y finalmente en la colocación de un conector como puerto de alimentación de la antena.

En general la fabricación de la estructura de una antena de alambre de este tipo es económica y de peso ligero, por lo que la mayor parte del peso recae en su plano de tierra, por tal motivo la selección del plano de tierra fue un punto importante en este proceso.

Material y Equipo de fabricación

El material y equipo utilizado en la construcción de la estructura cuasi-fractal se muestra en forma de lista en la Tabla 4.1, es necesario aclarar que para evitar colocar una placa metálica como plano de tierra y minimizar el peso de la antena, se propone utilizar una lámina perfora de aluminio, y con base a la teoría [1] las perforaciones deben ser menores a $\lambda/10$ de la frecuencia de operación.



Tabla 4.1 Material y equipo utilizados en la fabricación

Material:	Equipo
Una hoja tamaño A0 (84.1cm x 118.9 cm)	Plotter
Tabla de madera (70 cm x 70 cm)	Regla de 30 cm
Clavos de 3/2"	Martillo
Remaches de aluminio de (D=1/8", L= 0.625")	Pinzas para cortar
½ Kg de Alambre magneto calibre 8	Varilla Metálica
4 ángulos de aluminio de 105 cm (5/4" x 5/4")	Pinzas de electricista
2 solera de 149 cm de 5/4"	Taladro
1 lamina perforada de aluminio de 90 cm x 240 cm	Brocas de 1/8"
1 placa (FR4) de cobre de doble vista de 20 cm x 20 cm	Brocas de 45/64"
Tubo de soldadura 50/50	Cautín tipo lápiz
Laminillas de cobre (Padecería)	Tijeras
Conector tipo N Hembra	Cutter
lápiz adhesivo	Broca para devastar
Cinta adhesiva	Remachadora
	Guantes de protección

También es necesario mencionar que el puerto de alimentación es un conector de montaje en panel serie N de 50 ohmios, capaz de trabajar en frecuencias 0 Hz hasta 11GHz, con una terminación de cuerpo de latón chapado y contacto central chapado en plata. Este conector hembra de montaje en panel serie N de 50 Ω tiene un borde cuadrado de 25 x 40 mm con orificios de montaje de 4 x 3.2 mm y se puede montar en la parte posterior o de plano de tierra.



Figura 4.1 Conector hembra tipo N

En la Figura 4.1 se muestra el conector hembra tipo N que se utiliza como puerto de alimentación de la antena mientras que en la Tabla 4.2 se muestran sus características.

Tabla 4.2 Características del conector tipo N

Conector hembra tipo N	
impedancia	50 Ω
Tensión pico	1.000 V
Cuerpo	Latón, chapado en plata
Contacto hembra	Cobre-berilio
Contacto macho	Latón

Elaboración de la estructura de alambre de acuerdo al diseño y dimensiones de la estructura Cuasi-Fractal

Para iniciar el proceso de fabricación de la estructura, y evitar realizar el diseño de la estructura cuasi-fractal de forma manual y minimizar errores en sus dimensiones, se utiliza la opción de exportar archivo 2D que se encuentra en la pestaña de modelado en la herramienta computacional CST Microwave Suit Studio para obtener un archivo *.DFX el cual tiene las dimensiones exactas de la estructura. El archivo *.DFX, se imprime mediante un plotter en una hoja de tamaño A0.

Posteriormente a imprimir la estructura en la Hoja A0, se comprueban las dimensiones de cada brazo utilizando una regla de 30 cm, después de comprobar estas dimensiones, la hoja A0 se pega utilizando el lápiz adhesivo en una tabla de madera de 70 cm x 70 cm, buscando que el diseño de la estructura quede en el



centro de la tabla, más tarde se procede a recortar los excedentes de la hojas que no tienen el diseño de la estructura, con un cutter y tijeras, a continuación se coloca cinta adhesiva en algunos puntos del perímetro de la hojas para reforzar su adhesión a la tabla, este proceso se puede observar en Figura 4.2 .



Figura 4.2 Hoja A0 con el diseño de la estructura Cuasi-Fractal, pegada en la tabla de 70 cm x 70 cm

En la Figura 4.3 se observa que utilizando el martillo se clavaron los clavos de 3/2" en cada una de las esquinas internas y utilizando el taladro y la broca de 1/8" se realizan perforaciones en los extremos donde se coloca el puerto de alimentación.

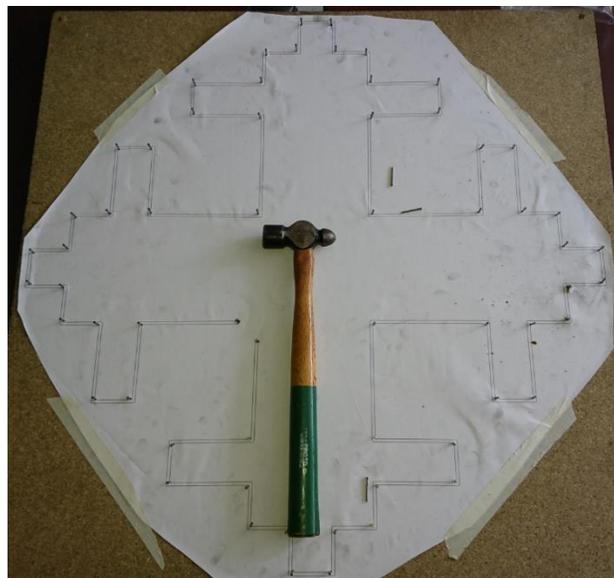


Figura 4.3 Clavos en cada esquina interna del diseño de la estructura



Una de las perforaciones que se realizaron se utiliza, para insertar un extremo del alambre magneto dejando una extensión de 15 cm atravesados en la tabla, una vez realizado la inserción del alambre, se busca que el alambre restante siga el contorno del diseño de la estructura, por lo que se utilizan los clavos como polea para realizar los dobles de cada esquina, además de utilizar una varilla metálica para corregir cada doblez y más clavos para estabilizar la posición del alambre de cada doblez(Figura 4.4).

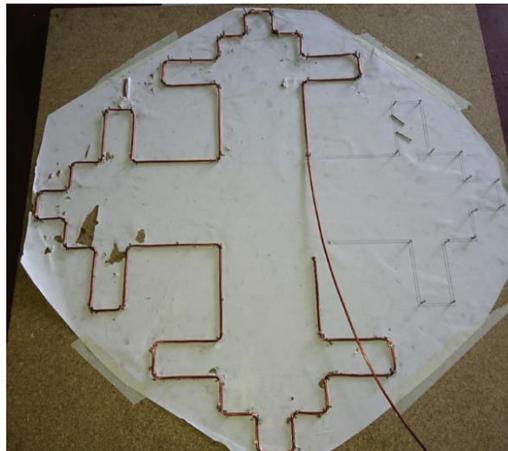


Figura 4.4 Doble del alambre en el perímetro del diseño de la estructura

Al terminar el proceso de doblado, se atraviesa 15 cm del alambre en la otra perforación de la tabla y se corta el excedente del alambre, el resultado final de este proceso, así como la materia utilizada se muestra en la Figura 4.5.

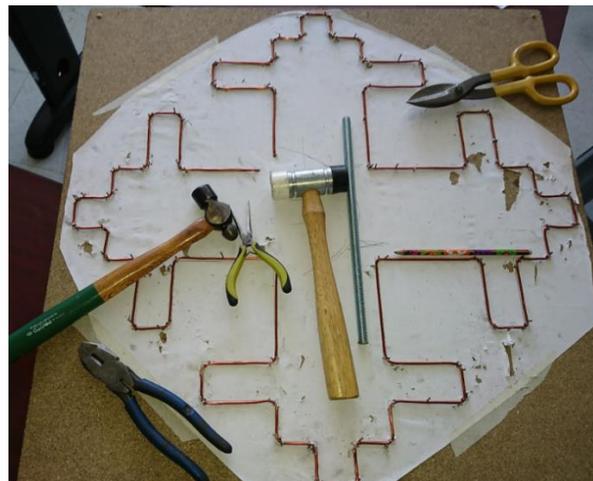


Figura 4.5 Proceso de doblado terminado y material utilizado en el proceso



Una vez completado el proceso de doblado del alambre, es necesario quitar los clavos e ir colocando cinta adhesiva sobre el alambre para que se mantenga pegado a la tabla, para más tarde colocar el diseño boca abajo y con un contrapeso sobre la tabla por algunos días, para prevenir y corregir posibles malformaciones y así después retirar la estructura de alambre de la tabla de madera.

Después de tener la estructura de alambre, se realiza el proceso de fabricación del plano de tierra

Elaboración del plano de tierra de la a estructura Cuasi-Fractal

Utilizando los cuatro ángulos de aluminio, el taladro con una broca de 1/8", la remachadora y remaches de aluminio, se realiza un marco de una dimensión de 105 cm x 105 cm, tal y como se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6 Marco de ángulos de aluminio de 105 cm x 105cm

Posteriormente, utilizando el taladro, y la remachadora se colocan las soleras de aluminio en forma diagonal, para reforzar la estructura cuadrada, en seguida, usando las tijeras para cortar laminas y los guantes de protección, se recorta la lámina de aluminio perforado para después utilizar el taladro y la remachadora para colocar la lámina de aluminio lo más estirada posible y de forma que cubra el marco de ángulos, el resultado de este proceso se puede mostrar en la Figura 4.7.

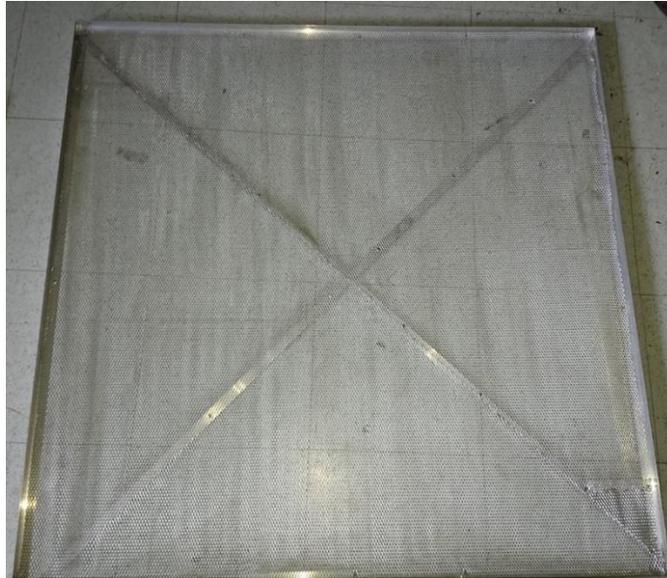


Figura 4.7 Plano de tierra de la estructura Cuasi-Fractal

Colocación del puerto de alimentación y montaje de la estructura de alambre y el plano de tierra

Como se describe en este capítulo, la estructura de alambre está hecha de cobre y el plano de tierra está hecho de aluminio, pero para realizar el montaje entre el plano de tierra, la estructura de alambre y el puerto de alimentación, se opta por utilizar una placa de cobre de doble vista de RF4 que se conecte de forma mecánica a el plano de aluminio para que permita soldar la estructura de alambre y el puerto de alimentación, además de que al colocar la placa de RF4 en el centro del plano de tierra, proporciona una mayor estabilidad a la estructura, cabe mencionar que no es de importancia el tipo de sustrato de la placa de cobre, y para este caso se seleccionó la más barata del mercado.

Para minimizar problemas de capacitancias parasitas de la placa de cobre, se unen las dos caras de la placa de aluminio, utilizando las láminas de cobre, así como del cautín y soldadura, Figura 4.8



Figura 4.8 Unión de las 2 Caras de la placa de cobre

Una vez terminada la placa de cobre y usando el taladro así como la remachadora, se coloca la placa de cobre en la parte central del plano de tierra entre las soleras y la lámina de aluminio perforado, después se procede a realizar las perforaciones en la placa de cobre utilizando la broca de 45/64" para colocar el conector y la de 1/8" para atornillar conector, posteriormente se coloca la estructura de alambre sobre el plano de tierra manteniendo una separación de 3.84 cm por lo que se corta el alambre excedente de cada extremo de la estructura de alambre y se utiliza el cautín para soldar uno de los extremos en el puerto de alimentación y el otro en la placa de cobre, además se utilizaron piezas huecas de plástico en los extremos de cada brazo para mejorar la estabilidad de la estructura y mantener la separación del plano de tierra, en la Figura 4.9 y Figura 4.10 se muestra la vista frontal y lateral de la antena terminada.

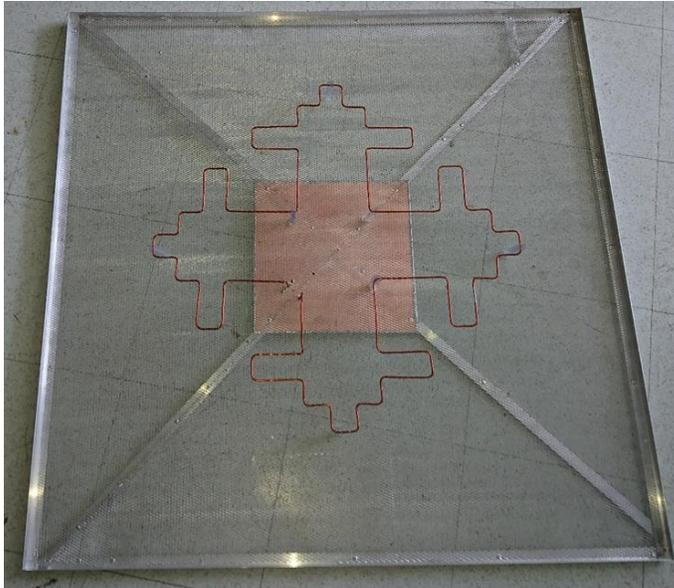


Figura 4.9 Antena Cuasi-Fractal vista frontal



Figura 4.10 Antena Cuasi-Fractal vista lateral

Caracterización de la antena Cuasi-Fractal

Las mediciones del coeficiente de reflexión de las antenas, dieron como resultado, que existían 3 acoplamiento cercanos a la frecuencia diseñada.

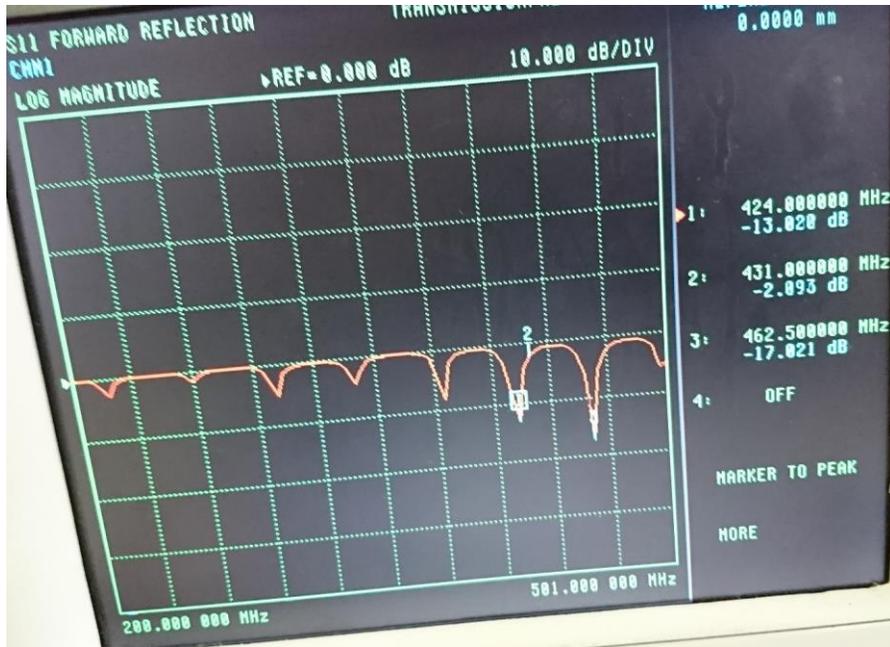


Figura 4.11 Medición del Coeficiente de reflexión

Conociendo estos tres puntos de acoplamiento, se procedió a realizar la caracterización del diagrama de radiación, que se realizó en la cámara anecoica del LaNTA del IPN y utilizando la ecuación de transmisión de Friis se realizó el cálculo de ganancia de antena para lo que se utilizó la antena Cuasi-Fractal como antena transmisora y como antena receptora una antena Logarítmica de 6.34 dB de ganancia de banda ancha calibrada en el CENAM, la cual abarca la frecuencia de operación de la antena Cuasi-Fractal.

Cabe mencionar que, al realizar la medición del diagrama de radiación, se encontró que el acoplamiento existente en la frecuencia de operación de 424 MHz se tenía los resultados con mayor semejanza en el diagrama de radiación a los simulados en la frecuencia de operación de 434 MHz. Por lo que a continuación, se muestra el proceso de medición del diagrama de radiación en la frecuencia de 424 MHz.

En la Figura 4.13 se muestra la antena de referencia utilizada como receptora en esta medición, mientras que en la Tabla 4.3 se muestran los datos de la antena necesarios para realizar el cálculo de ganancia.



Tabla 4.3 Datos de la antena Logarítmica

Antena Logarítmica	
Frecuencia de operación	424 MHz
Ganancia	6.34 dB

Como se había mencionado, las mediciones del diagrama de radiación se realizaron en una cámara anecoica, en la Figura 4.12 se puede observar cómo se realizó el montaje de la antena en el mástil de la cámara.

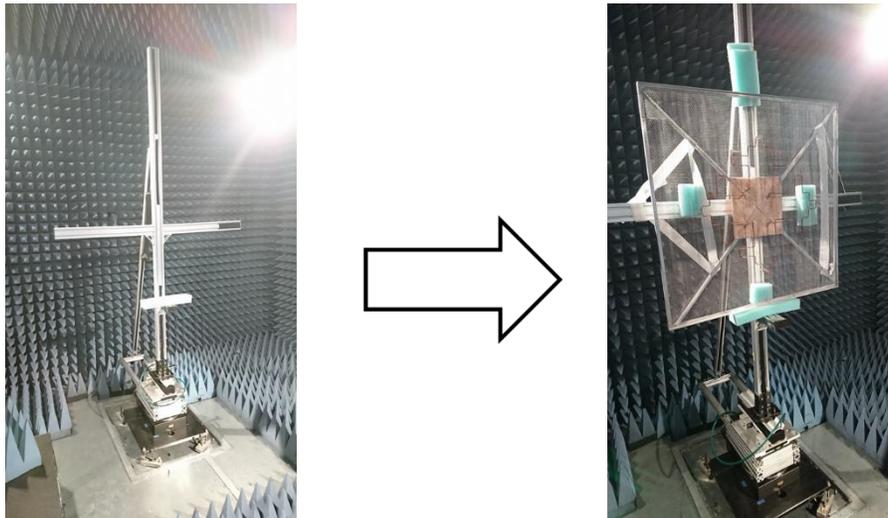


Figura 4.12 Montaje de la antena Cuasi-Fractal en el mástil de la cámara anecoica

El mástil donde fue colocada la antena se encuentra sobre una tornamesa, la cual gira 365° , más tarde se realizó el montaje de la antena logarítmica en el otro mástil de la cámara anecoica, a diferencia del otro, este mástil hace un barrido horizontal.



Figura 4.13 Montaje de la antena logarítmica en el mástil de la cámara anecoica.

Una vez realizado el montaje de ambas antenas su mástil correspondiente, se procede a realizar dos mediciones, una con la antena logarítmica colocada de forma horizontal y otra con la antena colocada en vertical, con el fin de conocer el comportamiento del diagrama de radiación de la estructura cuasi-fractal, en su plano ϕ y su plano azimut, para poder hacer el análisis de la relación axial en la Figura 4.14 se observa cómo se fue la colocación de la antena antes de iniciar el proceso de mediación para cada plano.

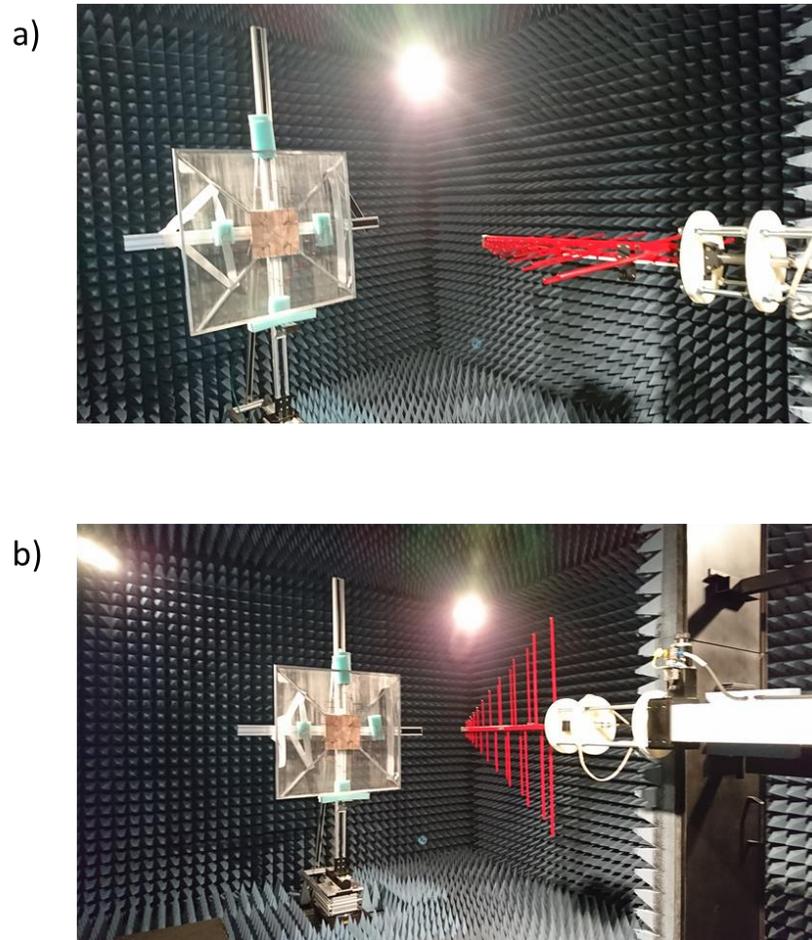


Figura 4.14 Colocación de la antena para realizar la medición del a) Plano Phi y el b) Plano Azimut del diagrama de radiación.

Tabla 4.4 Datos de medición de la antena transmisora Tx y receptora Rx

	Antena Transmisora Tx Cuasi-Fractal	Antena Receptora ¡Error! Marcador no definido. Rx Logarítmica
Frecuencia de medición	0.424 GHz	0.424 GHz
Longitud de Onda λ	0.7075 m	
Distancia entre la antena receptora Rx y transmisora Tx	2.1 m	
Perdidas en espacio libre L_{dB}	-31.43 dB	
Potencia de Transmisión P_R		-20 dBm
Ganancia de la antena Transmisora G_R		6.3336 dB

En la



Tabla
4.4 se

	Antena Transmisora Tx Cuasi-Fractal	Antena Receptora ¡Error! Marcador no definido. Rx Logarítmica
Frecuencia de medición	0.424 GHz	0.424 GHz
Longitud de Onda λ	0.7075 m	
Distancia entre la antena receptora Rx y transmisora Tx	2.1 m	
Perdidas en espacio libre L_{dB}	-31.43 dB	
Potencia de Transmisión P_R		-20 dBm
Ganancia de la antena Transmisora G_R		6.3336 dB

muestran los datos de la antena transmisora Tx y la antena receptora Rx obtenidos necesarios para el cálculo de ganancia utilizando la ecuación de Friss en la cámara anecoica del LaNTA. Una vez terminado el proceso de medición de cada plano, se obtuvieron los radiogramas de radiación de cada plano, presentando un diagrama de radiación directivo, luego se procesaron los datos obtenidos presentaron con una ganancia de 15 dB.

En la Figura 4.15 se muestran los diagramas de radiación en polar de la antena medida, en plano azimut y plano phi, se puede observar que los diagramas de ambos cortes, son muy similares con un ancho de haz de 44° y solo presenta una desviación de 1° .

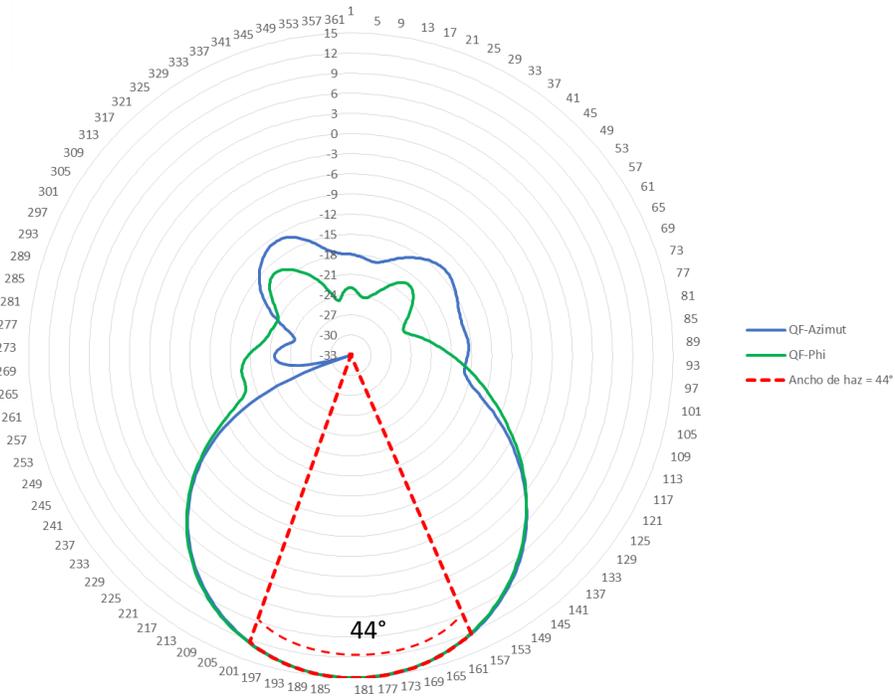


Figura 4.15 Diagrama de radiación medida del plano Phi y Azimet

Con estos valores es posible conocer la relación axial existente entre el plano azimet y phi, en Figura 4.16 se observa que la relación axial de la antena es aproximadamente igual a 0 dB, por lo que se deduce que presenta una polarización circular en el centro del haz principal y una polarización elíptica en los otros puntos del haz.

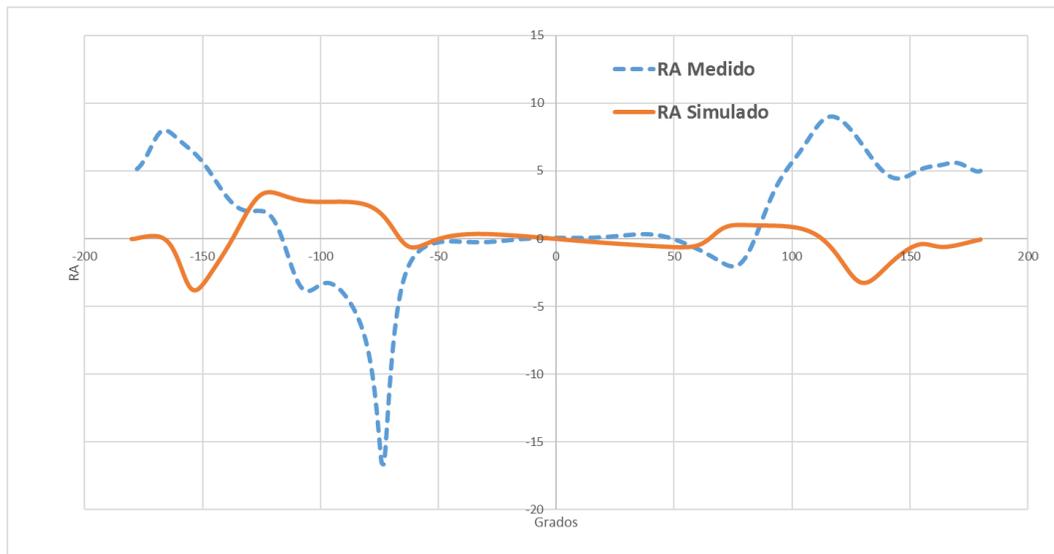


Figura 4.16 Relación axial y diagramas de radiación normalizados del plano Azimut y Phi.

Tal y como se observa en la Figura 4.11, el punto de acoplamiento con el funcionamiento óptimo de la antena se encuentra desplazada aproximadamente 10 MHz a la izquierda de la frecuencia calculada, y este resultado es muy similar a uno obtenido en el “Análisis paramétrico del grosor del conductor” del Capítulo 3, en el cual se realiza el análisis del grosor del conductor y se observa que el comportamiento del coeficiente de radiación es muy similar, cuando el grosor del radio del conductor es de 1.63 mm, inmediatamente se realizó la medición del radio del conductor, en el que efectivamente tenía la medida de 1.63 mm, por lo que a ese corrimiento de frecuencia se le atribuye a que el radio del conductor es menor al calculado a las dimensiones ideales.

Conociendo que el error se debe a que el grosor del conductor es más delgado, se propone buscar un alambre más grueso, (para ser más exactos de calibre 4), para fabricar la estructura con las dimensiones ideales, pero lamentablemente no fue posible conseguir el alambre de ese grosor.

Por lo que para comprobar que el análisis realizado de la estructura, con los que se obtuvieron las dimensiones ideales de la antena son correctos, se propone realizar



la comparación de los resultados medidos, con los valores de simulación cuando el radio del conductor es de 1.63 mm .

Comparación de resultados entre simulación y caracterización

Como se mencionó anteriormente, para comprobar que las ecuaciones de diseño de la estructura son correctas, se propone mantener las dimensiones generales de la estructura y solo se modifica el radio del conductor como $r_c = 1.63 \text{ mm}$ y de esta manera se toma en cuenta el desplazamiento de la frecuencia de operación y se comprueba el comportamiento de la estructura de acuerdo a las ecuaciones de diseño ideal, por lo que si la frecuencia de operación de diseño es de 434 MHz , al reducir el radio del conductor a 1.63 mm y con base a al análisis del Capítulo 3 la frecuencia de operación resultante será de 424 MHz .

La primera comparación que se realiza es la del coeficiente de reflexión de la antena, en la Figura 4.17, se observa que ambos coeficientes son similares, tienen la misma tendencia, pero difieren un poco en la magnitud del acoplamiento.

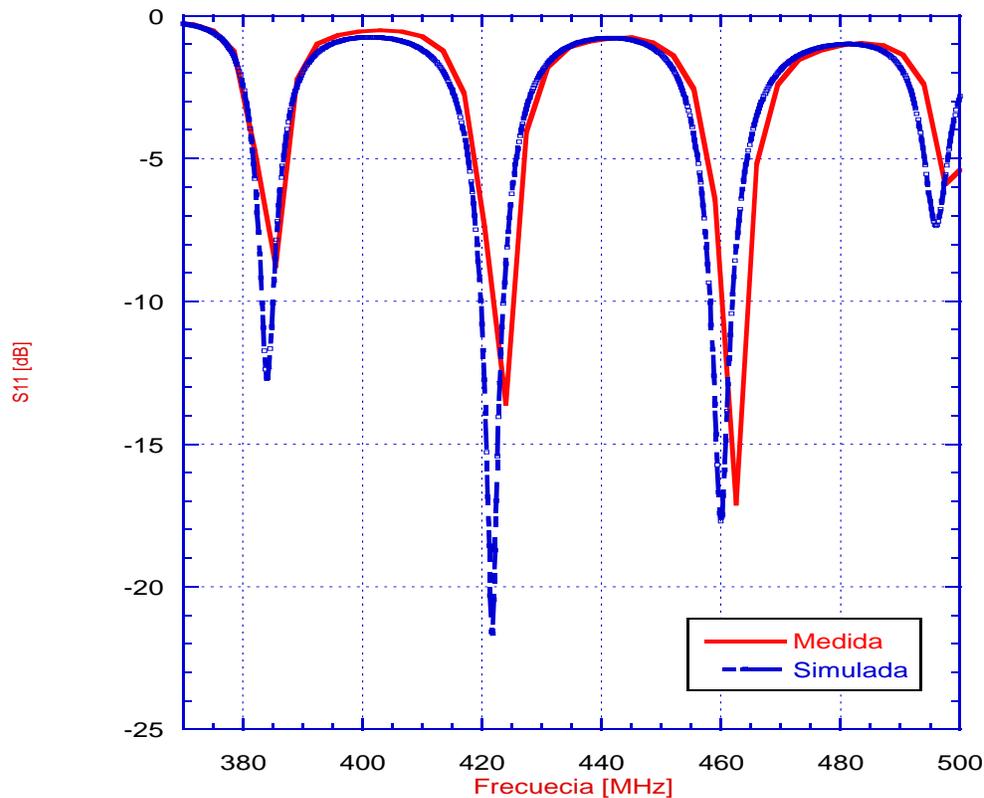


Figura 4.17 Comparación del coeficiente de reflexión medido contra el simulado



Observando la comparación del diagrama de radiación del plano azimut entre la simulación y la medición de la Figura 4.18 , se encuentra que el comportamiento de la antena, es un diagrama directivo, pero se observa que en la medición se presenta una ganancia de 15 dB con un ancho de haz de 43° mientras que en la simulación se tiene una ganancia de 13 dB con un ancho de haz de 43°.

No obstante en la comparación del diagrama de radiación del plano phi entre la simulación y la medición de la Figura 4.19, se encuentra que el comportamiento de la antena, es un diagrama directivo, pero se observa que en la medición se presenta una ganancia de 15 dB con un ancho de haz de 44° mientras que en la simulación se tiene una ganancia de 13 dB con un ancho de haz de 43°.

Con lo que se observa que el comportamiento de la simulación es similar al de la simulación a excepción de que la medición presenta una mayor ganancia.

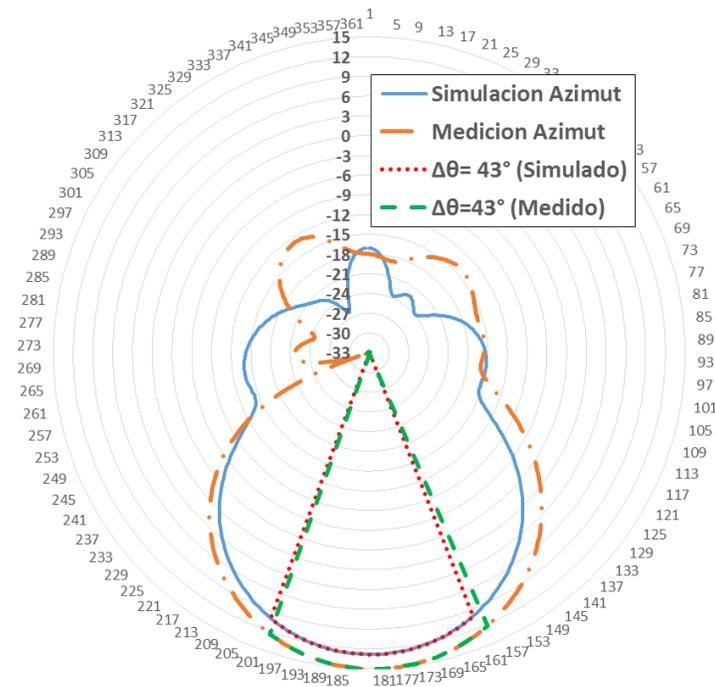


Figura 4.18 Comparación del diagrama de radiación en el plano Azimut

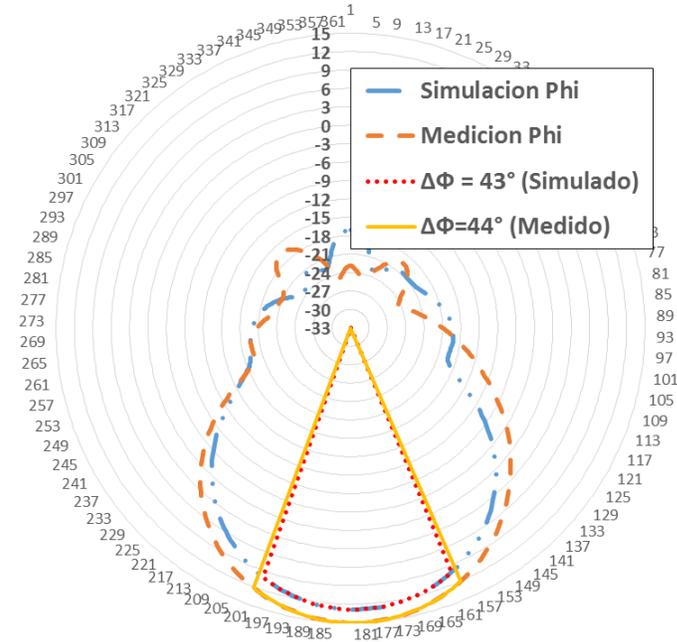


Figura 4.19 Comparación del diagrama de radiación del plano Phi

La no existe una gran diferencia en la comparación de la relación axial Figura 4.20, por lo que se puede observar que en la simulación se mantienen una RA aproximadamente de 0 dB en el intervalo de -70° a 70° al igual que para el caso de la medición.

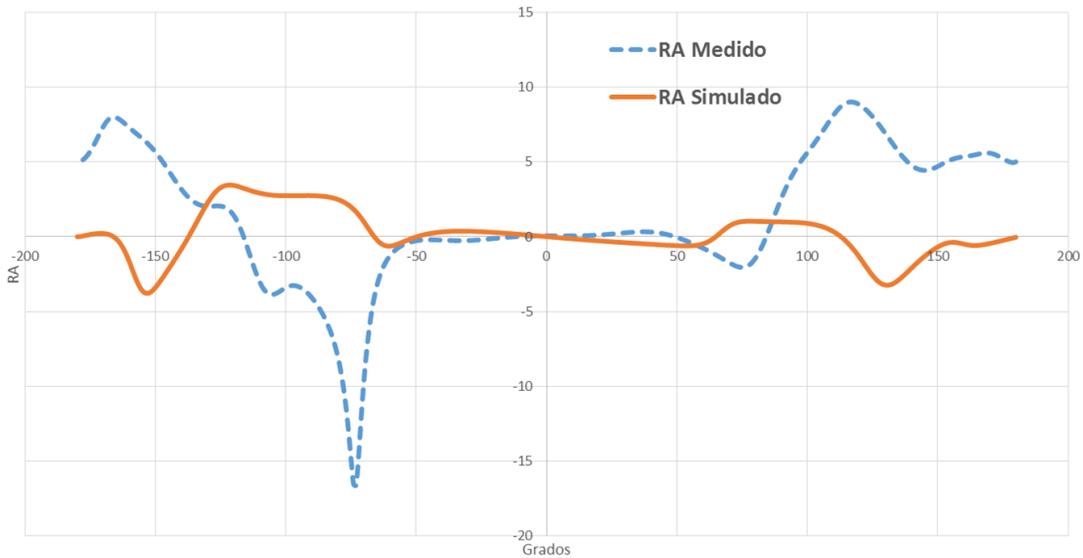


Figura 4.20 Comparación de la relación axial



Con base a las comparaciones mostradas en la Tabla 4.5 se observa que el acoplamiento de la antena real es menor a la simulada, pero tiene una mayor ganancia, aunque tiene un ancho de haz mayor y que solo en la posición directiva de mayor potencia, se tiene una polarización circular.

Tabla 4.5 Comparación de los resultados simulados y medidos

	Frecuencia de operación	Ganancia	Acoplamiento	Ancho de haz	RA
Simulación	424 MHz	13 dB	-22 dB	43°	0 dB
Medición	424 MHz	15 dB	-14 dB	44°	0 dB

Cabe mencionar que existe otro punto de acoplamiento en 462 MHz donde también se encontró un diagrama de radiación directivo, pero con una ganancia menor en 0.5 dB. Además de que con un análisis se podría medir si el diagrama directivo abarca un intervalo desde los 415 MHz hasta los 470 MHz.

Comparación de resultados entre la antena Quasi-Fractal y la antena Yagi

En la Tabla 4.6 se muestra un resumen comparativo de las características de la antena Quasi-Fractal y la antena Yagi, en donde se puede observar que la antena QF es mucho más pequeña que la antena Yagi, que ambas antenas trabajan en la banda de UHF, son de polarización circular y que son de ganancia media, además de que la antena Quasi-Fractal tiene la ventaja de ser escalable en frecuencia.

	Quasi-Fractal	Yagi
Ganancia	15 dB	11.74 dB – 16.76 dB
Banda de operación	UHF	UHF
Ancho de la antena	6 cm	30 cm
Altura de la antena	105 cm	30 cm
Longitud de la antena	105 cm	573.77 cm
Polarización	Circular	Circular
Escalable en frecuencia	Si	No

Tabla 4.6 Comparación de parámetros de la antena Quasi-Fractal y la antena Yagi

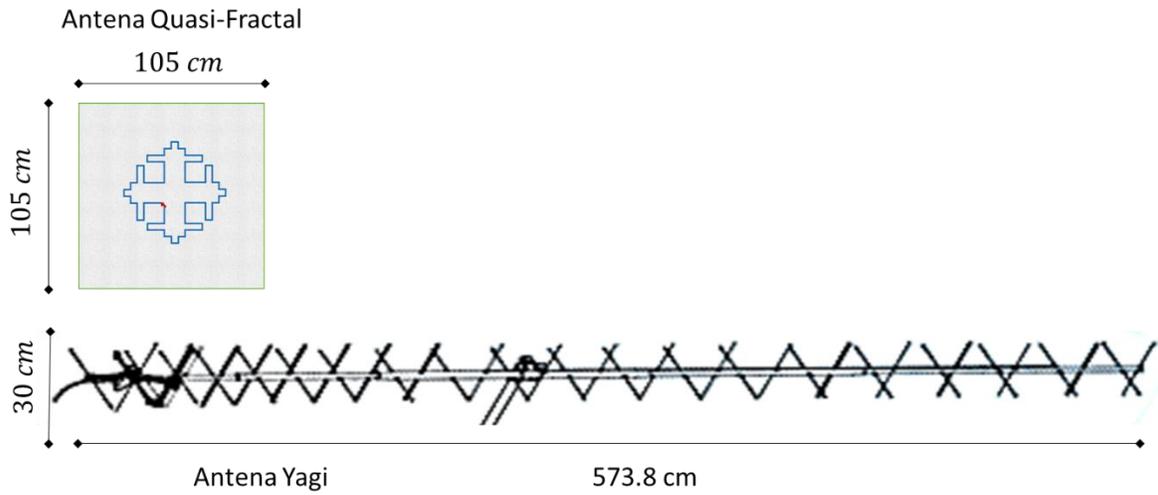


Figura 4.21 Dimensiones Quasi-Fractal vs Yagi

En la Figura 4.21 se observa que la antena Yagi utilizada en la estación terrena de ESIME-Zacatenco es aproximadamente 5.7 veces más grande que la antena Quasi-Fractal propuesta.



CONCLUSIONES

El método utilizado para el diseño de la estructura Cuasi-Fractal, proporciono una reducción de 44% de las dimensiones de la antena, por lo que el tamaño ideal de este diseño es de 66.66% el tamaño de una antena de cruz, al ser fabricada de alambre de cobre y aluminio, es muy ligera, y al tener un plano de tierra con perforaciones, permite disminuir su peso y ofrece una menor resistencia al viento, sin perder las propiedades de sus características principales, además tiene una ganancia simulada de 13 dB y una medida de 15 dB. La ganancia de 15 dB o 13 dB son funcionales para trabajar en la banda UHF y ambas se encuentran dentro del intervalo de la antena actualmente en uso predicha banda, También se observó que al igual que en el fractal Minkowski, al aumentar las iteraciones de la geometría básica en el contorno de la antena, este fractal produjo una reducción del ancho de banda, pero generó otros acoplamientos en otras frecuencias de operación. La antena cuasi-fractal es ligera y tiene un diagrama directivo de polarización circular, capaz de ser utilizada para la banda de ultra alta frecuencia (UHF) , además de que las dimensiones, además de que la antena Yagi utilizada en la estación terrena de ESIME-Zacatenco es aproximadamente 5.7 veces más grande que la antena Quasi-Fractal propuesta.

Las dimensiones ideales calculadas en función de λ , permiten que la estructura sea escalable en frecuencia, sin perder sus propiedades en ganancia, acoplamiento y directividad. Pero también se puede utilizar un intervalo de un grosor del conductor de la estructura entre $0.5 r_c - 1.5 r_c$, en donde $r_c = 0.00476\lambda$ y sin que pierda sus propiedades de ganancia y directividad, pero modificando su acoplamiento, además de que el proceso de fabricación de la antena es sencilla, rápida y de bajo costo.



TRABAJO A FUTURO

- Buscar una manera de aumentar el ancho de banda de la estructura.
- Reducir las dimensiones el plano de tierra de la antena.



Bibliografía

- [1] C. A. Balanis, *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN*, Third Edit. Wiley-Interscience, 2005.
- [2] J. L. Volakis, R. C. Johnson, and H. Jasik, *ANTENNA ENGINEERING HANDBOOK*, 4th Editio. McGraw-Hill, 2007.
- [3] W. Tomasi, *Sistemas de Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4ta Edició. HALL/PEARSON, PRENTICE, 2001.
- [4] Á. C. Aznar, L. J. Roca, J. M. R. Casals, J. R. Robert, S. B. Boris, and M. F. Bataller, *Antenas*, 2da Edició. UPC, Ediciones, 2002.
- [5] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd Editio. Wiley, John, 2010.
- [6] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Editio. Wiley, John, 2004.
- [7] W. H. Hayt and John A. Buck, *Teoría electromagnética*, 7ma Edició. Mcgraw-Hill, 2004.
- [8] F. Gustrau and D. Manteuffel, *EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication Systems*, 1st Editio. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [9] B. S. Yarman, *Design of ultra wideband antenna matching networks via simplified real frequency technique*, 1st Editio. Springer Netherlands, 2008.
- [10] J. D. Kraus and C. Keith R., *Electromagnetics*, 2nd Editio. McGraw-Hill, 1973.
- [11] C. C. Cadenas, *Radiocomunicación*, Primer Edi., vol. Primer. Pearson, 2008.
- [12] J. D. Kraus, *ANTENNAS*, 2nd Editio. McGraw-Hill, 1997.
- [13] C. Rosado, *Comunicación por satélite*, Primera. AHCIET, 2000.



- [14] G. Maral and M. Bousquet, *Satellite Communications Systems*, 5Th ed., vol. 231, no. 1. 2009.
- [15] A. L. Bravo and J. R. S. Pedroza, “Análisis Teorico-Experimental de una Antena de Cruz,” Instituto Politecnico Nacional, 2005.
- [16] A. G. Roederer, “The Cross Antenna: A New Low-Profile Circularly Polarized Radiator,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 38, no. 5, pp. 704–710, 1990.
- [17] L. Salazar Aria and J. R. S. Pedroza, “Caracterizacion de una antena Rombica para antenas inalámbricas (2.4 GHZ),” UPIITA-IPN, 2008.
- [18] M. L. V. Diaz, J. R. S. Pedroza, and F. M. Zuñiga, “Diseño y construcción de una antena para la estación terrena de un nanosatélite en banda UHF,” Instituto Politecnico Nacional, 2016.
- [19] L. E. C. Rivera and J. R. S. Pedroza, “Arreglo conforme para recepción de GNSS en la Banda GPS-L1,” Instituto Politecnico Nacional, 2012.
- [20] J. E. C. Palma, J. R. S. Pedroza, and F. M. Zuñiga, “Análisis Parametrico de una Antena de Banda Ancha para Recepción Satelital en Banda L,” Instituto Politecnico Nacional, 2013.
- [21] S. R. Best, “A Discussion on the Significance of Geometry in Determining the Resonant Behavior of Fractal and Other Non-Euclidean Wire Antennas,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 45, no. 3, pp. 9–28, 2003.
- [22] D. H. Werner and S. Ganguly, “An overview of fractal antenna engineering research,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 45, no. 1, pp. 38–57, 2003.
- [23] A. Azari, “Super wideband fractal antenna design,” *Proc. - 2009 3rd IEEE Int. Symp. Microwave, Antenna, Propag. EMC Technol. Wirel. Commun. MAPE 2009*, pp. 242–245, 2009.
- [24] H. M. Elkamchouchi and M. N. Abd El-Salam, “Square loop antenna miniaturization using fractal geometry,” *Natl. Radio Sci. Conf. NRSC, Proc.*, vol.



- 2003–Janua, pp. B41–B48, 2003.
- [25] Y. Yu and C. Ji, “Research of fractal technology in the design of multi-frequency antenna,” *2011 China-Japan Jt. Microw. Conf.*, pp. 1–4, 2011.
- [26] L.-N. Cheng, Y.-C. Jiao, H.-H. Xie, and F.-S. Zhang, “Minkowsky fractal patch antenna for size and radar cross-section reduction,” Xi’an, Shanxi, China, 2011.
- [27] N. A. Murad, M. Esa, M. F. Mohd Yusoff, and S. H. Ammah Ali, “Hilbert curve fractal antenna for RFID application,” *2006 Int. RF Microw. Conf. Proc.*, vol. 0, pp. 182–186, 2006.
- [28] R. P. Dwivedi, “High Gain Dual Band Antenna using Fractal Geometry for Mobile Communication,” *2015 2nd Int. Conf. Signal Process. Integr. Networks High*, pp. 50–55, 2015.
- [29] A. Ismahayati, P. J. Soh, R. Hadibah, and G. A. E. Vandenbosch, “Design and analysis of a multiband koch fractal monopole antenna,” *2011 IEEE Int. RF Microw. Conf. RFM 2011 - Proc.*, vol. 4, no. December, pp. 58–62, 2011.
- [30] A. K. Singh, R. A. Kabeer, Z. Ali, and D. Gurjar, “Performance analysis of compact Koch fractal antennas at varying iterations,” *2013 Students Conf. Eng. Syst. SCES 2013*, pp. 5–9, 2013.
- [31] R. Kumar and P. Bansode, “on the Design of Ultra Wide Band Antenna Based on Fractal Geometry,” *2010 ITU-T Kaleidosc. Acad. Conf. resulted*, pp. 1–5, 2010.
- [32] S. R. A. P. Singh, “On the Design and Analysis of Modified Koch Curve Fractal Antenna,” *J. Inst. Eng. Ser. B*, vol. 94, no. February, pp. 231–236, 2014.
- [33] P. Patel, K. Dwibedi, R. Poonkhuzhali, D. Thiripurasundari, and Z. C. Alex, “Miniaturized Dipole antenna using Koch fractal technique for wearable application,” *Int. Conf. Commun. Signal Process. ICCSP 2013 - Proc.*, pp. 734–737, 2013.
- [34] M. F. Pantoja *et al.*, “GA design of wire pre-fractal antennas and comparison with



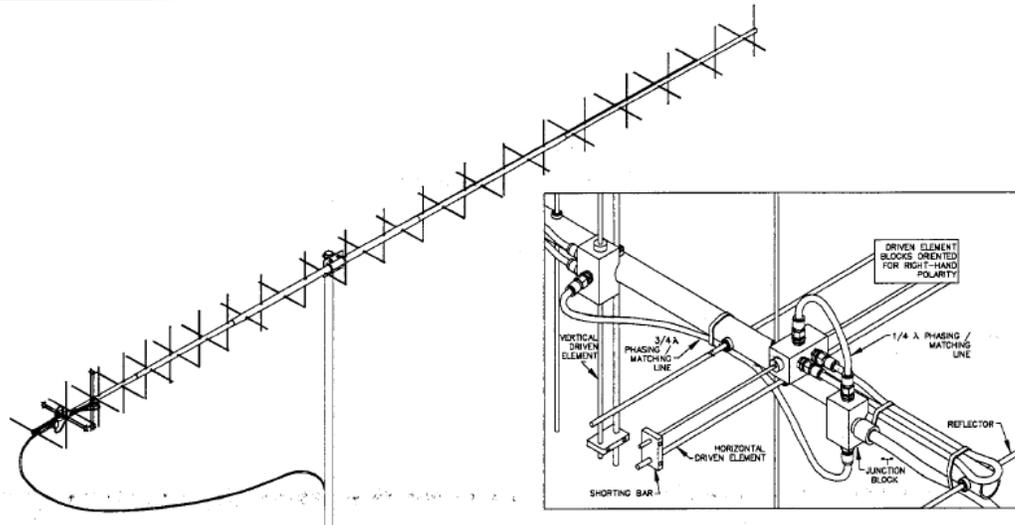
- other euclidean geometries," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 238–241, 2003.
- [35] P. S. R. Chowdary, A. M. Prasad, P. M. Rao, and J. Anguera, "Design and Performance Study of Sierpinski Fractal Based Patch Antennas for Multiband and Miniaturization Characteristics," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 83, no. 3, pp. 1713–1730, 2015.
- [36] M. Khalid T, "Combined fractal dipole wire antenna," *INICA 2007 Int. Conf. Antennas - Proc.*, pp. 176–180, 2007.
- [37] A. Azari, "A new ultra wideband fractal antenna," *Symp. Dig. - 20th URSI Int. Symp. Electromagn. Theory, EMTS 2010*, pp. 424–427, 2010.
- [38] D. Upadhyay and R. P. Dwivedi, "Antenna Miniaturization Techniques for Wireless Applications," *2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, pp. 1–4, 2014.
- [39] E. Garduño, J. R. Sosa-pedroza, and O. Thom, "Antena quasi - fractal Tipo Cruz de Reoderer para una estación terrena en VHF," *15to Congr. Nac. Ing. Electromecánica y Sist. (CNIES 2015)*, no. Cnies, pp. 1–5, 2015.
- [40] J. Sosa-Pedroza, S. Peña Ruiz, and F. Martínez-Zuñiga, "A 2.4 GHz cross rhombic antenna for a cube satellite application," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2014, 2014.



Anexos

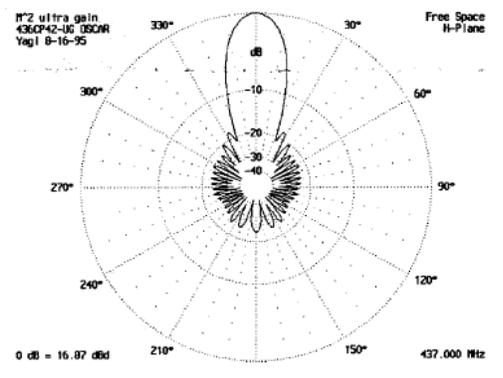
Anexo 1

M² 436CP42 U/G Circular Polarized Yagi rev.5-15-07



SPECIFICATIONS

Model Number.....	436CP42 U/G
Frequency Range.....	430 -438 MHz
Gain.....	16.8 dBdc
Beamwidth.....	21° circular
Polarity.....	Circular, RHC or LHC
Front to Back.....	25 dB Typical
Ellipticity.....	1.5 dB Typical
VSWR.....	1.5:1 & better
Feed Impedance.....	50 Ω, Unbalanced
Connector.....	'N' Female
Power Handling.....	1 kW
Stacking distance.....	.68" High .68" Wide
Boom Length / Dia.....	.18" 10"/1-1/2, 1-1/4", 1"
Elements.....	.21H, 21V, 3/16" Rod
Stacking Distance.....	.67" for E and H planes
Turning Radius.....	.95"
Wind Area.....	.2 sq ft.
Mast Size.....	1-1/2 to 2 Inches
Weight / Shipping Weight.....	7.8 lbs / 10 lbs UPS



FEATURES

The 436-CP42 U/G (Ultra-Gain) sets a new performance standard for UHF circular polarized antennas. Gain and F/B are excellent. The boom length is matched to the 2MCP22, and together they form an unbeatable satellite communications package. The extremely clean pattern maximizes forward gain and F/B. The pattern is important in order to match the antenna's noise temperature with modern low-noise preamps. The CP42 is also excellent for ATV, repeater operation, and long haul tropo DX and EME around 432 MHz.

The driven element and 'T' blocks are CNC machined, with connectors O-ring sealed for low maintenance and long-term peak performance. Internal connections are embedded in a space-age silicone gel that seals out moisture and improves power handling. The 3/16" 6061-T6 rod elements are centered in the boom to minimize interaction and maintain low ellipticity. Insulators are UV stabilized and locked in place with stainless retainers. The central boom section is 1-1/2" dia., tapering, front and rear, through 1-1/4" sections to 1" ends. If you are looking for rugged construction and top-notch performance, For EME use, M² can supply the optional parts needed to convert these to dual polarity Yagis. Contact us for more details.

4402 N Selland Ave, Fresno CA 93722 (559) 432-8873 FAX 432-3059 WWW. m2inc.com Email: sales@m2inc.com



M² 436CP42 U/G Assembly Manual

10-6-95
Rev. 5-20-98

TOOLS REQUIRED FOR ASSEMBLY: Screwdriver, 11/32 nut driver or wrench, 7/16" and 1/2" socket or end wrenches, measuring tape.

1. Assemble the boom using 8-32 screws and locknuts to join sections. Use screw lengths 1/4" longer than the larger of the two boom sections to be assembled (1-3/4" hardware for 1-1/2" boom section, etc.)

ASSEMBLING THE HORIZONTAL ELEMENTS

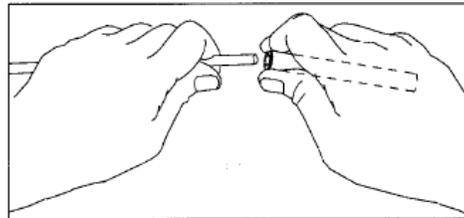
2. Lay out the elements by "H" length and position as shown the DIMENSION SHEET. Start with the reflector (longest) element. Balance it on your finger to find rough center and push on a black button insulator to about 1/2" off center. Push the element through the holes 1/2" from the rear of the boom and install the second button, snugging it up into boom. **DO NOT BOTHER CENTERING** the element at this time and **DO NOT INSTALL** the stainless steel shaft retainers.

3. Install the 3/16" rod **DRIVEN ELEMENT** as you did the reflector. Then continue with the installation of the **DIRECTORS**. *Note that the Director Elements do not consistently diminish in length from rear to front, so pay close attention to length and position.*

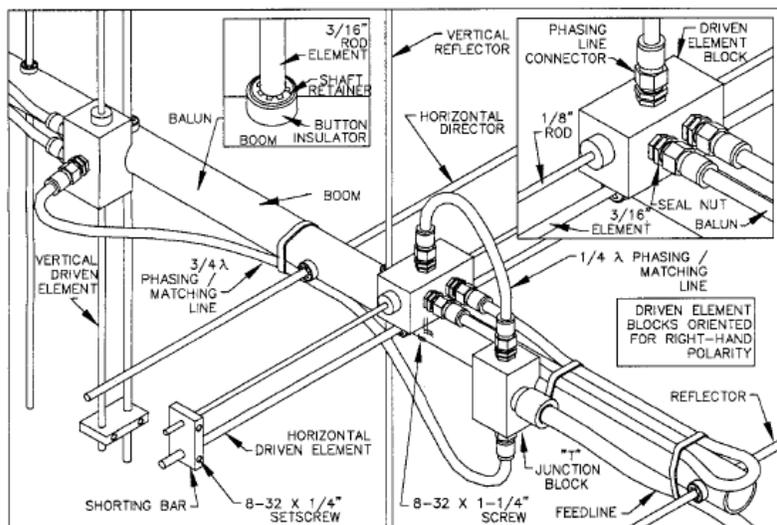
4. Now begin centering the elements. Use a tape measure to **EQUALIZE** the amount the element sticking out on each side of the boom. Once you have all the elements centered, sight down the element tips from the rear comparing each side. Look for any obvious discrepancies and correct if found.

5. Stainless steel **SHAFT RETAINERS** lock the elements in place. They should always be used for permanent and long term antenna installations. For portable or temporary use, the button insulators are adequate for holding the elements and the retainers may be left off.

To install the stainless steel **SHAFT RETAINERS**, use thumb and forefinger to hold the retainer over the end of the **PUSH TUBE** (3/8" x 3" tube, supplied in the kit), internal fingers on retainer dished into tube. **HOLD THE ELEMENT FIRMLY TO PREVENT IT FROM SLIDING OFF CENTER** and press the retainer onto the element end and continue until retainer butts on insulator button. Locking pliers, *lightly* clamped up against opposite button insulator will help maintain center reference (if you push the first retainer too far, remove element from boom, push retainer completely off the element, and start over). Install another retainer to the opposite side of the element. Continue installing retainers until all elements are secured.



6. Mount the **HORIZONTAL DRIVEN ELEMENT BLOCK / ROD ASSEMBLY** to the **TOP** of the boom using a single 8-32 X 1-1/4" screw. Orient the block with the two balun connectors facing to rear.

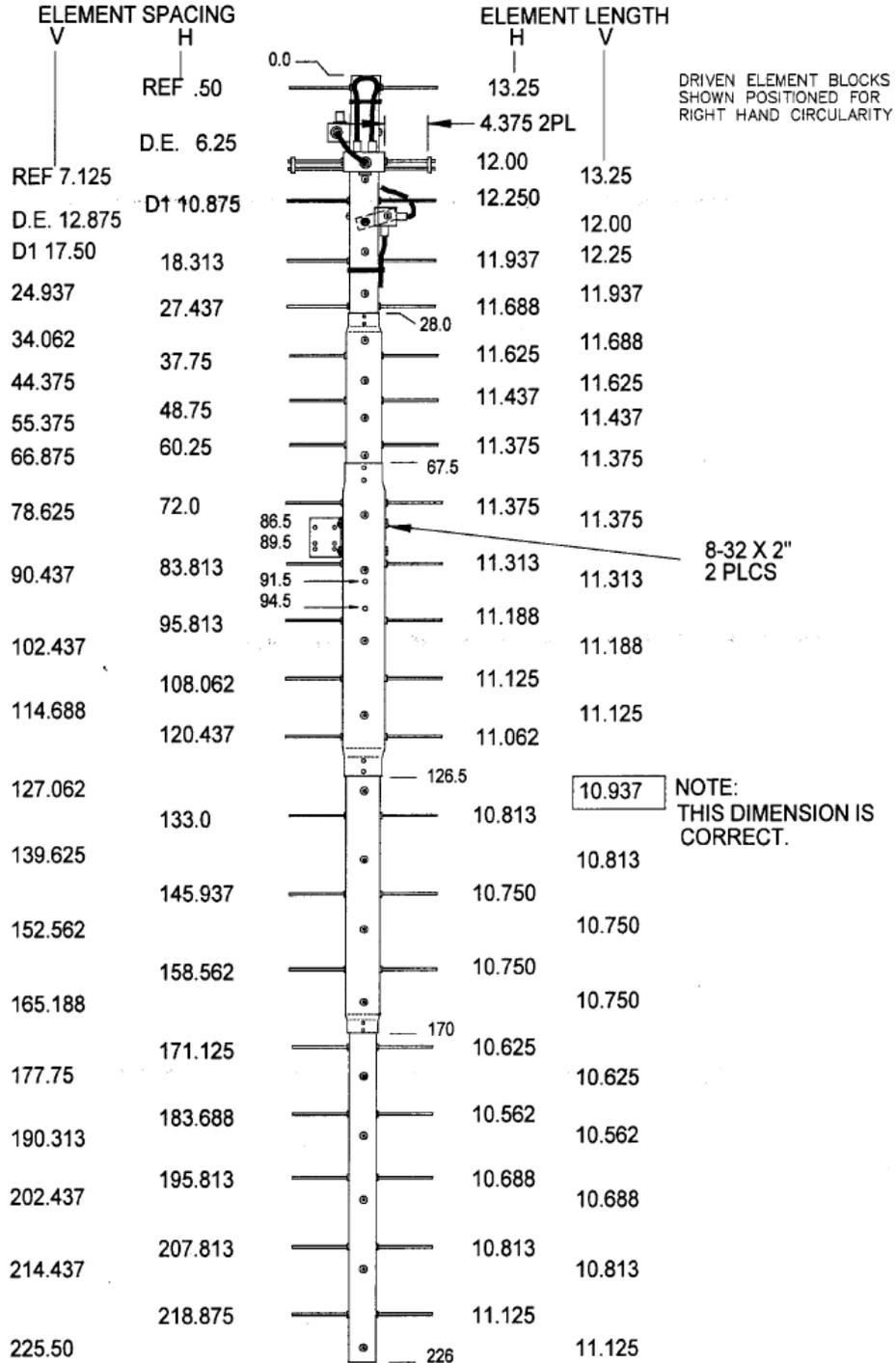


7. Install the 8-32 x 1/4" set screws (internal Allen head - tool supplied) into the **SHORTING BARS**. Slide the bars onto the 1/8" Driven Element Block Rods and the 3/16" driven element rod. Position the Shorting Bars as specified on the Dimension Sheet: the given distance is between the outer face of the driven element block and the inner face of the shorting bar. Align the bars and rods to each other and tighten the set screws.

ASSEMBLING THE VERTICAL ELEMENTS



436CP42-U/G ANTENNA DIMENSIONS



DECIMAL TO FRACTION CONVERSION	
.062	= 1/16
.125	= 1/8
.188	= 3/16
.250	= 1/4
.313	= 5/16
.375	= 3/8
.437	= 7/16
.500	= 1/2
.562	= 9/16
.625	= 5/8
.688	= 11/16
.750	= 3/4
.813	= 13/16
.875	= 7/8
.937	= 15/16

DRIVEN ELEMENT BLOCKS SHOWN POSITIONED FOR RIGHT HAND CIRCULARITY

8-32 X 2" 2 PLCS

NOTE: THIS DIMENSION IS CORRECT.

NOT TO SCALE



Note: The vertical element set is shifted forward on the boom by 1/4 wave length. This increases isolation between element planes, improving circularity and ease of phasing / matching the two element sets.

8. Repeat steps #2 through #5 for the Vertical elements, using the Dimension Sheet as your guide to lengths and spacing.

INSTALLATION OF THE VERTICAL DRIVEN ELEMENT BLOCK DETERMINES THE CIRCULARITY OF THIS ANTENNA. THE ORIENTATION OF THE BLOCK FOR RHC - RIGHT HAND CIRCULARITY, IS SHOWN ON THE DIMENSION SHEET AND DRAWING AND DESCRIBED BELOW:

9. Viewed from the rear of the boom (the Horizontal Driven Element Block), is to be mounted on the top of the boom. The VERTICAL Driven Element Block mounts to the LEFT hand side of the boom with the two Balun connectors oriented to the FRONT. Secure with 8-32 x 1-1/4" screw. Install the Shorting Bars as in step #7. Mount the 'T' Junction Block on the same side of the boom, just to the rear of the horizontal driven element.
10. Before installing the Baluns and Matching / Phasing Harness, thread 3/8" SEAL NUTS fully onto all balun and phasing line connectors, with the black Neoprene side facing out. Attach Baluns and Phasing lines to the Driven Element Blocks and Junction Block as shown on the drawing. Tighten the connectors **gently** using a 7/16" end wrench. Once the connectors are tight, back the Seal Nuts out and finger-tighten firmly up against the face of the connectors (or tighten **gently** with 1/2" end wrench). A lot of torque is unnecessary. Depending on model and polarity, the Vertical balun may loop around another element. This is normal. Form balun coax until it is close to the boom and secure with a nylon cable tie. Also secure the other balun and the matching / phasing harness coax with cable ties. Ties should be snug but not crushing or kinking the coax.
11. Use good quality coax and "N" connector for your feedline (see Installation Tips). Secure feed coax near connector on Junction Block, to provide stress relief. Allow about 60" of coax to hang in a loop between the rear end of the boom and the reattachment point (at least 12" beyond element tips) on the mast or crossboom. **Do not route feedline to boom to mast plate as exiting antenna here will adversely affect circular field.**
12. A conventional flat plate was not used for this ultra gain CP antenna, because it severely affected the circularity and gain of this antenna. We found that a smaller angle plate bolted to the boom allowed the antenna to work up to its potential. We have drilled two sets of holes in the boom to attach the plate. If neither of these positions work for your particular application, feel free to drill your own two holes. Mount the plate with two 8-32 x 2" screws and tighten securely, 1/2" and 2" u-bolts are provided to match your mast/boom diameter. **Be sure not to over tighten the u-bolts as this may damage your mast.**
THIS COMPLETES THE ANTENNA ASSEMBLY.

INSTALLATION TIPS

13. A circular polarized antenna creates a field in all planes or polarities. Performance DETERIORATES SIGNIFICANTLY if it is mounted on a metal (conductive) mast or crossboom. A mast or crossboom of any NON-CONDUCTIVE material must be used. Fiberglass is the prime choice for its strength and weather resistance. Mount so that element tips are at least 12" from any conductive material (mast, tower, feedline, etc.).
14. Recommended feedlines, in order of preference:
Andrews or Celwave 1/2" hardline
Times FM-8, LMR400, or Belden 9913 (We can highly recommend LMR400 because of its improved resistance to moisture and reduced weight.)
Try to keep the cable run to under 100 ft. to prevent excessive signal loss.
15. If stacking two or more antennas, contact M² specific stacking information



436CP42 U/G PARTS LIST

11-1-95

DESCRIPTION	QTY.
Boom section, 1-1/2 x .058 x 59" SBE.....	1
Boom section, 1-1/4 x .058 x 42-1/2" SOE.....	1
Boom section, 1-1/4 x .058 x 46-1/2" SOE.....	1
Boom section, 1 x .058 x 31" STR.....	1
Boom section, 1 x .058 x 59" STR.....	1
Boom to mast plate, 4 x .125" angle plate.....	1
Elements, 3/16" alum. rod x (see Dim. Sht.)	42
Driven element block assembly,	2
T Block assembly	1
Balun, RG-6U halfwave length	2
Phasing line, RG6-U, 1/4	1
Phasing line, RG6-U 3/4	1
U-bolt and cradle, 2"	2
U-bolt and cradle, 1-1/2"	2
Assembly instructions	1

IN HARDWARE BAG

Shorting bars, .75 x 1.532 x .250" mach. alum.	4
Button insulators, 3/16" black	84
Shaft Retainers, 3/16" ss.....	84
Nut, 5/16-18 ss.....	8
Lockwasher, 5/16" ss	8
Screw, 8-32 x 2"	2
Screw, 8-32 x 1-1/4" panhead	3
Screw, 8-32 x 1-3/4" panhead	4
Screw, 8-32 x 1-1/2" panhead	4
Set screw, 8-32 x 1/4" ss	8
Locknut, 8-32 ss.....	10
Seal nuts, 3/8-32 gold zinc.....	8
Allen wrench, 5/64"	1
Push tube, 3/8 x 3" (for keeper installation).....	1
Cable ties, 8"	5



Anexo 2

ARTÍCULO No.
ARTÍCULO15^o CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS (CNIES 2015)

Antena quasi-fractal Tipo Cruz de Reoderer para una estación terrena en VHF

Dr. Edson Garduño-Nolasco, Dr. Jorge R. Sosa-Pedroza, Ing. Oskar Thomás Cerón-Durán

Resumen— El presente trabajo muestra la modificación de la geometría de la Cruz de la antena Reoderer aplicando principios de estructuras fractales. Después de la modificación geométrica la antena ha reducido sus dimensiones totales, manteniendo sus principales parámetros como coeficiente S11, la ganancia y directividad. La antena está diseñada para 145.5 MHz (VHF) y los datos simulados presentados se obtuvieron mediante el uso de Computer Simulation Technology (CST). La ganancia alcanzada es 12.16 dB para un ángulo de lóbulo principal de 43 grados que hacen esta antena no sólo una opción excelente, sino también una opción novedosa para estaciones terrenas de VHF.

Palabras Clave— *Fractal, Antena, Reoderer, VHF.*

Abstract— The present paper shows the geometry modification of Cross of Reoderer antenna by applying fractal structures principles. After geometry modification the antenna has reduced on its total dimensions while keeping its main parameters as S11 coefficient, gain and directivity. The antenna is designed for 145.5 MHz (VHF) and the presented simulated data were obtained by using Computer Simulation Technology (CST) software. The achieved gain is 12.16 dB for a main lobe angle of 43 degrees making this antenna not only an excellent butt also novel option for a VHF earth station purposes.

Keywords— *Fractal, Antenna Reoderer, VHF.*

I. INTRODUCCIÓN

Normalmente una estación terrena utiliza antenas que operan en la banda de VHF (Very-High Frequency) y UHF (Ultra-High Frequency) que sean directivas y que tengan una buena ganancia, siendo ésta última un aspecto muy importante para la comunicación satelital. Las antenas tipo Yagui son comúnmente utilizadas para cubrir las comunicaciones en la estación terrena pero lamentablemente, las dimensiones de este tipo de estructuras son de gran tamaño [1].

El hecho que las Antenas de alambre diseñadas para la banda VHF del espectro electromagnético sean de gran tamaño y peso, genera la necesidad de diseñar sistemas de posicionamientos de la antena complejos y bastante robustos. En base a esto reducir las dimensiones físicas de la estructura hace más fácil su construcción. Sin embargo, lo anterior no es tarea fácil ya que es imprescindible reducir el tamaño de una antena de alambre mientras se mantienen sus métricas más importantes tales como parámetros S11, patrón de radiación y ganancia. Desafortunadamente, las técnicas de reducción de dimensiones, actualmente conocidas, están orientadas esencialmente a estructuras de microcinta planas donde la

posibilidad de cambio de sustrato se realiza convenientemente en función de las propiedades del material, permitividad, para obtener menores dimensiones [2].

Para sistemas de recepción satelital en VHF, las antenas de microcinta no son la mejor opción por los niveles de potencia utilizados además de valores deseados de ganancia superiores a los 10 dB. Por lo anterior, una geometría Cruz de Reoderer es una buena opción al ser una estructura de ganancia media y polarización circular, que consiste en un conductor que forma una cruz sobre un plano de tierra [3], es ideal para reducir su tamaño. Por lo tanto, el presente trabajo propone la reducción de dimensiones de una antena tipo Cruz de Reoderer fractalizando la geometría de la antena.

Finalmente se obtendrá el diseño de una antena para una estación terrena en VHF, ya que una antena fractal se basa en la repetición de una figura principal, conocida como patrón, en todo su contorno y así logrando acoplarse en otras bandas múltiples de la longitud de onda de cada patrón[4,-6].

II. DESARROLLO

Antena de Referencia

La antena tipo cruz de Reoderer ha sido estudiada en múltiples foros y documentada en la literatura. Ésta se basa en un diseño muy simple, de fácil construcción pero cuyas dimensiones son muy grandes cuando se trabaja en frecuencias de la banda VHF, La Figura 1 muestra las dimensiones para una antena de Cruz de Reoderer diseñada para operar en la frecuencia de 145.5MHz. La estructura tiene un largo total de 2.57 metros y un ancho de 2.58 metros. Por lo tanto el área que ocupa este diseño es de 6.63 metros cuadrados, este tamaño requiere un gran espacio para poder utilizarla y de rotores de alta potencia para el sistema de apuntamiento de la estación terrena.

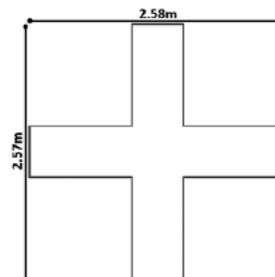


Figura 1.- Antena tipo Cruz de Reoderer diseñada a 145.5 MHz



ARTÍCULO No.
ARTÍCULO

15^o CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS (CNIES 2015)

Por lo tanto, se diseña la estructura de la Cruz de Reoderer en el simulador comercial CST Microwave Studio, utilizando sustrato de aire y PEC como conductor. En la Figura 2 Se observa que la apertura del lóbulo principal del patrón de radiación es de 39.6 grados. Adicionalmente se obtienen el parámetro de reflexión S11 (Figura 3) y se obtiene una ganancia de 13.1 dB. Y en la figura 4 se puede observar el patrón en 3D que esta genera.

Los resultados anteriores exhiben una excelente estructura para su aplicación en estaciones base debido a su ganancia y patrón de radiación. Sin embargo, es deseable la reducción de las dimensiones físicas de la estructura.

Diseño Propuesto

El diseño de una antena fractal se define por repetir una figura principal en su contorno [2], basándose en que la Cruz de Reoderer es formada por 4 brazos, en forma de rectángulos, se propone que la figura patrón sea un rectángulo, por lo que habrá un rectángulo en cada sección del perímetro teniendo así 3 figuras principales por brazo, a excepción del brazo inferior que solo tendrá 2 figuras patrón, Figura 5. Esto último ayuda a conservar el perímetro de la Cruz de Reoderer de $5.795 \cdot \lambda$ (longitud de onda) y mantener la configuración de onda progresiva para conseguir una polarización circular y de esta forma se logra reducir el tamaño de la antena por lo que se obtiene una reducción al 44% de su tamaño original.

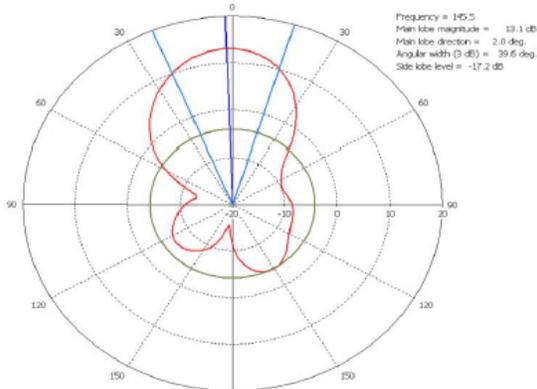


Figura 2.- Patrón de radiación para una Antena tipo Cruz de Reoderer a 145.5 MHz

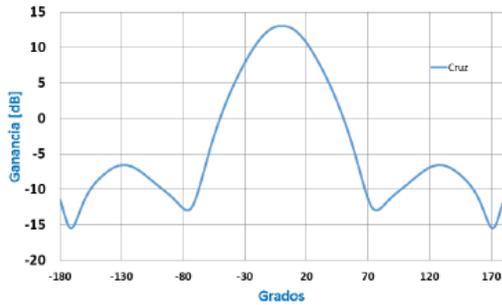


Figura 3.- Parámetro de reflexión S11 para una Antena tipo Cruz de Reoderer a 145.5 MHz

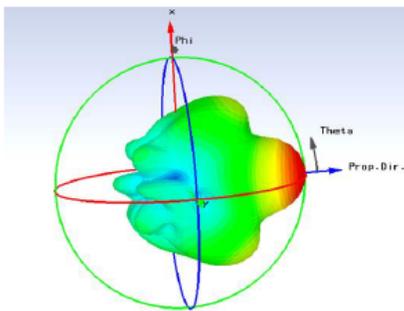


Figura 4.- Patrón de radiación en 3D de la antena Cruz de Reoderer a 145.5MHz

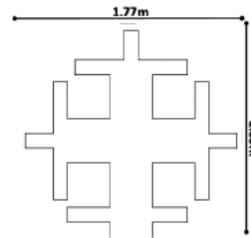


Figura 5.- Antena Fractal tipo Cruz de Reoderer diseñada a 145.5 MHz

En la Figura 7 se muestran sus parámetros de reflexión y una ganancia de 11.98 dB y en la Figura 8 se aprecia su patrón en 3D de esta antena. En la Figura 6 se observa una apertura de 49.5° por lo que se busca reducir esta apertura de modo que sea más directiva y por lo tanto tenga mayor ganancia. Para esto se busca una simetría en los dobleces de la antena.

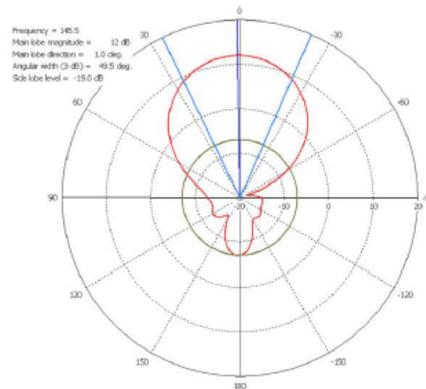


Figura 6.- Patrón de radiación para una Antena Cruz de Reoderer fractal a 145.5 MHz



ARTÍCULO No.
ARTÍCULO

15º CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECÁNICA Y DE SISTEMAS (CNIES 2015)

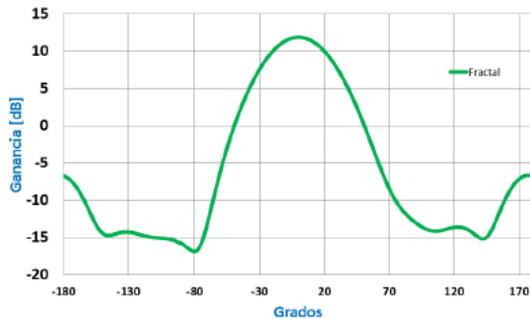


Figura 7.- Parámetro de reflexión S11 para una Antena Cruz de Reoderer fractal a 145.5 MHz

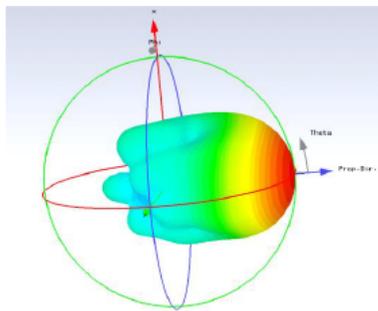


Figura 8.- Patrón de radiación en 3D de la Fractal tipo Cruz de Reoderer a 145.5Mhz

La actual estructura es aun objeto de optimización. El objetivo es aumentar la ganancia. Para tal objetivo, se busca reducir el ancho del haz del lóbulo principal. Se propone la modificación de la estructura fractal en las secciones de los extremos de cada uno de los brazos de la cruz como se muestra en la siguiente figura (Figura 9).

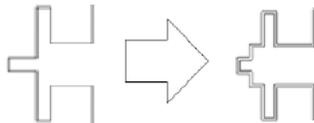


Figura 9.- Propuesta de modificación de geometría para los extremos de la antena de Cruz de Reoderer tipo fractal

Después del estudio paramétrico de las dimensiones se encontró que los dobleces que se agregan ayudan a aumentar la ganancia, pero también disminuyen un poco los parámetros S11, por lo que basándonos en que una estación terrena busca que una antena tenga una buena ganancia se opta por utilizar estos dobleces, formando una nueva apariencia, y en base a los parámetros utilizados para su diseño esta se nombra antena quasi-Fractal tipo Cruz de Reoderer la cual se puede observar en la Figura 10.

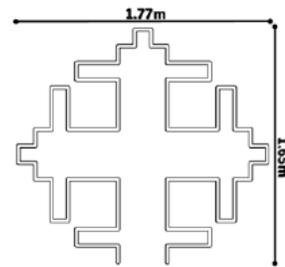


Figura 10.- Antena quasi-Fractal tipo Cruz de Reoderer diseñada a 145.5 MHz

Se observa que esta antena mantuvo su tamaño de la antena Fractal ocupando un área de solo 2.92 metros cuadrados, con dimensiones de 1.65 metros x 1.77 metros. La nueva estructura mantiene su perímetro de $5.795 \cdot \lambda$, por lo tanto, al aplicar los cambios propuestos.

En la Figura 11 se observa que la apertura del lóbulo principal del patrón de radiación es de 43 grados. Adicionalmente se obtienen el parámetro de reflexión S11 (Figura 12) y se obtiene una ganancia de 12.16 dB. Y en la figura 13 se puede observar el patrón en 3D que esta genera.

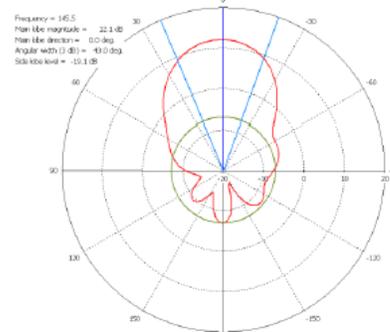


Figura 11.- Patrón de radiación para una Antena Cruz de Reoderer quasi-fractal a 145.5 MHz

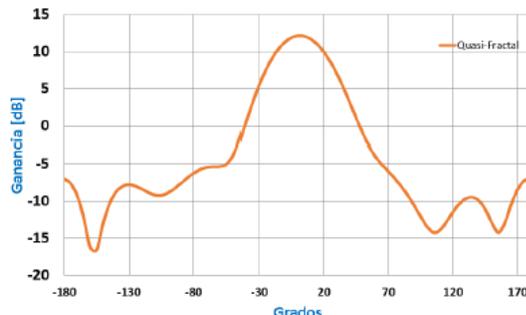


Figura 12.- Parámetro de reflexión S11 para una Antena Cruz de Reoderer quasi-fractal a 145.5 MHz



ARTÍCULO No.
ARTÍCULO

15^o CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS (CNES 2015)

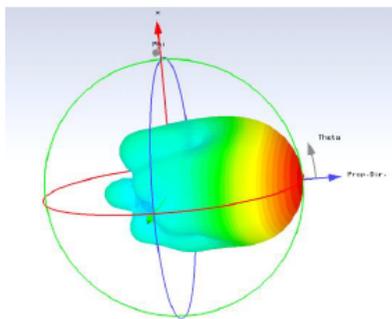


Figura 13.- Patrón de radiación en 3D de la quasi-Fractal tipo Cruz de Reoderer a 145.5Mhz

La ganancia exhibida por la estructura final es de 12.16 dB con un ancho de haz principal de 43 grados. Logrando la mejora deseada.

Comparación

La antena Cruz de Reoderer, la antena Cruz-Fractal y Fractal fueron modeladas en CST para su análisis. Las dimensiones que se utilizaron se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Datos de Simulación

Datos	Cruz	Fractal	quasi-Fractal
Frecuencia de Diseño	145.5 MHz	145.5 MHz	145.5 MHz
Longitud de Onda	2.06 m	2.06 m	2.06 m
Diámetro del alambre	3.2 mm	3.1 mm	3.2 mm
Separación del Plano de tierra	0.22 m	0.22	0.22 m

En la Figura 14 se pueden observar los resultados gráficos del Patrón de Radiación en 2D de la antena fractal, quasi-Fractal y la Cruz, en la que se observa que el patrón de ambos además de ser directivo, es similar en cuanto a ganancia, mientras que el quasi-Fractal tiene una ganancia de 12.16 dB la Cruz tiene una de 13.1 dB y la fractal 11.98 dB.

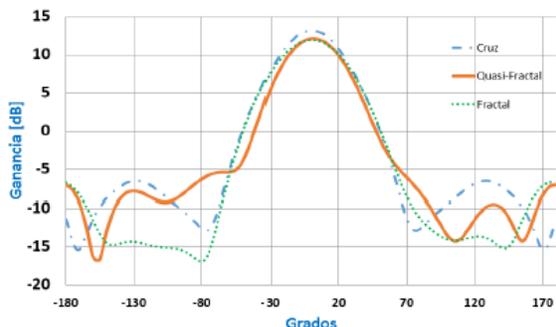


Figura 14.- Patrón de Radiación en 2D de la antena Fractal, quasi-Fractal y la antena tipo Cruz de Reoderer diseñada a 145.5 MHz

En la Figura 15 se muestra el Coeficiente de reflexión o parámetros S11 de las antenas, en la cual se puede observar que están acopladas, pero se puede apreciar que al reducir la antena de Cruz de Reoderer afecto el acoplamiento de esta.

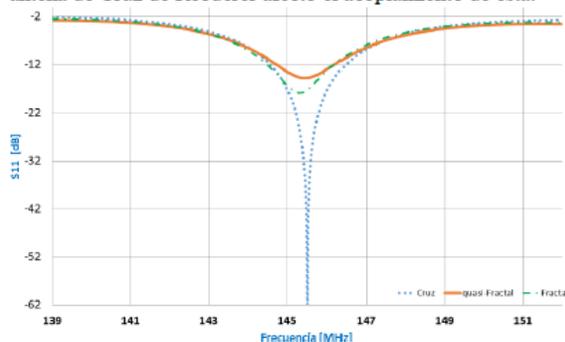


Figura 15.- Coeficiente de Reflexión o Parámetros S11 de; la antena Fractal (línea punteada con guion), quasi-Fractal (línea continua) y la antena tipo Cruz de Reoderer (línea punteada).

En la Tabla 2 se muestran los datos obtenidos en las simulaciones tanto para la antena de Cruz der Reoderer así como para la antena Fractal.

Tabla 2.- Resultados de Simulación

Datos	Cruz	Fractal	Quasi-Fractal
Tipo de Antena	Directiva	Directiva	Directiva
Frecuencia de Operación	145.5 MHz	145.5 MHz	145.5 MHz
Ganancia	13.1 dB	11.9 dB	12.16 dB
S11	-61.8 dB	-18 dB	-14.83 dB

III. CONCLUSIONES

Al reducir el tamaño de la cruz de Reoderer utilizando los principios de una antena fractal se consigue una notable reducción de dimensiones hasta en un 44%, mientras que el comportamiento del patrón de radiación no varía mucho, su acoplamiento decae pero aun así tiene un buen acoplamiento, además de que las modificaciones de los extremos de la fractal mejoraron la directividad y la ganancia de la antena. Por lo tanto, en base a las simulaciones considero que esta antena es una muy buena opción para utilizarla en una estación terrena.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de estudios de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.





IV. REFERENCIAS

- [1] B.S. Yarman, Design of Ultra-Wideband Antenna Matching Networks, Chapter 2 Antenna Fundamentals, 2008.
- [2] Divyanshu Upadhyay & Ravi Prakash Dwivedi, Antenna Miniaturization Techniques for Wireless Applications, 2014.
- [3] A.G. Reoderer "The Cross Antenna: A New Low Profile Circularly Polarized Radiator", May 1990.
- [4] S. V. Krupenin, Modeling of Fractal Antennas, December 1, 2005
- [5] Constantine A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, Chapter 11.6, 3rd Edition.
- [6] Steven R. Best, A Discussion on the Significance of Geometry in Determining the Resonant Behavior of Fractal and Other Non-Euclidean Wire Antennas, June 3, 2003.

BIOGRAFÍA



Dr. Jorge Roberto Sosa Pedroza. Doctor en Electrónica y Comunicaciones por el IPN, tiene cursos de especialización en Comunicaciones, en la Universidad de Wisconsin, USA, y Cursos de especialización en caracterización de antenas, Universidad de California USA. Ha sido Profesor-Investigador Titular de tiempo completo de la ESIME-IPN desde hace 40 años, especializándose en Propagación Electromagnética, Antenas, Comunicaciones Satelitales y Dispositivos Pasivos de Microondas. Ha asesorado más de 200 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado y escrito más de 200 artículos de su especialidad, tanto en revistas como en participación en congresos. Ha tenido varios cargos administrativos en el que destaca la Dirección de Educación Superior del IPN. Es miembro de la Academia de Ingeniería, habiendo sido coordinador del área de Comunicaciones y Electrónica de la misma. Su trabajo incluye asesoría técnica para la industria, y el gobierno, tales como la NASA, Telcel, en caracterización de antenas, igualmente para Telecomm en la caracterización del sistema de microondas y antenas de los Satélites Solidaridad y el rediseño del sistema de antenas de los mismos satélites. También la caracterización de la cobertura de las comunicaciones del Sistema TETRA de la policía del D.F. y el diseño del sistema de comunicaciones del proyecto de cámaras del D.F. (Proyecto Bicentenario). Ha participado en proyectos para PEMEX, el Aeropuerto del D.F., el Sistema de Transporte Colectivo Metro, el Sistema de Transporte Mexibus del Estado de México, entre muchos otros.



Dr. Edson Garduno-Nolasco. Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad de Manchester, Reino Unido (2014). Maestro en Ciencias en Ingeniería de las Telecomunicaciones por el Instituto Politécnico Nacional con honores. Ha sido galardonado en dos ocasiones (2000, 2011) con la Presea "Lázaro Cárdenas de Río" por el Instituto Politécnico Nacional y obtuvo la Presea "Federico Reul Gottschald" por el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos No. 11 del IPN en el 2000. Actualmente desarrolla investigación en antenas y en ingeniería de materiales para dispositivos electrónicos de última generación.



Ing. Oskar Thomás Cerón Durán. Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica egresado la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional en el año 2015, Actualmente estudiando la Maestría en Ciencias de Ingeniería en telecomunicaciones de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación del IPN.



Anexo 3

ARTÍCULO No.
ARTÍCULO

8º CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECÁNICA Y DE SISTEMAS (CIIES 2016)

Diseño de una antena Cuasi-Fractal de bajo costo para 2.4 GHz

Cerón-Durán O.T., Sosa-Pedroza J., Garduño-Nolasco E

Resumen— El presente trabajo muestra la optimización de una antena Cuasi-Fractal diseñada para trabajar a 2.4GHz. Con pequeñas modificaciones en la estructura principal, así como la separación del plano de tierra, se mejoraron parámetros tales como su ganancia y directividad, manteniendo su coeficiente de reflexión S_{11} acoplado. Los datos simulados que se presentan se obtuvieron mediante el uso de Computer Simulation Technology (CST) Suit Studio, donde la ganancia alcanzada es 12.4 dB y un acoplamiento de -15.8 dB.

Palabras Clave— *Cuasi-Fractal, Antena, 2.4GHz, bajo costo.*

Abstract— This paper shows the optimization of a Quasi-Fractal antenna designed to at 2.4GHz. With minor modifications to the main structure and the separation of the ground plane, parameters such as the gain and directivity are improved, maintaining a good reflection coefficient S_{11} . The simulated data presented were obtained by using Computer Simulation Technology (CST) Suit Studio, where the gain 12.4 dB and a reflection coefficient of -15.8 dB.

Keywords— *Quasi-Fractal, Antenna, 2.4GHz.*

I. INTRODUCCIÓN

El incremento del desarrollo tecnológico ha generado un aumento en la utilización de dispositivos inalámbricos provocando que puedan existir interferencias en los campos electromagnéticos entre cada dispositivo es por lo que la frecuencia de 2.4GHz, fue diseñada para uso industrial científico y médico conocida como la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical). Además, está frecuencia forma parte del espectro electromagnético utilizado en las comunicaciones libres de licencia [1,2] por lo que al ser una banda de usos múltiples se propone una antena de bajo costo con una buena ganancia que trabaje en esta banda, es por eso que se propone escalar y modificar el diseño de una antena Cuasi-fractal que trabaja en la banda VHF [3], comprobando que el diseño es escalable y que pueda operar a 2.4 GHz.

Una antena cuasi-fractal tiene grandes ventajas en comparación a otro tipo de antenas de alambre, tales como su fácil construcción, diseño, bajo costo, además este tipo de antenas proporciona una ganancia media. La estructura antena Cuasi-Fractal se basa en el principio de las estructuras fractales tomando la repetición de una figura principal, conocida como patrón, en todo su contorno, buscando mantener los principios de la antena de cruz los cuales van de la mano con el número de longitudes de ondas que se utilizan en su diseño [3-7].

II. DISEÑO Y MODELADO

Antena de Referencia

La antena de referencia es una estructura escalada y basada en el artículo “Antena cuasi-fractal Tipo Cruz de Reoderer para una estación terrena en VHF” [3], el escalamiento de esta estructura se realizó para que pudiera trabajar en la frecuencia de 2.4GHz, en la Figura 1 se muestran las dimensiones resultantes de este escalamiento.

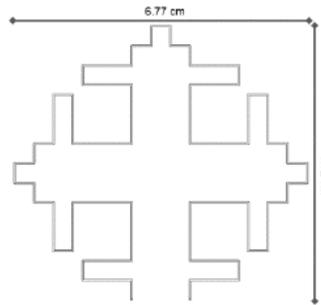


Figura 1 Dimensiones de la estructura Cuasi-fractal escalada a 2.4GHz

En la Tabla 1 se muestran los parámetros utilizados para el modelado y simulación de esta antena en el software comercial CST Suit Studio, tales como la frecuencia de operación, el radio del conductor r_c , la longitud de onda λ_o , el tamaño de la estructura, el tamaño del plano de tierra, así como la separación del plano de tierra.

Frecuencia de Operación	Radio del conductor r_c	Longitud de onda λ_o	Tamaño de la estructura	Tamaño del plano de tierra	Separación del plano de tierra (S)
2.4 GHz	0.32 mm	12.5 cm	6.7cm x 6.3cm	6.7+2*S cm x 6.3+2*S cm	$\lambda/8$ cm

Tabla 1 Parámetros utilizados para el modelado y simulación de la antena de referencia

En la Figura 2 se muestra el coeficiente de reflexión simulado de esta antena de referencia, en donde se puede apreciar que la antena se encuentra acoplada a 2.4 GHz mostrando un ancho de banda de 31 MHz y un acoplamiento de -31.85 dB, mientras que en la figura 3 se pueden el grafico polar de patrón de radiación en el plano azimut figura 3.a con una apertura de 58.5° en el lóbulo principal mientras que en el plano phi figura 3.b existe una apertura de 114.7°, ambas graficas muestran una ganancia de 7.2 dB y un patrón directivo.



ARTÍCULO No.
ARTÍCULO

8º CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECÁNICA Y DE SISTEMAS (CIIES 2016)

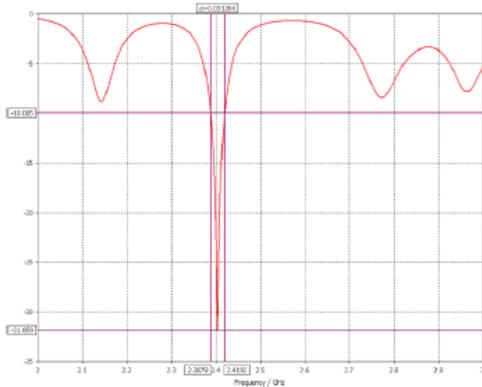


Figura 2 Resultados del coeficiente de reflexión de la antena de referencia

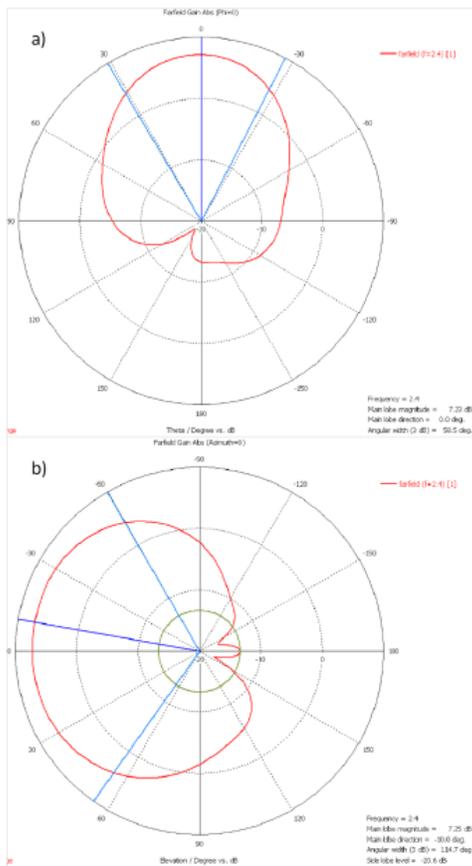


Figura 3 a) Grafica polar del patrón de radiación en el plano azimut, b) Grafica polar del patrón de radiación en el plano phi.

Con base a estos resultados obtenidos en la figura 3 es fácil percatarse que la apertura del lóbulo principal en el plano de phi es más grande que la apertura existente en azimut, por lo que a esta apertura se le atribuye a que la estructura no es completamente simétrica, es por eso que se propone una

modificación a la estructura buscando una simetría en todos sus brazos.

Optimización

Tomando en cuenta que la longitud del conductor de la estructura es un múltiplo de la longitud de onda λ_0 [1-6], se propone que esta antena se modifique, para tener una estructura simétrica, permitiendo que el brazo inferior sea similar a los brazos superiores tal y como se muestra en la Figura 4, aumentando la longitud del conductor, corrigiendo la apertura del lóbulo principal más amplio, localizado en el plano phi.

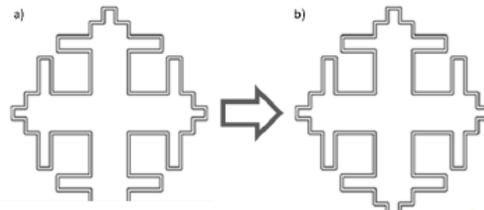


Figura 4 a) Estructura no simétrica, b) Estructura simétrica

Al realizar y simular este cambio, se observa en la Figura 5 que el acoplamiento en 2.4 GHz disminuye a -17.6 dB pero se encontró que el patrón en este punto ya no es directivo, después de realizar varias simulaciones se encontró que el patrón directivo en una frecuencia más alta a la diseñada, para ser más exactos en la frecuencia de 3GHz el cual se puede observar en la Figura 6 con una ganancia de 12.5 dB, pero el coeficiente de reflexión en ese punto de la antena simétrica es de -5.8dB por lo que no se encuentra acoplada.

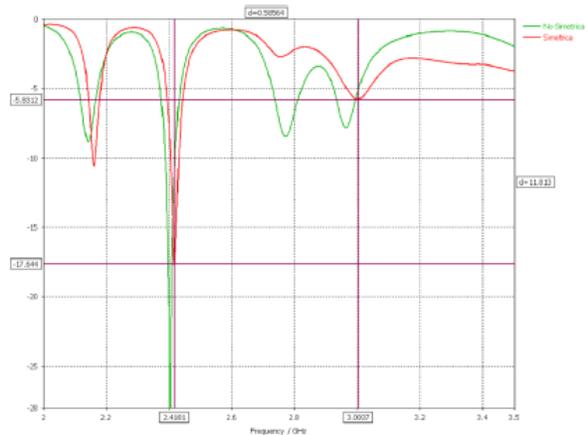


Figura 5 Coeficiente de reflexión entre la antena simétrica y la no simétrica

A simple vista se puede observar fácilmente que el patrón de radiación en la Figura 6 muestra que la apertura del lóbulo principal del plano azimut y phi son casi simétricos, a comparación de la antena de referencia.



ARTÍCULO No.
ARTÍCULO

8º CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECÁNICA Y DE SISTEMAS (CIIES 2016)

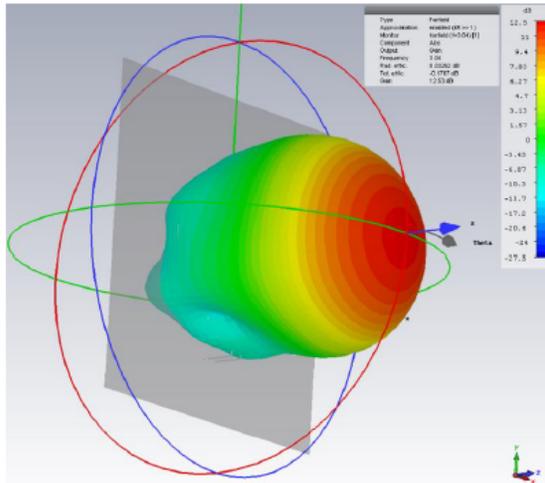


Figura 6 Patrón de Radiación en 3D ubicado en 3GHz

Aunque el patrón de la estructura parece simétrico, la ganancia es mayor al de la de referencia y que la apertura del lóbulo principal ahora también pare ser simétrico, la antena no está acoplada, es por eso que con base a los resultados obtenidos en el artículo "A 2.4 GHz Cross Rhombic Antenna for a Cube Satellite Application"[8], cuya estructura se basa en principios de una antena de cruz en donde se realizaron pruebas modificando el grosor del sustrato que a su vez es la separación entre la estructura y el plano de tierra, se mostró que esa separación puede modificar el comportamiento del coeficiente de reflexión de una antena de cruz, esta separación se modificó utilizando las bases teóricas de la cruz de Reoderer donde se propone que la separación de este plano debe estar entre $\lambda/4$ y $\lambda/25$ [9].

Por lo tanto, en la Figura 7 se muestran algunos de resultados del coeficiente de reflexión modificando la separación entre el plano de tierra donde n es el cociente de la relación antes mencionada.

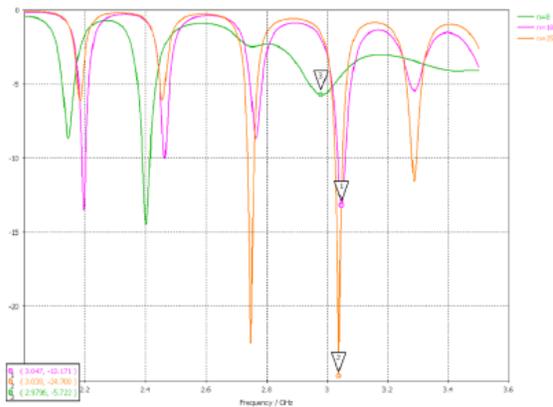


Figura 7 Resultados del coeficiente de reflexión en relación a la separación del plano de tierra

Después de varios resultados se encontró que $\lambda/18$ es un valor óptimo para esta separación ya que mantiene unos buenos parámetros de ganancia y un acoplamiento.

Al entonar esta estructura para que trabaje a 2.4GHz las dimensiones de la antena Cuasi Fractal se modificaron, las cuales se pueden observar en la Figura 8.

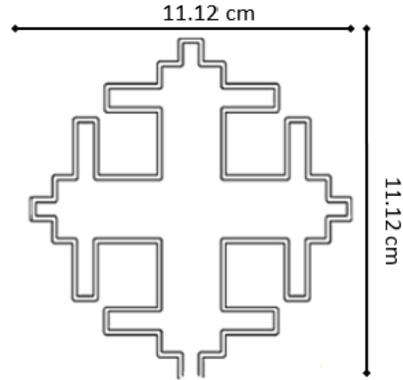


Figura 8 Dimensiones de la antena Cuasi-Fractal Simétrica a 2.4GHz

III. RESULTADOS FINALES

En la figura 9 se puede observar que existe un acoplamiento en la frecuencia de 2.4 GHz además tiene un ancho de banda de 21 MHz un coeficiente de reflexión de -15.88dB.

En la figura 10 se muestra el patrón de radiación de esta antena trabajando en 2.4 GHz con una ganancia media de 12.4 dB, además se observa que tiene un patrón directivo y simétrico.

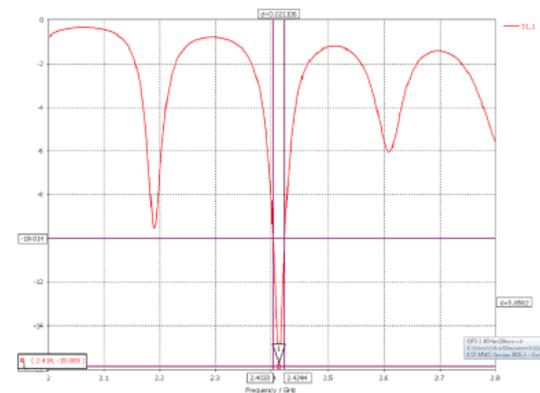


Figura 9 Resultados del coeficiente de reflexión de la estructura simétrica

En la Figura 11.a) se observa que el patrón de radiación en azimut tiene una apertura 43.4° y en el plano phi Figura 11.b) tiene una apertura de 45.5° .



ARTÍCULO No.
ARTÍCULO

8º CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECÁNICA Y DE SISTEMAS (CIIES 2016)

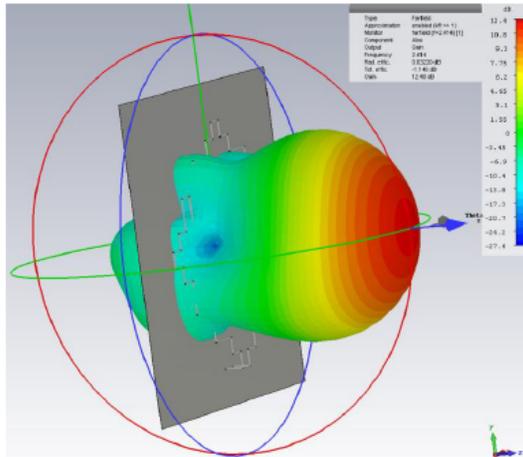


Figura 10 Patrón de radiación en 3D de la antena Cuasi-Fractal en 2.4 GHz

Con base a estos resultados se comprueba que la apertura del lóbulo principal tanto en el plano phi como el azimut son similares por lo que el patrón es casi simétrico.

IV. CONCLUSIONES

Esta antena al ser de fácil diseño, en base a los materiales con los cuales se puede construir y presentar un ancho de banda de 20 MHz una ganancia mayor a la de referencia de 12.4 dB y un acoplamiento de -15.88 dB con la optimización es una opción aceptable, de bajo costo y fácil construcción para utilizarse en la frecuencia de 2.4GHz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de estudios de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.

V. REFERENCIAS

- [1] Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence, Chapter 16, Ryszard J. Zielinski, Michał Kowal, Piotr Piotrowski, 2014
- [2] The RF and Microwave Handbook, Mike Golio, CRC press, 2001
- [3] "Antena quasi-fractal Tipo Cruz de Reoderer para una estación terrena en VHF", Edson Garduño, Jorge R. Sosa, Oskar Cerón, CNIES octubre 2015.
- [4] "Antenna Miniaturization Techniques for Wireless Applications", Divyanshu Upadhyay & Ravi Prakash Dwivedi, 2014 Eleventh International Conference on (WOCN), IEEE.
- [5] Modeling of Fractal Antennas, S. V. Krupenin, Journal of Communications Technology and Electronics, December 1, 2005,
- [6] Constantine A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, Chapter 11.6, 3rd Edition.
- [7] Steven R. Best, "A Discussion on the Significance of Geometry in Determining the Resonant Behavior of Fractal and Other Non-Euclidean Wire Antennas", June 3, 2003.
- [8] "A 2.4 GHz Cross Rhombic Antenna for a Cube Satellite Application, International Journal of Antennas and Propagation", Jorge Sosa-Pedroza, Sergio Peña Ruiz, and Fabiola Martínez-Zúñiga, Hindawi Publishing Corporation.
- [9] "The Cross Antenna: A New Low Profile Circular Polarized Radiator", A.G. Reoderer, May 1990.

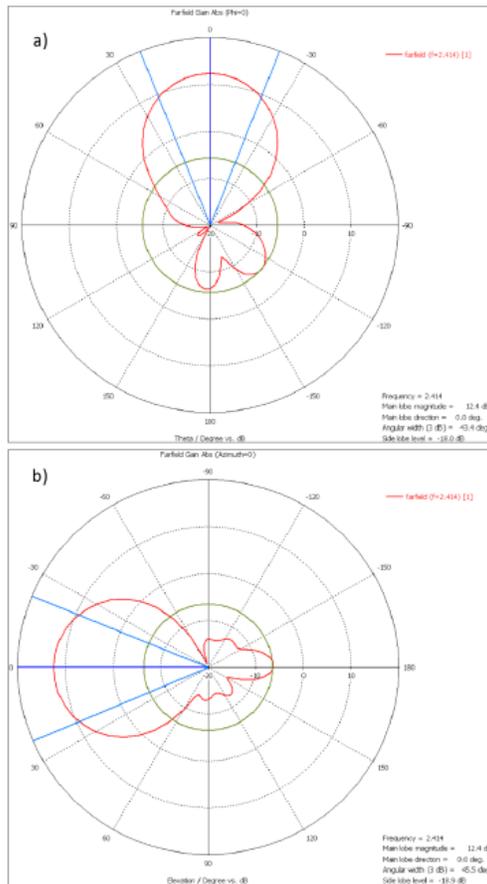


Figura 11 Patrón de radiación en 3D de la antena Cuasi-Fractal simétrica a 2.4 GHz en plano a) azimut b) phi

BIOGRAFÍA



Dr. Jorge Roberto Sosa Pedroza. Doctor en Electrónica y Comunicaciones por el IPN, tiene cursos de especialización en Comunicaciones, en la Universidad de Wisconsin, USA, y Cursos de especialización en caracterización de antenas, Universidad de California USA. Ha sido Profesor-Investigador Titular de tiempo completo de la ESIME-IPN desde hace 40 años, especializándose en Propagación Electromagnética, Antenas, Comunicaciones Satelitales y Dispositivos Pasivos



**ARTÍCULO No.
ARTÍCULO**

**8º CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS (CIIES 2016)**

de Microondas. Ha asesorado más de 200 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado y escrito más de 200 artículos de su especialidad, tanto en revistas como en participación en congresos. Ha tenido varios cargos administrativos en el que destaca la Dirección de Educación Superior del IPN. Es miembro de la Academia de Ingeniería, habiendo sido coordinador del área de Comunicaciones y Electrónica de la misma. Su trabajo incluye asesoría técnica para la industria, y el gobierno, tales como la NASA, Telcel, en caracterización de antenas, igualmente para Telecomm en la caracterización del sistema de microondas y antenas de los Satélites Solidaridad y el rediseño del sistema de antenas de los mismos satélites. También la caracterización de la cobertura de las comunicaciones del Sistema TETRA de la policía del D.F. y el diseño del sistema de comunicaciones del proyecto de cámaras del D.F. (Proyecto Bicentenario). Ha participado en proyectos para PEMEX, el Aeropuerto del D.F., el Sistema de Transporte Colectivo Metro, el Sistema de Transporte Mexibus del Estado de México, entre muchos otros.



Dr. Edson Garduño-Nolasco. Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad de Manchester, Reino Unido (2014). Maestro en Ciencias en Ingeniería de las Telecomunicaciones por el Instituto Politécnico Nacional con honores. Ha sido galardonado en dos ocasiones (2000, 2011) con la Presea "Lázaro Cárdenas de Río" por el Instituto Politécnico Nacional y obtuvo la Presea "Federico Reul Gottschald" por el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos No. 11 del IPN en el 2000. Actualmente desarrolla investigación en antenas y en ingeniería de materiales para dispositivos electrónicos de última generación.



Ing. Oskar Thomás Cerón Durán. Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica egresado la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional en el año 2015, Actualmente estudiando la Maestría en Ciencias de Ingeniería en telecomunicaciones de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación del IPN.