



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELÉCTRONICA

“ANTENA FRACTAL PARA UN CUBESAT”

Tesis

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIATURA EN ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

Rodrigo Petlachi Tochimani 201620021

Director de Tesis:

DR. RICHARD TORREALBA MELÉNDEZ

Asesora de Tesis:

M.C. EDNA ILIANA TAMARIZ FLORES (FCC)



**H. PUEBLA DE ZARAGOZA, PUE.,
ABRIL DE 2022**

Agradecimientos

En este apartado quiero agradecer en primer lugar, a mis padres. A mi madre Lourdes Tochimani Astorga, por estar ahí siempre para mí, despertarse todas las mañanas y prepararme el desayuno todos los días; mi padre Rodrigo Petlachi Méndez por siempre apoyar totalmente en todos mis estudios, esto es de ustedes. También quiero agradecer a mi tío José Guadalupe Tochimani Astorga que, desde lejos, me dio mucho apoyo.

Agradecido con la Benemérita Universidad autónoma de Puebla y la Facultad Ciencias de la Electrónica por aceptarme como un estudiante más que busca superarse y no solo lograr un objetivo profesional en la vida sino también, el buscar mejores oportunidades para vivir mejor. Gracias al Dr. Richard Torrealba Meléndez que brindó orientación, apoyo y sobre todo paciencia a lo largo de mi estancia en el Servicio Social, Práctica Profesional y en conjunto con el Dr. Richard Torrealba Meléndez, también agradezco a la M.C Edna Iliana Tamariz Flores por el apoyo en la tesis, fueron mis guías en ésta última etapa de formación académica universitaria para mi desarrollo profesional y culminar este objetivo.

Gracias a todos mis amigos y compañeros que a lo largo de estos años de vida universitaria me ayudaron no solo a pasar materias y divertirnos, sino en estar en los momentos difíciles en donde muchas veces queríamos tirar la toalla, pero seguimos adelante. Pero un especial agradecimiento a esas personas que conocí post-pandemia, han hecho que estos últimos semestres de universidad sean de lo mejor, gracias por estar ahí, son y serán un gran recuerdo.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 Estado del Arte	12
1.2 Objetivo General	14
1.3 Objetivo Específicos	14
1.4 Metodología	15
1.5 Organización	16
CAPÍTULO 2 SATÉLITES, CUBESAT Y TEORÍA DE ANTENAS	18
Introducción	18
2.1 Satélites	19
2.2 Clasificación de los Satélites	19
2.2.1 Tipo de órbita	19
2.2.2 Velocidad orbital	20
2.2.3 Tamaño	20
2.2.4 Geosíncrono	21
2.2.5 Altura	21
2.3 Nanosatélite	24
2.3.1 Tiempo de desarrollo	26
2.3.2 Costo	27
2.3.3 Órbita	27
2.3.4 Lanzamiento	27
2.3.5 Especificaciones	28
2.3.6 Aplicaciones	29
2.4 Antena	30
2.5 Teoría de las Antenas	31
2.5.1 Diagrama de Radiación	32
2.5.2 Ganancia	34
2.5.3 Eficiencia	35
2.5.4 Ancho de banda	35
2.5.5 Coeficiente de reflexión	36
2.6 Tipos de antenas	38
2.6.1 Antenas de hilo	38
2.6.2 Antenas de apertura	38
2.6.3 Array	39

2.6.4	Antenas de reflectivas -----	40
2.6.5	Antenas de microcinta -----	40
CAPÍTULO 3 ANTENA FRACTAL PARA NANOSATELITE -----		42
	Introducción -----	42
3.1	Línea de microcinta -----	42
3.2	Radiador de la antena de microcinta -----	43
	3.2.1 Tipos de alimentación -----	44
	3.2.2 Antena Fractal -----	45
3.3	Diseño de la antena Fractal -----	47
3.4	Diseño y simulación en HFSS -----	51
3.5	Fabricación -----	54
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS, RESULTADOS Y MEDICIONES -----		60
	Introducción -----	60
4.1	Resultado: Diseño, fabricación de la antena y coeficiente de reflexión -----	60
4.2	Resultado: Diagramas de radiación en 2D, 3D y medición de la ganancia -----	63
	4.2.1 Diagrama de radiación en 2D -----	63
	4.2.2 Diagrama de radiación en 3D -----	63
	4.2.3 Medición de la ganancia -----	64
4.3	Resultado: Distribución de corriente -----	66
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO -----		68
	Introducción -----	68
5.1	Conclusiones -----	68
5.2	Trabajo a futuro -----	70
APÉNDICE A -----		71
REFERENCIAS -----		73

LISTA DE FIGURAS

	Página
<i>Figura 1.1. Imagen alusiva a la IoT [35].</i> -----	11
<i>Figura 1.2. Distintos tipos de antenas para CubeSat [14].</i> -----	12
<i>Figura 1.3. Composición básica de una antena de microcinta [29]</i> -----	13
<i>Figura 1.4. Descripción grafica de las distintas geometrías o configuraciones de radiadores de una antena [1].</i> -----	13
<i>Figura 1.5. Descripción gráfica de la geometría fractal [26].</i> -----	14
<i>Figura 1.6. Geometría de antena fractal con un nivel jerárquico a uno.</i> -----	15
<i>Figura 2.1. Cinturón de Clarke.</i> -----	19
<i>Figura 2.2. Clasificación de las órbitas de acuerdo con su altura.</i> -----	21
<i>Figura 2.3. CubeSat 1U [34].</i> -----	25
<i>Figura 2.4. Variaciones de los tamaños de CubeSat [16].</i> -----	25
<i>Figura 2.5. Disección animada donde se puede observar lo que compone un CubeSat [6].</i> -----	26
<i>Figura 2.6. P-POD [17].</i> -----	28
<i>Figura 2.7. Antena de microcinta para CubeSat 1U con 4 rieles [17].</i> -----	28
<i>Figura 2.8. Descripción gráfica de las especificaciones de CubeSat 1U [7].</i> -----	29
<i>Figura 2.9. Radiación [18].</i> -----	24
<i>Figura 2.10. Antena emisora, equivalencia en Thevenin [1].</i> -----	31
<i>Figura 2.11. Sistema de coordenadas esféricas [19].</i> -----	32
<i>Figura 2.12. Diagrama de radiación en coordenada a) polar y b) cartesiana [19].</i> -----	33
<i>Figura 2.13. Diagrama de radiación a) isotrópico, b) omnidireccional y c) direccional [31].</i> -----	34
<i>Figura 2.14. Ancho de banda de una antena [22].</i> -----	36
<i>Figura 2.15. Voltaje reflejado, incidente y transmitido.</i> -----	36
<i>Figura 2.16. Antenas de hilo: a) hélice, b) dipolo y c) circular o cuadrada de bucle [1].</i> -----	38
<i>Figura 2.17. Antenas de apertura [1].</i> -----	39
<i>Figura 2.18. Array de antenas de apertura [1].</i> -----	39
<i>Figura 2.19. Antenas reflectoras [1].</i> -----	40
<i>Figura 2.20. Antena de microcinta en configuración cuadrada y hendidura en medio; fabricada en el Laboratorio de Caracterización de Microondas de la FCE-BUAP.</i> -----	40
<i>Figura 3.1. Estructura física de una línea de transmisión de microcinta [1].</i> -----	43

<i>Figura 3.2. Dimensión física de una antena de microcinta de radiador rectangular [1].</i>	43
<i>Figura 3.3. Tipos de alimentación para una antena de microcinta (contacto directo): (a) línea de transmisión, (b) sonda coaxial [1].</i>	45
<i>Figura 3.4. Tipos de alimentación para una antena de microcinta (contacto indirecto): (a) acoplamiento por apertura, (b) acoplamiento por proximidad [1].</i>	45
<i>Figura 3.5. Proceso de construcción de los fractales a) Isla de Minkowski [26], b) Bucle Koch [27].</i>	46
<i>Figura 3.6. Formación de los fractales anisotrópicos nivel jerárquico: a) nivel 1, b) nivel 2, c) nivel 3.</i>	47
<i>Figura 3.7. Primera etapa: tamaño del radiador de la antena fractal.</i>	48
<i>Figura 3.8. Segunda etapa: Inicializador.</i>	48
<i>Figura 3.9. Tercera etapa: Aparición de los fractales de orden jerárquico nivel 1 en su forma cuadrada.</i>	49
<i>Figura 3.10. Tercera etapa: Aparición de los fractales de orden jerárquico nivel 2 en forma de triángulos equiláteros.</i>	50
<i>Figura 3.11. Diseño de la antena fractal para CubeSat 1U (sin rieles).</i>	50
<i>Figura 3.12. Modelo final de la antena fractal para CubeSat 1U (con rieles).</i>	51
<i>Figura 3.13. Diseño final de la antena fractal para CubeSat 1U en HFSS.</i>	52
<i>Figura 3.14. Respuesta del coeficiente de reflexión S_{11} de la antena fractal en HFSS.</i>	53
<i>Figura 3.15. Respuesta del coeficiente de reflexión simulados S_{11} de la antena fractal de diferentes parámetros dimensionales en HFSS.</i>	55
<i>Figura 3.16. Sustrato RO4003C.</i>	55
<i>Figura 3.17. a) Impresión de fotolito para serigrafía del diseño de la antena fractal (positiva), b) Unidad de exposición de Rayos UV del Laboratorio de Caracterización en Sistemas Basados en Microondas.</i>	56
<i>Figura 3.18. Resultado de la exposición a rayos UV de la impresión en positivo sobre la película fotosensible y la placa.</i>	56
<i>Figura 3.19. Resultado final de la placa una vez expuesta con la solución reveladora alcalina.</i>	57
<i>Figura 3.20. Cara lateral de la placa (tierra).</i>	57
<i>Figura 3.21. Resultado de la placa una vez expuesta al ácido férrico.</i>	58
<i>Figura 3.22. Vista lateral del conector coaxial SMA hembra soldado a la antena fabrica</i>	58
<i>Figura 3.23. Antena Fractal sin las grietas de los rieles (marcados).</i>	59
<i>Figura 4.1. Comparación del diseño de la antena fractal: a) diseñada en HFSS, b) fabricada con RO4003C.</i>	61
<i>Figura 4.2. Medición del coeficiente de reflexión S_{11} en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.</i>	61
<i>Figura 4.3. Comparación del coeficiente de reflexión en S_{11} de la simulación en HFSS y medición en VNA.</i>	62
<i>Figura 4.4. Ganancia (Diagrama de radiación en 3D) en: a) 2.02 GHz b) 2.45 GHz, c) 2.64 GHz para $\Phi=0^\circ$.</i>	63

<i>Figura 4.5. Ganancia (Diagrama de radiación en 3D) en: a) 2.02 GHz b) 2.45 GHz, c) 2.64 GHz.</i>	64
<i>Figura 4.6. Ilustración gráfica de la medición de la ganancia.</i>	65
<i>Figura 4.7. Medición de la ganancia en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.</i>	66
<i>Figura 4.8. Distribución de corriente en: a) 2.02 GHz b) 2.45 GHz, c) 2.64 GHz.</i>	67
<i>Figura. A.1. Analizador vectorial de redes Anritsu MS4644b.</i>	71
<i>Figura. A.2. Analizador de señales ANRITSU MS2830A.</i>	72
<i>Figura. A.3. Generador de funciones ANRITSU MG3693.</i>	72

LISTA DE TABLAS

	Página
<i>Tabla I. Clasificación de los satélites de acuerdo con su tamaño [5].</i> -----	20
<i>Tabla II. Características principales de los diferentes tipos de satélites de acuerdo con su altura orbital [5].</i> -----	24
<i>Tabla III. Tabla comparativa: VSWR, coeficiente de reflexión y pérdidas por retorno [22].</i> -----	37
<i>Tabla IV. Parámetros de la antena fractal.</i> -----	51
<i>Tabla V. Parámetros anteriores y optimizados de la antena fractal.</i> -----	53
<i>Tabla VI. Comparación de las frecuencias de resonancia medidas, simuladas y el coeficiente de reflexión.</i> -----	55
<i>Tabla VI. Comparación de las ganancias medidas y simuladas en diferentes frecuencias de resonancia.</i> -----	62
<i>Tabla VII. Comparación de las ganancias medidas y simuladas en diferentes frecuencias de resonancia.</i> -----	66

RESUMEN

En el siguiente trabajo se diseña, fabrica y caracteriza una antena de microcinta con geometría fractal, la cual está formada por un radiador de cobre cuadrado y un conector coaxial para la alimentación de la antena; la conexión del puerto con la antena es mediante la técnica de alimentación directa por sonda coaxial. Lo que se destaca en esta antena es la adaptación en cuanto a tamaño, forma y características en nanosatélites del tipo cubo, en donde se pretende mejorar el tamaño del parche, haciendo más pequeño pero efectivo en ciertas dimensiones dadas y establecidas por estándares. Para lograr esto, se realizó un análisis de los parámetros matemáticos para la obtención del tamaño del parche antena y el tamaño de los fractales en cada uno de los niveles de fractal a utilizar. La antena está fabricada en un sustrato de aislamiento del tipo Rogers 4003C, el espesor es $h = 1.52 \text{ mm}$ y una constante dieléctrica $\epsilon_r = 3.55$, con una frecuencia de resonancia de 2.45 GHz como principal, una secundaria de 2.02 GHz y una frecuencia de resonancia terciaria de 2.64 GHz.

I

Capítulo: Introducción

El uso del llamado Internet de las Cosas (IoT) se está expandiendo en todo el mundo debido al gran valor que puede aportar en infinidad de actividades humanas. Todos los dispositivos conectados a Internet han ido en aumento y requieren comunicaciones Máquina a Máquina (M2M) por lo que mucha de esta comunicación tendrá que ser por satélite ya que, a pesar de la amplia disponibilidad de redes de comunicaciones terrestres en la mayoría de las regiones habitadas del mundo, hay muchas regiones que permanecen desconectadas debido a que no se justifican los costos para desplegar redes de fibra en áreas remotas escasamente pobladas o bien, es físicamente imposible desplegar estas redes como el caso del mar y el aire. Por lo anterior, las comunicaciones satelitales han sido de vital importancia en el desarrollo de la humanidad ya que permiten tener comunicación en tiempo real con una gran calidad de servicio. Por otro lado, cuando ocurren desastres naturales como huracanes y terremotos, las comunicaciones terrestres se pueden ver gravemente afectadas. Es así como las comunicaciones satelitales ofrecen soluciones para los servicios de auxilio y seguridad ya que mantienen la comunicación.



Figura 1.1 Imagen alusiva a la IoT.

Un satélite artificial de comunicaciones es un aparato repetidor de comunicaciones de uso espacial elaborado mediante un proceso de diseño, construcción, y transporte a su órbita final de operación. Los satélites de comunicaciones se clasifican por su peso generalmente, aunque también se les puede clasificar por su tamaño, órbita, uso, aplicación o área de cobertura. En la actualidad existen diversos tipos de satélites, sin embargo, el tipo de satélite que a nosotros nos concierne son los LEOs (por sus siglas en inglés “Low Earth Orbit”), debido a que son satélites muy pequeños a diferencia de un satélite convencional, tienen un costo de fabricación mucho menor y hay débil atenuación en la transmisión, también las señales tienen un mínimo retardo de propagación ya que estos satélites se encuentran más cercanos a la superficie de la Tierra. Los nanosatélites del tipo Cubo o denominados popularmente como CubeSats entran en este tipo de satélites. Estos artefactos fueron adoptados por las universidades y los centros de investigación de todo el mundo como una alternativa para realizar misiones espaciales para propósitos educativos y de investigación que de otra manera serían muy costosos y requerirían mucho tiempo de desarrollo, esto debido a que la estandarización del tamaño del satélite [7], un cubo de 10 cm x 10 cm x 10 cm de bajo costo.

Por lo anterior, en esta tesis se aborda el diseño, fabricación y caracterización de una antena del tipo parche de microcinta para un CubeSat que tenga ciertas prestaciones específicas de radiación, en cuyo caso se requiere que sea direccional y con una alta ganancia.

La antena opera en las frecuencias 2.45 GHz como principal frecuencia de resonancia, como secundaria en 2.02 GHz y terciaria en 2.64 GHz.

1.1 Estado del Arte

El espectro de radiofrecuencia es utilizado para transmitir y recibir información, haciendo uso de bandas de frecuencia de radio, por lo que, el tamaño limitado y los recursos de comunicación de los nanosatélites CubeSat, requieren soluciones avanzadas en esta área, es así como el diseño de antenas es una tarea relevante. De acuerdo con la investigación realizada, las antenas de tipo parche se utilizan principalmente para transmisiones de datos de alta velocidad para sistemas de observación de la Tierra. Ahora bien, hay diversos tipos de antenas que se pueden implementar en un CubeSat como son las antenas de parche, antenas de ranura, antenas dipolo y monopolo, antenas reflectoras, antenas reflectantes, antenas helicoidales, antenas de metasuperficie y antenas de ondas milimétricas y submilimétricas. En la Figura 1.2 se observa a) antena de microcinta de 4 elementos de alta ganancia en banda S, b) antena de microcinta con ranura de alta ganancia en banda S en MSS (estructura de superstrato metasuperficial) para CubeSat, c) antena de CubeSat para telecomunicaciones de la red de espacio profundo en banda Ka, d) antena holográfica multihaz de Si/GaAs en banda W, e) antena reflectante desplegable para comunicaciones para un CubeSat, f) antena helicoidal desplegable para nanosatélite, g) diseño e implementación de un diplexor y una antena VHF/UHF de doble banda para nanosatélites y h) reflector de malla desplegable para telecomunicaciones de red de espacio profundo en banda X y banda Ka.

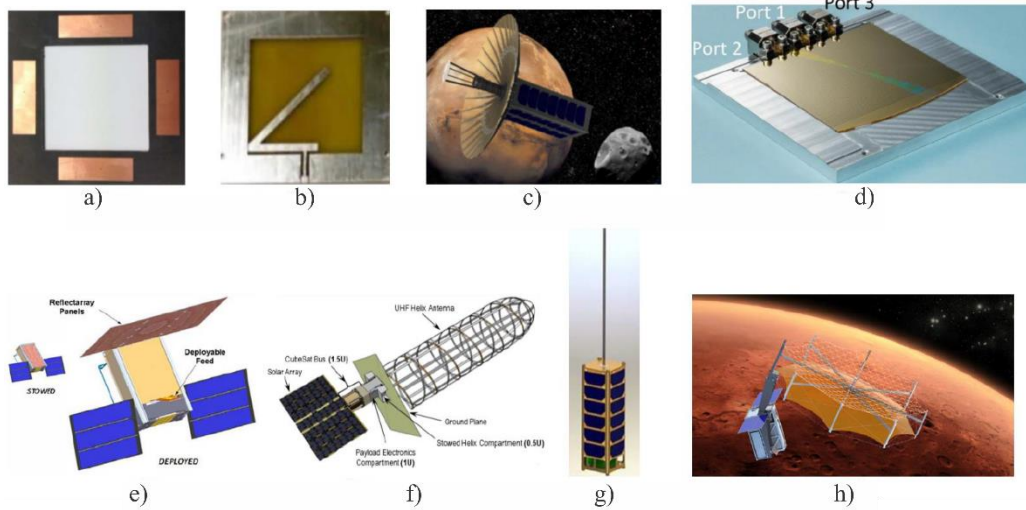


Figura 1.2 Distintos tipos de antenas para CubeSat [14].

Sin embargo, el diseño que nos interesa es de la antena de tipo parche. Las antenas microcinta ofrecen varios detalles que deben de ser considerados. Debido a que son manufacturadas con pistas en circuito impreso, pueden ser muy pequeñas y livianas, fabricación en masa y de fácil integración con dispositivos activos (Fig. 1.3).

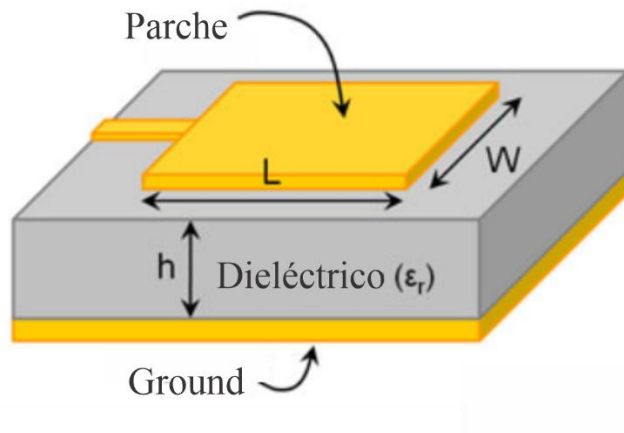


Figura 1.3 Composición básica de una antena de microcinta [29].

Existen diferentes configuraciones o formas geométricas de hacer una antena de microcinta (Fig. 1.4). Pero la que nos compete, es la antena de microcinta en su forma fractal. Una forma propuesta para aumentar el ancho de banda (o reducir el tamaño de la antena) es

mediante el uso de geometría fractal. En las geometrías planas, el ancho de banda de la antena puede mejorarse si la geometría de la antena utiliza de la mejor manera posible el área plana disponible [1].

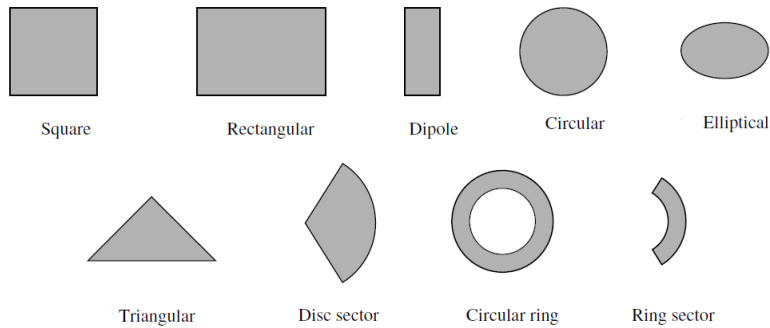


Figura 1.4 Descripción gráfica de las distintas geometrías o configuraciones de radiadores de una antena [1].

Las antenas fractales se basan en el concepto de fractal, que es una geometría generada de forma recursiva que tiene dimensiones fraccionarias por lo que su patrón se repite (Fig. 1.5) o en su defecto, es aleatorio y el resultado es que, si se realizan antenas con formas fractales, irradiarán y, a menudo, tendrán propiedades multibanda [1].

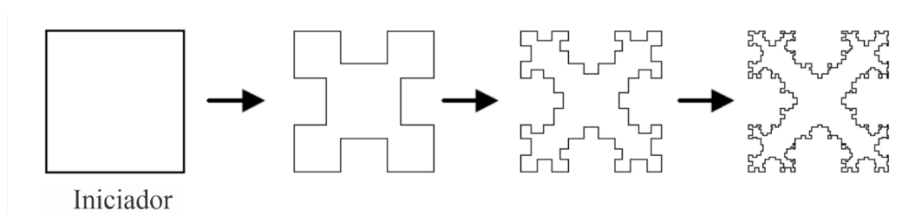


Figura 1.5 Descripción gráfica de la geometría fractal [26].

Ahora bien, se debe considerar la limitación en el tamaño de la antena, debido a que un CubeSat cuenta con unas dimensiones máximas de 10x10 cm a lo largo y ancho (la altura puede variar dependiendo del espesor del sustrato a utilizar), por lo que el sustrato no puede rebasar este tamaño. También se debe considerar el tamaño total del parche de la antena, éste no puede rebasar las dimensiones máximas de 83 mm x 83 mm debido a que este dispositivo va empotrado en una de las caras del eje Z (normalmente +Z) del CubeSat y en cada una de

estas caras [7] se cuenta con 4 rieles colocados (de una forma cuadrada con una medida de igual o mayor dimensión a 8.5 mm x 8.5 mm) en cada una de las esquinas del CubeSat.

Con lo expuesto anteriormente se proponen los siguientes objetivos.

1.2 Objetivo General

- Diseñar una antena con estructuras fractales para un CubeSat en las frecuencias de 2, 2.45 y 2.6 GHz.

1.3 Objetivos Específicos

- Diseñar una antena con estructuras fractales con un sustrato Rogers 4003C, grosor de 1.52mm y una permitividad relativa de 3.55.
- Caracterizar mediante simulación la antena diseñada obteniendo su coeficiente de reflexión, ganancia, diagramas de radiación y distribución de corriente.
- Optimizar los parámetros de la antena mediante un análisis paramétrico de las dimensiones de la antena.
- Fabricar la antena diseñada en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas.
- Caracterizar la antena fabricada mediante la medición del coeficiente de reflexión, ganancia, diagramas de radiación y distribución de corriente.

1.4 Metodología

La temática de esta tesis se centra en el diseño de una antena de microcinta con una configuración fractal para un CubeSat. A partir de una antena de microcinta existente de la literatura [4], se hace un análisis paramétrico en donde se determina el tamaño del parche de la antena, los tamaños de los fractales y el nivel de fractal a diseñar. Por lo tanto, se obtiene un primer diseño con un primer nivel de fractal con la configuración fractal cuadrada. La antena resuena a la frecuencia esperada (Fig. 1.6).

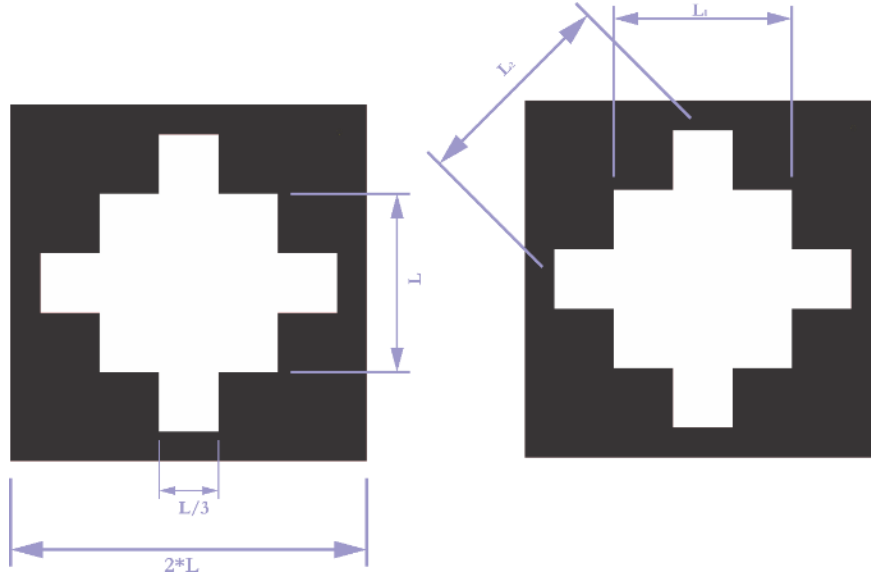


Figura 1.6 Formación geométrica de la parte radiante de la antena [4].

Se tiene que considerar que se agregará un orden jerárquico de fractal de nivel $n = 2$ además, el tamaño total de la antena se encuentra estandarizado para un CubeSat 1U; también considerar que el tamaño de parche también tiene un cierto límite de superficie sobre el sustrato. Todo lo anterior, se realizó en simulación con el software HFSS [12] utilizando el sustrato RO4003C, obteniendo la siguiente caracterización: coeficiente de reflexión, el diagrama de radiación en 2D y 3D, ganancia y distribución de corriente. Sin embargo, como el primer resultado no fue lo esperado, se hizo nuevamente un análisis paramétrico de la configuración del parche de la antena, en donde se ajustó su tamaño y en consecuencia su caracterización en simulación fue correcta.

Finalmente, la antena con la mejor prestación se procedió a fabricarla, y caracterizada en el laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE-BUAP. Con las mediciones obtenidas en dicho lugar, se compara y analiza con respecto al resultado simulado.

1.5 Organización de la tesis

Capítulo 1: Se da una introducción sobre el interés de los sistemas de comunicaciones inalámbricos. En el estado del arte de la antena se observan las diferentes configuraciones para hacer una antena de tipo parche y se describen algunos puntos muy importantes a considerar en el diseño de una antena para un CubeSat. Posterior a ello, se establecen el objetivo general y los objetivos específicos. Por último, se describe la metodología a seguir para fabricar la antena.

Capítulo 2: Se insiere los principales aspectos teóricos sobre la teoría de las antenas, tipos de antenas, las diversas configuraciones que se le pueden atribuir, por lo tanto, se presentan los conceptos de coeficiente de reflexión, diagramas de radiación, ganancia, ancho de banda y distribución de corriente.

Capítulo 3: Se delinea el diseño teórico de la antena de microcinta de parche cuadrado fractalizado, con alimentación mediante sonda coaxial. Para obtener la configuración de parche, se efectúa un análisis paramétrico de la ecuación para su diseño fractal, optimizar su tamaño y frecuencias de resonancia para cumplir con los estándares manejados. Por último, se describe brevemente la obtención de la antena física.

Capítulo 4: Descripción de la metodología para recabar los datos de la caracterización de la antena fractal para CubeSat. Se exponen y comparan el coeficiente de reflexión, diagramas de radiación, ganancia y eficiencia de la antena con respecto a los resultados experimentales.

Capítulo 5: Finalmente, se presentan las conclusiones de lo obtenido en simulación y en medición.

II

Capítulo: CubeSat y Teoría de Antenas

Introducción

Las ondas electromagnéticas están presentes en diferentes fenómenos que se pueden o no, observar en la vida cotidiana como lo son las ondas de radio, TV, la luz, radares etc. Para que una onda electromagnética se propague a través del espacio, debe existir un medio que la emita en direcciones determinadas y transforme la energía eléctrica en energía electromagnética de radiación, y de esto se encarga la antena transmisora o en su defecto, si queremos que se transforme la energía electromagnética de radiación a energía eléctrica será la antena receptora; de cualquier manera, se requiere este dispositivo para propagar este tipo de ondas. Sin embargo, cuando se requiere de una antena específicamente para cierto circuito de comunicación o en nuestro caso, para que funcione de manera correcta en un Nanosatélite del tipo CubeSat, la tarea se puede volver complicada debido a que hay que cumplir ciertos estándares que manejan asociaciones gubernamentales como la NASA, en conjunto con instituciones universitarias, como el Cal-Poly.

Aunado a lo anterior, en este capítulo se abordará los aspectos importantes de las antenas, debido a que es el componente esencial de algunos sistemas electrónicos para el envío de la información de un punto A hacia un punto B por medio del espacio, hablando específicamente de un satélite del tipo CubeSat.

2.1 Satélites

Los satélites por definición son cualquier objeto natural o artificial el cual órbita alrededor de un cuerpo celeste y desempeña diferentes funciones. Un satélite natural es un cuerpo celeste que órbita alrededor de otro de mayor masa, ambos vinculados entre sí por fuerzas de gravedad recíprocas; por ejemplo, la Luna es un satélite natural que gira alrededor de la Tierra. Mientras que un satélite artificial es un dispositivo construido por el hombre, tripulado o no, que se pone en órbita y se hace girar alrededor de un cuerpo celeste con un fin específico [5].

La necesidad de colocar objetos en el espacio, que giren alrededor de la Tierra comenzó después de la Segunda Guerra Mundial, en donde Arthur. C. Clarke difundió la idea de colocar tres repetidores separados a 120° entre sí con respecto a la Tierra, a una distancia de 36,000 km de la superficie terrestre (Fig. 2.1), sin embargo, para esa época no se contaban con los medios para diseñar un satélite en cualquier órbita. Pero esta idea impulsó a que la humanidad desarrollara múltiples soluciones para enviar satélites al espacio [5].

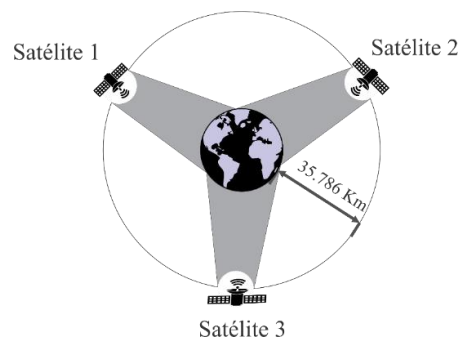


Figura 2.1 Cinturón de Clarke

2.2 Clasificación de los Satélites

2.2.1 Tipo de órbita

Una órbita es una trayectoria periódica repetitiva por lo satélites artificiales o naturales. El movimiento de un satélite artificial en órbita está fundamentado por las 3 leyes de Kepler, estas leyes dictaminan el movimiento de los planetas alrededor del Sol, las cuales

están sustentadas por la Ley de Gravitación Universal de Newton y de su segunda Ley de Movimiento [5].

Leyes de Kepler:

- ☒ Primera Ley. Los planetas se mueven alrededor del Sol siguiendo órbitas elípticas, uno de cuyos focos es el Sol.
- ☒ Segunda Ley. Para tiempos iguales, el satélite recorre áreas iguales en el plano orbital.
- ☒ Tercera Ley. El cuadrado del periodo de la órbita es proporcional al cubo de la distancia medida entre el satélite y el cuerpo celeste.

2.2.2 Velocidad Orbital

La velocidad orbital de los satélites debe ser específica, pues de ella depende en que pueda mantenerse en órbita y, por lo tanto, oponerse ante los efectos de la gravedad. Como la fuerza de gravedad ejercida por un cuerpo celeste disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia, cuanto más alto esté situado el satélite, menor será la fuerza de atracción gravitacional, por lo tanto, menor su velocidad orbital. Si la velocidad del satélite es mayor que la requerida, éste “saldría” de la órbita; por otro lado, si la velocidad es menor, el satélite “caería” y se podría quemar debido a la fricción con las partículas de la atmósfera [5].

En el caso de los satélites de orbita baja, necesitan estar a una velocidad constante de 7.35 km/s para perdurar en órbita, y para el caso de los geoestacionarios, la velocidad es de 3.075 km/s debido a la altitud a la que se encuentra con respecto a la superficie de la Tierra [5].

2.2.3 Tamaño

Los satélites se clasifican de acuerdo con su tamaño, obsérvese la Tabla I [5].

Tabla I. Clasificación de los satélites de acuerdo con su tamaño [5].

Tipo de satélite	Peso
Femtosatélites	<100 g
Picosatélites	100g – 1 kg
Nanosatélites	1 kg – 10 kg

Microsatélites	10 kg – 100 kg
Minisatélites	100 kg – 500 kg
Satélites medianos	500 kg – 1000 kg
Macrosatélites	>1000 kg

2.2.4 Geosíncrono

Estos satélites cuentan con la característica de un periodo orbital igual a la duración de 24 horas (un día), tiene una órbita circular y su plano orbital puede estar inclinado con relación al plano ecuatorial [5].

2.2.5 Altura

La altura a la que se pone en órbita un satélite respecto a la superficie de la Tierra, juega un papel muy importante para cumplir con una misión específica de manera correcta; dependiendo de dicha altura, los satélites se clasifican en diferentes tipos (Fig. 2.2). La altura de la órbita tiene relación directa con la velocidad angular a la que se mueve el satélite; a mayor altitud del satélite la velocidad angular es menor [5].

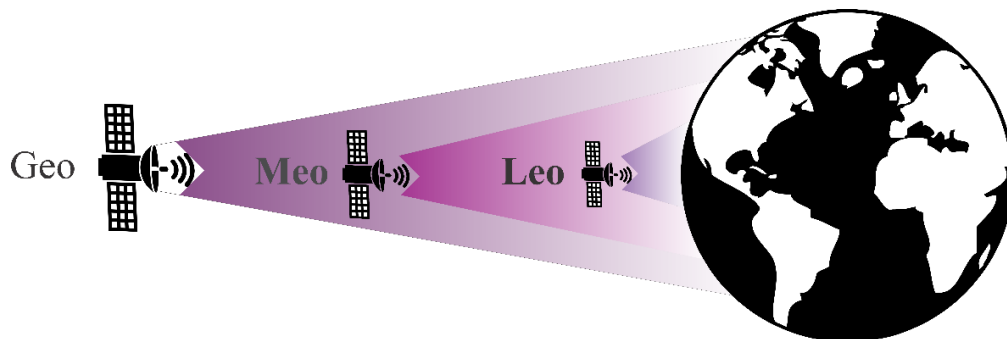


Figura 2.2 Clasificación de los satélites de acuerdo a su altura.

Geostacionario (GEO)

Los satélites GEO “Geostationary Earth Orbit” por sus siglas en inglés, son artefactos que se sitúan a 36,000 km con respecto a la superficie de la Tierra. Su velocidad orbital es de 3.075 *km/s* [5].

Una característica importante para destacar es su órbita geoestacionaria o dicho por otro nombre “cinturón de Clarke”, ya que es una órbita de forma circular con un radio de 42,164 km, con un ángulo de inclinación de 0° debido a que se localiza alrededor de la Tierra en un plano que pasa exactamente por Ecuador, los satélites se mueven en la misma dirección de la rotación terrestre, además, su periodo orbital es el mismo que el de rotación de la Tierra (24 horas). Son un caso particular de los satélites geosíncronos [5].

Como se menciona en [5], sus aplicaciones son: comunicaciones, televisión, meteorología, proyectos militares, telefonía y datos. Sus ventajas y desventajas son las siguientes.

Ventajas:

- ☒ La huella satelital es muy grande y con tan solo 3 satélites se puede cubrir casi toda la superficie de la Tierra.
- ☒ No se necesita un sistema de seguimiento satelital para las antenas de la estación terrena por lo tanto se reducen costos.
- ☒ Proporciona enlaces continuos entre las estaciones terrenas.

Desventajas:

- ☒ Debido a la gran distancia entre el satélite y la superficie de la Tierra, la propagación de la señal tiende a tener grandes retardos y pérdidas de la información por el espacio libre.
- ☒ No logran cubrir zonas de gran latitud (polos).
- ☒ Malgasta zonas de servicios debido a que cubre regiones innecesarias como océanos o regiones sin población.

Media (MEO)

Los satélites MEO “Medium Earth Orbit” operan en un rango de altura entre los satélites LEO y GEOS, la altura a la que se encuentra es de 15000 *km* aproximadamente, de

modo que permiten que estos aparatos queden ubicados entre el primer y segundo cinturón de Van Allen, evitando su radiación perjudicial [5].

Aplicaciones: comunicaciones, navegación, meteorología, localización GPS, televisión, telefonía.

Ventajas: El tiempo de retardo es pequeño, mejor que los tiempos de propagación de las ondas de los satélites GEO.

Desventajas: Los satélites no tienen una posición fija, en consecuencia, se necesitan constelaciones satelitales para una cobertura global.

Baja (LEO)

Por sus siglas en inglés “Low Earth Orbit” son cuyos satélites operan a altitudes de 1000 *km* sobre la superficie de la Tierra, sus planos orbitales pueden tener cualquier inclinación con respecto al plano ecuatorial, sus periodos orbitales están entre los 100 y 113 minutos y su órbita tiende a ser de forma casi circular [5].

Los satélites LEO deben de mantenerse en un límite superior de altura lo suficientemente bajo para evitar los niveles más potentes de radiación del primer cinturón de Van Allen y lo suficientemente alto para evitar la fricción atmosférica, de lo contrario ocurrirá una desaceleración en el satélite [5].

Como se menciona en [5], las aplicaciones son: comunicaciones, científicas, vigilancia, meteorología, teledetección, geolocalización, voz y datos. Sus ventajas y desventajas son las siguientes.

Ventajas:

- ✚ Ahorro en los costos de lanzamiento y puesta en órbita.
- ✚ Pequeño nivel de potencia de transmisión requerido.
- ✚ Débil atenuación en la transmisión por lo que los satélites y estaciones tienden a ser más pequeñas y de bajo costo.
- ✚ Se pueden cubrir posiciones de gran altitud con adecuadas inclinaciones.
- ✚ Al ser más cercanos a la superficie de la Tierra, la señal tiene un mínimo retardo de propagación.

Desventajas:

- ✚ La estación terrena puede requerir sistemas de seguimiento satelital.
- ✚ Debido a su pequeño periodo orbital, estos satélites permanecen visibles en un mismo lugar por pequeños lapsos de tiempo, por lo tanto, se requieren de constelaciones satelitales para una cobertura global.
- ✚ Su tiempo de vida útil es corto.

Este tipo de satélites de comunicaciones son de nuestro interés debido a que, la antena que se diseñó fue fabricada con el fin de utilizarla en un Nanosatélite del tipo CubeSat que se encuentra en esta categoría.

A continuación, se muestra en la Tabla II la comparación de los tres tipos de satélites artificiales que se describieron con anterioridad.

Tabla II. Características principales de los diferentes tipos de satélites de acuerdo con su altura orbital [5].

Características	LEO	MEO	GEO
Distancia del enlace satelital	~ 2000 km	~ 30 000 km	~ 72 000 km
Perdidas de propagación	Bajas	Medias	Grandes
Retardo de propagación	6.666 Ms	100 ms	240 ms
Tamaño del satélite	Pequeño	pequeño	Relativamente grande
Cobertura	Baja	Media	Grande
Tiempo de vida	3 – 7 años	10 – 15 años	10 – 15 años
Periodo orbital	< 2 horas	6 – 12 horas	24 horas

2.3 Nanosatélite: CubeSat

La masa de los pequeños satélites ronda entre 0.1– 500 *kg*, en este rango se incluyen los microsátélites con un peso entre 10 – 100*kg*, los picosatélites de 0.1 – 1 *kg* y

los nanosatélites con un peso que va de 0.1 – 1.3 *kg*. Los CubeSats pertenecen a la categoría de los Nanosatélites. El tamaño estándar de un CubeSat cuenta con unas dimensiones de $10 \times 10 \times 11.35 \text{ cm}^3$ diseñados para proporcionar $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ de volumen útil y no exceder el peso de 1.33 *kg*, con estas características se le conoce como la unidad más básica, conocida también como 1U (Fig. 2.3).



Figura 2.3 CubeSat 1U [34].

Sin embargo, los CubeSats pueden aumentar de tamaño desde 2U, 3U hasta 12U (Fig. 2.4).

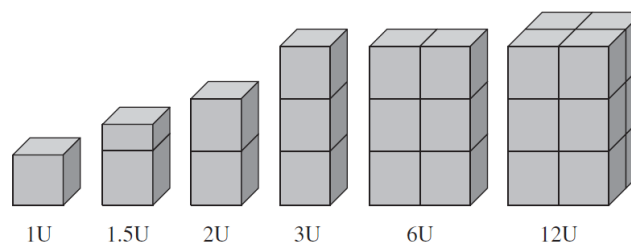


Figura 2.4 Variaciones de los tamaños de CubeSat [16].

La estandarización de los CubeSats ha llevado al uso de componentes electrónicos comerciales, haciendo que el desarrollo y construcción sea más sencillo al elegir un sinnúmero de proveedores, por lo que los costos serán inferiores con respecto a otro tipo de satélites [6].

2.3.1. Tiempo de desarrollo

Se pueden fabricar en menos de 10 meses, a diferencia de un satélite mediano o grande, pues a diferencia de los Nanosatélites, estos pueden llegar a tardar en desarrollarse entre 5 a 15 años desde que se detecta la necesidad hasta que se logre cumplir ciertos parámetros normales en la órbita adecuada. Teniendo en cuenta que la tecnología en las comunicaciones siempre está en constante desarrollo e innovación y, el satélite que en un inicio se empezó a fabricar, termine operando con tecnología de hace 10 a 15 años no se pueda actualizar. A diferencia de CubeSats, su propia naturaleza permite que los sistemas estén actualizados con lo último de la tecnología [6].

El desarrollar nanosatélites cumpliendo las características de un CubeSat (Fig. 2.5), nos da como ventaja, el lanzamiento de estos pequeños aparatos como segunda carga dentro de un cohete espacial, reduciendo el costo de lanzamiento además de no ser estorboso ni pesado [6].

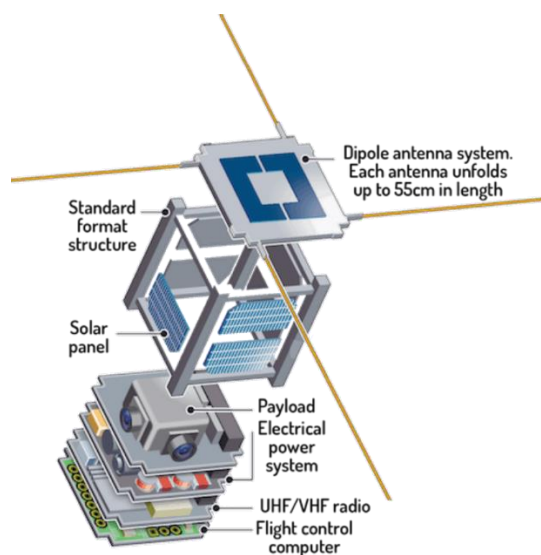


Figura 2.5 Disección animada donde se puede observar lo que compone un CubeSat [6].

2.3.2. Costo

Con lo mencionado anteriormente, el fabricar CubeSats nos permite reducir costos en los desarrollos técnicos e investigaciones. Esto ha implicado el romper la barrera de entrada hacia el espacio, llevando un crecimiento exponencial de la popularidad de los CubeSats desde su creación. [6].

Por lo que poner en órbita un nanosatélite cuesta menos de 500,000 dólares opuesto a un satélite convencional, el cual su costo puede rondar en los 500 millones de dólares, pero su bajo costo no nos dice que no sea fidedigno para las misiones [6].

2.3.3. Órbita

Su órbita por lo general se encuentra a una altura de 400 km hasta 650 km de altura con respecto a la superficie de la Tierra y viajan a 8 km/s. Con estos parámetros los nanosatélites tardan 90 minutos en dar una vuelta a la Tierra y completar un total de 14 a 16 órbitas por día. Un punto positivo de los CubeSats al encontrarse en la órbita más baja es la protección contra la radiación solar y cósmica, manteniéndose en óptimas condiciones para observación terrestre y comunicaciones [6].

2.3.4. Lanzamiento

Cuando el satélite ya fue ideado, desarrollado, probado, y listo para ser puesto en órbita se puede lanzar en conjunto con otros satélites o misiones espaciales como segunda carga, utilizando cohetes de agencias gubernamentales, lanzaderas de empresas privadas o con un enlace logístico mediante la Estación Espacial Internacional (ISS) [6].

Un elemento importante en el momento de expulsar los CubeSats son los sistemas de expulsión denominado como P-POD (Fig. 2.6), por sus siglas “Poly Picosatellite Orbital Deployer”, es el sistema desarrollado por el Cal Poly para expulsar CubeSats a su órbita desde el vehículo de lanzamiento sin poner en riegos la integridad del vehículo ni de la carga primaria. El P-POD no es más que una caja rectangular que contiene unos carriles lisos y redondos en la que se puede colocar hasta 3 Cubesats de 1U, su construcción es de aluminio adonizado para prever la soldadura en frío y proveer aislamiento eléctrico entre el CubeSat y el sistema de despliegue [17, 7].



Figura 2.6 P-POD [17].

2.3.5. Especificaciones

Los requerimientos generales se refieren a las cuestiones como la capacidad máxima de la batería, el empleo de materiales peligrosos, el sistema de propulsión, etc. (Fig. 2.8). Posterior a ellos, siguen los requerimientos mecánicos haciendo referencia a las dimensiones máximas, masa y tipo de material de la estructura del CubeSat. Dentro de estos requerimientos mecánicos se encuentran las dimensiones de los rieles del CubeSat, los rieles tendrán una anchura mínima de 8,5 mm medida desde el borde del riel hasta el primer saliente de cada cara. En la Figura 2.7 se observa una antena de microcinta con los cortes correspondientes en cada una de las esquinas, para darle espacio a los rieles y esta antena pueda ir empotrada al CubeSat 1U.

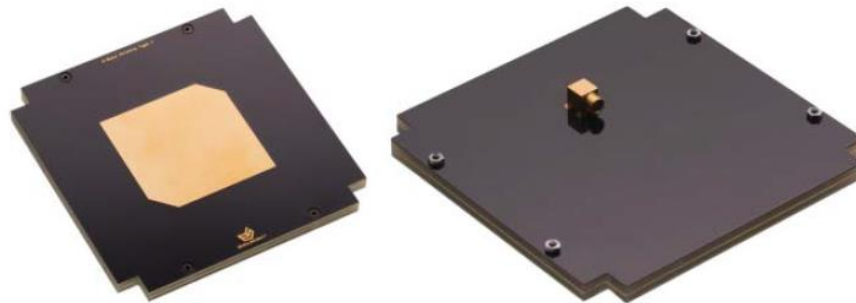


Figura 2.7 Antena de microcinta para CubeSat 1U con 4 rieles [17].

Los requerimientos eléctricos hacen referencia a sistemas de protección eléctrica y seguridad del nanosatélite. Después siguen los requerimientos de operación, resaltando las características de operación: paneles solares, despliegue de antenas, transmisión de datos,

duración de la batería, y entre otras más. Por último, el requerimiento de pruebas se refiere a que el CubeSat se le dé la luz en ser calificado para vuelo por vehículo de lanzamiento [17,7].

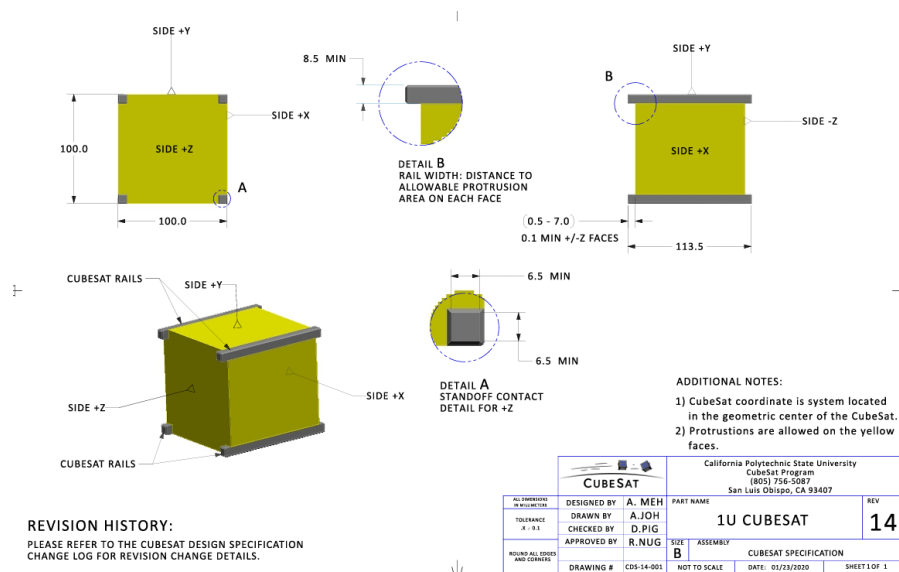


Figura 2.8 Descripción gráfica de las especificaciones de CubeSat 1U [7].

2.3.6. Aplicaciones

En las últimas dos décadas se ha roto el paradigma o la conceptualización que se tenía con respecto a la industria satelital y aunado con las grandes ventajas que representa desarrollar un CubeSat, es aceptable en numerosas aplicaciones. Las características especiales de los CubeSats implican que no puedan hacer las mismas tareas que los aparatos con mayor dimensión, las prestaciones no son idénticas, pero sí son lo suficientemente eficientes para muchas aplicaciones industriales [6].

Entre ellas se encuentran [6]:

- ☒ La observación de la Tierra: se desempeña en recoger datos y analizar el impacto humano en la agricultura. Además, en la geología y medioambiente se ha utilizado para la mejora de condiciones de vida de la población.
- ☒ En las comunicaciones: se permite crear redes de comunicación entre zonas que no cuenten con cobertura terrestre a través de una infraestructura espacial.

- ✚ La geolocalización y logística: se encuentran en aplicación de gestión de vehículos como barcos, aviones, helicópteros, etc. Muchas veces puede ser imposible localizarlos en ciertas zonas en donde no se cuente con infraestructura terrestre, ya que desde el espacio puede monitorearse a través de una constelación de nanosatélites.
- ✚ La monitorización de señales: permite monitorizar la meteorología, de esta manera, se puede proveer un posible desastre y tener información preliminar del impacto de éste.
- ✚ Aplicaciones científicas: se pueden emplear para la observación espacial, misiones interplanetarias y pruebas de sistemas en órbitas.

2.4 Antena

Las antenas son dispositivos diseñados con el fin de emitir o en su defecto, recibir información a través de ondas electromagnéticas, dichas ondas viajan por el espacio; en otras palabras, la antena es una estructura de transición entre el espacio libre y un dispositivo de guía. En otro caso, el dispositivo de guiado o línea de transmisión (Fig. 2.9) puede tomar la forma de un cable coaxial o un tubo hueco con el fin de transportar la energía electromagnética desde la fuente emisora hasta la antena o, por otro lado, de la antena hasta el receptor [18].

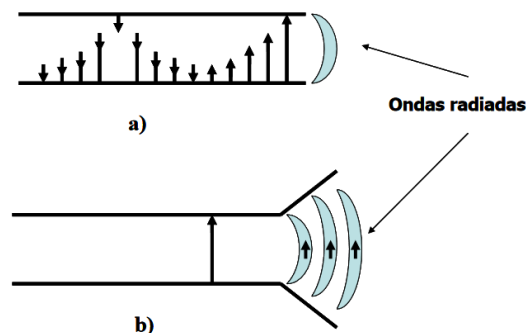


Figura 2.9 Radiación [18].

El equivalente de Thévenin de la línea de transmisión y la antena transmisora (Fig. 2.10) cuenta con un generador ideal, una línea de transmisión simbolizada por la impedancia Z_c y la antena simbolizada por $Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$; la resistencia R_L representa las pérdidas dieléctricas y de conducción asociadas con la estructura de la antena mientras que R_r se refiere a la resistencia por radiación, de otro modo representa la radiación de la antena. X_A se atribuye a la parte imaginaria de la impedancia asociada con la radiación de la antena [1].

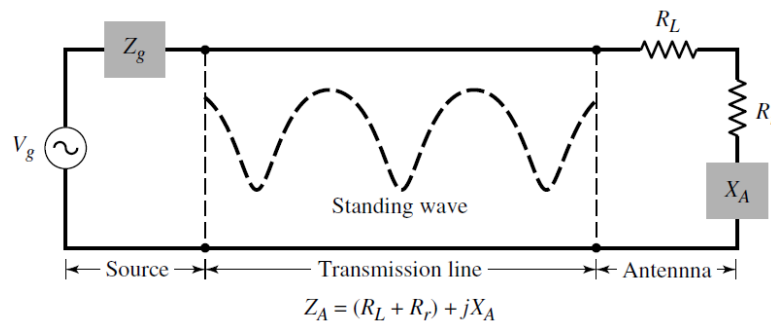


Figura 2.10 Antena emisora, equivalencia en Thévenin [1].

Si partimos en un escenario ideal, la energía generada por la fuente debería ser transferida a R_r , en la práctica no es así debido al desacoplamiento de impedancias por lo que no toda la potencia será transmitida y también por las pérdidas intrínsecas por conducción y por dieléctrico. Un efecto que ocurre a menudo en situaciones prácticas es la generación de dos tipos de ondas viajando en direcciones opuestas: ondas transmitidas de la fuente hacia la carga y las ondas reflejadas en dirección contraria [20].

2.5 Teoría de las Antenas

En los sistemas de comunicación inalámbrica, la antena es lo más importante, pues un buen diseño de la antena hace un mejoramiento en el rendimiento general de cualquier sistema electrónico inalámbrico.

Los parámetros de la antena nos describen su comportamiento, sin embargo, cabe resaltar que muchas veces estos parámetros no están relacionados entre sí y no todos estos

parámetros se necesitan especificar para explicar completamente su funcionamiento de la antena [1].

2.5.1. Diagrama de radiación

El diagrama de radiación, como lo menciona [1] es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio a una distancia fija, empleando un sistema de coordenadas esféricas (Fig. 2.11).

La antena debe estar situada en el origen y la distancia no debe variar; siempre constante. Se emplea un campo eléctrico en función de las siguientes variables angulares: θ y ϕ . θ representa el ángulo de elevación y ϕ el ángulo de Azimut con el fin de atribuir la dirección del espacio. El sistema de coordenadas define los vectores unitarios \hat{r} , $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$, estos son influenciados por las variables angulares brindando un esquema tridimensional sobre la dimensión de la antena a donde está apuntando [1].

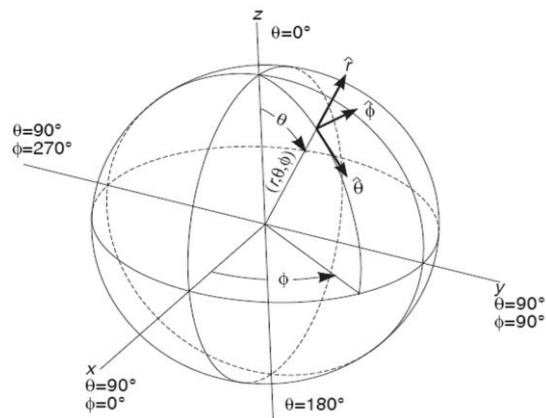


Figura 2.11 Sistema de coordenadas esféricas [19].

Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas. En la Figura 2.12a, el ángulo polar representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada. En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y el campo o la intensidad de potencia en ordenadas. La representación en coordenadas

cartesianas (Fig. 2.12b) permite observar los detalles en antenas muy directivas, mientras que el diagrama polar suministra una información más clara de la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio [1].

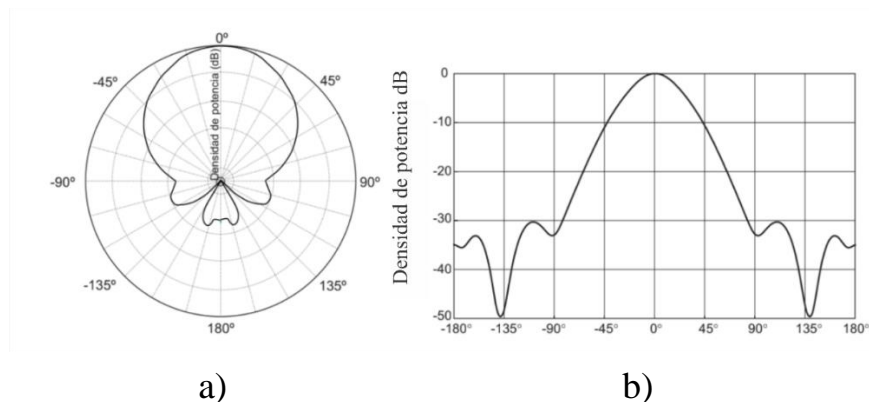


Figura 2.12 Diagrama de radiación en coordenada a) polar y b) cartesiana [19].

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas directivas, mientras que el diagrama polar suministra información más clara sobre la distribución de la potencia en sus diferentes direcciones en el espacio.

De acuerdo con [20] los diagramas de radiación las antenas pueden considerarse lo siguiente (Fig. 2.13):

- ☒ Isotrópica: Los radiadores del tipo isotrópico hacen referencia a una antena “sin pérdidas” o ideal, capaz de radiar con la misma intensidad en todas las direcciones.
- ☒ Omnidireccional: Su objetivo es irradiar o en su defecto recibir radiación en la mayor cantidad de direcciones posibles. Se considera una antena de estas características si es capaz de irradiar en todas las direcciones de un plano con una distribución relativamente uniforme; obteniéndose una escasa radiación en el eje sobrante debido a las limitaciones físicas de las antenas.
- ☒ Direccional: Un radiador direccional transmite o recibe ondas electromagnéticas con mayor eficiencia en ciertas regiones que otras, concentrando la energía en una dirección

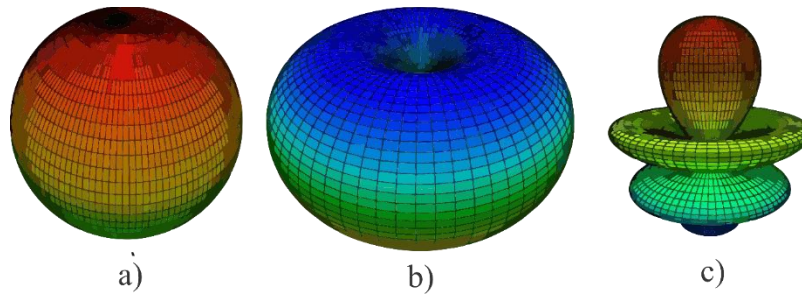


Figura 2.13 Diagrama de radiación a) isotrópico, b) omnidireccional y c) direccional [31].

2.5.2. Ganancia

Unos de los parámetros importantes a la hora de definir el rendimiento de antena es su ganancia. Está definida como la relación de la directividad de la densidad de potencia radiada y la densidad de la potencia radiada en una antena isotrópica, con una similitud en distancias y potencias entregadas a la antena [33]. Como lo describe [33], su ecuación es la siguiente:

$$D(\theta, \Phi) = \frac{P(\theta, \Phi)}{\frac{W_e}{4\pi r^2}} \quad (2.1)$$

La siguiente ecuación [33] se utiliza en caso de que no se especifique la dirección angular, siendo la ganancia la máxima radiación [33]:

$$G = \frac{P_{max}}{\frac{W_e}{4\pi r^2}} \quad (2.2)$$

En una antena de acuerdo con [33], la potencia de entrada es la potencia radiada. En un escenario ideal, si la antena tiene una eficiencia del 100%, entonces la potencia de entrada será igual a la potencia radiada, sin embargo, hay que tener en cuenta que una pequeña porción de esa potencia se absorbe, debido a las pérdidas del dieléctrico y del conductor. La ganancia es adimensional, por lo que puede expresarse en decibeles relativos a la isotrópica

(dBi) y su relación tiene que ver con la eficiencia de la antena, obsérvese la ecuación 2.3 [33]:

$$P_{rad} = \eta \cdot P_{ent} \quad (2.3)$$

2.5.3. Eficiencia

La eficiencia es un parámetro denotado por η , nos indica la capacidad de radiación de la antena, definida en [20] por la ecuación 2.4:

$$\eta = \frac{G_{rad}}{G_{ent}} = \frac{1}{G_{ent}R_{rad}} \quad (2.4)$$

Definida por la potencia radiada con respecto a la potencia de entrada o también podemos relacionarla con la conductancia de la radiación (G_{rad}), la conductancia de entrada (G_{ent}) y la resistencia de radiación R_{rad} [20].

La permitividad de los sustratos de las antenas de microcinta debe de ser alta, para que el campo electromagnético se propague dentro de él sin presentar fugas del campo. Por otro lado, el incremento de la eficiencia de la antena se logra a partir de un acercamiento de la permitividad del sustrato con respecto a la permitividad del vacío [20].

2.5.4. Ancho de banda

El ancho de banda [1] se puede considerar como un conjunto de frecuencias, dentro de este conjunto se encuentra la frecuencia central que normalmente es indicada como la frecuencia de resonancia de, en este caso, una antena estando dentro de un valor aceptable. Esta frecuencia central se ajusta dependiendo de la norma específica a emplear. En el caso de las antenas de banda ancha hace referencia a la relación entre las frecuencias superiores e inferiores con funcionamiento aceptable. Dicho de otro modo, el ancho de banda es el rango de frecuencias en la que puede trabajar una antena (Fig. 2.14).

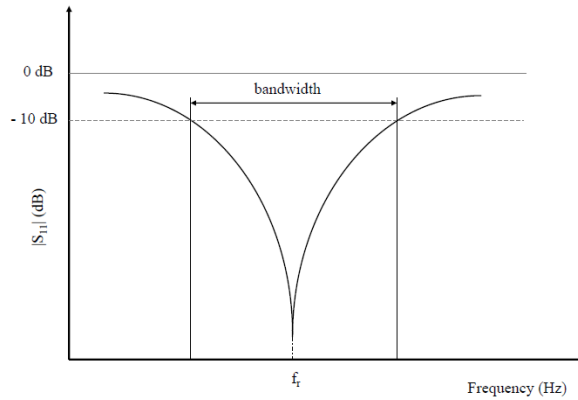


Figura 2.14 Ancho de banda de una antena [22].

Es posible aumentar la gama de frecuencias aceptable de una antena de banda estrecha si se pueden realizar los ajustes adecuados en las dimensiones críticas de la antena y en las redes de acoplamiento a medida que se modifica la frecuencia. Aunque no es una tarea fácil o posible en general, hay aplicaciones en las que esto puede lograrse [1].

2.5.5. Coeficiente de reflexión y VSWR

Se define [1] como la amplitud de una onda reflejada con respecto a la onda incidente debido al desacoplamiento de la impedancia de la carga y la impedancia característica (Fig. 2.15). Esto se describe en la ecuación 2.5:

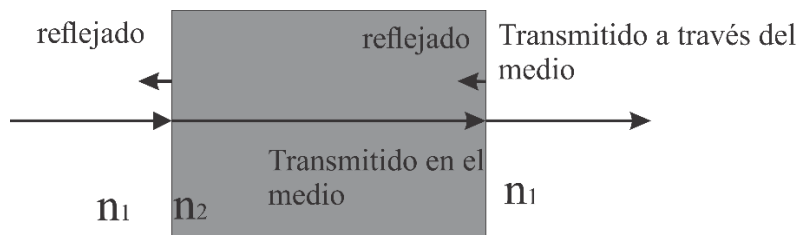


Figura 2.15 Voltaje reflejado, incidente y transmitido.

$$\frac{V_{reflejado}}{V_{incidente}} = \frac{Z_{\{L\}}}{G_{ent}R_{rad}} = v_{WSR} \quad (2.5)$$

El VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) es la relación entre las ondas estacionarias de voltaje transmitidas y su carga en el extremo. El VSWR es una medida de la eficiencia con la que se transmite la energía de RadioFrecuencia desde la fuente, a través de una línea de transmisión y la carga. Definida por la ecuación 2.6 [1].

$$\Gamma = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|} \quad (2.6)$$

Donde $V_{max} = V_{inc} + V_{ref}$ y $V_{min} = V_{inc} - V_{ref}$

Si R_L es mayor a cero significa que se está reflejando más de lo que se incide a la carga. A continuación, en la Tabla III se muestra la comparación entre el VSWR, el coeficiente de reflexión y las pérdidas por retorno [1].

Tabla III. Tabla comparativa: VSWR, coeficiente de reflexión y pérdidas por retorno [22].

VSWR	Γ	Pérdidas por retorno
∞	1.0	0.0
17.39	0.89	1.0
8.72	0.79	2.0
5.85	0.71	3.0
4.42	0.63	4.0
3.57	0.56	5.0
3.01	0.50	6.0
2.61	0.45	7.0
2.32	0.40	8.0
2.10	0.35	9.0
1.92	0.32	10.0
1.67	0.25	12.0
1.43	0.18	15.0
1.22	0.10	20.0
1.07	0.003	30.0
1.00	1.00	∞

2.6 Tipos de antenas

Hay diferentes tipos de antenas dependiendo del sistema electrónico al que se busca conectar con ello. El tamaño de las antenas depende de la frecuencia a la que trabajen, pues está relacionado con la longitud de onda (λ) de la señal. Por lo tanto, si se trabaja con frecuencias más altas la antena tiende a ser más pequeña [1].

2.6.1 Antenas de hilo

Las antenas de hilo tienden a tener varias formas, como son el dipolo (hilo recto), hélice y de bucle y estas últimas no solo tienen la forma circular sino también puede adoptar otras formas geométricas (Fig. 2.16). Estas antenas están construidas por hilos conductores, delgados y sus medidas diametrales son menores a la longitud de la onda. Las antenas de hilo se encuentran en prácticamente por todas partes, desde automóviles, edificios, barcos hasta naves espaciales, aviones, etc. [1].

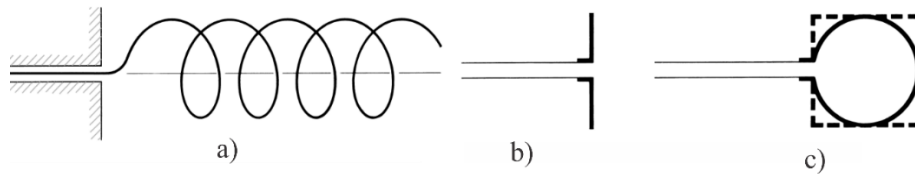


Figura 2.16 Antenas de hilo: a) hélice, b) dipolo y c) circular o cuadrada de bucle [1].

2.6.2 Antenas de apertura

Hoy en día, la creciente demanda de este tipo de antena es debido a la forma sofisticada que puede adoptar y la utilización en altas frecuencias, donde el principal campo en que se desempeñan es en aplicaciones aeroespaciales, ya que pueden colocarse al ras del exterior de las aeronaves espaciales y sirven para protegerlas del exterior y se cubren con materiales dieléctricos. Dicho por Constantine A. [1] “Estas antenas trabajan por medio una onda radiada que se consigue a partir de una distribución de campo soportada por la antena y se suelen excitar por guía de ondas” (Fig. 2.17). De acuerdo con la forma de la apertura de la antena, las bocinas pueden ser de dos tipos: piramidal y cónica [1].

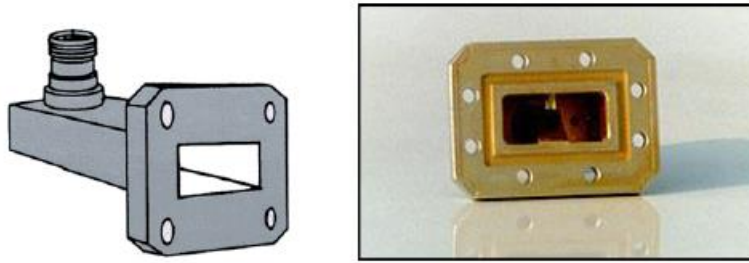


Figura 2.17 Antenas de apertura [1].

2.6.3 Array

A veces no basta con tener un solo elemento para poder alcanzar ciertas características de radiación, pero, un conjunto de antenas pueda lograr ciertas características de radiación deseadas con ciertas configuraciones (Fig. 2.18). La forma en cómo trabajan las antenas de fase o array es mediante un grupo de antenas que se conecta entre sí, haciéndola en una sola antena. Una de las grandes ventajas de utilizar estas antenas es que se puede cambiar el patrón de radiación electrónicamente sin la necesidad de mover físicamente a las antenas. Lo descrito anteriormente es debido a que en aplicaciones en radares se busca que los patrones de radiación tengan la capacidad de cambiar rápidamente para seguir un objeto en movimiento [1].

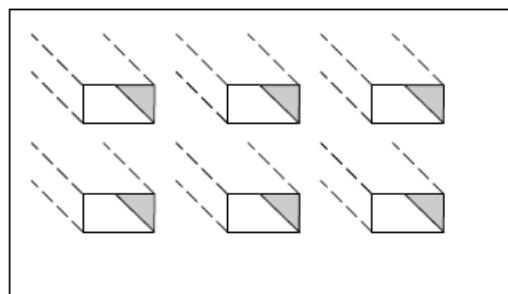


Figura 2.18 Array de antenas de apertura [1].

2.6.4 Antenas reflectivas

Las antenas reflectoras permiten buscar principalmente una comunicación a largas distancias, como es el caso de la exploración del espacio exterior y, para ello, se necesitan utilizar formas sofisticadas de antenas para transmitir y recibir señales que deben viajar millones de kilómetros (Fig. 2.19). Los tamaños de estas antenas tienden a ser de 300 metros; es forzoso que tengan grandes dimensiones para lograr altas ganancias debido a que se requiere enviar información a grandes distancias [1].

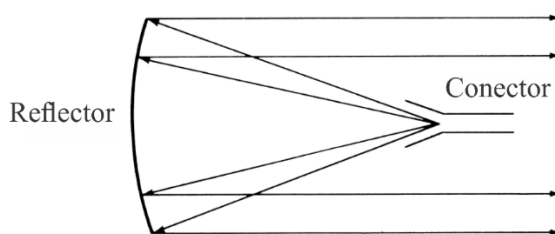


Figura 2.19 Antenas reflectoras [1].

2.6.5 Antenas de microcinta

Su popularidad inició en los años 70's y hoy en día siguen siendo una gran alternativa en muchas aplicaciones tanto comerciales como gubernamentales. Su construcción consiste en un parche metálico que puede adoptar diferentes configuraciones geométricas [1].

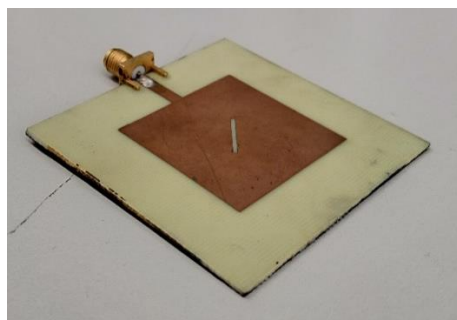


Figura 2.20 Antena de microcinta en configuración cuadrada y hendidura en medio; fabricada en el Laboratorio de Caracterización de Microondas de la FCE-BUAP.

Las antenas consisten en un parche metálico sobre un sustrato conectado a tierra; la forma de fabricación es mediante técnica de fotograbado sobre un sustrato dieléctrico laminado en cobre por ambas superficies (Fig. 2.20). Al ser tecnología plana, facilita su integración con el resto de los sistemas, reduciendo su tamaño y peso [1].

III

Capítulo: Antena fractal para nanosatélite

Introducción

Se estudiarán y analizarán las bases para el diseño de la antena de microcinta de parche rectangular partiendo como base para el diseño y fabricación de la antena de microcinta para nanosatélite. Se realiza un análisis paramétrico para obtener las dimensiones de la antena y también del tamaño del radiador. Posteriormente, se realiza nuevamente un análisis paramétrico sobre el diseño de la antena para ajustarla a las frecuencias deseadas (en caso de ser necesario) y optimizar las medidas del radiador. Los diseños son realizados en el software HFSS, donde se caracteriza y se obtienen los diagramas de radiación en 2D y 3D, distribución de corriente y ganancia.

A finalizar, se muestra la antena fractal para nanosatélite fabricada en el sustrato Rogers4003C.

3.1 Línea de microcinta

Las líneas de transmisión planas o de microcinta cuentan con una estructura en sustrato en medio de dos placas metálicas como conductores. Su geometría no es más que una línea de microcinta con cierto tamaño de ancho y largo (Fig. 3.1). El tipo de sustrato en

el que se diseñará la línea de transmisión puede variar dependiendo de la aplicación que se le quiera dar por lo que su constante dieléctrica también puede variar.

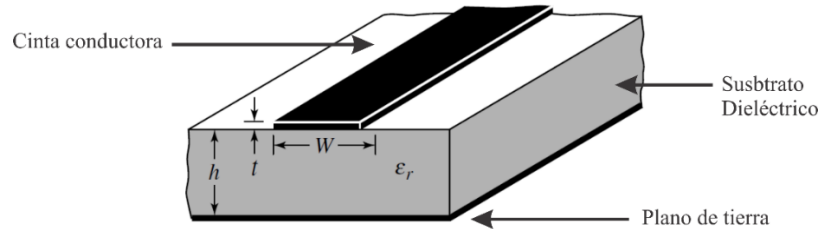


Figura 3.1 Estructura física de una línea de transmisión de microcinta [1].

Para determinar las dimensiones de una línea de microcinta, las cuales son el ancho (w) y el largo (L), se necesita conocer la constante dieléctrica ϵ_r , el espesor h , frecuencia de resonancia f_r , impedancia Z_m y el grosor de la capa conductora t .

3.2 Radiador de la antena de microcinta

La antena rectangular es fácil de analizar debido a su estructura, en consecuencia, la fabricación en este tipo de geometría tiende a ser más precisa para sustratos con grosores delgados. El radiador de forma rectangular de microcinta tiene dimensiones de largo (L) y ancho (w) determinadas por el espesor h y la constante dieléctrica ϵ_r .

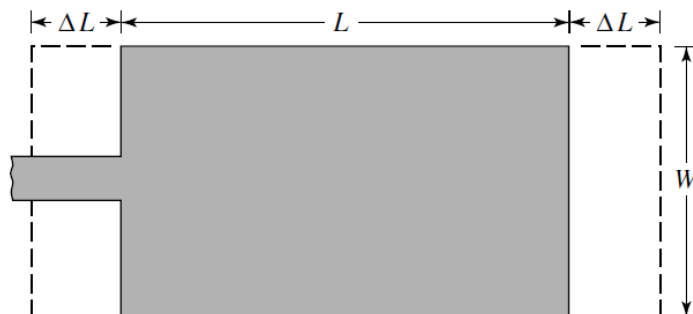


Figura 3.2 Dimensión física de una antena de microcinta de radiador rectangular [1].

El ancho de la antena se define por la siguiente ecuación, para que el radiador resuene de forma eficiente:

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

La constante dieléctrica efectiva se calcula por:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.2)$$

A partir de esto, ΔL , la longitud del efecto de borde [23], se obtiene de:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.3)$$

Finalmente, se obtiene el largo del radiador rectangular mediante:

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}} \mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

3.2.1 Tipos de alimentación

En el diseño de antenas de tipo parche de microcinta, es importante conocer el método de alimentación del radiador, por ello es importante tener en cuenta las especificaciones y su utilidad.

Los cuatro métodos más populares son: alimentación por sonda coaxial, por la línea de transmisión, alimentación por acoplamiento de apertura y acoplamiento por proximidad (Fig. 3.3 y Fig. 3.4)

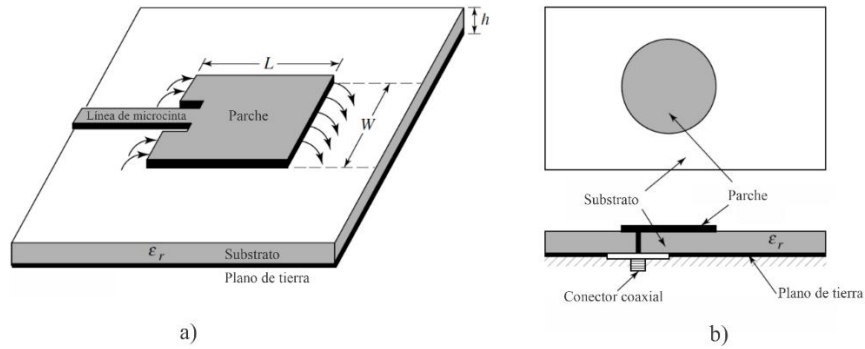


Figura 3.3 Tipos de alimentación para una antena de microcinta (contacto directo): (a) línea de transmisión, (b) sonda coaxial [1].

Se infiere que, de los 4 métodos los primeros dos son de contacto directo mientras que los últimos dos son de contacto indirecto. Los de contacto directo se realizan mediante una línea de microcinta o por un cable coaxial. Los de contacto indirecto realizan la transferencia de energía mediante acoplamientos electromagnéticos a través de los materiales dieléctricos entre la línea de microcinta y el radiador o parche.

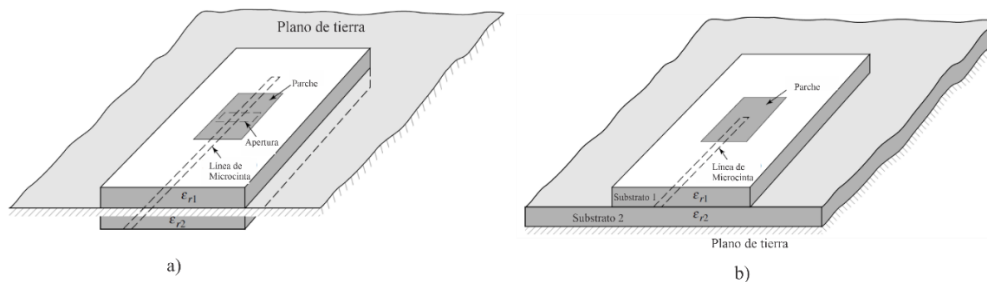


Figura 3.4 Tipos de alimentación para una antena de microcinta (contacto indirecto): (a) acoplamiento por apertura, (b) acoplamiento por proximidad [1].

3.2.2 Antena Fractal.

La geometría fractal como configuración en el radiador de la antena fractal busca tener características multibanda y, asimismo, mejorar los anchos de banda sobrepasando los límites eléctricos de las antenas por medio de una distribución geométrica eficiente [1] [25]. Sus principales aplicaciones se encuentran en sistemas de comunicaciones personales, sistemas de comunicaciones por satélite de bajo perfil, UAS (vehículos aéreos no

tripulados) y muchas más. Las antenas fractales se basan en el concepto de fractal, que es una geometría generada de forma recursiva que tiene dimensiones fraccionarias por lo que su patrón se repite o en su defecto, es aleatorio y el resultado es que, si se diseñan antenas con formas fractales, irradiarán y, a menudo, tendrán propiedades multibanda.

Los fractales se clasifican en ser deterministas o aleatorios. Los fractales deterministas, como el copo de nieve de Von Koch y de Sierpinski, se generan partir de varias copias reducidas y rotadas de sí mismas, guiadas en sí de un algoritmo recursivo (Fig. 3.5). Los fractales del tipo aleatorio generan elementos de aleatoriedad como lo son los fenómenos naturales [1].

El proceso de generación de la geometría fractal inicia con una figura inicial llamada semilla o iniciador [25]. En la Figura 3.5(a) el iniciador es un cuadro de Euclides en donde, cada uno de los cuatro lados rectos del cuadrado se sustituye por un generador que se muestra en la parte inferior como se puede observar 3 jerarquías (el iniciador o semilla no cuenta como nivel de jerarquía). En la Figura 3.5(b) la semilla es el triángulo de Euclides el tercio medio de cada lado del triángulo se sustituye por su propio generador. Se infiere que la geometría fractal final es una curva con una estructura subyacente infinitamente intrincada de tal modo que se pueden diferenciar los bloques de construcción o su nivel de jerarquía.

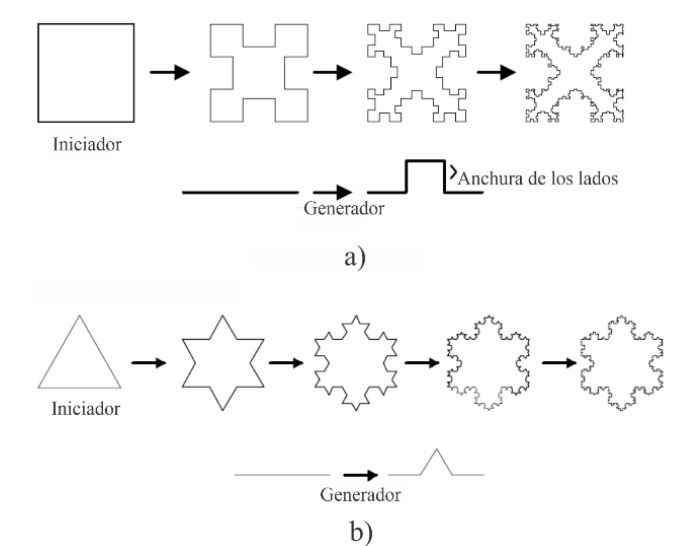


Figura 3.5 Proceso de construcción de los fractales a) Isla de Minkowski [26], b) Bucle Koch [27].

3.3 Diseño de la antena Fractal

En general, los nanosatélites de CubeSat en banda S, requieren de antenas de tamaño pequeño y alta ganancia. Mencionado por Meirambekuly [4] las antenas en la banda S debe cumplir los siguientes requisitos: coeficiente reflexión $S_{11} < -10$ dB y una ganancia superior a 2 dBi o en su defecto, con una ganancia menor a 8 dBi [16].

La geometría del parche radiante de la antena se basa en la jerarquía del fractal anisotrópico de Z. Zh. Zhanabaev [30]. De acuerdo *et al* [30] se denomina "anisótropo" porque se origina en una sola dirección además de la no deformación de los eslabones laterales (Fig. 3.6); a diferencia de muchas geometrías fractales conocidas.

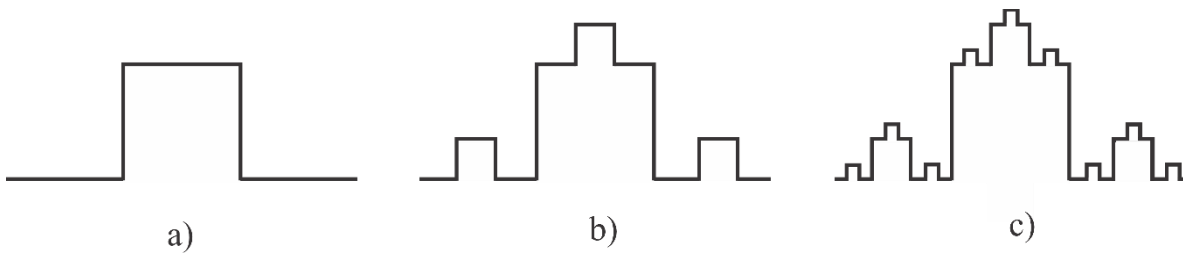


Figura 3.6 Formación de los fractales anisotrópicos nivel jerárquico: a) nivel 1, b) nivel 2, c) nivel 3.

Para iniciar el diseño de la antena del nanosatélite, lo primero fue designar la frecuencia de resonancia de la antena (f_r) a 2.45 GHz. Posterior a ello, se eligió el sustrato a utilizar y que luego fue empleado para la fabricación de la antena. El sustrato elegido es Rogers 4003c; el conocer las características del material es fundamental debido a que se obtiene la constante dieléctrica cuyo caso es $\epsilon_r = 3.55$, grosor $h = 1.52$ mm y las pérdidas tangenciales del material $\delta = 0.002$ [28]. A partir de esto, se puede adquirir el tamaño del ancho (W) y largo (L) del radiador de la antena.

Se debe tomar en cuenta que la antena debe contar con espacios libres para realizar en un futuro, los cortes cuadrados de dimensiones de igual o mayor tamaño a 8.5 mm de lado a lado, en cada una de las cuatro esquinas de la antena fractal para CubeSat (ver ejemplo en Figura 2.7 y 2.8), con el fin de que la antena quede empotrada en la cara +Z del CubeSat. En consecuencia, las dimensiones del parche del radiador de la antena no deben superar los 83mm de lado a lado.

Recordemos que la geometría del del radiador es un cuadrado y para crear la antena fractal se requieren 4 etapas. La primera etapa es calcular el tamaño del radiador, por lo tanto, para calcularlo se utiliza la ecuación (3.5):

$$f = \frac{c}{2L \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3.5)$$

Donde c es la velocidad de la luz en espacio libre. Se despeja a $2L$ y se tiene que $2L = W$ (Fig. 3.7).

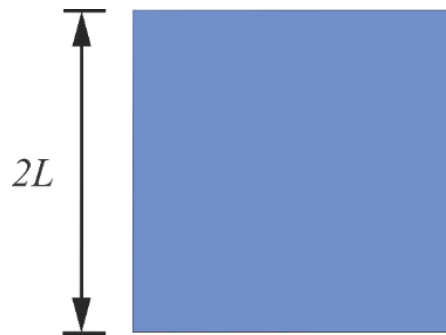


Figura 3.7 Primera etapa: tamaño del radiador de la antena fractal.

Para la segunda etapa, se hace un corte cuadrado en el centro del radiador con longitud L , (Fig. 3.8). A esto también se le conoce como el inicializador o semilla.

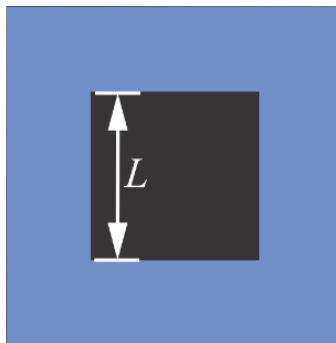


Figura 3.8 Segunda etapa: Inicializador.

A partir de aquí y con el resultado anterior, los fractales empiezan a formarse según el nivel jerárquico deseado. Como los fractales son anisotrópicos [30] y de forma cuadrada entonces, para la tercera etapa se debe considerar el orden jerárquico que uno crea conveniente para el diseño de la antena fractal; además de que cada lado del cuadrado se deformará y tendrán propiedades longitudinales de cada uno de los fractales posteriores al inicializador, según el nivel jerárquico deseado y de acuerdo con la teoría *et al* [30]. En este caso, la antena fractal para CubeSat se eligió a un orden de nivel 2. Para los fractales de orden nivel 1 se tiene que su longitud efectiva este dado por la ecuación (3.6) [4]:

$$L_2 = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{3^n} \right) \right) L \quad (3.6)$$

Sustituyendo:

$$L_2 = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^1 \left(\frac{1}{3^n} \right) \right) L \quad (3.7)$$

Por lo tanto, los lados de los fractales cuadrados del primer nivel tienen como dimensiones de $L/3$:

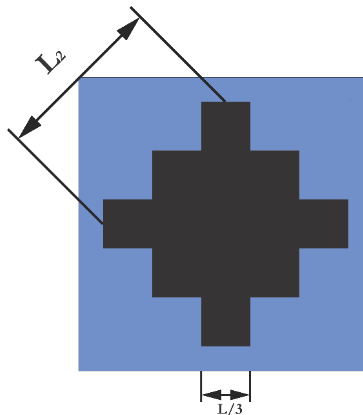


Figura 3.9 Tercera etapa: Aparición de los fractales de orden jerárquico nivel 1 en su forma cuadrada.

Para la cuarta etapa, se obtiene que la longitud efectiva del segundo nivel jerárquico de los fractales; utilizando la ecuación descrita anteriormente (3.6) y sustituyendo el número de orden jerárquico correspondiente:

$$(3.8)$$

$$L_3 = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^2 \left(\frac{1}{3^n} \right) \right) L$$

Por lo tanto, los lados de los fractales cuadrados del primer nivel tienen como dimensiones $L/9$. Sin embargo, el diseño geométrico de los fractales del segundo nivel jerárquico se opta por cambiar a triángulos equiláteros, manteniendo las mismas dimensiones longitudinales de cada uno los tres lados (Fig. 3.10).

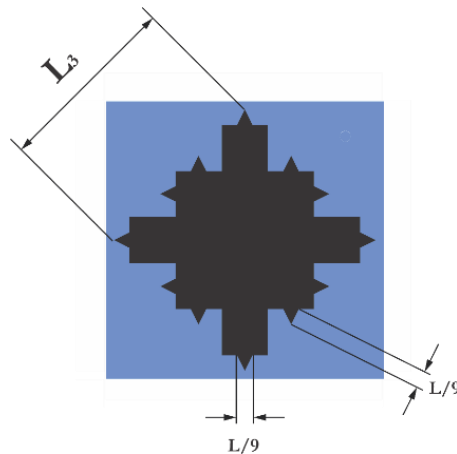


Figura 3.10 Tercera etapa: Aparición de los fractales de orden jerárquico nivel 2 en forma de triángulos equiláteros.

Una vez obtenidas las dimensiones del parche del radiador de la antena fractal, se determinó el tamaño del sustrato. Para ello, se decidió utilizarlo en una placa RO4003C con un ancho de $W_s = 100 \text{ mm}$ y de largo $L_s = 100 \text{ mm}$ (Fig. 3.11).

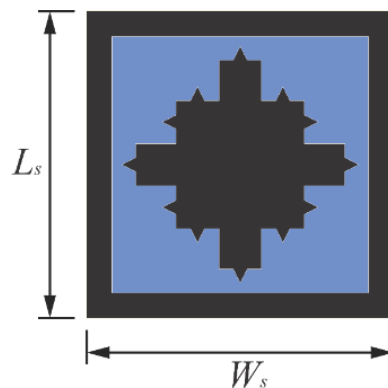


Figura 3.11 Diseño de la antena fractal para CubeSat 1U (sin rieles).

Por último, se determinaron las dimensiones de los rieles en cada una de las esquinas de la antena fractal y la posición del punto de alimentación del conector SMA hembra en la PCB. Los rieles cuentan con un ancho de $W_r = 8.5 \text{ mm}$ y de largo $L_r = 8.5 \text{ mm}$. Recordemos que estas hendiduras son muy importantes para que la antena pueda ir empotrada de la mejor manera en el nanosatélite además de cumplir con un requisito muy importante a la hora de diseñar antenas para CubeSats. Mientras que la posición de conector SMA hembra está en las coordenadas (30,31) del simulador HFSS (Fig. 3.12).

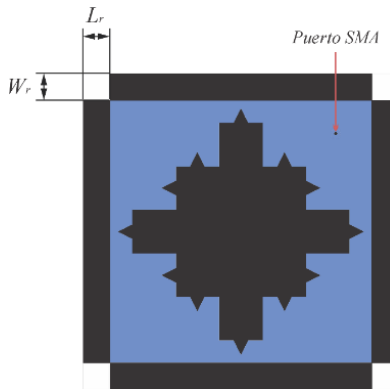


Figura 3.12 Modelo final de la antena fractal para CubeSat 1U (con rieles).

A continuación, se presentan los parámetros de la antena en la Tabla IV.

Tabla IV. Parámetros de la antena fractal.

Parámetros	Valores (mm)
L	40.6
$2 * L$	81.2
$L/3$	13.53
L_2	47.85
$L/9$	4.53
L_3	54.22
W_r	8.5
L_r	8.5
W_s	100
L_s	100

3.4 Diseño y simulación en HFSS

El diseño de la antena fractal en el software HFSS se presenta en la Figura 3.13. En la imagen no se puede apreciar la posición del conector debido a que éste va insertado desde la tierra hasta atravesar y llegar al parche del radiador.

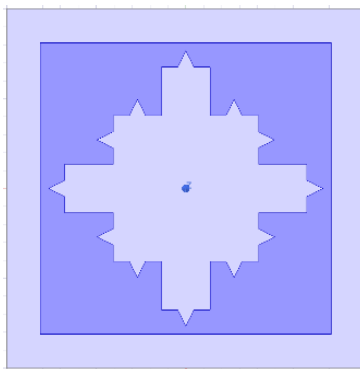


Figura 3.13 Diseño final de la antena fractal para CubeSat 1U en HFSS.

El resultado en el parámetro S_{11} nos otorga un coeficiente de reflexión aceptable dentro de los estándares para la frecuencia primaria y terciaria, mientras que para la frecuencia secundaria no es así. Además de presentar un corrimiento en las frecuencias a las que se determinaron, en este caso, la frecuencia primaria resuena a 2.48 GHz, la frecuencia secundaria a 2.03 GHz y la terciaria a 2.69 GHz, (Fig. 3.14).

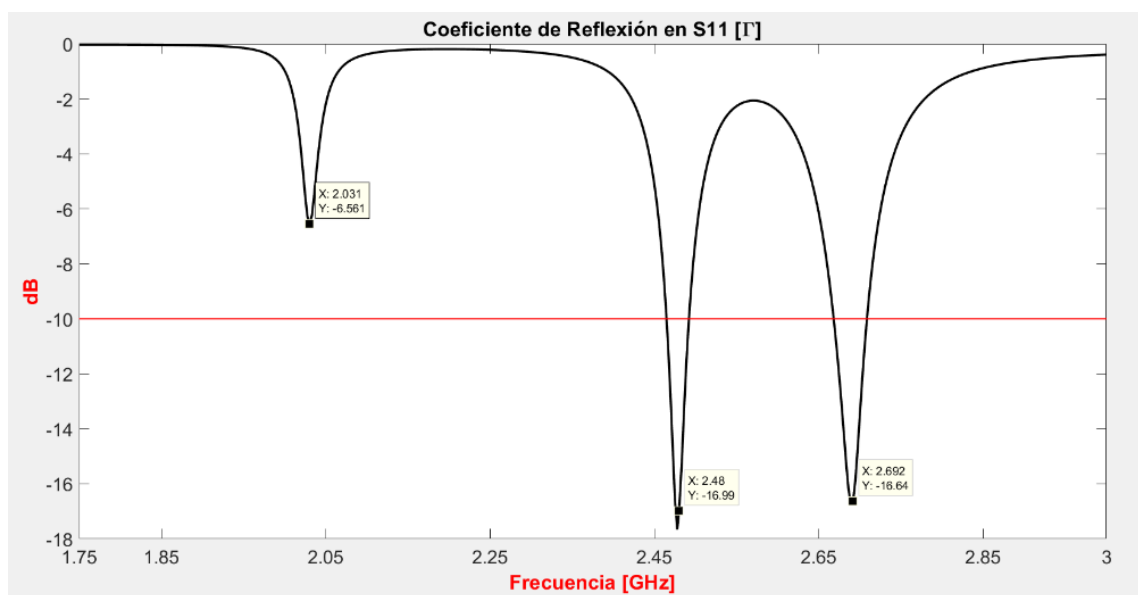


Figura 3.14 Respuesta del coeficiente de reflexión S_{11} de la antena fractal en HFSS.

Por lo tanto, para que la antena resuene a lo esperado se optó por hacer un análisis paramétrico sobre las dimensiones del parche del radiador. Esto quiere decir que tomaremos las medidas ya obtenidas y se ajustarán a la frecuencia indicada.

Sabemos que, entre más grande sea la frecuencia de una onda electromagnética su longitud de onda tiende a ser más pequeña y viceversa, entre más pequeña sea la frecuencia de una onda electromagnética su longitud de onda será más grande. Por lo tanto, este mismo concepto aplica en la teoría de antenas (microcinta).

En la Tabla V se muestran los valores optimizados de la antena fractal con 3 casos en donde varían distintos parámetros dimensionales, además, podemos encontrar en la Figura 3.15 diferentes respuestas en cuanto al coeficiente de reflexión S_{11} .

Tabla V. Parámetros anteriores y optimizados de la antena fractal.

Parámetros	Valores (mm) (SR1)	Valores (mm) Inicial (SR2)	Valores (mm) (SR3)	Valores (mm) Optimizado (SR4)
L	40.6	40.1	41.8	41.2
$2 * L$	81.2	80.2	83.6	82.8
$L/3$	13.53	13.3	13.8	13.8
L_2	47.85	47.2	49.26	48.53
$L/9$	4.53	4.4	4.6	4.6
L_3	54.22	53.55	55.83	55.08
W_r	8.5	8.5	8.2	8.5
L_r	8.5	8.5	8.2	8.5
W_s	100	100	100	100
L_s	100	100	100	100

A continuación, se muestra en la Figura 3.15 una comparación de 4 diferentes resultados en el coeficiente de reflexión con 4 diferentes parámetros dimensionales. Como se observa, el resultado en S_{11} con las medidas SR4 de la antena mejoraron considerablemente. Las 3 frecuencias de resonancia se desplazaron con respecto al primer resultado obtenido, situándose como se esperaba. Además de que la frecuencia primaria a 2.45 GHz y terciaria a 2.68 GHz se encuentran con un coeficiente de reflexión bueno, a -13.09dB y -16.26dB respectivamente. Mientras que la frecuencia secundaria de 2.0 GHz tiene un coeficiente de reflexión por debajo del estándar permitido para una antena.

También se identificó que modificar 3 parámetros dimensionales (L , $L/3$ y $L/9$) hace variar la frecuencia de resonancia de la antena a escala de MHz como es el caso de Sr1, Sr2 y Sr3. Aunque en nuestro caso particular (Sr4), se necesitó modificar solamente el tamaño del radiador de la antena L , sin la necesidad de corregir las dimensiones los fractales y encontrar la frecuencia de resonancia determinada.

Por último, no se puede diseñar una antena para CubeSat con esta geometría ni con estas características del sustrato, específicamente, a una frecuencia menor a 2.45 GHz y con el material RO4003C, debido a que el tamaño del radiador tiende a ser más grande y las dimensiones de los rieles tienden a ser menores a 8.5 mm, incumpliendo con las dimensiones estándar que se manejan para antenas de CubeSat.

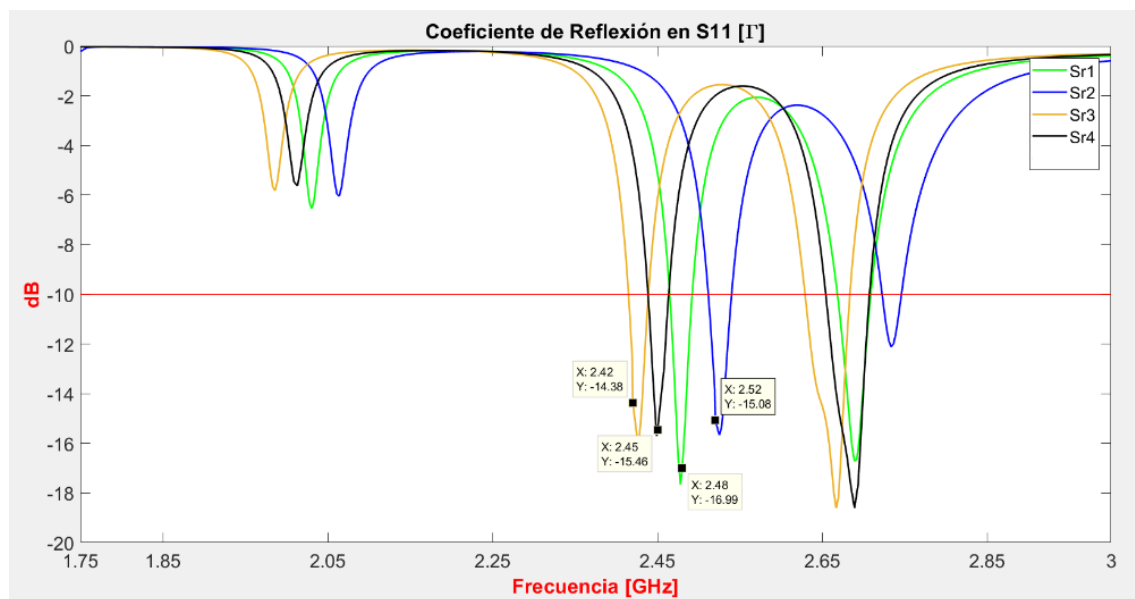


Figura 3.15 Respuesta del coeficiente de reflexión simulados S_{11} de la antena fractal de diferentes parámetros dimensionales en HFSS.

3.5 Fabricación

Una vez que se conocen las dimensiones exactas de la antena y además de obtener un resultado en simulación aceptable se procedió a fabricarla mediante la utilización de película fotosensible. El material que se utilizó fue el sustrato RO4003C (Fig. 3.16).



Figura 3.16 Sustrato RO4003C.

Primero se cortó dicho sustrato con medidas de 10 cm de largo y 10 de ancho; se limpió por los dos lados del cobre con agua y posteriormente con alcohol isopropílico para que pueda adherirse la película con mayor facilidad y no se despegue. Se cortó la película fotosensible a la medida más exacta posible, después se retiró la protección de la película fotosensible (del lado más opaco de ésta), se aplicó agua en la superficie y se colocó la película en seguida. El agregar agua en la superficie del cobre facilita no solo a fijarse sobre la placa, sino también a que cuando se pase el rodillo sobre dichos materiales se pueda extraer partículas de polvo que pudieron quedarse pegadas sobre la película o el sustrato. Después, se le aplicó calor en toda la superficie de la placa durante 2 minutos, esto ayudó a fijarse con mayor fuerza a los materiales y posterior a ello, se le pasó con un rodillo sobre la placa para extender la película, en consecuencia, se verán algunos bordes sobre la película. Finalmente, se procedió a cortarlo de tal manera que quedara la película a la medida de la placa.

Para el siguiente paso de la fabricación de la antena fractal sobre el sustrato se requiere una unidad de exposición de Rayos UV y una impresión del diseño de la antena fractal por fotolito para serigrafía (coloquialmente dicho, impresión en positivo o negativo, Fig. 3.17).

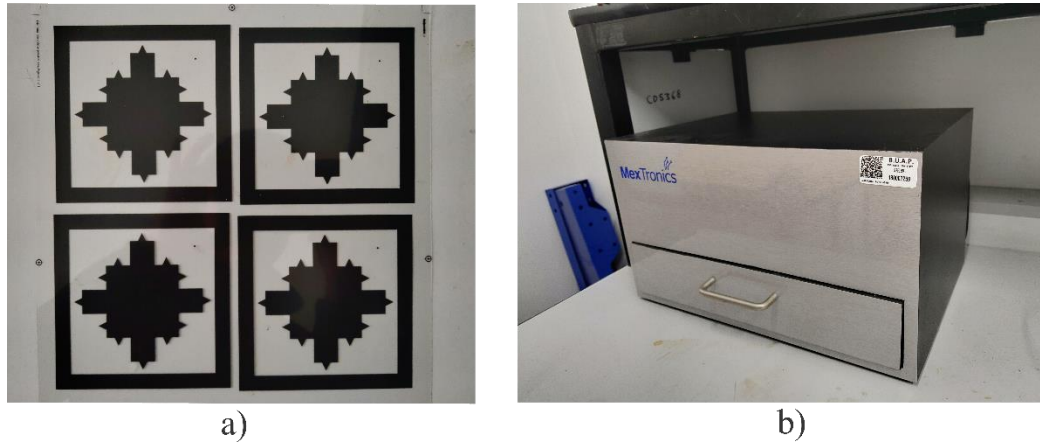


Figura 3.17 a) Impresión de fotolito para serigrafía del diseño de la antena fractal (positiva), b) Unidad de exposición de Rayos UV del Laboratorio de Caracterización en Sistemas Basados en Microondas.

Esto se hace con el fin de marcar el diseño sobre la película de una manera precisa ya que la ventaja de utilizar este tipo de impronta es la resolución de impresión a una escala de 0.1 mm, esto quiere decir que las medidas que se diseñaron en el simulador HFSS serán lo más cercanas a la realidad. El método para grabar el diseño es rociar agua sobre la superficie de la película fotosensible (adherirse de una mejor manera), colocar la impresión en positivo sobre ella y por último someter la placa a la cámara porta lámparas de rayos UV; se debe dejar expuesta por un periodo de 2:15 minutos, una vez concluido el tiempo se deja reposar la placa por 5 minutos y se separa la impresión en positivo de la película y la placa. Como se puede observar, el diseño ha quedado grabado en la película con una excelente resolución y precisión, esto se denotan en cada uno de los bordes de los fractales. Figura 3.18.



Figura 3.18 Resultado de la exposición a rayos UV de la impresión en positivo sobre la película fotosensible y la placa.

El siguiente paso es sumergir la placa en solución de agua con revelador alcalino en polvo (10gramos/litro) con la cantidad necesaria sobre una charola durante unos minutos, mover de izquierda a derecha hasta que se logre apreciar que la parte más tenue de la película se desprenda y se conserve solamente la parte mayor intensidad de color de la película, pues esta es el diseño real de nuestra antena fractal (Fig. 3.19). Posterior a ello, se enjuagó la antena fractal con agua común hasta quitar la solución reveladora alcalina.

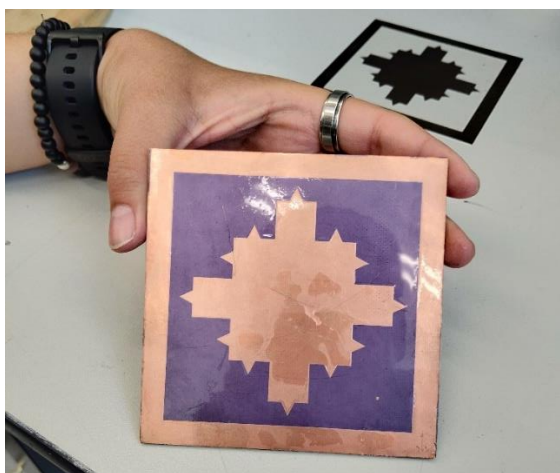


Figura 3.19 Resultado final de la placa una vez expuesta con la solución reveladora alcalina.

Después, la antena se sumerge sobre el cloruro férrico. Antes de llevar a cabo esta actuación, se pintaron los bordes externos de la cara opuesta de la antena con plumón negro permanente y también se le adosó cinta adhesiva, todo esto con el fin de conservar esa parte de la placa con cobre una vez que se sumerja con el ácido férrico, puesto que es la tierra de la antena (Fig. 3.20).



Figura 3.20 Cara lateral de la placa (tierra).

Hecho lo anterior, se introdujo la tarjeta al ácido férrico con un tiempo necesario en la que se pudiera observar que el ácido disolviera el cobre expuesto (Fig. 3.21).

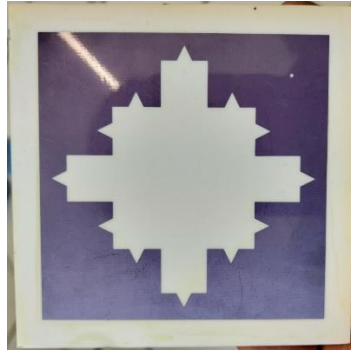


Figura 3.21 Resultado de la placa una vez expuesta al ácido férrico.

Por último, se introdujo la tarjeta en una solución reveladora alcalina con el fin de redimir la película que se encuentra en el diseño de la antena, posterior a ello, se enjuagó correctamente y se dejó secar para proseguir con la conexión del conector coaxial.

Para alimentar el radiador se utilizó el conector coaxial con una impedancia de 50Ω . Primero se hizo una incisión en la coordenada 30 mm del eje x y 31 mm del eje y (marcado en un círculo en el parche del radiador de la antena, Fig. 3.21), para que pueda atravesar desde la tierra, el sustrato y hacer la conexión del radiador el pin del conector. Posterior a ello, se procedió a soldar el pin del conector con el radiador y la tierra de la antena con la parte inferior del conector (Fig. 22).

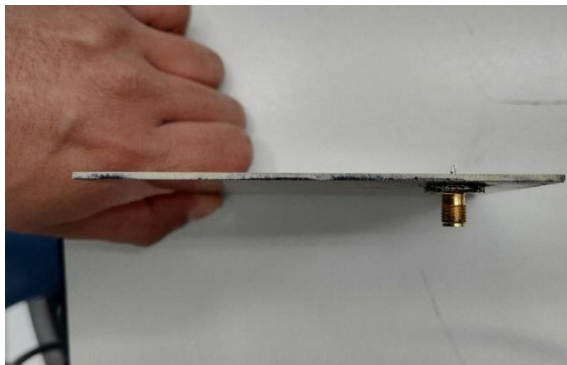


Figura 3.22 Vista lateral del conector coaxial SMA hembra soldado a la antena fabricada.

La Fig. 3.23 muestra la antena fractal se logra apreciar la marcación de los rieles en la antena; con el fin de ser una guía a la hora de hacer los cortes cuadrados en cada una de las esquinas de la antena, cabe recordar que la antena será empotrada en una de las caras del eje Z del CubeSat en caso de ponerse a prueba en el espacio.

Este es el resultado final del proceso de fabricación de la Antena Fractal para un CubeSat.

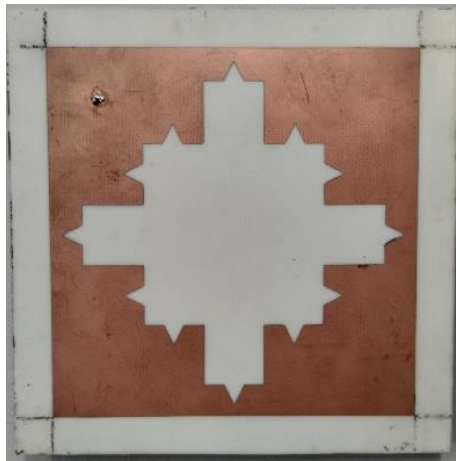


Figura 3.23 Antena Fractal sin las grietas de los rieles (marcados).

IV

Capítulo: Análisis, resultados y mediciones.

Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de la antena fractal mediante las simulaciones y mediciones. Se muestran los resultados del parámetro S , coeficiente de reflexión, ganancia, diagramas de radiación en 2D, y 3D y distribución de corriente en la estructura de la antena fractal para cada una de las tres frecuencias de resonancia. Finalmente, se realiza una comparación de los resultados de simulación con los experimentales.

4.1 Resultado: Diseño, fabricación de la antena y coeficiente de reflexión

En la Fig. 4.1 se compara el diseño de la antena fractal en el simulador HFSS y la fabricada en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE.

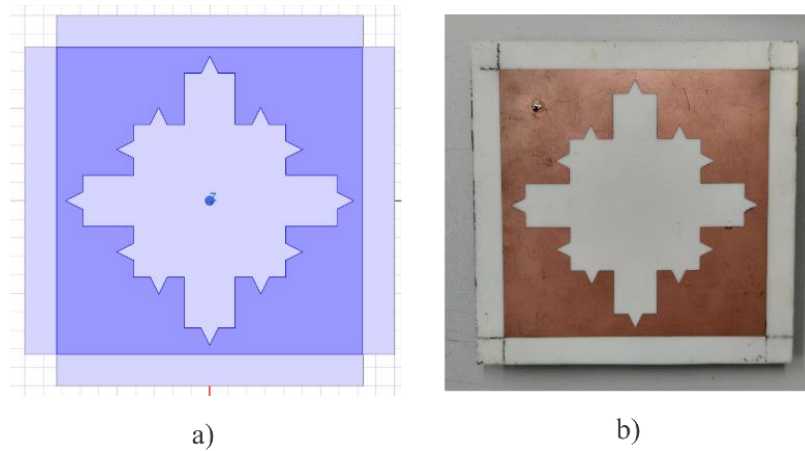


Figura 4.1 Comparación del diseño de la antena fractal: a) diseñada en HFSS, b) fabricada con RO4003C.

Para obtener el coeficiente de reflexión (S_{11}) medido de la antena, se utilizó el Analizador Vectorial de Redes (VNA, por sus siglas en inglés) de la marca **ANRITSU** de la familia **VectorStar** (Apéndice A). Esta medición se compara con la respuesta del simulador en HFSS (Fig. 4.2).

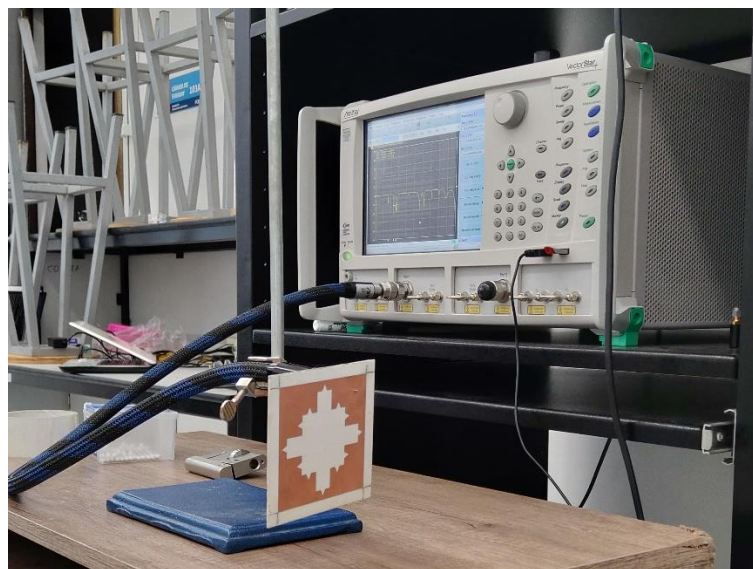


Figura 4.2 Medición del coeficiente de reflexión S_{11} en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.

En la frecuencia de resonancia secundaria, el coeficiente de reflexión simulado es de -5.6 dB en 2.013 GHz mientras que para el coeficiente de reflexión medido es de -9.41 dB, pero a una frecuencia de 2.02 GHz; presenta un corrimiento hacia la derecha de 7 MHz

con respecto a la simulada. En la tercera frecuencia de resonancia el coeficiente de reflexión simulado es de -18.6 dB a 2.689 GHz por otro lado, el coeficiente de reflexión medido es de -17.96 dB con una frecuencia de operación de 2.64 GHz; se manifiesta un corrimiento hacia la izquierda de 49 MHz con respecto a la simulada. Por último, la respuesta de la frecuencia de resonancia principal en simulación fue de -13.3 dB a 2.450 GHz y a su vez, la respuesta de la antenna medida fue de -15.4 dB a la misma frecuencia de resonancia simulada, a 2.45 GHz; ambas frecuencias se encuentran por debajo de -10 dB. El funcionamiento de la antenna es óptimo para la transmisión y recepción de las señales electromagnéticas en las tres frecuencias de resonancia. En la Tabla VI se muestran los resultados comparativos.

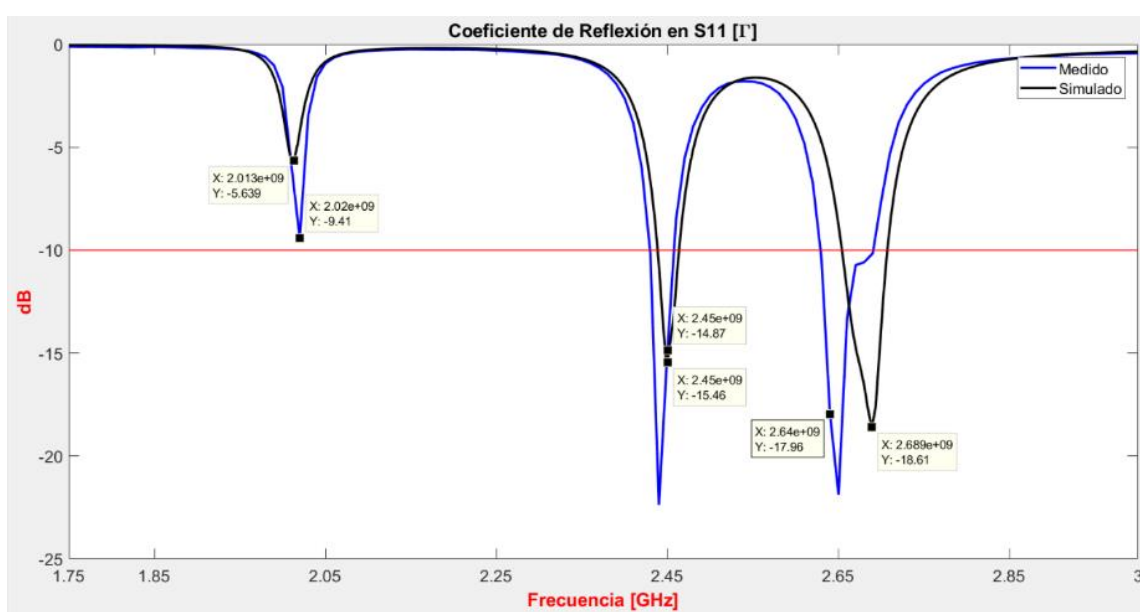


Figura 4.3 Comparación del coeficiente de reflexión en S_{11} de la simulación en HFSS y medición en VNA.

Tabla VI. Comparación de las frecuencias de resonancia medidas, simuladas y el coeficiente de reflexión.

Frecuencia principal		Frecuencia secundaria (GHz)		Frecuencia Terciaria (GHz)	
Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido
2.450 GHz	2.450 GHz	2.013 GHz	2.020 GHz	2.689 GHz	2.640 GHz
2.444-2.472 GHz (2.8 MHz)	2.43-2.458 GHz (28 MHz)	N/A	N/A	2.663-2.719 GHz (56 MHz)	2.63-2.69 GHz (60 MHz)
-15.46 dB	-14.87 dB	-5.63 dB	-9.41 dB	-18.61 dB	-17.96 dB

4.2 Resultados: Diagramas de radiación en 2D, 3D y medición de la ganancia

4.2.1 Diagrama de Radiación en 2D

En la siguiente Figura 4.4, se comparan los diagramas de radiación en 2D simulados y los diagramas de radiación en 2D medidos de la antena, ambas mediciones en el plano E, para cada una de las tres frecuencias de resonancia; para $\Phi = 0^\circ$.

Las variaciones en las mediciones del diagrama de radiación se deben a la incertidumbre presentada debido a que las mediciones no se realizaron en un ambiente controlado como una cámara anecoica de microondas.

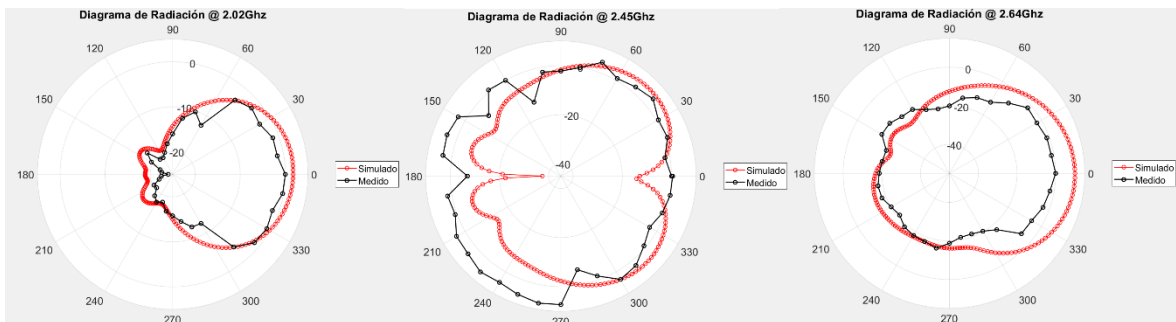


Figura 4.4 Ganancia (Diagrama de radiación en 3D) en: a) 2.02 GHz b) 2.45 GHz, c) 2.64 GHz para $\Phi = 0^\circ$.

4.2.3 Diagrama de Radiación en 3D

A continuación, se exhibe la ganancia de la antena en las tres diferentes frecuencias de resonancia obtenidas en HFSS (Fig. 4.5). En la frecuencia de 2.02 GHz se observa que una característica omnidireccional, la máxima radiación se centra desde la parte central hacia dos lados opuestos de la antena, tiene una ganancia de 5.5dB. Para 2.45 GHz como frecuencia de resonancia principal, tenemos una característica omnidireccional total en donde la máxima radiación se centra en la geometría del inicializador hasta distribuirse en cada una de las 4 esquinas de la antena fractal, su ganancia es a 5.6dB, lo que significa una concentración a lo largo del plano XYZ. Por último, en la frecuencia de resonancia terciaria a 2.64 GHz también representa una característica omnidireccional un tanto parecida a la frecuencia secundaria, sin embargo, éste se pronuncia de una mejor manera; cuenta con una ganancia de 10 dB y su

máxima radiación se centra en medio de la antenna hacia uno de los 2 lados opuestos de la antenna.

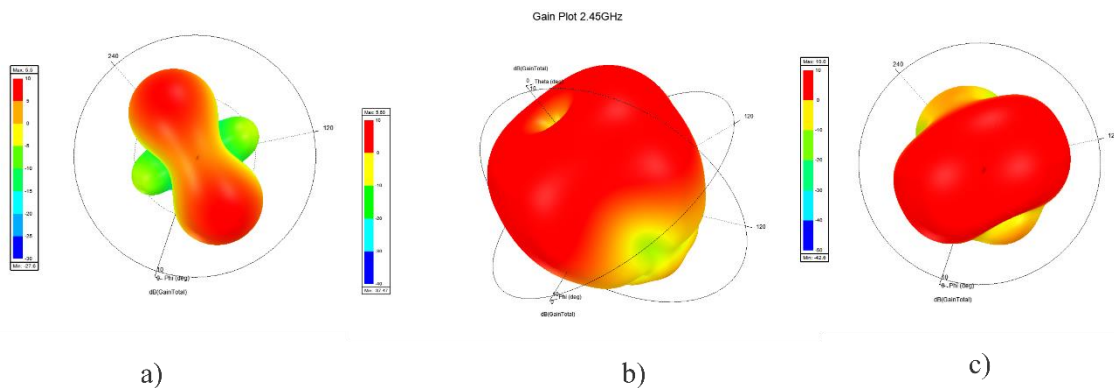


Figura 4.5 Ganancia (Diagrama de radiación en 3D) en: a) 2.02 GHz b) 2.45 GHz, c) 2.64 GHz.

4.2.3 Medición de las ganancias

Para realizar la medición de las ganancias se empleó el método de las dos antenas [1] (Fig. 4.6). Este método consiste en usar dos antenas: una transmisora conectada a un generador de funciones y la otra antenna receptora conectada a un analizador de espectros. En este caso la antenna transmisora es una antenna *AARONIA HyperLog7060* que se conecta al generador de señales *ANRITSU MG3693* y la antenna receptora es la antenna fractal para CubeSat que se conecta al analizador de señales *ANRITSU MS2830A*. Los parámetros necesarios para hacer la medición de la ganancia son los siguientes:

- ⊕ G_{ot} = Ganancia de la antenna transmisora (dB)
- ⊕ G_{or} = Ganancia de la antenna receptora (dB)
- ⊕ P_t = Potencia de la antenna transmisora (W)
- ⊕ P_r = Potencia de la antenna receptora (W)
- ⊕ R = Separación de las antenas (m)
- ⊕ λ = longitud de la onda (m)

Entonces:

$$G_{or} = 20 \log_{10} \left(\frac{4 \pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) - G_{ot}$$

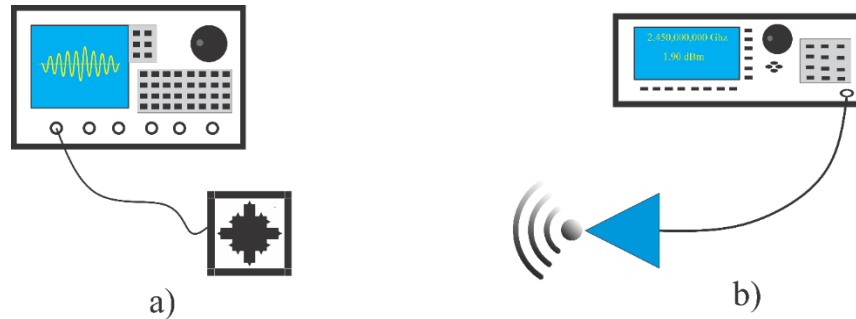


Figura 4.6 Ilustración gráfica de la medición de la ganancia.

Antes de iniciar con la medición, se deben conocer las pérdidas que presentan los cables, para ello se conectó directamente el generador de funciones con el analizador de espectros y se obtuvo que hay una pérdida del cable Transmisor de -1.9 dB, para el cable Receptor de -2.5 dB; por lo tanto, el nivel de potencia del generador de funciones fue establecido a 1.9 dBm asegurando que la antena emita una potencia de ganancia igual a 0 dBm. Por otro lado, a la potencia obtenida en el analizador de espectros se le suma las pérdidas presentadas en el cable Rx. Entonces:

- ⊕ $G_{ot} = 4\text{db} - 4.5\text{dB}$ (depende de la frecuencia a la que se trabaje, más información ver hoja de especificaciones de la ganancia de la antena [32])
- ⊕ $P_t = 0.001\text{W}$
- ⊕ $P_r = 3.16e^{-7}\text{W}$ (2.02 GHz), $3.54.e^{-7}\text{W}$ (2.45 GHz), $1.25e^{-6}\text{W}$ (2.64 GHz)
- ⊕ $R = 1.7\text{m}$ (2.02 GHz), 1.4m (2.45 GHz), 1.2m (2.64 GHz)
- ⊕ $\lambda = 0.1451\text{m}$ (2.02 GHz), 0.1224m (2.45 GHz), 0.1136m (2.64 GHz)

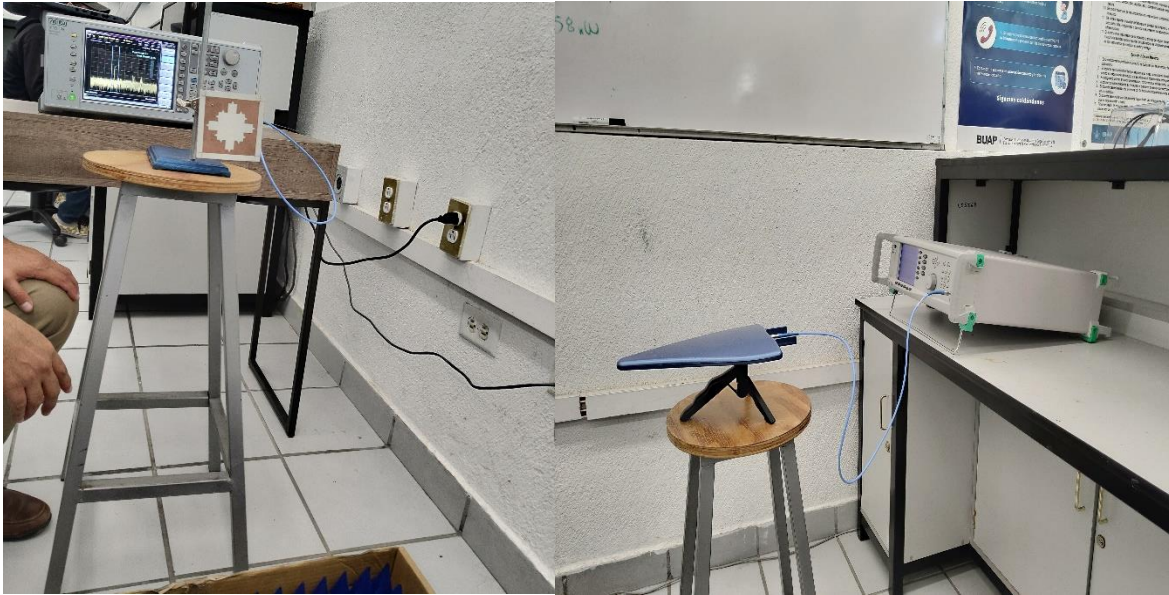


Figura 4.7 Medición de la ganancia en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.

De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados, presentados en la tabla VII, para cada una de las frecuencias de resonancia además de compararlos con el resultado adquirido en los diagramas de radiación en 3D. Las ganancias medidas fueron menores con respecto a las ganancias simuladas, lo cual representa una diferencia de aproximadamente de 1 dB- 1.5 dB, por lo tanto, la antena fractal cumple con la ganancia estimada.

Tabla VII. Comparación de las ganancias medidas y simuladas en diferentes frecuencias de resonancia.

	Frecuencia secundaria (2.02 GHz)	Frecuencia principal (2.450 GHz)	Frecuencia Terciaria (2.640 GHz)
Simulación (dB)	5.5	5.6	10
Medido (dB)	4.65	4.14	8.95

4.3 Resultado: Distribución de la corriente

En la Figura 4.8 se expone la distribución de corriente de la antena para las diferentes frecuencias.

En la frecuencia de resonancia de 2.45 GHz se observa la máxima distribución de corriente en las cuatro zonas del radiador de la antena, para los demás casos, se tiene que a

2.02 GHz la corriente fluye en 2 lados opuestos y, cuando la antena resuena a 2.64 GHz esta tiende a hacer lo mismo en las zonas contrarias de 2.02 GHz, pero con mayor presencia de corriente en dichas zonas.

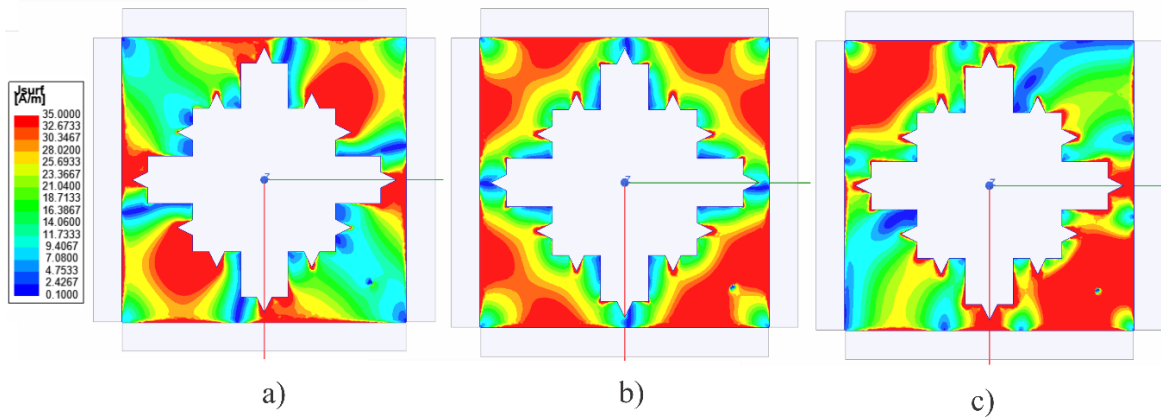


Figura 4.8 Distribución de corriente en: a) 2.02 GHz b) 2.45 GHz, c) 2.64 GHz.



Capítulo: Conclusiones y trabajo a futuro.

Introducción

En este capítulo final de la tesis, se presentan las conclusiones y aportaciones obtenidas durante el desarrollo de la tesis, para cumplir con los objetivos de esta.

5.1 Conclusiones

Las antenas son indispensables para las comunicaciones inalámbricas y en este caso particular, para los satélites pequeños del tipo CubeSat. En el mundo contemporáneo las tecnologías avanzan de una manera acelerada en donde se requiere que funcionen en bandas de frecuencia específicas. De igual manera, los dispositivos móviles y otros transceptores son diseñados con características multibanda. Por consiguiente, es importante el desarrollo e innovación de antenas con estas particularidades, además de hacerlas más eficientes y miniaturizarlas.

En esta tesis se ha centrado en el estudio, diseño y fabricación de una antena con geometría fractal con una jerarquía de segundo nivel para un CubeSat con el sustrato RO4003C.

La antena propuesta opera en tres frecuencias de resonancia a 2.02 GHz, 2.45 GHz y 2.64 GHz con un coeficiente de reflexión de -9.41 dB, -15.46 dB y -17.96 dB, una ganancia

de 4.65 dB, 4.14 dB y 8.95 dB respectivamente. La antena cuenta con un ancho de banda para la frecuencia principal de 28 MHz (2.43 GHz – 2.458 GHz) y un ancho de banda para la frecuencia terciaria de 60 MHz (2.63 GHz – 2.69 GHz). La respuesta de la antena fractal se desplazó en las frecuencias de resonancia secundaria y de resonancia terciaria con respecto a lo adquirido en simulación, sin embargo, cumple con el objetivo especificado de la tesis. El uso de la geometría fractal permite aprovechar de una manera óptima la superficie del área del sustrato además de obtener propiedades multibanda.

En el simulador se modificaron las longitudes de el parche del radiador y los fractales de la antena con base en un análisis paramétrico de las ecuaciones descritas en el Capítulo 3, se realizaron tres análisis paramétricos sobre las dimensiones del primer diseño de la antena con un total de cuatro diseños de la antena como se explicó en el Capítulo 3. Se observó que el parámetro que modifica la frecuencia de resonancia principal de la antena fue L y $L/2$. También, el software permite el uso de herramientas de utilidad como la obtención de la distribución de corriente y los diagramas de radiación en 3D para cada una de las tres frecuencias de resonancia de la antena. Con esto, se observó que la forma de como radia la antena es de forma direccional en las tres frecuencias de resonancia de la antena, por lo tanto, se adecua para el propósito al que fue diseñada.

Con respecto a la implementación de la antena se utilizó el método de fabricación por medio de película fotosensible. Este proceso de fabricación conllevó una serie de pasos específicos para elaborar la antena, la precisión de la impresión del diseño de la antena en el sustrato RO4003C permite tener una resolución de 0.1mm, como resultado se obtiene una fidelidad en las dimensiones de la antena fabricada con respecto a las dimensiones de la antena simulada. La forma de como proveer señales electromagnéticas a la antena una vez concluida su fabricación, fue mediante el método de alimentación por sonda coaxial en el punto más óptimo.

Por otro lado, la medición del coeficiente de reflexión, de la ganancia y los diagramas de radiación en 2D de la antena, fueron obtenidos de manera experimental en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas. La obtención de los resultados respecto al diagrama de radiación se obtuvo en un ambiente no controlado y con presencia de sistemas interferentes. Además, el posicionamiento de las antenas para medir

los diagramas y la ganancia fue realizado de manera manual donde la precisión del movimiento tiene una alta incertidumbre y, a pesar de ello, se muestra una concordancia en los resultados medidos con respecto a los simulados.

El equipo de instrumentación del laboratorio fue importante para la medición de los parámetros; gracias a ello nos otorgaron exactitud y precisión como fue el caso del Analizador de Redes Vectorial de Redes y el equipo de calibración para la medición de los parámetros S ; el generador de funciones y el analizador de espectros para la medición de la ganancia y diagramas de radiación en 2D.

5.2 Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro. Existen diferentes áreas de oportunidad para realizar diseños e implementar las antenas fractales para nanosatélites:

- ✚ Se propone investigar sobre la relación del nivel jerárquico de los fractales y las frecuencias de resonancia posteriores a la primaria. Encontrar una ecuación que describa a qué frecuencia resonaría las frecuencias de resonancia secundaria y terciaria de la antena.
- ✚ Crear antenas fractales para CubeSat en materiales más ligeros y con espesores menores al RO4003C para lograr que el satélite cuente con un peso más ligero.
- ✚ Analizar el rendimiento de la antena fractal en un satélite del tipo CubeSat para las frecuencias a las que fue diseñada; lanzar dicho satélite en la órbita terrestre baja.
- ✚ Realizar cortes en la parte central de la antena fractal para aprovechar de una mejor manera el espacio en ella, colocando sensores o una cámara de video vigilancia y analizar el rendimiento de la antena.

Apéndice A. Equipos de medición

VNA – Analizador vectorial de redes *ANRITSU MS4644b (Familia VectorStar)*

La funcionalidad de este equipo radicó para la medición del coeficiente de reflexión de la antena (ver equipo en Fig. A-1). Sus características principales destacan un rango de trabajo de 70 KHz hasta 40 GHz, con un rango dinámico de 142 dB, una alta potencia de +14 dBm. Cuenta con dos puertos y cuatro bucles de acceso directo. Sus aplicaciones principales se encuentran en antena, mezcladores, convertidores de frecuencia, amplificadores, entre otros. Mediciones en: parámetros S, ruido de figura, parámetros X, pulsos RF.



Fig. A-1 Analizador vectorial de redes *Anritsu MS4644b*.

Analizador de señales *ANRITSU MS2830A*

Para medir la ganancia de la antena se utilizó este instrumento (Fig. A-2). Tiene un rango de frecuencia de 9 KHz a 26 GHz, un rango dinámico de 6 GHz cuenta con un convertidor descendente de 1 GHz (incorporado). Anchos de banda con opciones de 10/31,25/62,5/125 MHz en análisis de modulación y análisis de señales. Admisión de ruido y VER, nivel de ruido promedio de 142 dBm. Empleada para medición de TOI, MC, ACP OBW, CCDF APD, etc. Sus aplicaciones radican en telefonía móvil y propósitos generales.



Fig. A-2 Analizador de señales *ANRITSU MS2830A*.

Generador de señales *ANRITSU MG3692C*

Este instrumento fue utilizado para generar las señales a la frecuencia de resonancia de la antena. Rango de frecuencia de 2 GHz a 20 GHz, una resolución de 0.01 Hz con un nivel de ruido de -199 dB. Modulaciones de analógicas (AM/FM) y modulación por pulsos



Fig. A-3 Analizador de señales *ANRITSU MG3692C*.

REFERENCIAS

- 1.- B. Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Design, 3^o Edición. New York: John Wiley & Sons Inc. 2005.
- 2.- Satélites pequeños - GOR. (s. f.). Recuperado en 2022, de http://smallsats.cicese.mx/wiki/index.php/Sat%C3%A9lites_peque%C3%B1os.
- 3.- Aem, E. E. H.-. (s. f.). *Comunicaciones por satélite: pieza clave para el éxito del Internet de las Cosas*. Hacia el espacio. Recuperado en 2022, de <https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=522>.
- 4.- Meirambekuly, N., et al. 2022. Dual-band optical imaging system-integrated patch antenna based on anisotropic fractal for earth-observation CubeSats, Ain Shams Engineering Journal, Vol. 13, Issue 2, 101560, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.07.010>.
- 5.- Tema: Satélites Capitulo 2. Recuperado en el repositorio UNAM en 2022 <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/163/A5.pdf?sequence=5>
- 6.- Space, A. (2022, 9 marzo). *Guía básica de nanosatélites*. Alén Space. Recuperado en 2022, de <https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites/#aplicacion>.
- 7.- Cal Poly. (2022, Febrero) CubeSat Design Specification Rev. 14. CubeSatOrg. Recuperado en 2022, https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf
- 8.- Baic, R. (2010, 1 marzo). Fractal Antenna Applications. Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications. <https://doi.org/10.5772/9057>
- 9.- Mantri, E. D. (2021, 31 enero). Design and Simulation of Fractal Antenna. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 9(1), 569-573. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.32867>
- 10.- Komuraiah, S. B., Kumar, T. S., Reddy, K. S., Ramateja, R., Athar, S. & Reddy, T. A. (2022, 22 junio). Analysis of Microstrip Fractal Antenna with Multiband Characteristics. 2022 7th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). <https://doi.org/10.1109/icces54183.2022.9836017>
- 11.- What Is a Satellite? (s. f.). NASA. Recuperado en 2022, de <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-satellite-58.html>.

- 12.- Ansys Electronics Desktop Student. (2022, 7 julio). Recuperado en 2022, de <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-electronics-desktop-student>
- 13.- Li, B., Ge, H., Ge, M., Nie, L., Shen, Y. & Schuh, H. (2019). LEO enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS) for real-time precise positioning services. *Advances in Space Research*, 63(1), 73-93. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.017>
- 14.- Abulgasem, S., Tubbal, F., Raad, R., Theoharis, P. I., Lu, S. & Iranmanesh, S. (2021). Antenna Designs for CubeSats: A Review. *IEEE Access*, 9, 45289-45324. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3066632>
- 15.- Chowdhury, M. H., Hossain, Q. D., Hossain, M. A. & Cheung, R. C. C. (2019). Single feed circularly polarized crescent-cut and extended corner square microstrip antennas for wireless biotelemetry. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 9(3), 1902. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i3.pp1902-1909>.
- 16.- Chahat, N. (2021). *CubeSat Antenna Design*. Wiley-IEEE Press. 2021.
- 17.- Aem, E. E. H.-. (s. f.). El estándar CubeSat. *Hacia el espacio*. Recuperado en 2022, de <https://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=299>
- 18.- Manuel Huidobro, J. (2013). *Antenas para telecomunicaciones*. Acta.es. Recuperado en 2022, de https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf
- 19.- Elizvan Juárez Pacheco. *Diseño de arreglos de antenas aperiódicos basados en sub-arreglos* [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional - Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- 20.- Edgar Hernández Limón. *Diseño de una antena de microcinta con polarización dual a 4 GHz* [Tesis Para Obtener El Título De Licenciado En Electrónica, Facultad Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional-Facultad Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- 21.- Aznar, Á. C., Robert, J. R., Casals, J. M. R., Roca, L. J., Boris, S. B. & Bataller, M. F. (2004). *Antenas*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica.
- 22.- rfLyncs LLC. (2021, noviembre 7). *Antenna Return Loss versus Reflected Power, Mismatch & VSWR*. Custom Antenna & RF Design Services. Recuperado en 2022, de <https://rflyncs.com/return-loss/>
- 23.- S. S. Yang and K. M. Luk. Design of a wide-band L-probe patch antenna for pattern reconfiguration or diversity applications, *IEEE Trans. Antenna Propag.*, vol 54, no 2, pp.433-438 2006.
- 24.- V., M. & Baic, R. (2010). *Fractal Antenna Applications*. Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications. <https://doi.org/10.5772/9057>

- 25.- Miranda, F. Diseño de una antena fractal de 2400 MHz. Tecnología en Marcha. Vol. 25, Nº 4. Pág 71-75
- 26.- J. P. Gianvittorio and Y. Rahmat-Samii, “Fractal Antennas: A Novel Antenna Miniaturization Technique, and Applications,” IEEE Antennas Propagation Magazine, Vol. 44, No. 1, pp. 20–36, February 2002.
- 27.- J. P. Gianvittorio and Y. Rahmat-Samii, “Fractal Element Antennas: A Compilation of Configurations with Novel Characteristics,” 2000 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 3, Salt Lake City, Utah, pp. 1688–1691, July 16–21, 2000.
- 28.- Rogers Corporation “RO4000 Laminates RO4003C and RO4350B – Data Sheet,” 92-004, Agosto 2022, Recuperado en 2023.
- 29.- Microstrip Patch Antenna Calculator. (2006). EM: Talk. Recuperado 8 de enero de 2023, de <https://www.emtalk.com/mpacalc.php>
- 30.- Zhanabaev ZZ, Karibayev BA, Imanbayeva AK, Namazbayev TA, Akhtanov SN. Electrodinamic characteristics of wire dipole antennas based on fractal curves. J Eng Sci Technol 2019;14:305–20.
- 31.- Amaury Buendia Aguirre, Martín Jiménez Gonzáles. Estudio paramétrico de separación entre antenas de parche rectangulares (3.5 Ghz) [Tesis Para Obtener El Título De Ingeniero En Comunicaciones y Electrónica, Ingeniería En Comunicaciones y Electrónica de la Escuela Superior De Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.]
- 32.- Aaronia AG ”Logper Antennas HyperLog 70 Series - DataSheet” Versión 5.2, 3 de Marzo 2022, Recuperado en 2023: https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/HyperLOG/Aaronia_HyperLOG_70_Logper_Antennas.pdf
- 33.- Miguel Ferrando, Alejandro Valero. Universidad Politécnica de Valencia. Dep. Comunicaciones. Recuperado en 2023, de http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF
- 34.- CubeSats and SmallSats. (s. f.). NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). Recuperado en 2023: <https://www.jpl.nasa.gov/topics/cubesats>
- 35.- Thomas, J. (2023, 4 enero). IoT devices made greener with printable smart sensors. Innovation News Network. Recuperado en 2023: <https://www.innovationnewsnetwork.com/iot-devices-made-greener-with-printable-smart-sensors/28592/>