

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**ESCUELA DE POSGRADO**



**“DISEÑO DE ANTENA FRACTAL EN BANDAS DE FRECUENCIA PARA EL  
ESPACIO PROFUNDO APLICADO A UNA CONSTELACIÓN DE  
NANOSATÉLITES EXPLORADORES”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAGÍSTER EN FÍSICA APLICADA**

**AUTOR**

Ricardo Erick Díaz Vargas

**ASESOR**

Manuel Augusto Yarleque Medina

Noviembre, 2021

## RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño de una antena para uso en misiones espaciales, que hagan uso de nano-satélites. La finalidad de este experimento es proponer un enlace de comunicación entre unidades CubeSat usadas en una configuración de enjambre.

En el capítulo 1 se exponen los conceptos relacionados a las misiones de exploración espacial y los programas espaciales a realizarse en los próximos años. También, se presentan las bandas definidas para comunicación en el espacio profundo.

En el capítulo 2 se definen los conceptos relacionados a los nano-satélites CubeSat y cómo estos han logrado que las misiones espaciales sean accesibles. También se describen configuraciones para la comunicación en una constelación de CubeSats.

En el capítulo 3 se muestran los conceptos relacionados a los patrones fractales y antenas microstrip. Además, se diseña una antena con patrón fractal sintonizada para las bandas de comunicación en el espacio profundo.

En el capítulo 4 se describen los procesos de simulación, los parámetros de umbral para definir el ancho de banda de la antena y su patrón de radiación. Finalmente se presentan los parámetros de la antena para cada banda de comunicación en el espacio profundo.

Hipótesis: De acuerdo a las restricciones geométricas de los nano-satélites, es posible utilizar una antena para enlazar una constelación de nano-satélites en las bandas de comunicación en el espacio profundo.

Objetivo: Diseñar y evaluar una antena con frecuencias de trabajo en los canales de comunicación dedicadas a la exploración del espacio profundo.

A Dios por darme la vida y a mi familia,  
quienes me apoyaron en todo mi camino.  
Por aquellas personas con las que cruzó mi destino  
y ayudaron a forjar esta historia.



# ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABLAS .....	vi
1. Introducción .....	1
2. Aplicación de una constelación de Cubesats en el espacio profundo.....	3
2.1. Satélites CubeSat .....	3
2.2. Constelaciones de satélites.....	3
2.3. Diseño orbital de la constelación repetidora .....	4
2.4. Comunicación en la constelación de CubeSats.....	5
2.5. Nave nodriza .....	5
3. Diseño de la antena .....	7
3.1. Diseño fractal .....	7
3.2. Parámetros de la antena microstrip.....	8
4. Simulación y resultados .....	12
4.1. Plano de tierra.....	13
4.2. Ancho de banda de la antena.....	16
4.3. Patrón de radiación .....	17
5. Conclusiones .....	20
Referencias .....	21
ANEXO 1 .....	24
Plan de negocio .....	24
ANEXO 2 .....	29

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CONFIGURACIONES ESTUDIADAS POR SCAWG PARA EL DISEÑO ORBITAL DE LA CONSTELACIÓN REPETIDORA [15].....	6
FIGURA 2: ITERACIONES DEL COPO DE NIEVE DE KOCH INSCRITAS EN UNA CIRCUNFERENCIA DE RADIO R.....	8
FIGURA 3: VISTA FRONTAL Y TRASERA DE LA ANTENA FRACTAL COPO DE KOCH Y SUS PARÁMETROS.....	11
FIGURA 4: ESQUEMA 3D DE LA ANTENA FRACTAL COPO DE KOCH.....	11
FIGURA 5: PUERTO DE GUÍA DE ONDA QUE ENERGIZA EL CONECTOR SMA EN LA ANTENA.....	12
FIGURA 6: PARÁMETROS S DE LA ANTENA PARA UN PLANO DE TIERRA DE LONGITUDES INFERIORES A 20 MM. ....	13
FIGURA 7: PARÁMETROS S DE LA ANTENA PARA UN PLANO DE TIERRA DE LONGITUDES SUPERIORES A 30 MM. ....	14
FIGURA 8: RESONANCIA DE LA ANTENA CON UN PLANO DE TIERRA DE ALTURA ENTRE 20 Y 28 MM, CON VARIACIONES DE 2 MM.....	14
FIGURA 9: PARÁMETROS S DE LA ANTENA PARA UN ANCHO DEL PLANO DE TIERRA ENTRE 24 Y 32 MM, CON VARIACIONES DE 2 MM. ....	15
FIGURA 10: RESONANCIA DE LA ANTENA CON UN PLANO DE TIERRA DE ANCHO ENTRE 34 Y 44 MM, CON VARIACIONES DE 2 MM. ....	15
FIGURA 11: RESONANCIA DE LA ANTENA CON UN PLANO DE TIERRA DE ANCHO ENTRE 4 Y 18 MM, CON VARIACIONES DE 2 MM.....	15
FIGURA 12: COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN LA ANTENA PARA LONGITUDES DE ONDA DE 14.2 Y 3.6 CM (2.115 GHz Y 8.425 GHz). ....	16
FIGURA 13: PARÁMETROS S <sub>11</sub> DE LA ANTENA PARA EL RANGO DE 1 A 30 GHz - BANDAS S, C, X Y KU (50 OHMIOS) CON MARCADORES QUE INDICAN UN VALOR DE S <sub>11</sub> MÍNIMO DE -10 dB. ....	17
FIGURA 14: VALORES DE VSWR DE LA ANTENA CON MARCADORES CENTRADOS EN LOS CANALES DE SUBIDA Y BAJADA EN LAS BANDAS S, C Y X DE COMUNICACIÓN EN EL ESPACIO PROFUNDO (50 OHMIOS). ....	17
FIGURA 15: PATRÓN DE RADIACIÓN PARA CANAL DE SUBIDA 2110-2120 MHz Y BAJADA 2290-2300 MHz EN LA BANDA S PARA COMUNICACIÓN EN EL ESPACIO PROFUNDO. ....	18
FIGURA 16: PATRÓN DE RADIACIÓN PARA CANAL DE SUBIDA 7145-7190 MHz Y BAJADA 8400-8450 MHz EN LA BANDA X PARA COMUNICACIÓN EN EL ESPACIO PROFUNDO. ....	18

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1: BANDAS DE FRECUENCIA PARA INVESTIGACIÓN ESPACIAL. ....	4
TABLA 2: LONGITUDES DEL MONOPOLO, COPO DE NIEVE Y SEGMENTO DE ITERACIÓN DE ACUERDO AL RADIO FRACTAL.....	8
TABLA 3: FRECUENCIAS DE REFERENCIA, LONGITUDES DE ONDA CORRESPONDIENTE EN EL SUBSTRATO FR-4 DE $\epsilon_R = 4.4$ Y SUS PERÍMETROS DEL COPO DE KOCH Y LONGITUD DE UN LADO DEL TRIÁNGULO GENERADOR CORRESPONDIENTES. ....	9
TABLA 4: DIMENSIONES DE LA ANTENA OPTIMIZADAS PARA COBERTURA EN LA BANDA X. ....	10
TABLA 5: COMPORTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO DE LA ANTENA PARA LAS BANDAS S, C Y X. ....	18



# Capítulo 1

## 1. Introducción

En los últimos años la tecnología aeroespacial ha avanzado de una manera exponencial, pero continúa hallando nuevos desafíos que estimulan el ingenio humano. Por ejemplo, en la próxima década, nos enfrentaremos con nuevos retos como la colonización de la Luna y Marte. Este auge en la exploración espacial requiere de nuevas alternativas de diseño de sistemas que cumplan con los requisitos de los cada vez más complejos estándares espaciales.

La NASA tiene el objetivo de que astronautas aterricen en la Luna para el 2024, por medio del programa de exploración lunar "Artemis" [1]. Esto vuelve necesario desarrollar nuevas tecnologías e innovadores sistemas que permitan la exploración de la Luna y el espacio profundo.

En esta tesis se plantearán posibles aplicaciones para la exploración del espacio profundo. Por ejemplo, utilizar una nave nodriza que transporte múltiples CubeSats para observar un objetivo con múltiples blancos, como un cinturón de asteroides [2]; o realizar múltiples observaciones simultáneas de un fenómeno de interés. Para establecer el sistema de comunicaciones, un protocolo simple como el TCP/IP podría ser usado entre varios CubeSats exploradores [2] y la nave nodriza, que sirve como un nodo de comunicación "store and forward" in-situ.

Con la finalidad de contribuir a estas innovaciones tecnológicas, en esta tesis se describirá el diseño de una antena fractal de copo de nieve de Koch que trabaja en las bandas S, C y X, y que será utilizado en una constelación de CubeSats o satélites pequeños, para realizar investigaciones científicas en el espacio profundo.

Las capacidades de comunicación -hardware y software- del estándar para satélites CubeSat, permiten la transmisión de datos y telemetría para misiones en la órbita baja de la tierra (LEO; del inglés Low Earth Orbit). Sin embargo, continúa siendo un desafío establecer comunicaciones interplanetarias con satélites CubeSat de 1 a 3 unidades, debido a que su tamaño y potencia son limitados [3].

Si bien los recientes avances en diseños de antenas y amplificadores han ampliado las posibilidades de comunicación para el estándar CubeSat, aún es necesario investigar más sobre los sistemas de comunicación que requiere este estándar. Sin embargo, debido a su simplicidad y bajo costo, los CubeSat son opciones atractivas

para realizar misiones científicas a la Luna [4] y estudiar cargas experimentales, como el caso de esta antena fractal de copo de Koch [5].





## Capítulo 2

### 2. Aplicación de una constelación de Cubesats en el espacio profundo

#### 2.1. Satélites CubeSat

Un CubeSat es un satélite pequeño y de bajo costo que puede ser desarrollado y lanzado por universidades, escuelas o cualquier persona. Las especificaciones fueron desarrolladas por la Universidad Politécnica Estatal de California (Cal Poly) y la Universidad Standford en 1999. La estructura básica es un cubo de 10 centímetros, con un peso menor a 1.33 kilogramos [6]. Esto permite desplegar múltiples de estos paquetes estandarizados como una carga secundaria en otras misiones [7].

Las especificaciones de diseño del CubeSat, desarrolladas por Cal Poly, definen los requerimientos físicos y de interface de los CubeSat, y brindan los requisitos para realizar las pruebas de vibración, vacío térmico, impacto, y seguridad en estos satélites [7].

Las pruebas de seguridad son clave para mantener la integridad de los equipos desde su entrega al vehículo de lanzamiento o transbordador, hasta que orbite en el espacio. Primero, este proceso garantiza que los Cubesat soporten las condiciones del transbordador durante su transporte y lanzamiento; luego, permite que los CubeSat subsistan en las extremas condiciones del espacio; y finalmente, evita que los Cubesats sufran o generen daños a otros CubeSats cercanos, u otras cargas primarias, almacenadas en el mismo vehículo de despliegue y que también serán lanzadas al espacio.

#### 2.2. Constelaciones de satélites

Una constelación es un grupo de satélites que operan juntos para observar un objetivo único. Una constelación permite observar un objetivo de forma simultánea desde múltiples ubicaciones, u observar múltiples objetivos simultáneamente [8]. Además de las constelaciones de comunicación, tan comúnmente usadas a nivel comercial, una constelación facilita estudiar los campos magnéticos de los planetas [9]; recopilar datos de los asteroides para desarrollar minería espacial [10]; instalar redes de interferometría para detectar ondas gravitacionales [11], o redes de

espectrometría para determinar la composición de exoplanetas [12]. En el Anexo 1 se discuten aplicaciones comerciales adicionales.

La arquitectura de enjambre son sistemas de constelación más avanzados. En robótica de enjambre, las dificultades más comunes son la comunicación y el comportamiento cooperativo entre sus unidades. Para esta constelación se diseñó una antena fractal que posibilita la comunicación, principalmente, entre satélites pequeños. Para este diseño se utilizaron las bandas designadas S (VHF) y X (UHF) para comunicación espacial, las más utilizadas en los estándares de nano y micro-satélites. Los canales usados en las bandas para el espacio profundo se detallan en la Tabla 1.

Cabe destacar que lo importante en el diseño de la constelación es el número de satélites que se utilicen para formar el enjambre, y no la capacidad de un solo satélite. Por eso, este diseño se puede aplicar a grupos de exploradores organizados como constelaciones, clústeres o enjambres.

Tabla 1: Bandas de frecuencia para investigación espacial.

Banda Asignada	Espacio profundo		Espacio cercano	
	Canal de subida (MHz)	Canal de bajada (MHz)	Canal de subida (MHz)	Canal de bajada (MHz)
Banda S	2110 - 2120	2290 - 2300	2025 - 2110	2200 - 2290
Banda X	7145 - 7190	8400 - 8450	7190 - 7235	8450 - 8500

### 2.3. Diseño orbital de la constelación repetidora

Una “red de relé” es una red cuyo transmisor y receptor no pueden comunicarse directamente y, por ello, requieren de nodos intermediarios que sirven como repetidores que retransmitan el mensaje. De este modo, un “satélite de relé” es cualquier nodo de comunicación intermediario dentro de una red de satélites.

Una constelación de satélites de relé que orbite a una baja altitud nos permitirá crear una red de comunicación autónoma que conecte los nodos ubicados en la del lugar de aterrizaje objetivo, la constelación de satélites y la estación base en la Tierra. Algunas opciones de órbita para esta constelación son los siguientes: Estación Malapert [13], constelación de halo L1 & L2 [14], constelación híbrida, constelación de órbita elíptica, constelación de órbita circular polar o constelación

de órbita inclinada circular [15]. Estas opciones de configuración de órbita están presentadas en la Figura 1.

#### **2.4. Comunicación en la constelación de CubeSats**

La comunicación en los CubeSats es complicada debido a sus antenas pequeñas y potencias relativamente bajas. Un enfoque consiste en asignar una nave nodriza para controlar las comunicaciones con la Tierra, y mantener una comunicación de corto-alcance con los CubeSat, usando la técnica de “store-and-forward” [16], que sirve para manejar los paquetes de información entre los nodos de la constelación.

Se propone usar una constelación con sistema de comunicación por relé para órbitas lunares bajas, junto a la antena fractal presentada en este trabajo de tesis. Dado que los satélites repetidores de órbita baja cruzarán sobre los puntos en la superficie de forma relativamente frecuente, se requiere una nave nodriza de órbita alta que brinde un soporte de comunicación casi continua [17].

#### **2.5. Nave nodriza**

Definiremos a la nave nodriza como una nave de mayor volumen que actuará como hub o concentrador entre los nodos de la constelación, o un transponder que retransmita el mensaje con una mayor potencia y permita establecer fácilmente un enlace con la Tierra. En otras palabras, debería soportar comunicaciones punto-multipunto, en una configuración de red en estrella, entre las varias unidades de CubeSat o las unidades en la superficie donde se realice el aterrizaje. Es posible que el protocolo de comunicación entre CubeSats y la nave nodriza sea tan simple como el protocolo de internet Transmission Control Protocol (TCP/IP) [16]. Sería ideal considerar la Tecnología de Comunicación Espacial Autónoma (por sus siglas en inglés, ASCoT) [18], pues este ejecuta ágilmente un esquema de Control de Acceso al Medio (MAC); y a la vez conduce arreglos direccionados electrónicamente e intercambia enlaces de comunicación entre múltiples nodos, que están dispersos en el espacio o la superficie de aterrizaje.

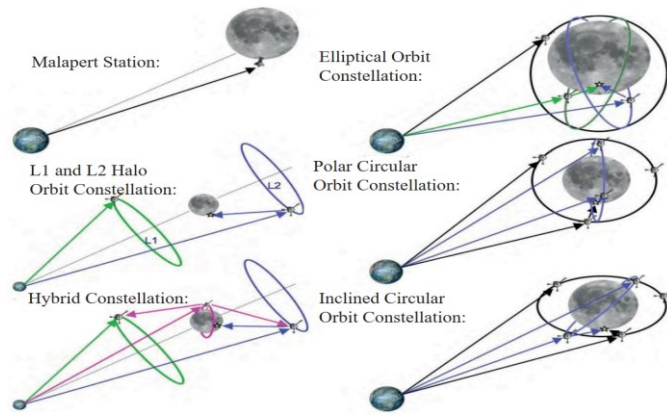


Figura 1: Configuraciones estudiadas por SCAWG para el diseño orbital de la constelación repetidora [15].



## Capítulo 3

### 3. Diseño de la antena

La antena propuesta debe cubrir las bandas S, C y X para el estándar de comunicación en el espacio profundo [19]. Para evitar el uso de complejos sistemas de despliegue, la antena está restringida a seguir el estándar CubeSat, que determina que las dimensiones de una unidad (1U) de CubeSat deben ser de 10x10x10 cm.

Una antena de patrón fractal cumple fácilmente con estos dos requisitos, gracias a sus características de miniaturización y banda ancha o cobertura multi-banda. Dado que la antena será utilizada en un sistema de comunicación para constelaciones de baja potencia, el patrón radiante será impreso como una línea microstrip en un sustrato FR-4 [20].

#### 3.1. Diseño fractal

Los patrones fractales son auto-similares; por tanto, una forma fractal se genera a partir de 'n' iteraciones de la réplica de una fracción de la forma original sobre sí misma. Mientras que los fractales continúan auto-replicándose en cierto espacio limitado, con un comportamiento de "llenado de espacio", la antena se acerca al límite de Chu-Harrington para antenas pequeñas con cada iteración [21]. El copo de nieve de Koch es un patrón fractal que se genera al utilizar un sistema de funciones iterativas sobre un triángulo equilátero [22]; por eso, el perímetro del lazo de Koch es el siguiente [23]:

$$P_n = 3\sqrt{3} r \left(\frac{4}{3}\right)^n$$

Donde 'r' es el radio del círculo que circunscribe al copo de Koch, y 'n' es el número de iteraciones. Se escogieron dos iteraciones para este diseño, pues un número mayor de iteraciones resulta en segmentos más pequeños que complican la fabricación de la antena [24]. A continuación, en la Tabla 2, se muestran los perímetros de los patrones monopolo y copo de Koch calculados para el radio fractal correspondiente.

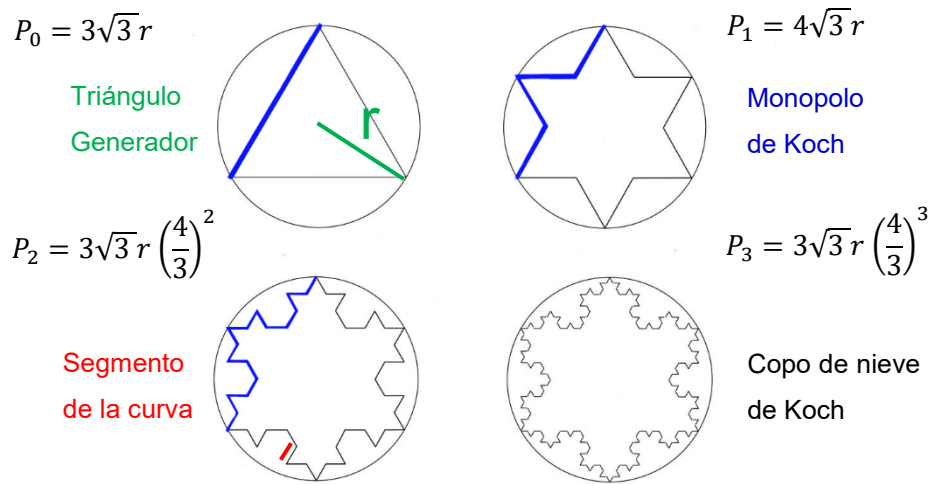


Figura 2: Iteraciones del copo de nieve de Koch inscritas en una circunferencia de radio  $r$ .

En la Figura 2 se muestran las iteraciones fractales del copo de nieve de Koch sobre el triángulo generador. El patrón base, es decir, la iteración cero del patrón fractal, es un triángulo equilátero, también llamado “triángulo generador”, a partir del que se pueden analizar las demás iteraciones debido al comportamiento fractal del copo de nieve de Koch. En cada iteración, fracciones del triángulo generador se añaden a cada uno de sus lados y el perímetro resultante toma la forma de un copo de nieve, del que proviene el nombre de “copo de nieve de Koch”. Un “monopolo de Koch” es un lado del triángulo generador en cualquiera de sus iteraciones, cuya longitud aumenta en cada réplica debido a la suma progresiva de segmentos cada vez más pequeños. Las medidas usadas en el diseño del copo de nieve de Koch de esta tesis se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Longitudes del monopolo, copo de nieve y segmento de iteración de acuerdo al radio fractal.

Radio fractal (cm)	Iteración	Longitud del monopolo (cm)	Perímetro del copo de nieve (cm)	Longitud del segmento (cm)
1.767	0	3.061	9.18	3.06
1.767	1	4.081	12.24	1.02
1.767	2	5.442	16.33	0.34

### 3.2. Parámetros de la antena microstrip

La antena microstrip está montada en un sustrato FR-4 de 1.5 mm de grosor y el diseño sigue los procedimientos para calcular la longitud eléctrica presentados en [22]. En esta tesis, el perímetro del patrón fractal se calcula de acuerdo a la longitud de onda efectiva en el sustrato de la frecuencia objetivo. Se eligió aproximar esta

medida según la permitividad, pues esta es dominante para resonancias de menor frecuencia y la diferencia en los resultados al tomar en cuenta otras variables es despreciable de acuerdo a la fórmula presentada por Yassen [25].

$$f_r = \frac{c}{0.36 P_n \sqrt{\epsilon_r}}$$

Donde 'f<sub>r</sub>' es la frecuencia de resonancia inferior, 'c' es la velocidad de la luz, 'P<sub>n</sub>' es el perímetro del copo de Koch para la enésima iteración y 'ε<sub>r</sub>' es la permitividad relativa en el medio.

Se pueden producir otras resonancias en la longitud de un lado del triángulo generador, similar al comportamiento de un monopolo. El perímetro interno y externo del patrón fractal, ambos, intervienen en la resonancia de la antena. Calcularemos algunas longitudes de referencia, para el sustrato FR-4 de ε<sub>r</sub> =4,4. [23]

Tabla 3: Frecuencias de referencia, longitudes de onda correspondiente en el sustrato FR-4 de ε<sub>r</sub> =4.4 y sus perímetros del copo de Koch y longitud de un lado del triángulo generador correspondientes.

Frecuencia de referencia (GHz)	Longitud de onda en el sustrato (cm)	Perímetro del copo de nieve (cm)	Longitud en un lado del triángulo generador (cm)
2.205	6.486	18.017	3.378
7.798	1.834	5.095	0.955
17.0	0.841	2.337	0.438

Las dimensiones propuestas para el perímetro del copo de nieve y la longitud del monopolo de Koch utilizados en el diseño de la antena, presentados en la Tabla 2, guardan coherencia con las dimensiones calculadas para los parámetros en el sustrato, expuestos en la Tabla 3.

A continuación, se muestra los valores en los que convergen los parámetros teóricos o de referencia, y los propuestos o calculados para el diseño:

- El perímetro del copo de nieve para la banda S (2.205 GHz) de la Tabla 3 es coherente con el perímetro del copo de nieve en la antena de la Tabla 2 (18.02 cm).

- El perímetro del copo de nieve para la banda X (7.79 GHz) de la Tabla 3 es coherente con la longitud del monopolo en la antena de la Tabla 2 (5.095 cm).
- El perímetro del copo de nieve para la banda Ku (17 GHz) de la Tabla 3 es coherente con media longitud del monopolo de Koch en la antena de la Tabla 2 (2.337 cm).

Cabe destacar que el lazo fractal determinado por el copo de Koch se imprime como una línea microstrip sobre el substrato y debido al grosor de la línea microstrip, el patrón se genera con dos triángulos generadores de lados 35.8 y 25.41 mm para el triángulo exterior e interior, respectivamente.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de estos cálculos, donde 'L' es la longitud un lado del patrón base o triángulo generador, y 'L\_n' es la longitud de la enésima iteración (n=2), mientras que 'Loop\_w' es el ancho de la línea microstrip. La antena se energiza por una línea microstrip de 50 Ohmios de un ancho 'Feed\_w' [5]. Y un plano de tierra rectangular de longitud y ancho 'Gr\_h' y 'Gr\_w', respectivamente. Las vistas frontales y traseras del diseño final de la antena, junto a sus parámetros, se muestran en la Figura 3.

Tabla 4: Dimensiones de la antena optimizadas para cobertura en la Banda X.

Parámetro	Dimensiones (mm)	Parámetro	Dimensiones (mm)
L	30.61	Subs_w	44
L_n	3.4	Subs_h	42
Feed_w	2.9	Gr_w	6.00
Loop_w	6	Gr_h	26.30



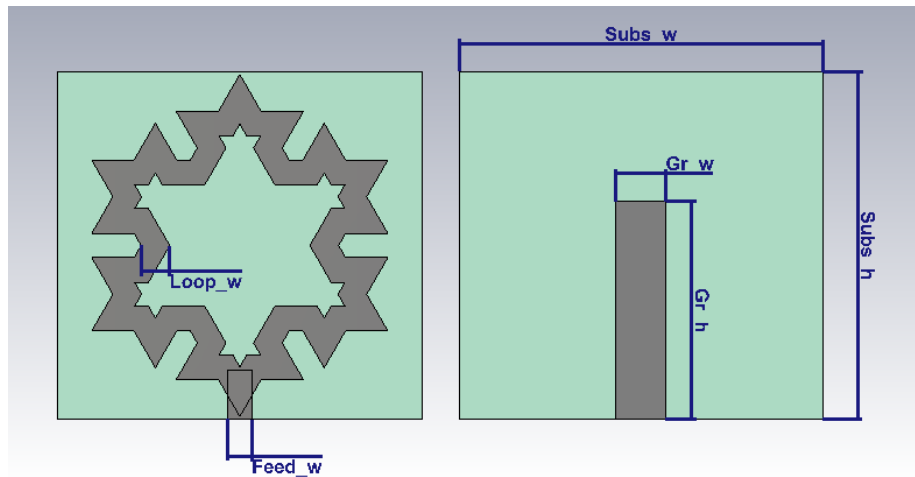


Figura 3: Vista frontal y trasera de la antena fractal copo de Koch y sus parámetros.

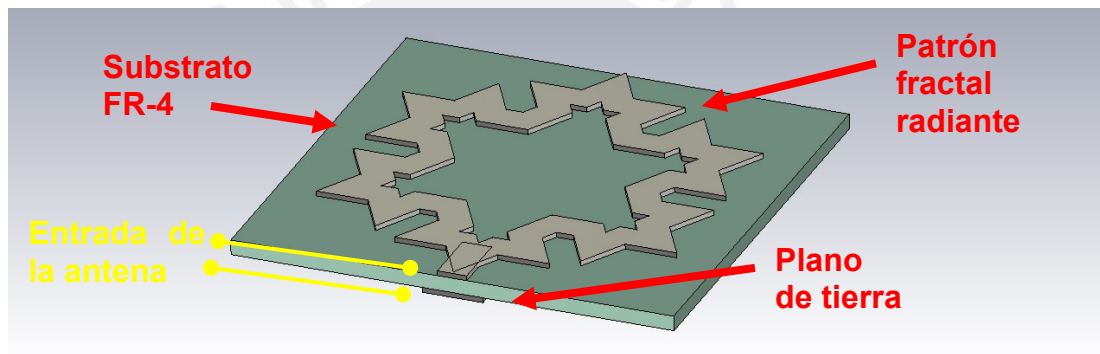


Figura 4: Esquema 3D de la antena fractal copo de Koch

## Capítulo 4

### 4. Simulación y resultados

Las dimensiones del substrato, geometría fractal y plano de tierra previamente calculados se optimizaron con el algoritmo de regiones de confianza y el uso de modelamiento computacional electromagnético de elementos finitos. Se utilizó el programa EM CAD Microwave Studio por Computer Simulation Technology (CST®) para modelar tridimensionalmente la antena propuesta y optimizar sus dimensiones para lograr un mayor ancho de banda en la banda X.

Las dimensiones obtenidas con el programa se muestran en la sección 3.2, y la evaluación del comportamiento de la antena en las bandas S, C y X para la comunicación en el espacio profundo con una impedancia de referencia de 50 ohmios, se presenta en las siguientes secciones. Esta configuración en la antena logra una ganancia máxima de 6.8 dBi para el canal de subida en la banda X.

En la simulación, la antena es alimentada por un conector SMA, cuyo conductor interior esta soldado a la línea de alimentación microstrip y el conductor exterior, al plano de tierra de la antena. Un puerto de guía de onda energiza este conector en el programa. A continuación, se muestra en la Figura 5 la configuración del puerto.

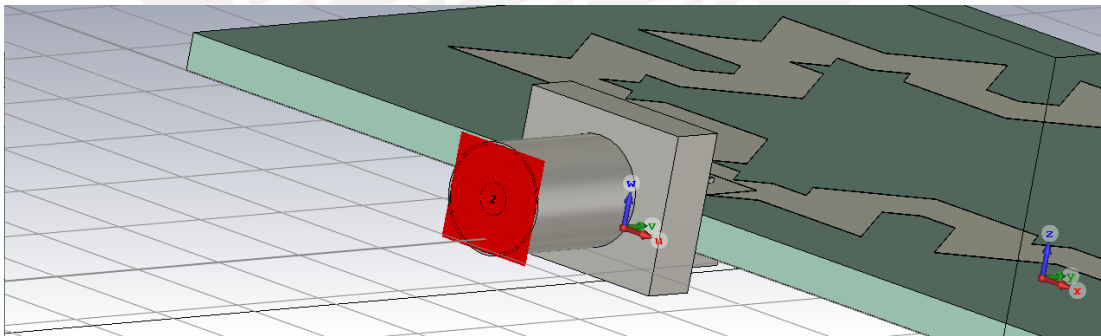


Figura 5: Puerto de guía de onda que energiza el conector SMA en la antena.

En las siguientes secciones se evaluará la antena de acuerdo a parámetros como:

Los parámetros S, específicamente S11 o coeficiente de reflexión de entrada, indican la capacidad de acoplamiento de la antena a ciertas frecuencias. Esta, junto a la razón de onda estacionaria (VSWR, del inglés voltage standing wave ratio) son parámetros con los cuales se evalúa el ancho de banda de una antena.

Por otro lado, el patrón de radiación de una antena se evalúa de mediante la ganancia, que es un parámetro que combina la directividad de una antena y su eficiencia de radiación.

#### 4.1. Plano de tierra

El plano de tierra sirve para guiar las líneas de campo EM a través del sustrato; esto afecta a las pérdidas de radiación, al ancho de banda de la antena y a la ganancia de la antena [26]. Las dimensiones del plano de tierra, que en este caso es un plano rectangular, son la longitud y el ancho que corresponden a los parámetros 'Gr\_h' y 'Gr\_w', y que fueron mostrados en la Figura 3. Estas dimensiones suelen ser mayores a un cuarto de la longitud de onda de operación. En la siguiente sección, se demostrará el efecto de la variación en las dimensiones del plano de tierra en la antena. En cada prueba se variará la dimensión en 2 milímetros y se evaluará la antena de acuerdo a sus parámetros S11, que describen la cantidad de potencia reflejada en la entrada de la antena.

##### Longitud del plano de tierra

En las Figura 6 y Figura 7, se muestra el comportamiento de la antena con un plano de tierra, que tiene longitudes inferiores a 20 mm o superiores a 30 mm. En este rango de valores, los parámetros S mostrados en las gráficas indican un acoplamiento defectuoso de la antena.

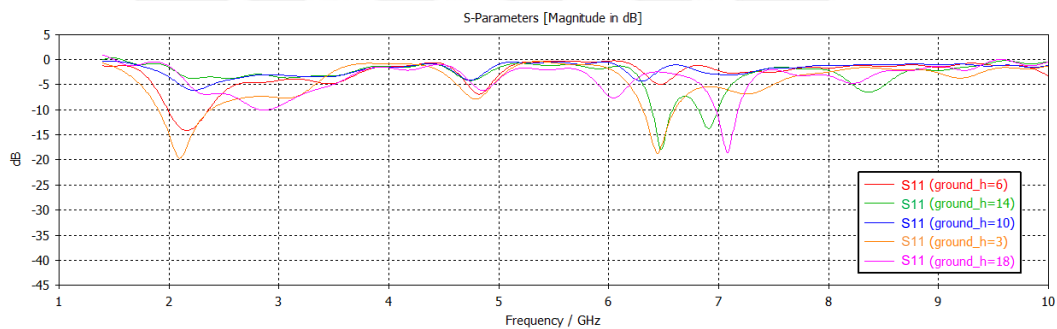


Figura 6: Parámetros S de la antena para un plano de tierra de longitudes inferiores a 20 mm.

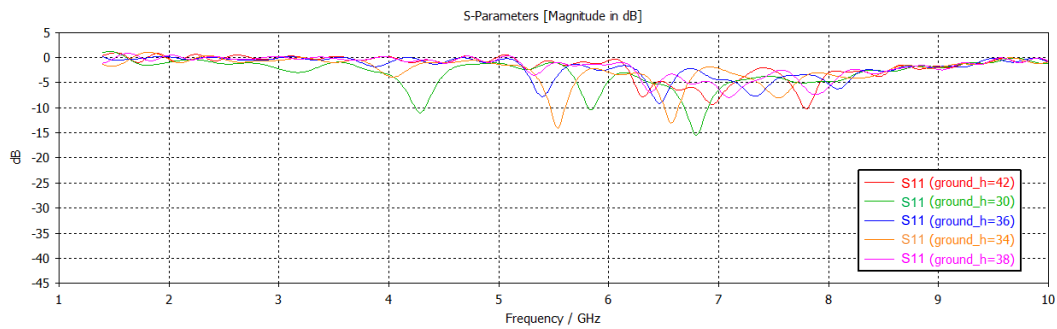


Figura 7: Parámetros S de la antena para un plano de tierra de longitudes superiores a 30 mm.

Por otro lado, se obtiene una mejor distribución de corriente cuando la longitud del plano de tierra 'Gr\_h' permite al plano de tierra extenderse hasta coincidir con el centro o cerca del centro de la forma fractal, como se dispone en la Figura 3. En la Figura 8, se muestra la resonancia de la antena para un plano de tierra con una longitud que mide entre 20 y 28 mm. Se concluye que un valor de 26.3 mm en la longitud del plano a tierra brinda una mejor resonancia y un mayor comportamiento multibanda.

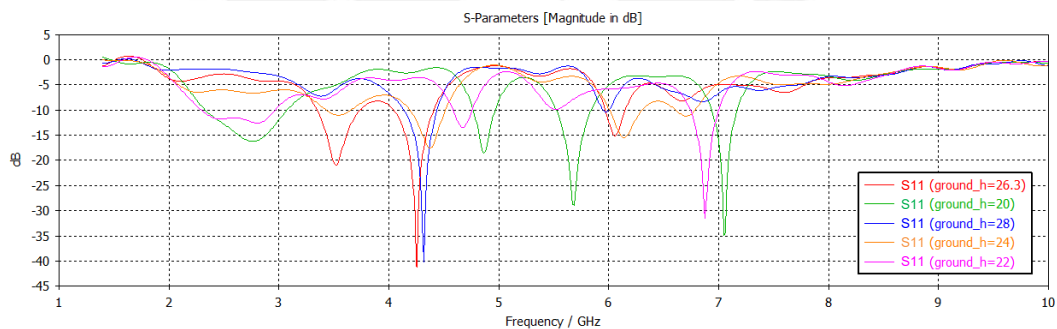


Figura 8: Resonancia de la antena con un plano de tierra de altura entre 20 y 28 mm, con variaciones de 2 mm.

### Ancho del plano de tierra

De acuerdo a la variación en el ancho del plano a tierra, se generan 3 grupos de resonancias que serán presentados a continuación:

El ancho del plano a tierra del primer grupo mide entre 24 y 32 mm, y su efecto en los parámetros S es graficado en la Figura 9. Este grupo tiene un comportamiento poco estable y su mayor resonancia se encuentra alrededor de 3.7 GHz

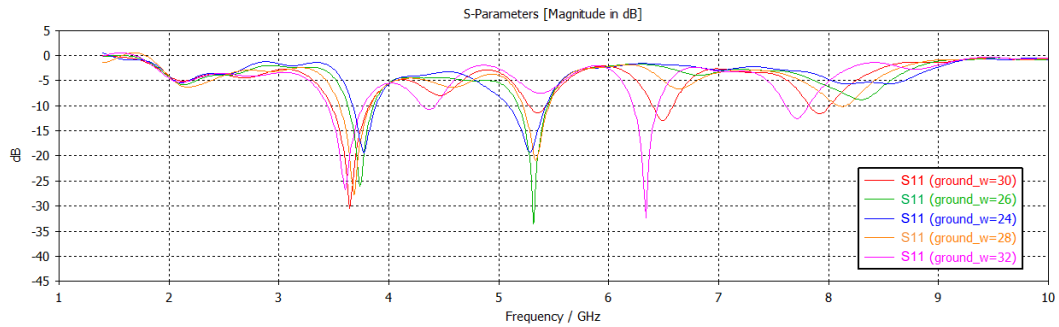


Figura 9: Parámetros S de la antena para un ancho del plano de tierra entre 24 y 32 mm, con variaciones de 2 mm.

El ancho del plano a tierra del segundo grupo mide entre 34 y 44 mm, y su efecto en los parámetros S es graficado en la Figura 10. En este grupo se obtienen mejores valores de S11 y un comportamiento muy estable a lo largo de las variaciones. La mayor resonancia se encuentra en 4.3 GHz

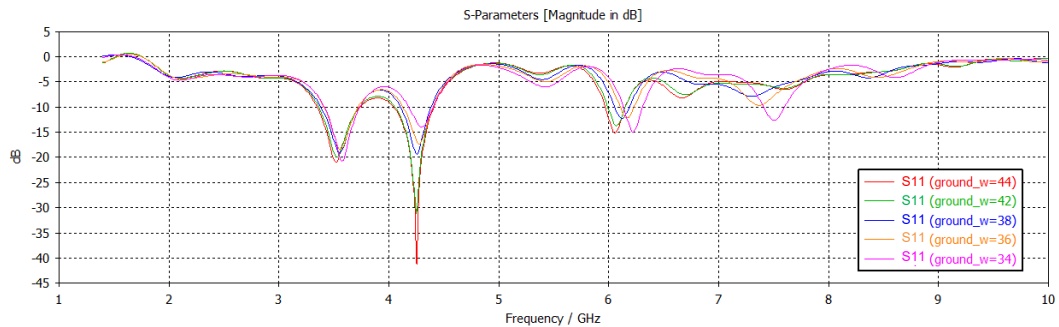


Figura 10: Resonancia de la antena con un plano de tierra de ancho entre 34 y 44 mm, con variaciones de 2 mm.

El ancho del plano a tierra del tercer grupo mide entre 4 y 18 mm, y su efecto en los parámetros S es graficado en la Figura 11. Este último grupo promueve la resonancia en banda S, alrededor de 2.2 GHz de una manera estable y mantiene la resonancia en las frecuencias calculadas

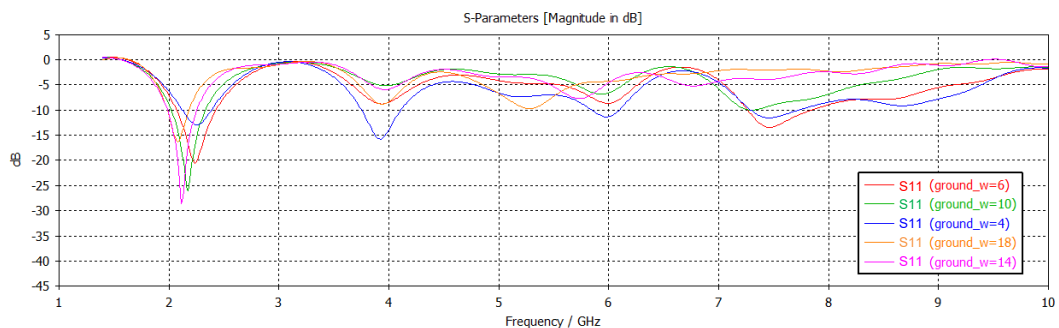


Figura 11: Resonancia de la antena con un plano de tierra de ancho entre 4 y 18 mm, con variaciones de 2 mm.

Se observa que los cambios en la forma del plano de tierra distribuyen la corriente en el patrón de la antena de una manera distinta en cada frecuencia y varían su

frecuencia de resonancia. Se escogió para el diseño de la antena un ancho de plano de tierra de 6 mm que pertenece al tercer grupo, presentado en la Figura 11, pues las características del grupo son favorables para anchos de bandas más extensos. Cabe destacar que, a diferencia de los demás valores en este grupo, un ancho de plano de tierra de 6mm genera resonancias que están mejor sintonizadas con las frecuencias buscadas en este diseño.

La Figura 12 demuestra cómo longitudes de ondas más grandes tienen una distribución de corriente que abarca una mayor superficie en la antena.

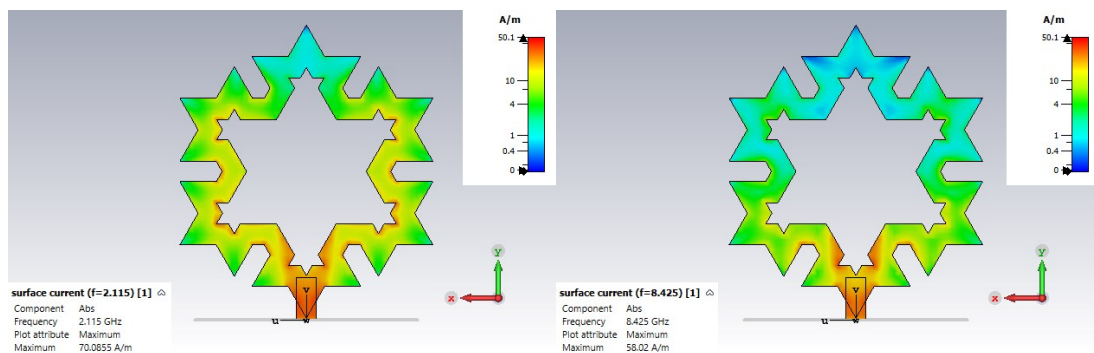


Figura 12: Comportamiento de la densidad de corriente en la antena para longitudes de onda de 14.2 y 3.6 cm (2.115 GHz y 8.425 GHz).

#### 4.2. Ancho de banda de la antena

El ancho de banda de una antena se calcula a partir de sus parámetros de reflexión de onda, cuando la antena está conectada en un circuito de cierta impedancia. Estos valores pueden ser presentados como la razón de onda estacionaria (VSWR, del inglés voltage standing wave ratio) o como el coeficiente de reflexión de entrada (parámetro S11).

Un diseño con patrón fractal permite que la antena tenga un amplio ancho de banda y, por tanto, posea múltiples bandas de frecuencia operativas. Al determinar un umbral de -10 dB para los valores del parámetro S11, la frecuencia de operación de la antena es la siguiente: en la banda S abarca desde 2.0 GHz hasta 2.5 GHz; en la banda C, desde 7.1 GHz hasta 8 GHz; en la banda X, desde 8 GHz hasta 9.3 GHz; y en la banda Ku, desde 13.8 GHz a 18 GHz.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a una antena con un sustrato de 44x42 mm ('Subs\_w' x 'Subs\_h'), un plano de tierra de 6x26.3 mm ('Gr\_w' x 'Gr\_h') y una forma fractal cuyas dimensiones están descritas en la Tabla 4. Cabe destacar que la gráfica de la Figura 3 representa la configuración de los elementos en esta antena. En las Figura 13 y Figura 14 se muestran los parámetros

S11 y VSWR de la antena, para un circuito de 50 Ohmios. De acuerdo a los resultados mostrados en ambas figuras, se puede observar que el ancho de banda de la antena abarca en toda su extensión las bandas de frecuencia S y X para la comunicación en el espacio profundo, que se mostraron en la Tabla 1, y esto aumenta la variedad de sus posibles aplicaciones.

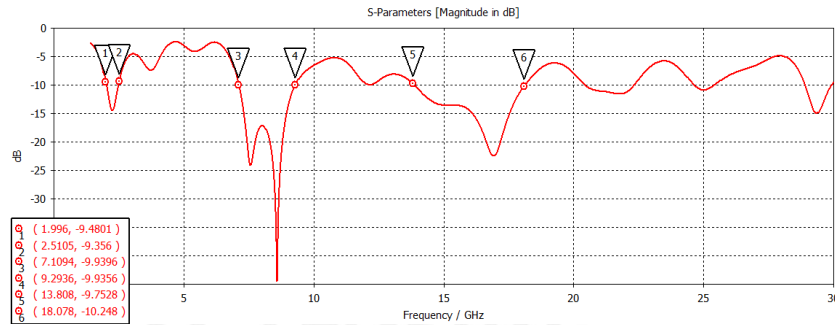


Figura 13: Parámetros S11 de la antena para el rango de 1 a 30 GHz - bandas S, C, X y Ku (50 Ohmios) con marcadores que indican un valor de S11 mínimo de -10 dB.

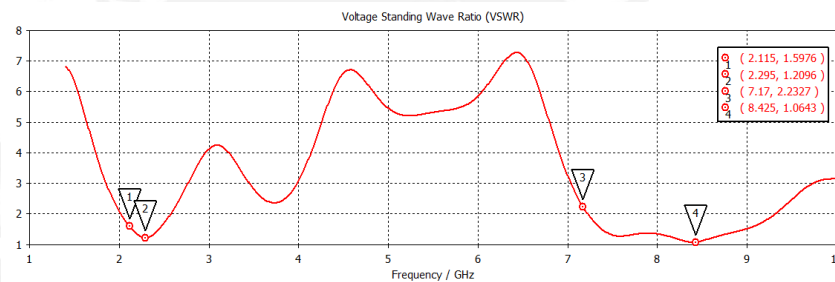


Figura 14: Valores de VSWR de la antena con marcadores centrados en los canales de subida y bajada en las bandas S, C y X de comunicación en el espacio profundo (50 Ohmios).

### 4.3. Patrón de radiación

El patrón de radiación esperado para esta antena es del tipo omnidireccional, cuyo máximo se encuentra en el eje perpendicular al plano de la curva fractal. En la banda S, la apertura efectiva de la antena es pequeña; por otro lado, en la banda X, la antena se desenvolverá mejor debido a su longitud efectiva [27].

Dado que los estándares de comunicación en el espacio profundo no utilizan la banda Ku, en las Figura 15 y Figura 16, respectivamente, se presentará el patrón de radiación de ganancia de la antena para las bandas S, C y X. El patrón de radiación de la antena para el canal de subida en la banda X tiene una ganancia máxima de 6.8 dBi, mientras que para el canal de bajada en la banda C tiene una ganancia máxima de 4.37 dBi. Este resultado es óptimo dado que los enlaces de transmisión requieren de una mayor potencia que los de recepción.



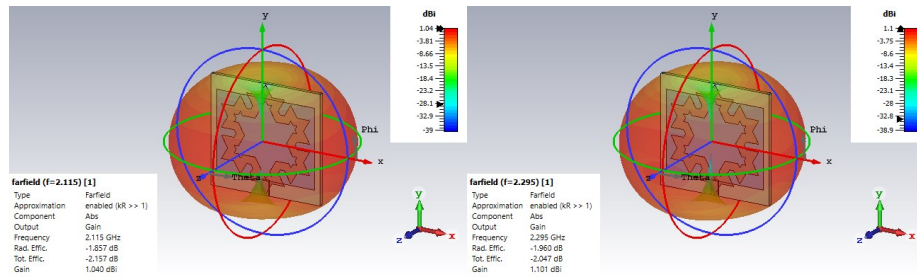


Figura 15: Patrón de radiación para canal de subida 2110-2120 MHz y bajada 2290-2300 MHz en la banda S para comunicación en el espacio profundo.

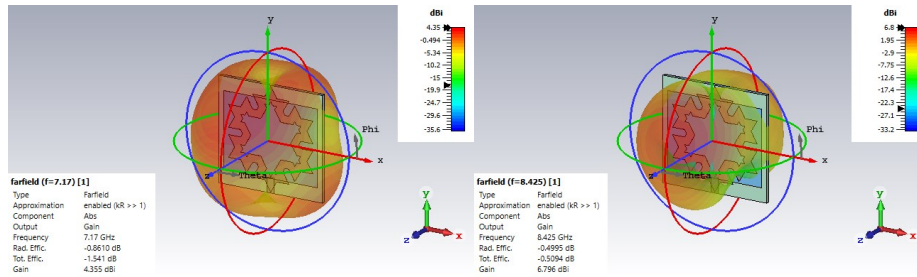


Figura 16: Patrón de radiación para canal de subida 7145-7190 MHz y bajada 8400-8450 MHz en la banda X para comunicación en el espacio profundo.

En base a los patrones de radiación de las figuras anteriores y el diagrama de VSWR, se puede confirmar que las dimensiones de la antena han sido sintonizadas correctamente en las frecuencias de operación de la banda de comunicación en el espacio profundo. En la Tabla 5 se muestran la ganancia, parámetros S11 y VSWR de la antena en cada banda.

Tabla 5: Comportamiento electromagnético de la antena para las bandas S, C y X.

Banda de frecuencia	Frecuencia central (GHz)	Ganancia (dBi)	S11 (dB)	VSWR (-)	Eficiencia de Radiación (dB)
S	2.115	1.04	-12.765	1.598	-1.857
S	2.295	1.1	-20.459	1.210	-1.960
C	7.17	4.35	-8.374	2.233	-0.8610
X	8.425	6.8	-30.127	1.064	-0.4995

De acuerdo a las pruebas realizadas en las bandas S, C y X se confirma que la eficiencia de radiación de la antena será mayor en la banda X que en la banda S. Este resultado es coherente con la apertura efectiva de la antena y el comportamiento en antenas pequeñas.

En la banda S, la antena se comporta como una antena pequeña debido a que sus dimensiones (4 cm) son menores a  $\lambda/10$ . Este tipo de antenas se caracterizan por



tener una baja resistencia de radiación y una reactancia relativamente alta. Por otro lado, en la banda X es más factible obtener ganancias altas. Esto se debe a que la ganancia de la antena aumenta de acuerdo su apertura efectiva, que se calcula por la relación entre las dimensiones de la antena y su longitud de onda de operación.



## 5. Conclusiones

El diseño de la antena con una geometría fractal de “Copo de nieve de Koch” presentado en esta tesis es una opción atractiva para emprender misiones en el espacio profundo, así como también en múltiples aplicaciones de CubeSat que permiten la experimentación y desarrollo de tecnología a bajo costo.

La antena propuesta es útil para la comunicación de doble banda, gracias a que sus bandas de frecuencia de operación abarcan la totalidad de los canales de comunicación de subida y bajada en las bandas S, C y X. La ganancia en el canal de subida es de 6.8 dBi, mientras que la ganancia en el canal de bajada es de 4.37 dBi.

El uso de un patrón de radiación omnidireccional permite que un CubeSat utilice un sistema de estabilización magnético pasivo, para mantener un enlace de comunicación sin necesidad de un sistema de apuntamiento. Esto es ideal para una comunicación espacial de bajo consumo de potencia, como lo es un sistema de repetidores o “store & forward”, y además es una alternativa a productos comerciales.

Los resultados de esta tesis también pueden ser de interés para otras misiones en el espacio profundo como exploración de asteroides, investigación de las lunas de Júpiter y Saturno, entre otras.

### Trabajos Futuros

Para continuar este trabajo se podría trabajar con los programas STK y Matlab para simular la operación de la constelación de antenas en el espacio profundo, e investigar el protocolo de comunicación y el comportamiento cooperativo de enjambres. Además, se recomienda estudiar el uso de un conector transversal al substrato para reducir las reflexiones por discontinuidades en la antena; y la aplicación de estructuras de tierra defectuosas (o DGS, para defected ground structure en inglés) en la antena.

## Referencias

- [1] M. Smith et al., "The Artemis Program: An Overview of NASA's Activities to Return Humans to the Moon", *2020 IEEE Aerospace Conference*, 2020, pp. 1-10, doi: 10.1109/AERO47225.2020.9172323.
- [2] M. Shao, S. Turyshev y C. Zhai, "Big science in small packages: A constellation of cubesats to search for near earth asteroids", *2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2016, pp. 1-2.
- [3] A. Batista, E. Gomez, H. Qiao y K. Schubert, "Constellation Design of a Lunar Global Positioning System Using CubeSats and Chip-Scale Atomic Clocks", 2012.
- [4] J. Kolbeck, X. Fang, M. Keidar, J. S. Kang, M. Sanders y N. Bakulinski, "Effects of metallic plasma thruster plume on solar cells", *2018 IEEE Aerospace Conference*, 2018, pp. 1-10, doi: 10.1109/AERO.2018.8396445.
- [5] Z. Yu, J. Yu y X. Ran, "An improved koch snowflake fractal multiband antenna", *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292332.
- [6] M. Swartwout, "The First One Hundred CubeSats: A Statistical Look", *Journal of Small Satellites*, vol. 2, no. 2, pp. 213–233, 2013.
- [7] Toorian, K. Diaz y S. Lee, "The CubeSat Approach to Space Access", *2008 IEEE Aerospace Conference*, 2008, pp. 1-14, doi: 10.1109/AERO.2008.4526293.
- [8] P. Stakem, "Robotic exploration of the icy moons of the gas giants", 2020.
- [9] "Swarm – Earth Online", Earth Observation information discovery platform, European Space Agency, <https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm>
- [10] M. J. Nadoushan, M Ghobadi y M. Shafae, "Designing reliable detumbling mission for asteroid mining", *Acta Astronautica*, 2020, doi: 10.1016/j.actaastro.2020.05.0
- [11] D. Devani et al, "Gravity sensing: cold atom trap onboard a 6U CubeSat", *CEAS Space Journal*, 2020, doi: 10.1007/s12567-020-00326-4
- [12] V. Lapeyrère et al, "A space interferometer on a 6U Cubesat: FIRST-S (Conference Presentation)", *Proc. SPIE 10698, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, 2018, doi: 10.1117/12.2313372

- [13] B. L. Sharpe, y D. G. Schrunk, "Malapert mountain: Gateway to the moon", *Advances in Space Research*, 2003, vol. 31, no. 11, pp. 2467–2472, doi: 10.1016/S0273-1177(03)00535-0.
- [14] C. Circi, D. Romagnoli y F. Fumentì, "Halo orbit dynamics and properties for a lunar global positioning system design", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Junio 2014, vol. 442, no. 4, pp. 3511-3527, doi: 10.1093/mnras/stu1085.
- [15] J. Schier, J. Rush, P. Vrotsos y W. Williams. "Space Communication Architecture Supporting Exploration and Science: Plans & Studies for 2010-2030", AIAA 2005-2517. *1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery*, January 2005, doi: 10.2514/6.2005-2517.
- [16] R. G. Perea-Tamayo, C. M. Fuchs, E. Ergetu y L. BingXuan, "Design and Evaluation of a Low-Cost CubeSat Communication Relay Constellation", *2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/LAMC.2018.8699047.
- [17] K. Bhasin, A. Hackenberg, R. Slywczak, P. Bose, M. Bergamo y J. Hayden, "Lunar Relay Satellite Network for Space Exploration: Architecture, Technologies and Challenges", AIAA 2006-5363. *24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, Junio 2006, doi: 10.2514/6.2006-5363.
- [18] Gnawali, M. Polyakovt, P. Bose y R. Govindan, "Data centric, position-based routing in space networks", *2005 IEEE Aerospace Conference*, 2005, pp. 1322-1334, doi: 10.1109/AERO.2005.1559422.
- [19] D. K. Shin, "Frequency and channel assignments", California Institute of Technology, 2015.
- [20] M. G. Siddiqui, A. Saroj, Devesh, N. Agrawal y J. A. Ansari, "Design of Isosceles-Shaped Fractal Antenna for Ku and K-Band Applications", *2018 Recent Advances on Engineering, Technology and Computational Sciences (RAETCS)*, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/RAETCS.2018.8443921.
- [21] M. P. Herrera y J. C. Inclan, "Estudio y metodología de diseño de antenas utilizando Geometría Fractal (Antenas fractales).", 2004.
- [22] F. Gonzales Palacios, R. E. Díaz Vargas, J. A. Heraud Perez y S. B. Correa Erazo, "S-band koch snowflake fractal antenna for cubesats", *2016 IEEE ANDESCON*, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ANDESCON.2016.7836227.
- [23] M. T. Yassen, M. R. Hussan, H. A. Hammas, H. Al-Saedi y J. K. Ali, "A compact dual-band slot antenna based on Koch fractal snowflake annular

- ring", *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*, 2017, pp. 670-674, doi: 10.1109/PIERS.2017.8261826.
- [24] Madray, R. Kuemper, J. Martin y M. R. Madani, "Design and COMSOL simulation of koch snowflake dipole fractal antennas", *2017 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA)*, 2017, pp. 111-115, doi: 10.1109/RFID-TA.2017.8098902.
- [25] M. T. Yassen, M. R. Hussan, H. A. Hammas, H. Al-Saedi y J. K. Ali, "A Dual-Band Printed Antenna Design Based on Annular Koch Snowflake Slot Structure", *Wireless Personal Communications*, 2019, pp. 649-662, doi: 10.1007/s11277-018-6039-0.
- [26] J. Coonrod, "Comparing Microstrip and Grounded Coplanar Waveguides", Rogers Corporation, Julio 2020, <https://rogerscorp.com/blog/2020/comparing-microstrip-and-grounded-coplanar-waveguides>
- [27] C. A. Balanis, "Antenna theory, analysis and design", 3rd edition, New York: John Wiley & Sons. Inc; 2015.

# ANEXO 1

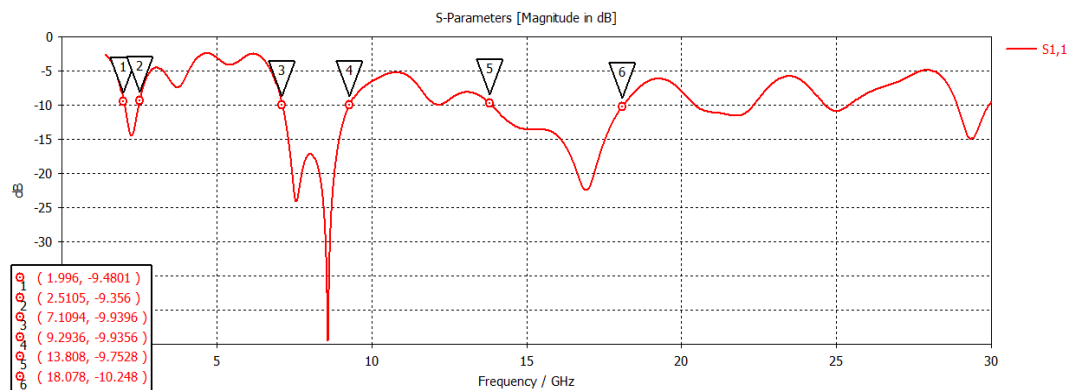
## Plan de negocio

Como se ha podido apreciar en esta tesis, el sistema diseñado cumple con los objetivos planteados a nivel de prototipo. Sin embargo, para concluir con este proyecto aún es necesario mejorar su presentación y definir sus condiciones de uso final. Solo así dejará de ser un prototipo y se convertirá en una solución real para la industria.

### Descripción del proyecto:

Como producto, la antena diseñada en esta tesis posee unas dimensiones mínimas de 4x4 cm y un ancho de banda que abarca las siguientes tres bandas:

- Banda S: 2 GHz a 2.5 GHz
- Banda C y X: 7.1 GHz a 9.3 GHz
- Banda Ku: 13.8 GHz a 18.1 GHz



Como servicio, las antenas pueden ser diseñadas de acuerdo a los requerimientos de frecuencia y dimensiones que elija el cliente, según las aplicaciones o tecnologías que requiera implementar. El modelo de diseño desarrollado en esta tesis se diferencia de otros por las siguientes características:

- amplio ancho de banda
- cobertura multi-banda
- miniaturización de antena

Estas características son muy necesarias en el mercado actual que demanda dispositivos muy pequeños y de mayores velocidades de transferencia.

### Productos y Tecnología:

Este producto puede aplicarse en tres grupos tecnológicos distintos: dispositivos electrónicos comerciales, aplicaciones de radioaficionados, e investigación en radioastronomía.

Primero, existe un grupo de dispositivos comerciales o de uso común que utilizan tecnologías WiFi, WiMax, Bluetooth y 5G. Estas tecnologías están ampliamente implementadas alrededor del mundo y sus protocolos ya vienen programados en los dispositivos, listos para ser utilizados.

Tecnología	Estándar	Frecuencia (MHz)	
WiFi 2.4 GHz	802.11 b/g/n/ax	2400 – 2495	
WiMax	802.16 d/e	2300 – 2400	
Bluetooth	802.11 FH / 802.15.1	2400 – 2480	
5G	n7 IMT-E	2500 – 2570	2620 – 2690
5G	n30 WCS	2305 – 2315	2350 – 2360
5G	n34 IMT	2010 – 2025	
5G	n38 IMT-E	2570 – 2620	
5G	n40 Banda-S	2300 – 2400	
5G	n41 BRS	2496 – 2690	
5G	n53 Banda-S	2483.5 – 2495	
5G	n65 IMT extendido	1920 – 2010	2110 – 2200
5G	n66 AWS extendido	1710 – 1780	2110 – 2200

Luego, tenemos otro grupo de bandas de frecuencia designadas por la por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) reservadas para radioaficionados, que se pueden usar en llamadas CW (Continuous Wave u onda continua) y SSB (Single Side Band o banda lateral única), comunicación de aviones a radiocontrol y satélites amateurs. También, existen bandas reservadas para aplicaciones ISM (Industrial, científico, médico).

Licencia	Aplicación	Frecuencia (MHz)
ISM		2400 – 2500
Radioaficionados	Satélites amateurs	2300 – 2450
Radioaficionados	CW / SSB	2304.1
Radioaficionados	Aviones a radiocontrol	2400 – 2485

Finalmente, existe un último grupo de bandas que pueden ser empleadas para fines académicos o de investigación. Dentro de las bandas protegidas por la Unión Internacional de Astronomía (IAU por sus siglas en inglés), se encuentran la frecuencia del isótopo de helio ionizado ( $^3\text{HeII}$ ), que es importante para el estudio de la evolución estelar, evolución galáctica y cosmología; y la frecuencia del formaldehído ( $\text{H}_2\text{CO}$ ), importante para estudios en astro-química. También, encontramos las bandas designadas por la ITU para satélites de exploración terrestre y radioastronomía.

Licencia	Aplicación	Frecuencia (GHz)
ITU	Radioastronomía	14.47 - 15.4
ITU	Radioastronomía	2.64 – 2.69
IAU	Isótopo de Helio ( $^3\text{HeII}$ )	8.66 – 8.67
IAU	Formaldehído ( $\text{H}_2\text{CO}$ )	14.44 – 14.5
ITU	Satélites de exploración terrestre	9.2 – 9.3

### Mercado potencial

De acuerdo a las aplicaciones anteriores, se pueden identificar tres sectores de mercados potenciales distintos, que serán presentados a continuación:

1. Uso comercial: 5G, WiFi, Bluetooth, WiMax.
2. Uso espacial: radioastronomía y comunicación o exploración espacial.
3. Uso para radioaficionados.

Uso comercial: El sector del mercado de dispositivos de uso común evoluciona rápidamente. La implementación de las redes 5G y su relación con la domótica e internet de las cosas (IoT, del inglés Internet of Things) promueven que cada vez más dispositivos de uso común estén conectados a la red.

Las celdas usadas en estas tecnologías son cada vez más pequeñas, como son las femtoceldas en la tecnología 5G, y esto permite reducir la potencia necesaria en los equipos que se ubican dentro de la zona de cobertura de la celda. Además, como la tecnología IoT incluye en la red a dispositivos de uso común, el producto podría ser utilizado en estos equipos, especialmente en aquellos de dimensiones pequeñas. La capacidad de producción en este mercado es de nivel industrial. Por ejemplo, empresas como Swarm Technologies Inc recientemente empezaron a utilizar un modelo similar al presentado en esta tesis.



Uso espacial: El sector del mercado espacial y de radioastronomía continúa expandiéndose debido a los estándares de satélites cada vez más accesibles al usuario. El producto podrá ser utilizado para la comunicación espacial, donde los satélites de menores dimensiones obtendrán mayores beneficios. Nuevas tecnologías de exploración en la superficie, como los CubeRovers, también podrán utilizar el producto para comunicación o de investigación de elementos.

Además, la antena puede utilizarse para la investigación radioastronómica de elementos como el isótopo de helio o el formaldehído, en el espacio. Como se explicó anteriormente, es conveniente utilizar vehículos de exploración de bajo volumen, como CubeSats o CubeRovers, para identificar la presencia de estos elementos durante la exploración espacial. Debido al gran ancho de banda del producto, los vehículos podrán utilizar bandas de comunicación simultáneamente.

Uso para radioaficionados: Finalmente, se encontró un mercado nicho para usuarios radioaficionados que utilicen la banda S para enlazar sus terminales con satélites amateur o aviones a radiocontrol.

#### Mercado local:

Dentro del mercado peruano, los dispositivos comerciales son fabricados en el exterior e importados al país; y cada uno de estos dispositivos, en su mayoría, ya cuenta con un módulo de comunicación integrado. En este contexto, el proyecto podría tener una mayor acogida como un servicio en el sector de uso espacial, pues usualmente las áreas de investigación espacial o radioastronomía requieren de dispositivos diseñados a la medida. Por ejemplo, instituciones peruanas como CONIDA (Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial) promueven la experimentación con CubeSats, en el sector de educación de nivel secundaria, técnica y universitaria, a través de constantes conferencias de acceso público. Sin embargo, pese a que el proyecto podría tener una mayor acogida en este sector, las utilidades serían menores por tratarse de un mercado aún emergente.

### Cliente Objetivo

De acuerdo al análisis anterior, el perfil del cliente objetivo es una empresa que está relacionada con la industria de producción y ensamblado de dispositivos electrónicos, por ello podrá instalar la antena diseñada en sus productos.

El cliente tendrá como objetivo de incluir sus dispositivos a las tecnologías de internet de las cosas o domótica.

El cliente tendrá el objetivo de comunicar sus dispositivos vía WiFi, Bluetooth o 5G.

### Usuario

El usuario final podrá percibir los beneficios del producto al evaluar la capacidad de velocidad de transferencia de datos de su dispositivo. La velocidad depende directamente del ancho de banda del enlace y la calidad de la señal recibida, de acuerdo al teorema de Shannon-Hartley. El ancho de banda puede ser extendido con el uso de técnicas como el Carrier Aggregation (CA), que utiliza múltiples canales en una o distintas bandas para incrementar el ancho de banda total, de acuerdo a los protocolos utilizados. De acuerdo a estos dos parámetros, el producto es ideal para cumplir con los requisitos del usuario.

### Hipótesis

La propuesta tendrá mayor factibilidad de ser rentable en el sector del mercado de dispositivos comerciales que usen tecnologías 5G, Bluetooth, WiFi o Wimax. La creciente demanda de incluir un interfaz de acceso a la red, sea alámbrica o inalámbrica, en dispositivos tecnológicos, se debe a una mayor implementación del IoT, la domótica y las tecnologías previamente mencionadas. Por todo ello, ofrecer el proyecto en un mercado de nivel industrial generará el mayor nivel de retorno.

## **ANEXO 2**

Artículo aceptado en el Congreso Internacional de Electrónica, Comunicaciones y Redes 2021.

Se anexa en las siguientes páginas el artículo (paper) aceptado en el evento, en idioma inglés, tal como ha sido solicitado.



June 2021

# Koch Snowflake Fractal Antenna Design in the Deep Space Bands for a Constellation of Cubesat Explorers

Orlando Francois GONZALES PALACIOS<sup>1,b,c</sup>, Ricardo Erick DIAZ VARGAS<sup>2,d</sup>

Patrick H. STAKEM<sup>a</sup>, and Carlos Enrique ARELLANO RAMIREZ<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Office of STEM & Cubesat Inclusion GSFC (NASA) - EE-UU

<sup>b</sup>Beijing University of Aeronautics and Astronautics - Beijing, China

<sup>c</sup>Universidad Nacional de Piura - Piura, Perú

<sup>d</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) - Lima, Perú

**Abstract.** This paper presents the design and simulation of a Koch curve fractal antenna, developed according to the second iteration of the Koch snowflake fractal for S-band, C-band, X-band and Ku-band. The simulated antenna shows good performance for the operating frequencies and desirable gain, bandwidth and VSWR parameters. Being a compact antenna, it has a size, geometry and characteristics that go in accord with the CubeSat's structure standards. The antenna was fabricated on a 1.5 mm thick FR-4 substrate. The VSWR achieved values are lower than 1.4 for the frequencies used (2.1 GHz to 2.4 GHz and 7.4 GHz to 8.9 GHz) with a simulated omnidirectional radiation pattern. A maximum **gain of 6.8 dBi** was achieved. As this antenna works optimally in the S, C and X bands, it is adequate for deep space applications, especially in low-power consumption systems. This approach would be ideal for constellations of Cubesat explorers.

**Keywords.** antenna, microstrip, fractal, S-band, C-band, X-band, Ku-band, deep space, cubesat, constellation, swarm, communication.

## 1. Introduction

Aerospace technology in recent years has advanced exponentially, but it continues to present new challenges that stimulate human ingenuity. In the next decade, we will face the new challenge that is the colonization of the Moon and Mars. This boom in space exploration requires new design alternatives that meet the demands of increasingly complex aerospace standards. NASA is committed to landing American astronauts on the Moon by 2024, through the Artemis lunar exploration program [1], new technologies and innovative systems will be used for deep exploration of the Moon and deep space.

Possible applications on deep space exploration as the case of a "mothership" spacecraft carrying multiple Cubesats with multiple targets as an objective, such as an asteroid belt [2], or areas of phenomena of interest where multiple simultaneous observations are required are discussed in this paper. Within the communication group, a simple TCP/IP protocol could be used between the mothership and the various explorer

---

<sup>1</sup> GONZALES PALACIOS, Orlando Francois; E-mail: [a20156013@pucp.edu.pe](mailto:a20156013@pucp.edu.pe)

<sup>2</sup> DIAZ VARGAS, Ricardo Erick; E-mail: [a20100863@pucp.edu.pe](mailto:a20100863@pucp.edu.pe)

June 2021

Cubesats [2]. The mothership serves as an in-situ store-and-forward communication node.

Contributing to these technological innovations, this scientific article works on the design of a Koch snowflake fractal antenna that works in the S-band, C-band and X-band, which will be used in a constellation of CubeSats or small satellites to carry out scientific investigation in deep space. The communication capabilities (hardware and software) of the CubeSat satellite standard allow the transmission of data and telemetry for missions in LEO. However, interplanetary communications with 1 to 3 U Cubesats remain a challenge due to the limited size and power of these spacecrafts [3]. Recent advances in antenna and amplifier designs have expanded the communication possibilities for the Cubesat standard, although more research work is still needed on Cubesat communication systems. However, the simplicity and low cost of CubeSats make them attractive candidates for scientific missions to the Moon [4] and study experimental payloads such as this “Koch Snowflake Fractal Antenna” [5].

## **2. Deep Space Cubesat Constellation Application**

### *2.1. Cubesat Satellites*

A Cubesat is a small and affordable satellite that can be developed and launched by colleges, high schools, and even individuals. The specifications were developed by California Polytechnic State University (Cal Poly) and Stanford University in 1999. The basic structure is a 10-centimeter cube, weighing less than 1.33 kilograms [6]. This allows multiple of these standardized packages to be launched as secondary payloads on other missions [7].

The Cubesat design specification, developed by Cal Poly, defines the physical and interface specifications for Cubesats, and gives testing requirements for vibration, thermal-vacuum and shock tests, as well as safety tests [7]. Since a Cubesat flies along with other Cubesats in a deployment device, and with a primary payload, safety is a key concern.

### *2.2. Constellation Systems*

Constellations are groups of satellites operating together to observe a single target. A constellation allows simultaneous observations of one target from multiple locations, or multiple targets simultaneously [8]. The step beyond constellation systems is a swarm architecture. In swarm robotics, the key issues are the communication between units, and cooperative behavior. The fractal antenna for this constellation of satellites is designed to primarily serve small satellites using UHF and VHF, as they are the most popular bands in nano and microsatellite standards. The capability of individual units does not matter much; what matters is the strength in numbers, and for this reason the given approach is applicable to groups of explorers arranged as constellations, clusters, and swarms.

June 2021

### 2.3. Relay Constellation Orbital Design

A relay satellite constellation that orbits on a low altitude orbit will allow us to establish an autonomous communication network that provides connectivity between the surface nodes, satellite constellations and base stations on Earth. Some orbit options for this configuration are the following: Malapert station [9], L1 & L2 halo constellation [10], hybrid constellation, elliptical orbit constellation, polar circular orbit constellation and inclined circular orbit constellation [11]. These orbital alternatives are depicted on Figure. 1.

### 2.4. Communication within collection of Cubesats (relay communication)

The Cubesat's small antennas, and relatively low power (1W) means we have to get clever with communications. One approach is to have the dispenser or mothership handle communications with Earth, and have short-range communication with the Cubesats using the store-and-forward technique [12]. A relay communication constellation system for low lunar orbits is proposed to be used in conjunction with the fractal antenna presented in this paper. As low-orbit relay satellites will pass over the surface sites relatively quickly, a high-orbiting mothership is needed to provide near-continuous communication support [13].

### 2.5. The Mothership

The mothership would also support point to multipoint communications between the various units of Cubesats or units on the surface. The protocol for communication between Cubesats and the mothership could be as simple as TCP/IP [12]. It would be ideal to consider the Autonomous Space Communications Technology (ASCoT) [14]. Since it nimbly executes a media access control (MAC) scheme, it simultaneously drives electronically directed arrays and switches communication links between multiple nodes separated in space or on the surface.

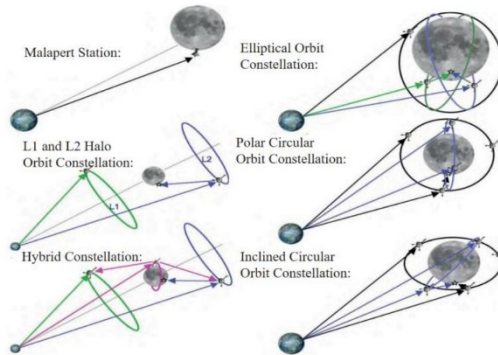


Figure 1. Relay Constellation Orbital Design configurations studied by the SCAWG [11]

### 3. Antenna Design

The proposed antenna must cover the S-band, C-band and X-band for deep-space communication standards [15]. 1U Cubesat standard states a satellite's dimension must be 10x10x10cm, therefore the antenna is constrained by this requirement to avoid the implementation of complex deployment systems. A fractal pattern antenna easily complies with these two requirements, due to its characteristic antenna miniaturization and broad bandwidth, multi band coverage. Since the antenna will be used for a low power application, the radiating pattern will be printed as a microstrip on a FR-4 substrate [16].

#### 3.1. Fractal Design

Fractal patterns are self-contained and self-similar; thus, a fractal shape replicates itself as a fraction of the original shape with each iteration. As the fractal keeps self-replicating limited to a certain space, with a space-filling behavior, the Chu limit for small antennas is approached with higher iterations [17]. Among fractal patterns, Koch snowflake is generated using an iterative function system on an equilateral triangle [18]; thus, the perimeter of the Koch loop curve is [19]:

$$P_n = 3\sqrt{3} r \left(\frac{4}{3}\right)^n$$

Where  $r$  is the radius of the circle that circumscribes a Koch snowflake, and  $n$  is the number of iterations. Two iterations have been chosen as further iterations will resolve in smaller details which complicate the antenna fabrication [20]. The monopole and snowflake lengths have been calculated for the chosen fractal radius, as shown on Table 1.

**Table 1.** Monopole, snowflake and iteration lengths according to fractal radio.

Fractal radius (cm)	Iteration	Monopole length (cm)	Snowflake length (cm)	Segment length (cm)
1.767	0	3.061	9.18	3.06
1.767	1	4.081	12.24	1.02
1.767	2	5.442	16.33	0.34

#### 3.2. Microstrip Antenna Parameters

This microstrip antenna is mounted on a 1.5mm FR-4 substrate and follows the electrical length correction procedures presented on [18]. The Koch snowflake fractal loop is imprinted as a microstrip line on the substrate, thus the dimensions shown on Table 1. have to be tuned to match substrate electromagnetic parameters. The results of these recalculations are shown on Table 2. where  $L$  is the pattern base length and  $L_n$  is the  $n$ -th iteration length ( $n=2$ ), while  $Loop_w$  is the pattern microstrip width. Antenna is fed by a 50 Ohms microstrip line with a  $Feed_w$  width [5]. Final design of the antenna front and rear views along with its parameters are depicted in Figure 2.

**Table 2.** Antenna dimensions for bandwidth coverage optimization in the X-Band

Parameter	Dimensions (mm)	Parameter	Dimensions (mm)
$L$	30.61	Subs_w	44
$L_n$	3.4	Subs_h	42
$Feed_w$	2.9	Gr_w	6.00
$Loop_w$	6	Gr_h	26.30

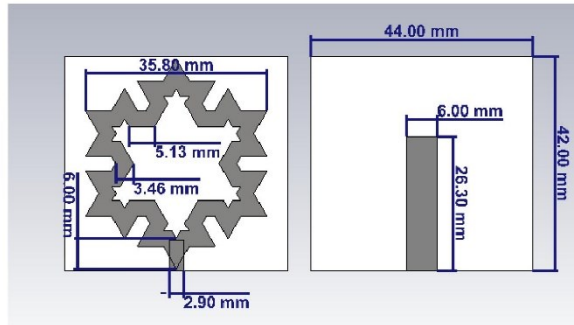


Figure 2. Koch snowflake fractal antenna dimensions

#### 4. Simulation and Results

The dimensions of the substrate, fractal geometry and ground plane previously calculated are now optimized with computational electromagnetic finite element modeling. The proposed antenna modeling and X-band focused optimization have been carried out using EM CAD Microwave Studio by Computer Simulation Technology (CST®). The dimensions we obtained after the optimization are shown in Section 3.2 and the antenna performance evaluation in the sections below. This setting achieves a maximum gain of 6.8 dBi for the X-band uplink channel.

##### 4.1. Bandwidth: $S_{11}$ Parameter & VSWR

An antenna bandwidth is calculated according to its wave reflection parameters when matched to a load; these values can be presented as voltage standing wave ratio (VSWR) or as input reflection coefficient ( $S_{11}$ ). Fractal pattern design allows the antenna to have a broad bandwidth and thus it has multiple working frequency bands: S-band working frequency is from 2.0 GHz to 2.5 GHz, C-band working frequency from 7.1 GHz to 8 GHz, X-band working frequency from 8 GHz to 9.3 GHz and Ku-band working frequency from 13.8 GHz to 18 GHz. The antenna's  $S_{11}$  and VSWR parameters when matched to a 50 Ohm load are shown on Figure 3 and Figure 4, these results cover the whole S-Band and X-Band Deep-Space communication standards frequencies and broaden the possible applications for this antenna.



June 2021

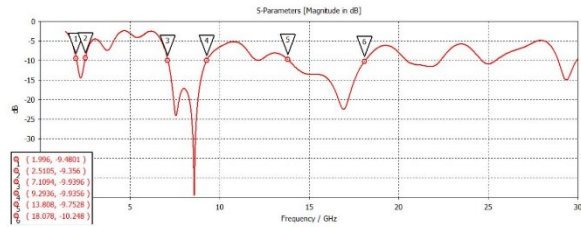


Figure 3. Antenna S11 parameters in S-Band, C-band, X-band and Ku-band (50 Ohms).

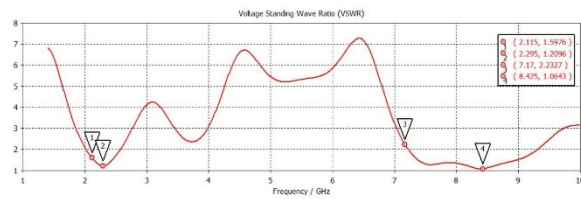


Figure 4. Voltage standing wave ratio values in S-Band, C-band and X-band (50 Ohms).

#### 4.2. Radiation Pattern

Radiation pattern is expected to be that of an omnidirectional antenna, with its maximum along the fractal loop perpendicular axis. While effective aperture is low on S-band, due to the antenna's effective length, the antenna performs better for X-band [21]. Since Deep-space communications standards make no use of Ku-band, we'll present the antenna S, C and X bands gain radiation patterns in Figure 5 and Figure 6 respectively. X-Band uplink radiation pattern presents a 6.8 dBi gain, while C-Band downlink has the maximum gain of 4.37 dBi, this result is optimal as transmission requires more power than reception.

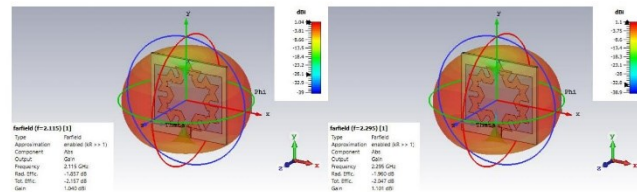


Figure 5. Deep space S-band 2110-2120 MHz up-link and 2290-2300 MHz down-link radiation patterns.

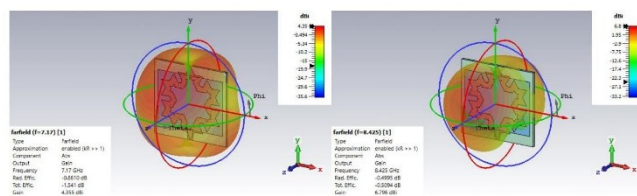


Figure 6. Deep space C-band 7145-7190 MHz up-link and X-band 8400-8450 MHz down-link radiation patterns.

Based on the previous radiation pattern figures and VSWR diagram, we can confirm the antenna optimized dimensions have been correctly tuned to the deep space bands working frequencies. The proposed antenna electromagnetic gain, S11 parameter and VSWR along each band are presented in Table 3.

Table 3. Antenna electromagnetic performance for S-band, C-Band, K-band and X-band

Center frequency (GHz)	Gain (dBi)	S11 (dB)	VSWR (-)
2.115	1.04	-12.765	1.598
2.295	1.1	-20.459	1.210
7.17	4.35	-8.374	2.233
8.425	6.8	-30.127	1.064

### 5. Conclusions and Future Works

The design of an antenna with a "Koch Snowflake" fractal geometry is introduced in this paper as a suitable candidate for deep space missions, as well as in various Cubesat applications which allow testing and developing technology at low cost.

The proposed antenna serves for dual-band communication since its working frequency band covers the entirety of S, C and X band up-link and down-link standard channels. The uplink gain is 6.8 dBi while the downlink gain is 4.37 dBi. The development of an omnidirectional radiation pattern allows CubeSats that use a passive magnetic attitude stabilization system to maintain a communication link with no need of an aiming system. This is ideal for low-power consumption space communication, as relay or store and forward systems, as a non-off-the-shelf alternative.

Applications such as the following could make use of this article: Deep-space missions such as asteroid exploration, investigation of the moons of Jupiter and Saturn.

We are currently working with the STK & Matlab Software for a complete simulation of the antenna constellation operation in deep space and need to further investigate the swarm system communication protocol and cooperative behavior.

### References

[1] Smith M, Douglas C, Hermann N, Mahoney E, Krezel J, McIntyre E, et al. The Artemis program: An overview of NASA's activities to return humans to the moon. AERO [Internet]. 2020 Aug. p. 1-10. Available from: <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172323>.

June 2021

- [2] Shao M, Turyshev S, Zhai C. Big science in small packages: A constellation of cubesats to search for near earth asteroids. *CLEO* [Internet]. 2016 Jun. Available from: [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_AT.2016.JF1N.2](https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2016.JF1N.2).
- [3] Batista A, Gomez E, Qiao H, Schubert K. Constellation design of a lunar global positioning system using Cubesats and chip-scale atomic clocks. *ESA* [Internet]. 2012 Jul.
- [4] Kolbeck J, Fang X, Keidar M, Kang JS, Sanders M, Bakulinski N. Effects of metallic plasma thruster plume on solar cells. *AERO* [Internet]. 2018 Aug. p. 1-10. Available from: <https://doi.org/10.1109/AERO.2018.8396445>.
- [5] Yu Z, Yu J, Ran X. An improved koch snowflake fractal multiband antenna. *PIMRC* [Internet]. 2018 Feb. Available from: <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292332>.
- [6] Swartwout M. The first one hundred CubeSats: A statistical look. *JSSat*. 2013 Dec; 2(2):213–233.
- [7] Toorian A, Diaz K, Lee S. The CubeSat approach to space access. *AERO* [Internet]. 2008 Mar. Available from: <https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526293>.
- [8] Stakem PII. Robotic exploration of the icy moons of the gas giants. 2020 Feb.
- [9] Sharpe BL, Schunk DG. Malapert mountain: Gateway to the moon. *ASR* [Internet]. 2003 Jun. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00535-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00535-0).
- [10] Circi C, Romagnoli D, Fumentì F. Halo orbit dynamics and properties for a lunar global positioning system design. *MNRAS* [Internet]. 2014 Jun. Available from: <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1085>.
- [11] Schier J, Rush J, Vrotsos P, Williams W. Space communication architecture supporting exploration and science: plans & studies for 2010-2030. *AIAA* [Internet]. 2012 Dec. Available from: <https://doi.org/10.2514/6.2005-2517>.
- [12] Perea-Tamayo RG, Fuchs CM, Ergetu E, BingXuan L. Design and evaluation of a low-cost CubeSat communication relay constellation. *LAMC* [Internet]. 2019 Apr. Available from: <https://doi.org/10.1109/LAMC.2018.8699047>.
- [13] Bhasin K, Hackenberg A, Slywczak R, Bose P, Bergamo M, Hayden J. Lunar relay satellite network for space exploration: architecture, technologies and challenges. *ICSSC* [Internet]. 2006 Jun. Available from: <https://doi.org/10.2514/6.2006-5363>.
- [14] Gnawali O, Polyakovi M, Bose P, Govindan R. Data centric, position-based routing in space networks. *IEEE* [Internet]. 2005 Dec. Available from: <https://doi.org/10.1109/AERO.2005.1559422>.
- [15] Shin DK. Frequency and channel assignments. California Institute of Technology. 2015 Dic.
- [16] Siddiqui MG, Saroj A, Devesh, Agrawal N, Ansari JA. Design of isosceles-shaped fractal antenna for Ku and K-band applications. *RAETCS* [Internet]. 2018 Feb. Available from: <https://doi.org/10.1109/RAETCS.2018.8443921>.
- [17] Herrera MP, Inclán JC. Estudio y metodología de diseño de antenas utilizando geometría fractal (Antenas fractales). *EPN* [Internet]. 2014 Oct. Available from: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11124>. Spanish
- [18] Gonzales OF, Diaz RE, Heraud JA, Correa SB. S-band Koch snowflake fractal antenna for Cubesats. *IEEE* [Internet]. 2016 Oct. Available from: <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2016.7836227>.
- [19] Yassen MT, Hussan MR, Hammas HA, Al-Saedi H, Ali JK. A compact dual-band slot antenna based on Koch fractal snowflake annular ring. *PIERS* [Internet]. 2017 May. Available from: <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8261826>.
- [20] Madray I, Kuemper R, Martin J, Madani M R. Design and COMSOL simulation of koch snowflake dipole fractal antennas. *RFID-TA* [Internet]. 2017 Sep. Available from: <https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2017.8098902>.
- [21] Balanis CA. Antenna theory, analysis and design. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons. Inc; 2015.