

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA PLANA  
MULTIRESONANTE PARA APLICACIONES DE  
RADIOASTRONOMÍA EN LA BANDA SHF**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**JOSUÉ ISMAEL CRUZ CASTILLO**

**DIRECTOR: Dra. DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ**

**Quito, septiembre 2021**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Josué Ismael Cruz Castillo bajo mi supervisión.

DIANA VERONICA  
NAVARRO  
MENDEZ

Firmado digitalmente  
por DIANA VERONICA  
NAVARRO MENDEZ  
Fecha: 2022.09.09  
08:29:53 -05'00'

---

**Dra. DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Josué Ismael Cruz Castillo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.



---

JOSUÉ ISMAEL CRUZ CASTILLO

# DEDICATORIA

*Al niño que nunca dejó de soñar en grande.*

## **AGRADECIMIENTO**

A mi madre Vivienn por brindarme su amor y asegurarse de que en este camino no me falte nada.

A mi padre Juan por enseñarme el valor del trabajo, la responsabilidad y la honestidad.

A mi hermana Nicole por acompañarme y ser mi escape de la rutina.

A mis abuelitas Mariana y Raquel por su apoyo incondicional y estar siempre pendientes de mi.

A cada uno de mis maestros por la paciencia y la vocación con la que me brindaron sus conocimientos.

A mis amigos por su motivación constante y sus deseos por verme triunfar.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCE.....	3
1.3 MARCO TEÓRICO.....	3
1.3.1 INTRODUCCIÓN A LA RADIOASTRONOMÍA.....	3
1.3.2 RADIOTELESCOPIOS.....	4
1.3.3 RECEPTORES.....	5
1.3.3.1 Espectrómetro.....	5
1.3.4 ANTENA INTERNA O “FEED”.....	6
1.3.4.1 Antena de bocina.....	7
1.3.4.2 Antena parche (microstrip).....	7
1.3.4.3 Antena log-periódica.....	8
1.3.4.4 El caso del Allen Telescope Array (ATA).....	9
1.3.5 BANDAS DE FRECUENCIA DE INTERÉS ASTRONÓMICO.....	9
1.3.5.1 Observaciones desde tierra.....	10
1.3.5.2 Rayas espectrales.....	10
2. METODOLOGÍA.....	12
2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	12
2.1.1 ESPECIFICACIONES Y DIMENSIONES DE LA ANTENA PROPUESTA.....	13
2.1.1.1 Dimensión de los elementos triangulares.....	14
2.2 METODOLOGÍA DE MODELADO.....	16

2.2.1	MODELADO EN UN AMBIENTE DE 2 DIMENSIONES.....	16
2.2.2	MODELADO EN UN AMBIENTE DE 3 DIMENSIONES.....	18
2.2.2.1	Exportación del modelo 2D al software de simulación 3D.....	18
2.2.2.2	Asignación de materiales, esquema de alimentación y plano de referencia.....	20
2.2.2.3	Modelado del sistema en ANSYS HFSS.....	20
2.2.2.3.1	Reflector/plano de referencia .....	20
2.2.2.3.2	Formas de alimentación.....	21
3.	SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	24
3.1	CONDICIONES DE SIMULACIÓN.....	24
3.1.1	MÉTODO DE ALIMENTACIÓN .....	24
3.1.2	REGIÓN DE RADIACIÓN .....	25
3.1.3	FRECUENCIAS DE SIMULACIÓN Y CAMPO LEJANO .....	27
3.2	RESULTADOS.....	27
3.2.1	PARÁMETRO S11 .....	27
3.2.2	IMPEDANCIA .....	30
3.2.3	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN Y GANANCIA.....	33
3.2.4	COMPORTAMIENTO DEL PARÁMETRO S11 EN DISTINTOS PUNTOS DE ALIMENTACIÓN .....	39
3.2.5	COMPARACIÓN ENTRE ALIMENTACIÓN PARALELA Y ALIMENTACIÓN PERPENDICULAR .....	42
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	43
4.1	CONCLUSIONES .....	43
4.2	RECOMENDACIONES.....	44
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46
	ANEXO A.....	48
	ANEXO B.....	49

## RESUMEN

Este trabajo de titulación presenta el diseño y simulación de una antena plana multiresonante en la banda baja de SHF para aplicaciones de radio astronomía.

En el primer capítulo se explican de forma general los conceptos principales de astronomía y radio astronomía. Primeramente se describen los sistemas de radio frecuencia utilizados actualmente en radio astronomía: antenas, receptores, condiciones de operación, etc. Seguido de los fenómenos astronómicos detectables, bandas de frecuencia de interés, etc.

El proceso de diseño se describe en el capítulo dos. Como primer paso se selecciona la banda de frecuencia a la que se desea trabajar junto con los elementos que se pueden detectar dentro de la misma, con esta información se opta por diseñar una antena plana multiresonante comprendida de elementos triangulares.

En el tercer capítulo se presenta el modelado de la antena y el sistema de alimentación junto con la asignación de materiales en el software de simulación electromagnética HFSS. A continuación, se analizan las características obtenidas de la antena: parámetro S11, directividad, ganancia, diagrama de radiación, etc. Para complementar se realiza un análisis del comportamiento de la antena en distintos puntos de alimentación.

Para finalizar, las conclusiones y recomendaciones son recopiladas en el capítulo cuatro.

**PALABRAS CLAVE:** antenas multiresonantes, radio astronomía, frecuencia, banda SHF, simulación.



## **ABSTRACT**

This thesis presents the design and simulation of a multi-resonant flat antenna in the low SHF band for radio astronomy applications.

In the first chapter, the main concepts of astronomy and radio astronomy are explained in a general way. First, the radio frequency systems currently used in radio astronomy are described: antennas, receivers, operating conditions, etc. Followed by detectable astronomical phenomena, frequency bands of interest, etc.

The design process is described in chapter two. As a first step, the frequency band in which the antenna needs to work is selected, together with the elements that can be detected within it. With this information, it is decided to design a multi-resonant flat antenna comprised of triangular elements.

In the third chapter, the modeling of the antenna and the feeding system is presented together with the allocation of materials in the HFSS electromagnetic simulation software. Next, the characteristics obtained from the antenna are analyzed: parameter S11, directivity, gain, radiation pattern, etc. To complement, an analysis of the behavior of the antenna in different feeding points is carried out.

Finally, the conclusions and recommendations are compiled in chapter four.

**KEYWORDS:** multi-resonant antennas, radio astronomy, frequency, SHF band, simulation.

# 1. INTRODUCCIÓN

El ser humano ha puesto su mirada en el cielo desde el inicio de su existencia. Las respuestas a muchas de las más grandes incógnitas han sido obtenidas de la observación y exploración espacial.

El avance de la tecnología óptica y de radio frecuencia ha permitido que desde la invención del telescopio en el siglo XVII [1], se obtengan cada vez mejores imágenes del cosmos, esto gracias a grandes hitos de la ingeniería como el Telescopio Hubble o el Very Large Telescope de Chile.

En Ecuador la realidad es distinta, el país se encuentra muy rezagado comparado a sus pares latinoamericanos en lo que respecta a exploración astronómica. El único observatorio del país es el Observatorio Astronómico de Quito, perteneciente a la Escuela Politécnica Nacional. Dicho complejo tiene más de 140 años de antigüedad [2] y por ser una institución pública no ha recibido los recursos necesarios para estar a la par de la evolución tecnológica, esto sumado a las limitaciones de su naturaleza óptica, han hecho que este campo de investigación no sea el más aprovechado en el país.

La observación espacial óptica se queda corta cuando se toma en cuenta la inmensidad del espacio. Las longitudes de onda de la luz visible se encuentran aproximadamente entre los 310 nm hasta los 1050 nm [3], un rango muy pequeño si se compara con el total del espectro electromagnético hasta ahora estudiado. Es ahí donde la radioastronomía entra en juego.

La radioastronomía observa el espacio en todas las bandas de frecuencia que el ojo humano no puede detectar por debajo del espectro visible [4], convirtiéndose en el pilar fundamental de la exploración espacial actual. Además, es la responsable de que hoy en día se pueda reconocer, por ejemplo, los principales elementos que constituyen un planeta lejano, la ubicación de un agujero negro o la existencia de púlsares, quásares y galaxias activas [5].

Las antenas parabólicas son las más utilizadas en la radioastronomía gracias a su directividad y alta ganancia. Este tipo de antenas por sí mismas no son capaces de detectar señales electromagnéticas, necesitan un elemento resonante (antena interna) en el foco del paraboloide que trabaje en las bandas de frecuencia de interés astronómico, estas bandas se encuentran entre los cientos de MHz hasta las unidades de THz [6].

El desafío se encuentra en el diseño de esta antena interna. Los principales parámetros para tomar en cuenta son: los elementos a detectar, las bandas de frecuencia a las que se

encuentran dichos elementos, la directividad, la ganancia, parámetros S, temperatura de operación, entre otros.

Para extraer el máximo partido de las observaciones astronómicas es necesario que la antena pueda detectar una cantidad de elementos considerables, es decir, un ancho de banda que permita a los astrónomos, en un solo mapeo de un área determinada, analizar más de una variable.

En radioastronomía, la banda SHF es de vital importancia ya que elementos de gran interés astronómico como el formaldehído ( $H_2CO$ ), metanol ( $CH_3OH$ ), helio ( $3He^+$ ), amoníaco ( $NH_3$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ), etc. emiten frecuencias detectables dentro de la misma [6], y las dimensiones de una antena para esta banda están entre las unidades de milímetros a las decenas de centímetros, lo que facilita su implementación [7].

Las antenas multibanda más comunes son la Yagi y la log-periódica. Antenas de diseño relativamente sencillo, pero de construcción un poco más elaborada. Estas antenas se caracterizan por ser un arreglo de dipolos separados paralelamente por un valor lineal o logarítmico respectivamente [8]. Por otro lado, tenemos las antenas planas, estas están constituidas por un solo elemento: una hoja de metal de alta conductividad, modelada con técnicas de corte CNC. Su diseño es un poco más complicado comparado con aquellas anteriormente mencionadas, pero su mayor ventaja es que pueden ser implementadas directamente desde un dibujo CAD enviado a una máquina de corte asistido por computadora. Complejos radioastronómicos como el Allen Telescope Array, ubicado en California – USA, se ha decantado por el uso de arreglos de antenas planas como elementos resonantes de sus platos parabólicos [7].

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Presentar el diseño de una antena plana multiresonante para aplicaciones de radioastronomía en la banda baja de SHF.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Aprender sobre las bandas de frecuencia de interés astronómico junto a los fenómenos y elementos detectables por la radioastronomía.
- Conocer los beneficios de las antenas planas multiresonantes en aplicaciones radio astronómicas.

- Definir los mejores materiales tanto para la antena, como para su sistema de alimentación.
- Modelar con la ayuda de un software de simulación electromagnética 3D la antena diseñada.
- Presentar el análisis de los resultados obtenidos de la simulación.

## **1.2 ALCANCE**

Este proyecto empezará definiendo un marco teórico que, gracias a la bibliografía pertinente y vigente, presentará la información necesaria sobre las bandas de frecuencia y los diferentes fenómenos que se pueden detectar mediante una observación de ondas de radio procedentes de distintas coordenadas espaciales, así como la forma de analizarlas.

Como siguiente paso se procederá a investigar sobre los diferentes tipos de antenas planas multibanda con sus respectivas técnicas de diseño, se profundizará el estudio en la que mejor se adapte al funcionamiento dentro de la banda baja de SHF.

Con la técnica de diseño definida, el siguiente paso será, con la ayuda de un software de simulación electromagnética 3D, modelar la antena plana según los parámetros obtenidos en la fase de diseño y analizar sus características resultantes.

Este trabajo de titulación no tendrá producto final demostrable

## **1.3 MARCO TEÓRICO**

### **1.3.1 INTRODUCCIÓN A LA RADIOASTRONOMÍA**

La radioastronomía es la ciencia que estudia el universo no observable, es decir fuera de los rangos del espectro electromagnético visible, mediante la detección y el análisis de ondas de radio provenientes del espacio exterior. Los principales objetos de estudio de la radioastronomía son: la radiación de fondo de microondas (CMB), procesos de alta energía, campos magnéticos cósmicos, astroquímica, formación de planetas y galaxias, cinética de las galaxias, estrellas de neutrones y relatividad general.

### 1.3.2 RADIOTELESCOPIOS

Un radio telescopio es un receptor de señales de radio provenientes del espacio exterior. Los dos parámetros más importantes con los que debe cumplir son la sensibilidad y la resolución angular. La sensibilidad depende de que tan buena es la relación señal a ruido y la resolución angular se define como la habilidad de poder detectar y diferenciar ondas recibidas dentro de un área de observación específica.

El ruido es un factor clave a tomar en cuenta para las observaciones radio astronómicas. Las señales detectadas son muy débiles y pueden ser fácilmente eclipsadas por fuentes externas o por el ruido térmico. Para solucionar este problema, los radio telescopios están instalados lejos de cualquier asentamiento humano, y sus elementos radiantes y de recepción se mantienen a temperaturas cercanas al cero absoluto (alrededor de 20 K).

Para mejorar la resolución angular, los radio telescopios están conformados por platos parabólicos, debido a que este parámetro es directamente proporcional al diámetro del reflector como se puede observar en la siguiente ecuación [8].

$$\theta = 1.22 * \frac{\lambda}{D} \quad (1.1)$$

Donde  $\theta$  está en radianes y  $\lambda$  y D en metros.

La antena parabólica también posee una ganancia dada por la siguiente ecuación [9]:

$$G_{dB} = 10\log \left( \frac{\eta * \pi^2 * D^2}{\lambda^2} \right) \quad (1.2)$$

En donde:

- G es la ganancia en dB
- $\eta$  es la eficiencia de la antena
- D es el diámetro de la antena
- $\lambda$  es la longitud de onda de trabajo

La construcción de radio telescopios con diámetros de platos cada vez más grandes es una limitante por el desafío que conlleva. Para mantener una resolución angular amplia sin aumentar el tamaño de los telescopios se puede llevar a cabo un arreglo de antenas parabólicas abarcando un área de terreno determinada, estas antenas trabajan sobre una misma área de observación y las señales detectadas son analizadas en conjunto como un

gran único radio telescopio, esta técnica se conoce en radio astronomía como interferometría.

### **1.3.3 RECEPTORES**

Se define un receptor como el sistema de recepción interno del radio telescopio, conformado principalmente por una antena interior también llamada "feed", que recibe las ondas concentradas por el plato parabólico, un amplificador y uno o varios filtros.

Dependiendo del tipo de ondas y las características a extraer, un receptor puede ser un:

- Radiómetro: Mide solo la intensidad (potencia) de una señal.
- Espectrómetro: Mide la intensidad en función de la frecuencia de una señal.
- Polarímetro: Es sensible al estado de polarización de una señal. Entiéndase como polarización a la relación de ortogonalidad entre el campo magnético y eléctrico de la misma.

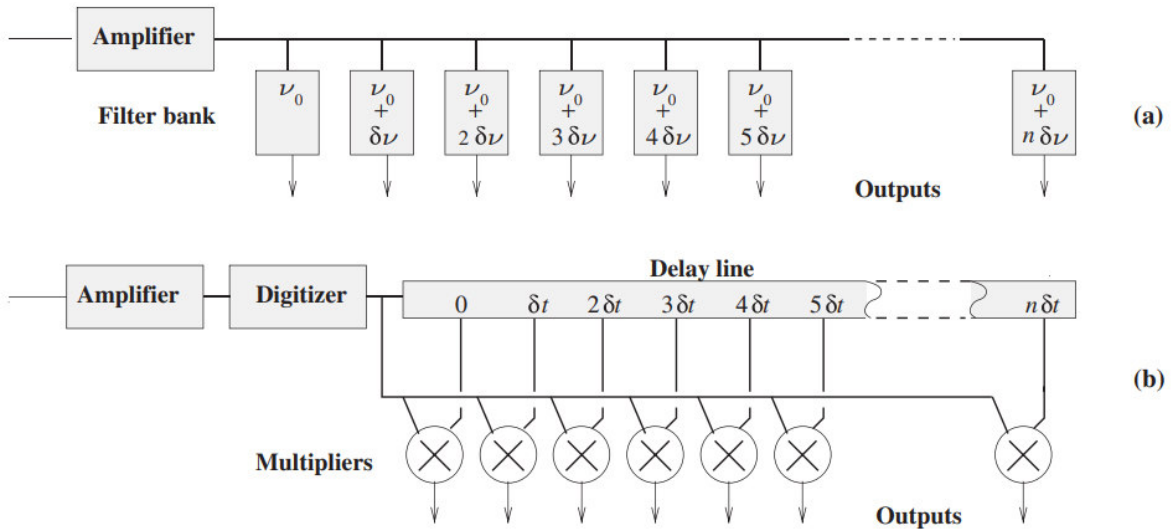
O una combinación de estos.

#### **1.3.3.1 Espectrómetro**

El análisis en frecuencia es indispensable para realizar diagnósticos importantes sobre las condiciones físicas y químicas del espacio.

Se definen dos tipos principales de espectrómetros:

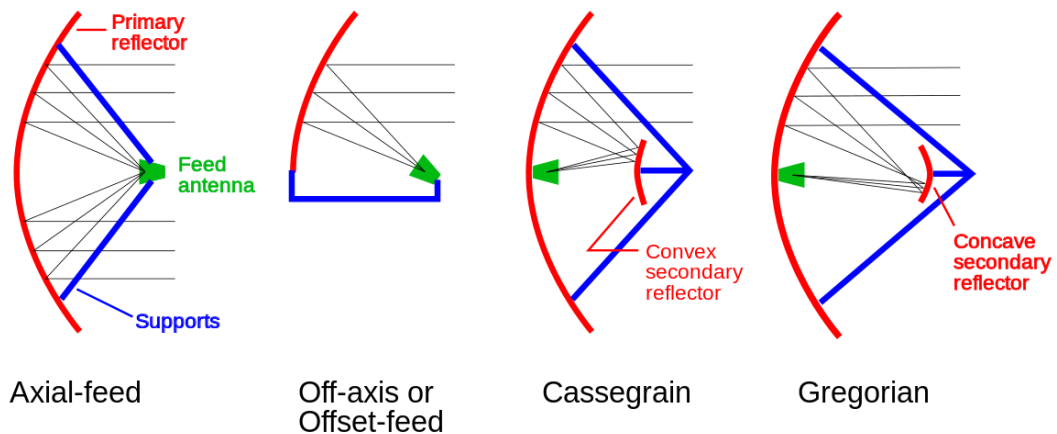
- De banco de filtros: La forma más directa de construir un sistema multibanda. Como su nombre lo indica, está conformado por un conjunto de filtros pasa banda en paralelo.
- De autocorrelación digital: Estos espectrómetros utilizan procesamiento digital de señales. Multiplican una señal por versiones de ésta con un desfase determinado, e integran estos resultados a lo largo de un periodo de tiempo. De esta manera se puede analizar qué tan relacionada está una señal con sus distintas versiones para encontrar sus características de frecuencia.



**Figura 1.1:** Esquema de un espectrómetro de banco de filtros (a) y de autocorrelación digital (b) [10].

### 1.3.4 ANTENA INTERNA O “FEED”

La principal función del plato de un radio telescopio, más allá de aumentar la directividad de este último, es el de concentrar las señales recibidas en un solo punto llamado foco gracias al principio de reflexión. En este punto se necesita un elemento resonante (antena interna) que se encargue de detectar las señales y/o enviarlas.



**Figura 1.2:** Principales tipos de antenas parabólicas, en rojo se definen el o los reflectores, en verde el foco, en negro la trayectoria de las señales recibidas y/o enviadas [11].

Para aprovechar al máximo los recursos disponibles y el tiempo de observación, los astrónomos consideran obligatorio realizar observaciones multibanda. Es decir, en un solo escaneo de un área determinada, obtener datos de señales con distintas características de frecuencia. Es, por lo tanto, muy importante considerar una antena multiresonante como “feed” de un radio telescopio. A continuación, se definen los principales tipos de antenas multibanda usadas en radio astronomía.

#### 1.3.4.1 Antena de bocina

Una antena de bocina es básicamente una guía de onda ensanchada progresivamente y terminada en apertura. Ya que no posee elementos resonantes puede tener un ancho de banda de funcionamiento considerable. Son principalmente usadas para frecuencias mayores a 300 MHz [12]. Su principio de funcionamiento es el de emparejar gradualmente a lo largo de la bocina la impedancia del medio de transmisión con el del espacio libre ( $377 \Omega$ ) [13]. Se caracterizan además por tener una buena directividad y una baja relación de onda estacionaria.

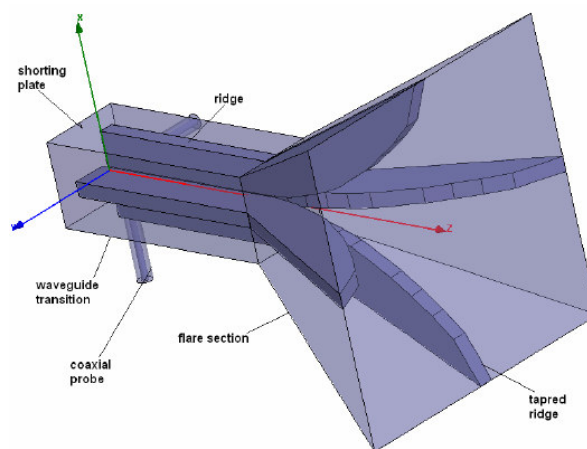


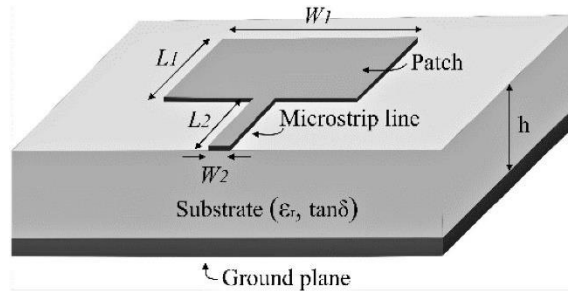
Figura 1.3: Diagrama de una antena de bocina cuadrada [14].

#### 1.3.4.2 Antena parche (microstrip)

Las antenas de parche también conocidas como antenas microstrip o impresas, consisten en una hoja metálica con una forma determinada sobre un plano de tierra separado por un sustrato dieléctrico. Estas antenas pueden ser de banda angosta o banda ancha, todo depende de la forma (diseño) de la hoja metálica. Son relativamente fáciles de construir y



diseñar por su geometría de dos dimensiones. Dentro de este tipo se pueden encontrar antenas rectangulares, fractales, log-periódicas, etc.

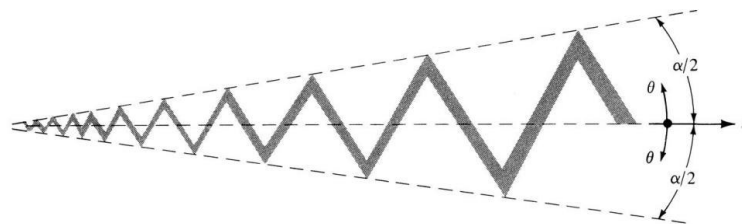


**Figura 1.4:** Diagrama de una antena microstrip rectangular [15].

### 1.3.4.3 Antena log-periódica

La antena log-periódica es una antena direccional de múltiples elementos, su principal característica es que la separación de dichos elementos sigue una función logarítmica natural. Es una antena multiresonante. Se construye principalmente como un arreglo de dipolos.

DuHamel [16], creador de la antena log-periódica moderna, y posteriormente Paul Mayes [17], demostraron que los parámetros de separación y longitud de los elementos se pueden obtener geoméricamente mediante un zigzag de ángulo fijo embebido en un ángulo agudo como se puede ver en la siguiente figura:



**Figura 1.5:** Estructura log-periódica [18].

Si tomamos en cuenta coordenadas esféricas para definir la forma de esta estructura, se puede definir que [18]:

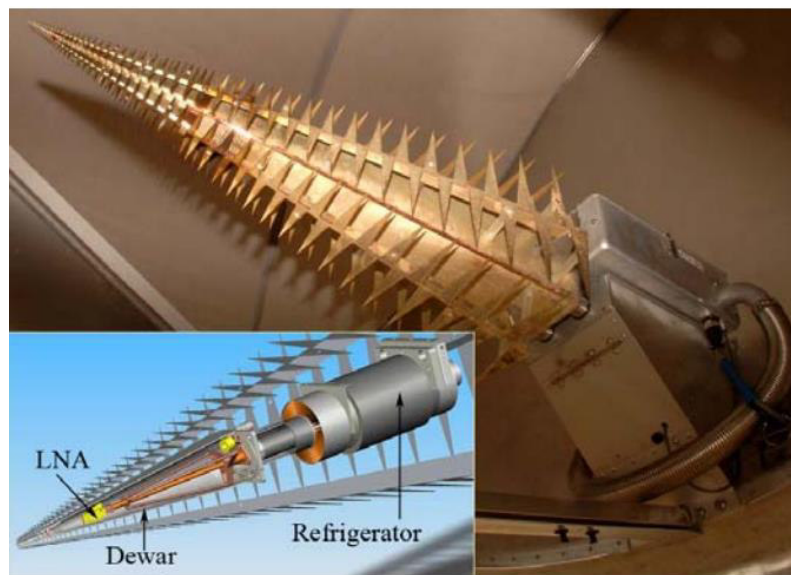
$$\theta = \text{función periódica de } (b * \ln(r)) \quad (1.3)$$

Donde b es una constante y r es la distancia entre el punto cero tomado en el origen del ángulo  $\alpha$  a cualquier punto de la estructura.

#### 1.3.4.4 El caso del Allen Telescope Array (ATA).

El Allen Telescope Array es un complejo radio astronómico situado en California – USA. Está conformado por un arreglo de 42 telescopios gregorianos con reflector secundario en offset, estos telescopios funcionan bajo el concepto de interferometría.

Dentro de cada telescopio se encuentra un feed conformado por un arreglo de 4 antenas planas log-periódicas sobre un reflector piramidal, como se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 1.4:** Feed de un telescopio del ATA más un esquema de las partes principales internas del feed [19].

Dentro del reflector piramidal se encuentra el amplificador de bajo ruido (LNA) y una cámara de vacío (Dewar en inglés) en donde se encuentra un actuador mecánico que cambia el punto de alimentación del feed para sintonización, estos elementos son enfriados a 60 K utilizando un sistema de refrigeración, de esta forma se garantiza un ruido térmico prácticamente inexistente [19].

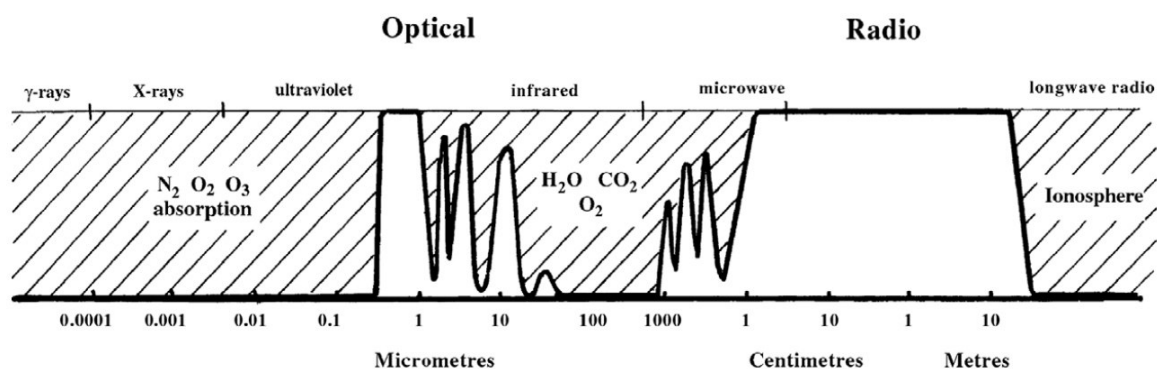
#### 1.3.5 BANDAS DE FRECUENCIA DE INTERÉS ASTRONÓMICO

Karl Jansky descubrió en los años 30, gracias a una antena casera, una señal muy débil con episodios periódicos de atenuación. Meses después de estudiarla, identificó que se repetía cada 24 horas. Grote Reber años después concluyó que esta señal de 20 MHz procedía del centro de la vía láctea ya que coincidía con el periodo de rotación de la tierra, dando inicio así a una nueva rama de la ciencia llamada radio astronomía.

### 1.3.5.1 Observaciones desde Tierra

Existen dos formas de realizar observaciones astronómicas: desde el espacio, con el uso de satélites y sondas, y desde Tierra gracias a complejos astronómicos.

Se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones relacionadas con la atmósfera al momento de realizar observaciones radio astronómicas en suelo. Dentro del espectro electromagnético, existen frecuencias que están sujetas a atenuación debido a la ionósfera y tropósfera terrestre.



**Figura 1.6:** Variación del espectro electromagnético debido a los efectos de la atmósfera terrestre [18].

En la Figura 1.6 se puede observar que la ionósfera afecta considerablemente a las frecuencias menores a 30 MHz. Además, para las frecuencias entre los 1000 y 10 micrómetros de longitud de onda (300 – 30 GHz) se debe considerar la atenuación por absorción del oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono.

Es por esta razón que en la mayoría de las observaciones desde Tierra se trabaja con frecuencias entre los 20 MHz y 30 GHz, mientras que se utilizan sondas o satélites para frecuencias mayores.

### 1.3.5.2 Rayas espectrales

Las líneas o rayas espectrales son producto del comportamiento de un sistema cuántico, es decir interacciones entre átomos o moléculas. Cuando un electrón cambia de orbital una energía es emitida en una determinada longitud de onda. Esta frecuencia está estrechamente ligada a la naturaleza del átomo o la molécula. Por esta razón y mediante la espectroscopía, se pueden determinar los elementos químicos constituyentes de

planetas, nebulosas, nubes estelares, etc. A esta rama de la radio astronomía también se la conoce como astroquímica. A continuación, se presentan las rayas espectrales de mayor importancia dentro de la banda SHF:

**Tabla 1.1:** Líneas espectrales de máxima importancia para la radioastronomía dentro de la banda SHF [6].

Sustancia	Frecuencia en reposo	Banda mínima propuesta
Metiladina ( $CH$ )	3263,794 MHz	3252,9 - 3267,1 MHz
Metiladina ( $CH$ )	3335,481 MHz	3324,4 - 3338,8 MHz
Metiladina ( $CH$ )	3349,193 MHz	3338,0 - 3352,5 MHz
Formaldehído ( $H_2CO$ )	4829,660 MHz	4813,6 - 4834,5 MHz
Metanol ( $CH_3OH$ )	6668,518 MHz	6661,8 - 6675,2 MHz
Helio ( $^3He^+$ )	8665,650 MHz	8657,0 - 8674,3 MHz
Metanol ( $CH_3OH$ )	12,178 GHz	12,17 - 12,19 GHz
Formaldehído ( $H_2CO$ )	14,488 GHz	14,44 - 14,50 GHz
Ciclopropenilideno ( $C_3H_2$ )	18,343 GHz	18,28 - 18,36 GHz
Vapor de agua ( $H_2O$ )	22,235 GHz	22,16 - 22,26 GHz
Amoniaco ( $NH_3$ )	23,694 GHz	23,61 - 23,71 GHz
Amoniaco ( $NH_3$ )	23,723 GHz	23,64 - 23,74 GHz
Amoniaco ( $NH_3$ )	23,870 GHz	23,79 - 23,89 GHz
Monóxido sulfúrico ( $SO$ )	30,002 GHz	29,97-30,03 GHz

La frecuencia en reposo es aquella que los elementos emiten cuando hay interacción de sus átomos o moléculas. La banda mínima propuesta es en donde realmente se hace la detección de estos elementos, ya que las señales recibidas son afectadas por el efecto Doppler.

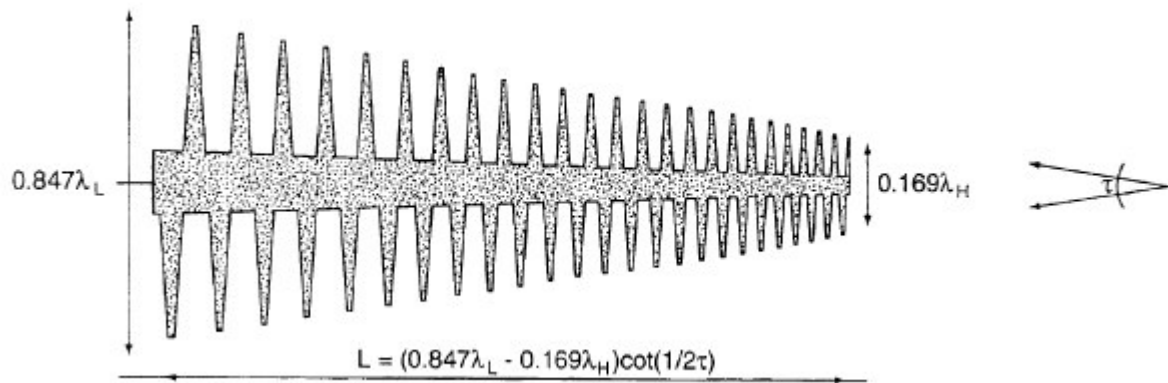
## 2. METODOLOGÍA

En el proyecto se diseña y simula una antena plana log-periódica multiresonante para la banda baja de SHF. En primer lugar, se especifica la metodología de diseño escogida, basada en la demostración de la estructura log-periódica hecha por DuHamel y Bayes. Una vez determinados los parámetros geométricos de la antena, se procede a utilizar un software CAD para modelar la misma en un entorno de dos dimensiones. Como paso siguiente se procede a exportar este modelo al área de trabajo de un software de simulación electromagnética, en este caso ANSYS HFSS. Para el análisis de la antena se hacen distintas simulaciones con dos formas de alimentación para encontrar aquella con la que se obtenga la mejor respuesta en frecuencia. A continuación, se presentan las características obtenidas tales como: parámetro  $S_{11}$ , impedancia, ganancia y diagrama de radiación.

### 2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

El punto de partida para el diseño de la antena descrita es la antena log-periódica de Gregory Engargiola y su equipo de investigación [7]. Esta antena está conformada por elementos triangulares sobre un eje conductor. Engargiola define las dimensiones de esta antena basándose en la demostración de la estructura log-periódica anteriormente descrita además de algunas premisas derivadas de antenas fundamentales como el dipolo  $\frac{\lambda}{2}$ , obteniendo las siguientes conclusiones:

- La longitud de los elementos más pequeños de la antena define el límite máximo de frecuencia de operación.
- La longitud de los elementos más grandes define el límite mínimo de frecuencia de operación.
- El ángulo de apertura está relacionado con la directividad de la antena, un ángulo menor a  $30^\circ$  es ventajoso.
- Un factor de escala entre elementos triangulares continuos de entre 0.900 y 0.999 resulta beneficioso.
- Se recomienda que el ángulo de apertura del eje conductor sea menor de  $4^\circ$



**Figura 2.1:** Estructura y dimensiones de la antena plana log-periódica de Gregory Engargiola en donde:  $\lambda_L$  es la longitud de onda de la menor frecuencia,  $\lambda_H$  la longitud de onda de la máxima frecuencia y  $\tau$  el ángulo de apertura de la antena [7].

Se puede observar en la Figura 2.1 que la longitud de los elementos de la antena está limitada de tal forma que se pueden obtener valores de  $\frac{\lambda}{2}$  dentro del ancho de banda definido por  $\lambda_L$  y  $\lambda_H$  de esta forma:

$$0.847\lambda_L > \frac{\lambda_L}{2} > \frac{\lambda_1}{2}, \frac{\lambda_2}{2}, \frac{\lambda_3}{2}, \dots, \frac{\lambda_n}{2} > \frac{\lambda_H}{2} > 0.169\lambda_H$$

En donde  $\lambda_1$  hasta  $\lambda_n$  son las longitudes de onda de las potenciales frecuencias de resonancia.

Para facilidad de implementación, Engargiola definió los siguientes rangos en las dimensiones de los extremos de la estructura [7]:

- Máxima frecuencia:  $(0.169 - 0.254) \lambda_H$
- Mínima Frecuencia:  $(0.742 - 0.847) \lambda_L$

Se debe tomar en cuenta que estos factores también influyen en la expresión que permite determinar la longitud de la antena.

### 2.1.1 ESPECIFICACIONES Y DIMENSIONES DE LA ANTENA PROPUESTA

Con miras a una futura implementación y tomando en cuenta las conclusiones de Engargiola, se decide diseñar la antena bajo los siguientes parámetros:

- Multiresonancia comprendida en la banda baja de SHF, específicamente entre 3 y 9 GHz.

- Ángulo de apertura de 20 grados.
- Ángulo de apertura del eje conductor de 3.6 grados.

En la Tabla 2.1 se presentan los principales parámetros de diseño obtenidos con las expresiones anteriormente descritas.

**Tabla 2.1:** Dimensiones de la antena a diseñar.

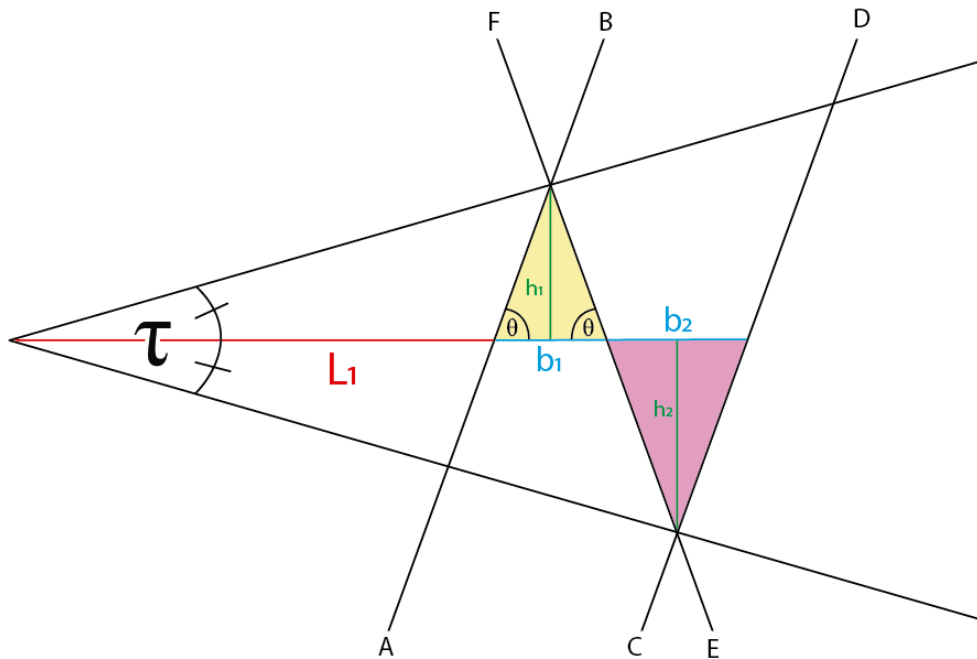
Parámetro	Expresión	Dimensión [mm]
Longitud elementos baja frecuencia	$L_L = 0.847\lambda_L$ (2.1)	84.64
Longitud elementos alta frecuencia	$L_H = 0.254\lambda_H$ (2.2)	8.46
Longitud antena	$L = (0.847\lambda_L - 0.254\lambda_H) \cot\left(\frac{\tau}{2}\right)$ (2.3)	209.3

### 2.1.1.1 Dimensión de los elementos triangulares

Si bien Engargiola en su trabajo determina que el tamaño (área) entre elementos triangulares continuos debe tener un factor de escala entre 0.900 y 0.999 para mejores resultados, no se especifica el ángulo fijo que debe tener el zigzag de la estructura logarítmica para obtener dicho factor.

Para resolver esta incógnita se plantea el siguiente problema:

Dada la Figura 2.2, ¿qué valores debe tomar  $\theta$  para que el área del triángulo 1 (amarillo) sea de 0.900 a 0.999 veces el área del triángulo 2 (magenta)?



**Figura 2.2:** Triángulos formados por un zigzag de ángulo fijo  $\theta$  embebido en un ángulo de apertura  $\tau$ .

Para resolver este problema se asumen dos valores:  $\tau = 20^\circ$  que es al ángulo de apertura a utilizar y  $L_1$  igual a 5 cm, esto para disminuir el número de ecuaciones. El área del triángulo 1 será  $A_1$  y la del triángulo 2 será  $A_2$ . Se puede definir entonces un sistema conformado por las siguientes ecuaciones:

$$\tan(10^\circ) = \frac{h_1}{5 \text{ cm} + \frac{b_1}{2}}$$

$$\tan(10^\circ) = \frac{h_2}{5 \text{ cm} + b_1 + \frac{b_2}{2}}$$

$$A_1 = \frac{b_1 \times h_1}{2}$$

$$A_2 = \frac{b_2 \times h_2}{2}$$

$$\tan(\theta) = \frac{2h_1}{b_1}$$

$$\tan(\theta) = \frac{2h_2}{b_2}$$

$$A_1 = 0.900A_2 \quad \text{ó} \quad A_1 = 0.999A_2$$



Una vez resuelto el sistema de ecuaciones, se obtiene que para un factor de escala de 0.9 el ángulo  $\theta$  debe ser de  $81.506^\circ$ , y para un factor de 0.999 el ángulo  $\theta$  debe ser de  $89.919^\circ$ . A partir de esto se concluye que  $\theta$  debe estar entre  $81.506^\circ$  y  $89.919^\circ$ . Por lo tanto: Para el modelado de la antena se elige un valor de  $\theta$  igual a  $86^\circ$ .

La distancia  $L_1$  no influye en el valor de  $\theta$  ya que cualquiera sea su valor, el rango del ángulo  $\theta$  no varía.

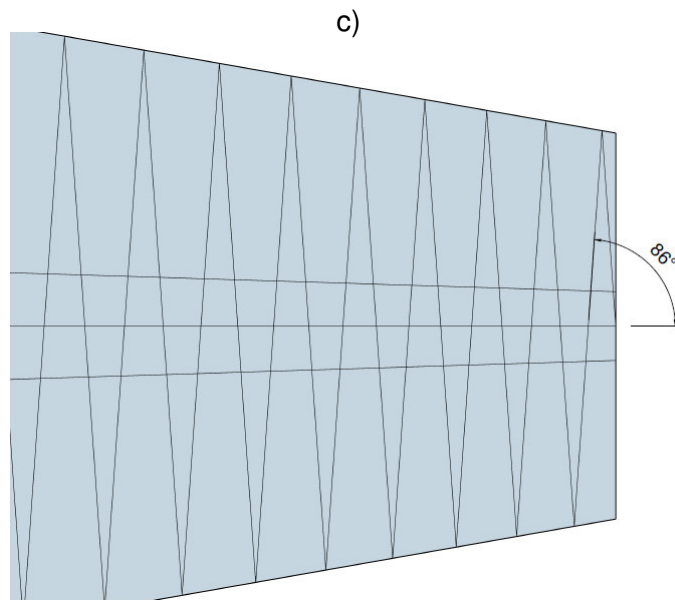
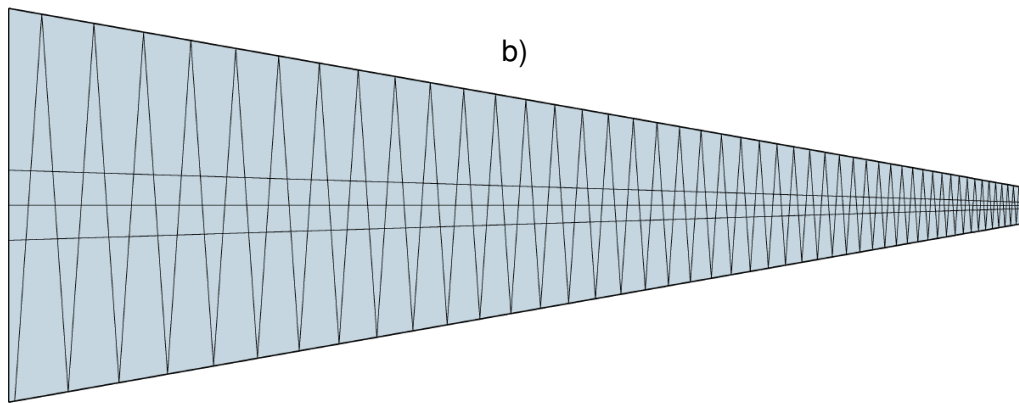
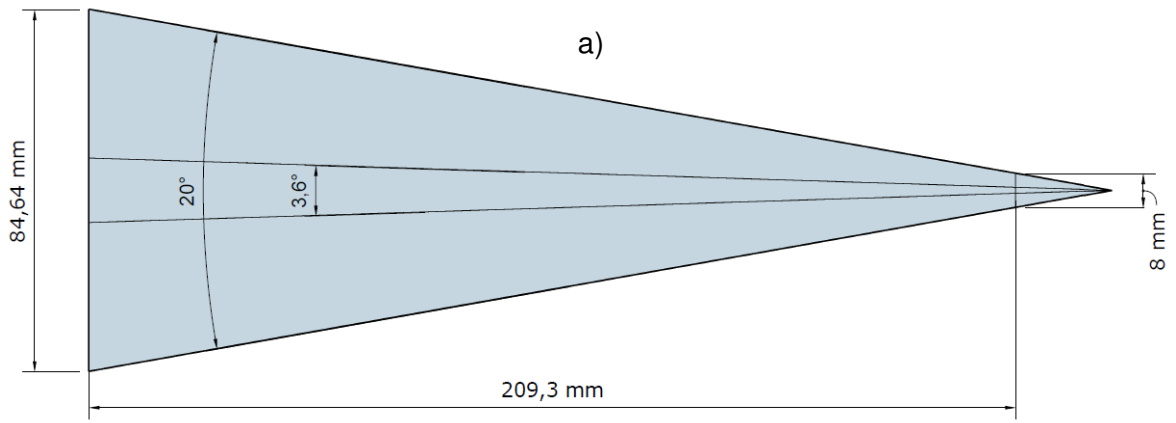
## **2.2 METODOLOGÍA DE MODELADO**

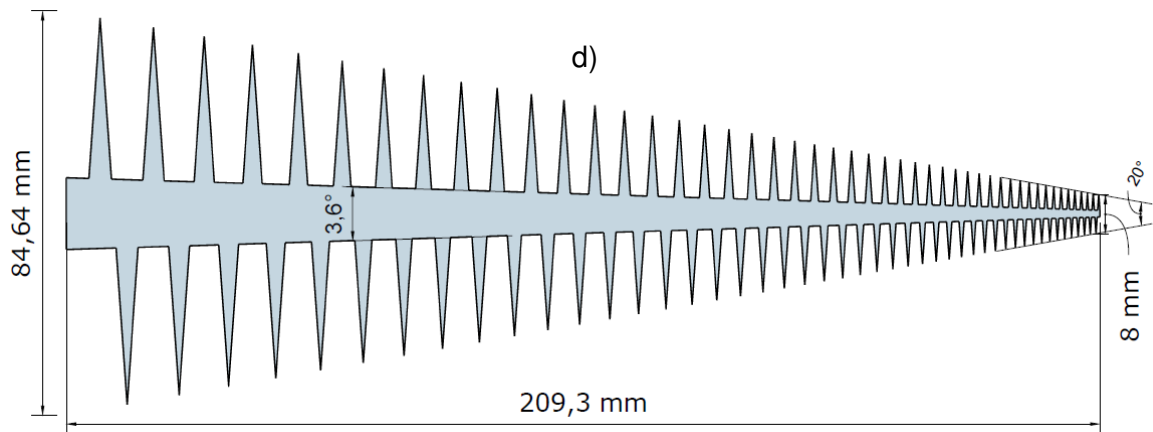
Este trabajo al no tener producto final demostrable continúa su desarrollo computacionalmente. La metodología de modelado está dividida en dos partes: ambiente de dos dimensiones y ambiente de tres dimensiones. Ya que la antena diseñada es plana es mucho más sencillo modelarla en dos dimensiones, una vez obtenido este objeto bidimensional, se lo exporta a un ambiente 3D de simulación en donde se obtienen y analizan sus características electromagnéticas. Los softwares utilizados en cada etapa son Trimble SketchUp versión 18 y ANSYS HFSS versión 15 respectivamente.

### **2.2.1 MODELADO EN UN AMBIENTE DE 2 DIMENSIONES**

Al ser una antena plana y por la cantidad de rectas que la conforman, se decidió modelar la misma en un software CAD (SketchUp Versión 18) antes de exportarla al software de simulación electromagnética.

Como primer paso se define un triángulo isósceles de base igual a  $0.847\lambda_L$  y con un ángulo de apertura (ángulo opuesto a la base) igual a  $20^\circ$ , dentro de este ángulo se crea el ángulo de apertura del eje conductor de  $3.6^\circ$ . A continuación, se mide la longitud de la antena obtenida en la ecuación (2.3) desde la base y se trunca el triángulo. Dentro de este ahora trapecio, se dibujan rectas con un ángulo de inclinación  $\theta$  igual a  $86^\circ$  como se puede ver en la Figura 2.2 para conformar el zigzag embebido de ángulo fijo. Finalmente se eliminan las líneas de ayuda y se obtiene la antena plana log-periódica de elementos triangulares como se puede observar en la figura 2.3.d.





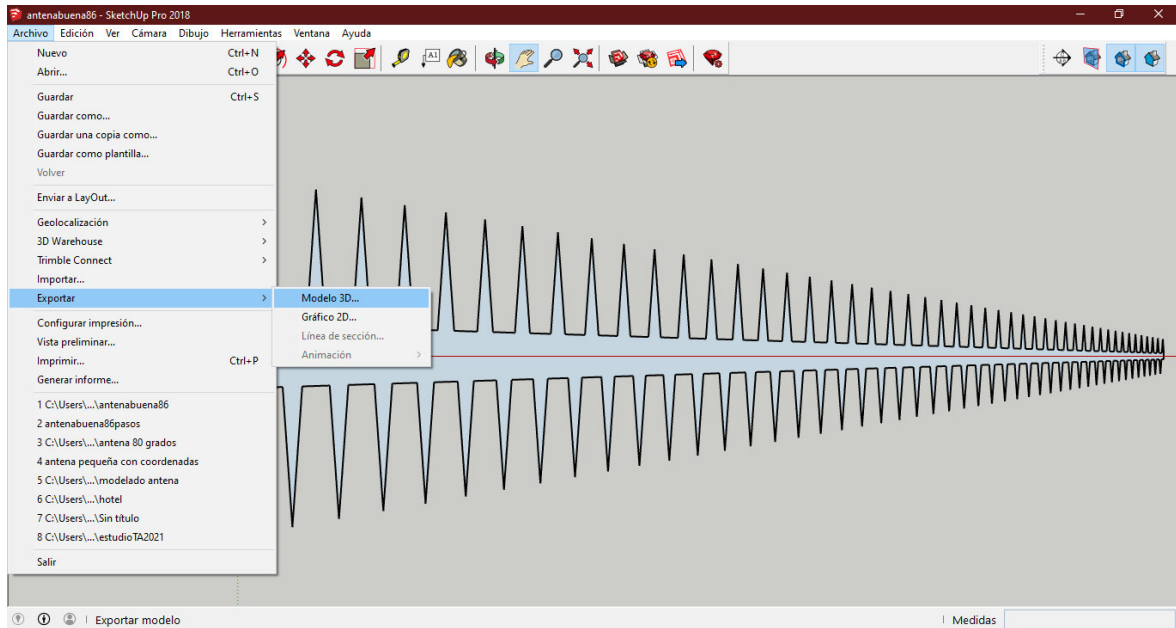
**Figura 2.3:** a) Triángulo isósceles definido por el ángulo de apertura  $\alpha$  con base igual a  $0.847\lambda_L$ , dentro de  $\alpha$  se encuentra el ángulo de apertura del eje conductor. b) Triángulo truncado por la ecuación (2.3) con zigzag de ángulo fijo embebido. c) Acercamiento al zigzag embebido con un ángulo  $\theta$  igual  $86^\circ$ . d) Esquema final acotado de la antena plana log-periódica de elementos triangulares.

## 2.2.2 MODELADO EN UN AMBIENTE DE 3 DIMENSIONES

Con el software seleccionado para el análisis de la antena diseñada. Se realizó el siguiente procedimiento:

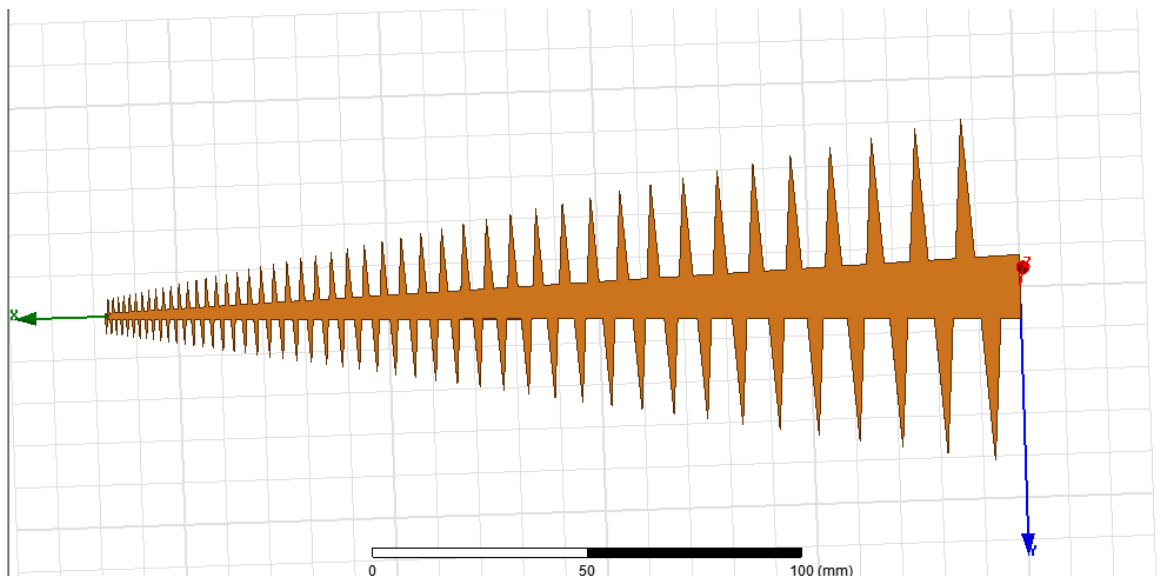
### 2.2.2.1 Exportación del modelo 2D al software de simulación 3D.

Una vez modelada la antena en dos dimensiones, es necesario guardarla en un formato adecuado para que pueda ser importada al software de simulación electromagnética 3D, esto se realiza en SketchUp mediante el menú Archivo > Exportar > Modelo 3D (Figura 2.4). Se debe exportar como un archivo .dxf el cuál es una extensión que permite la interoperabilidad entre distintos programas CAD.



**Figura 2.4:** Comando de exportación en SketchUp para generar compatibilidad del modelado con otros softwares CAD.

Con el archivo .dxf listo, se procede a abrir un nuevo proyecto en HFSS y en la pestaña Modeler se selecciona la opción Import..., seleccionamos el archivo y tendremos el dibujo 2D en el área de trabajo.



**Figura 2.5:** Antena 2D importada en ANSYS HFSS

### **2.2.2.2 Asignación de materiales, esquema de alimentación y plano de referencia.**

Con una futura implementación como objetivo, se decidió utilizar el cobre como material de la antena log-periódica con un espesor calibre 22 (0.65 mm) por las siguientes razones:

- Gran conductividad.
- Gran maquinabilidad.
- Fácil soldadura.
- El calibre es lo suficientemente grueso para que la antena mantenga su forma.
- Bajo costo.
- Alta disponibilidad.

Para la línea de transmisión, y tomando en cuenta que el punto de alimentación se encuentra típicamente en la parte más angosta de la antena, se decidió utilizar el cable coaxial RG-223. A continuación, algunas de sus características [20]:

- Frecuencia máxima de operación: 12.4 GHz.
- Conductor de un hilo (facilita soldadura y/o colocación de conector).
- Diámetro del conductor 0.9 mm (menor que el eje de la antena en la parte más angosta).
- Bajo costo.
- Alta disponibilidad.

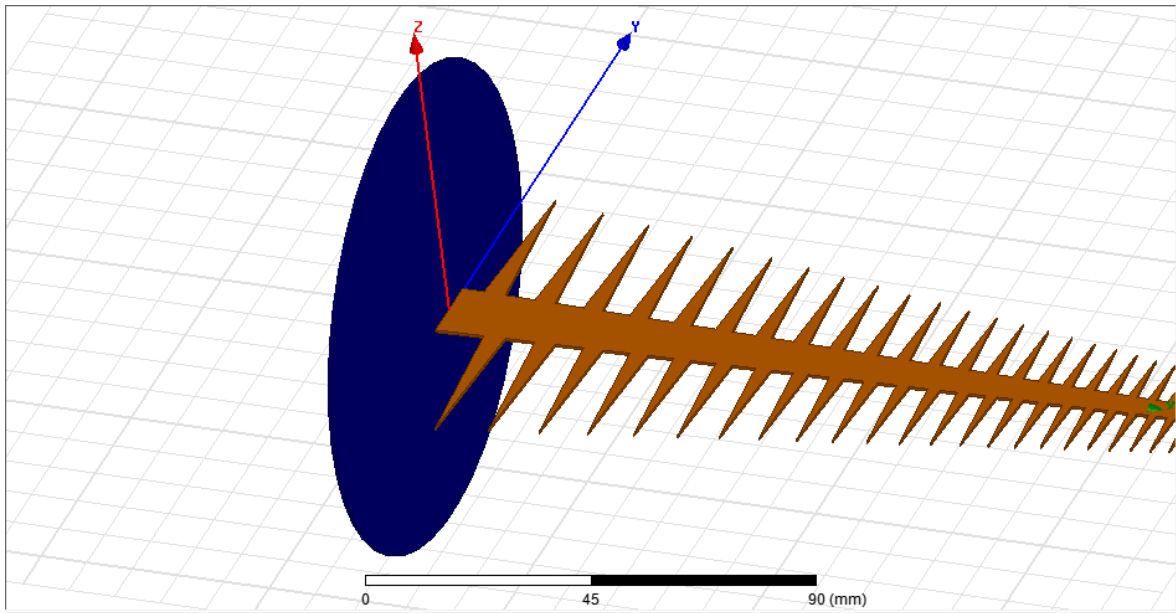
En el caso del reflector/plano de referencia se utiliza el mismo material de la antena, cobre calibre 22.

### **2.2.2.3 Modelado del sistema en ANSYS HFSS**

#### ***2.2.2.3.1 Reflector/plano de referencia***

Ya que idealmente el lóbulo de radiación de una antena log-periódica apunta en dirección +x (tomando en cuenta el sistema de coordenadas en ANSYS HFSS como se puede ver en la Figura 2.5) hacia el espacio libre, se decide colocar un reflector/tierra circular de cobre

calibre 22 de 51 mm de radio perpendicular a los elementos de menor frecuencia separado 5 mm de la antena, como se puede ver en la figura 2.6:



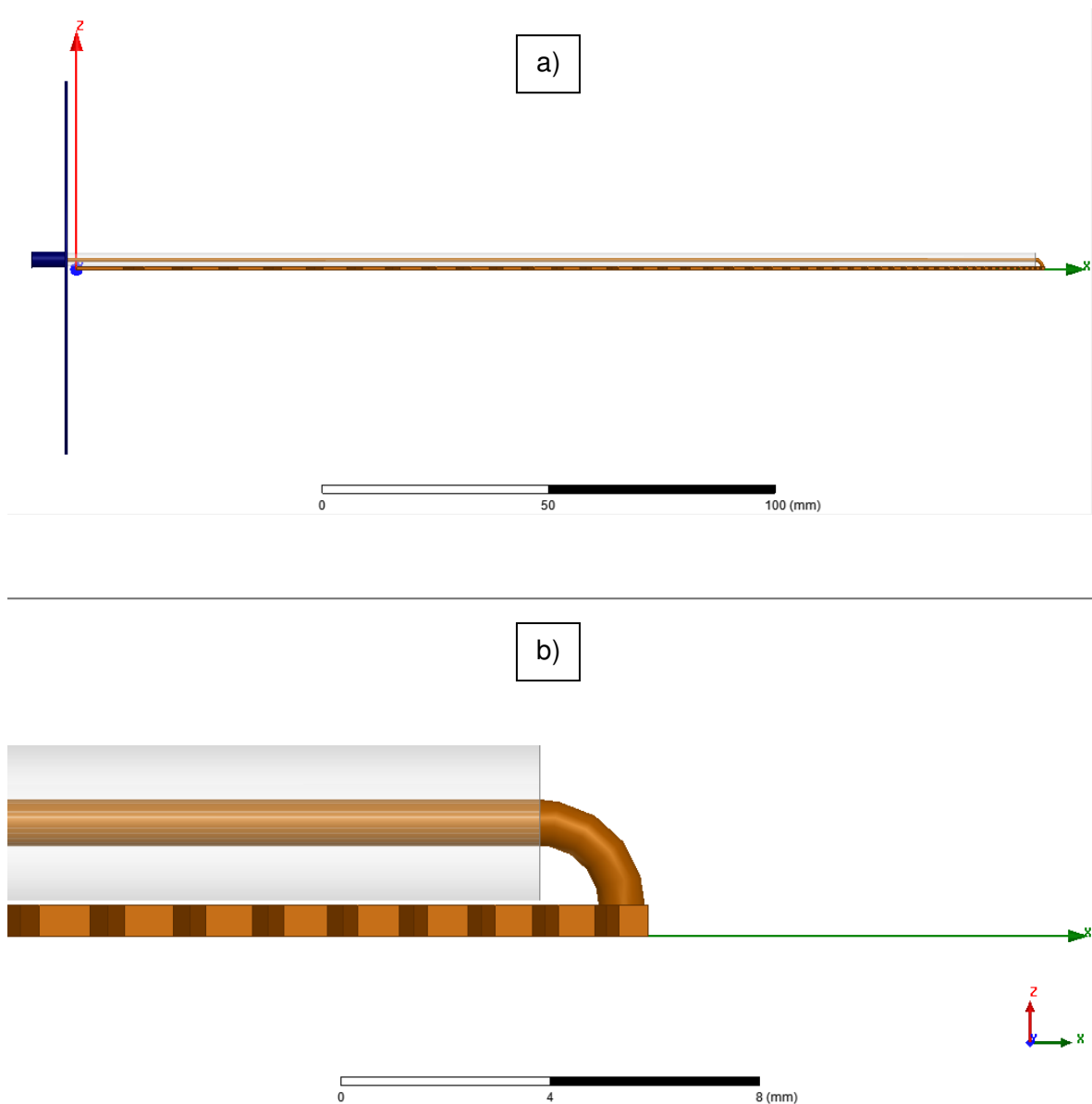
**Figura 2.6:** Antena con reflector/tierra circular (azul) de 51 mm de radio.

### **2.2.2.3.2 Formas de alimentación**

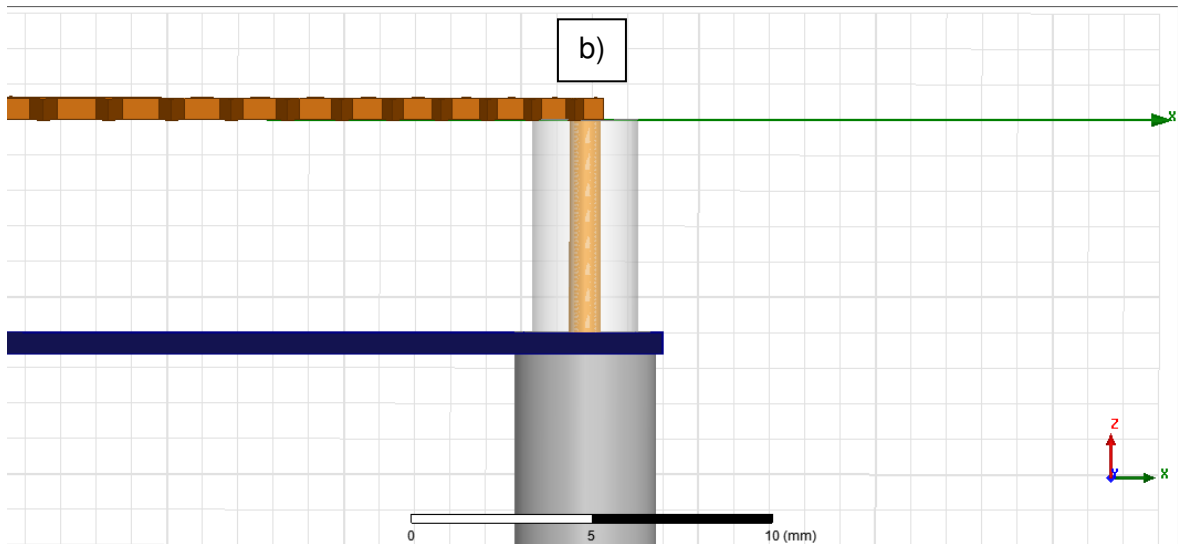
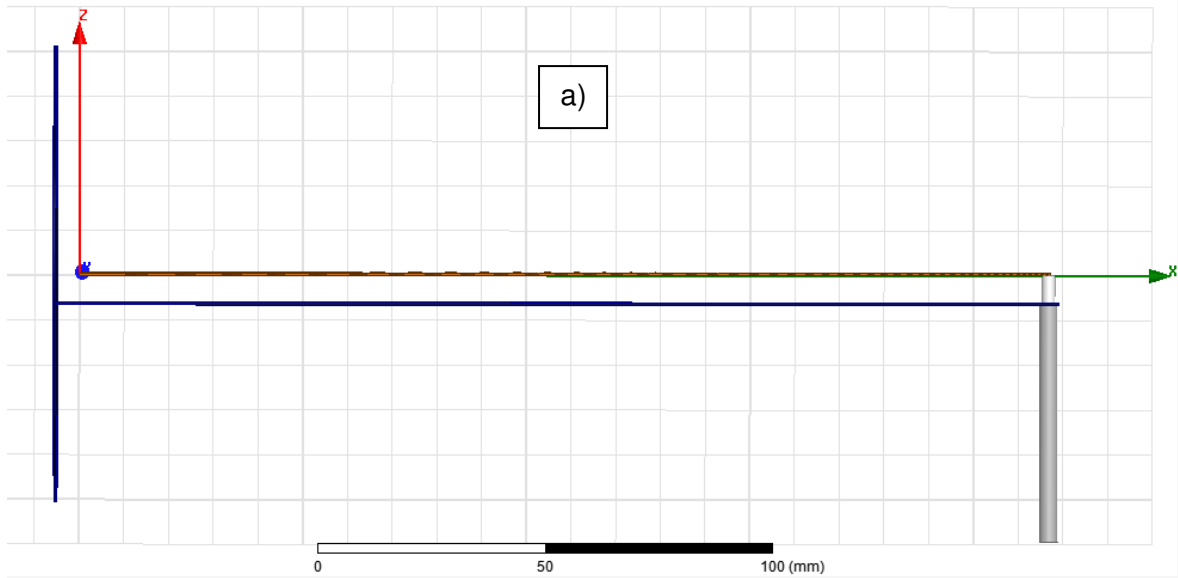
Se propusieron dos formas de alimentación para la antena las cuales se las denominó: alimentación paralela y alimentación perpendicular.

La alimentación paralela consiste en el cable coaxial partiendo desde el reflector y viajando paralelamente sobre el eje de la antena hasta llegar al final de esta y conectando su conductor mediante una curvatura.

Por el otro lado la alimentación perpendicular consiste en conectar el cable como su nombre lo indica, perpendicularmente en el extremo angosto de la antena, la unión entre la malla del cable y el reflector se realiza mediante un pequeño eje metálico del mismo material, con ancho un poco mayor al diámetro de la malla y paralelo a la antena.



**Figura 2.7:** a) Vista XZ completa de la antena con alimentación paralela. b) Acercamiento al punto de alimentación en donde se puede apreciar la curvatura del conductor del cable coaxial.



**Figura 2.8:** a) Vista XZ completa de la antena con alimentación perpendicular. b) Acercamiento al punto de alimentación en donde se puede apreciar el eje metálico de unión (azul) entre la malla (gris) y el reflector.



### 3. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

A continuación, se presentan los parámetros utilizados en la simulación junto con los resultados obtenidos en las dos configuraciones de conexión anteriormente descritas. Las principales características extraídas de la antena son: parámetro S11, impedancia, ganancia y diagramas de radiación.

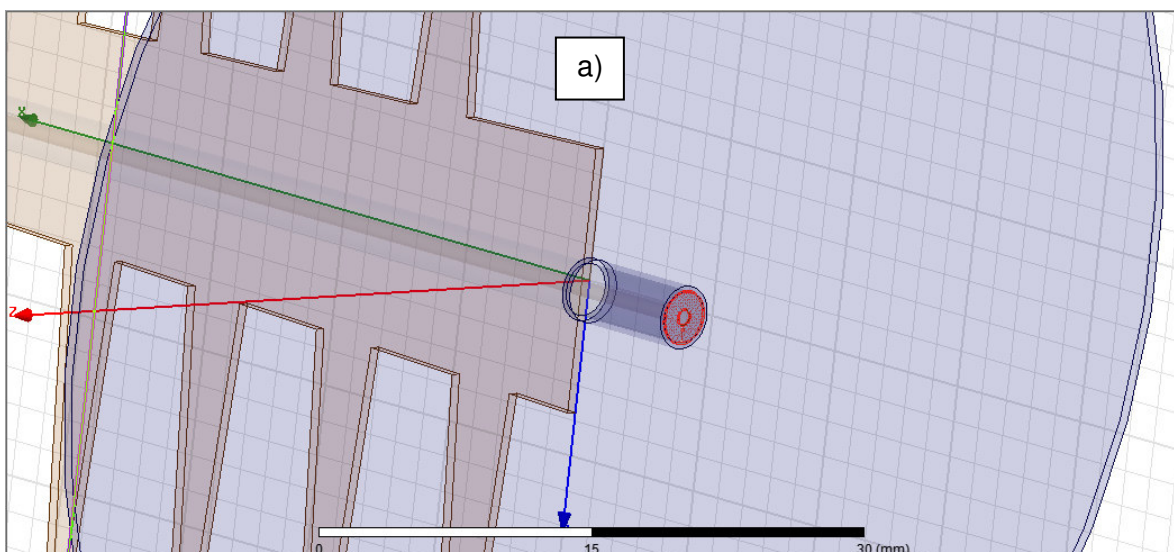
#### 3.1 CONDICIONES DE SIMULACIÓN

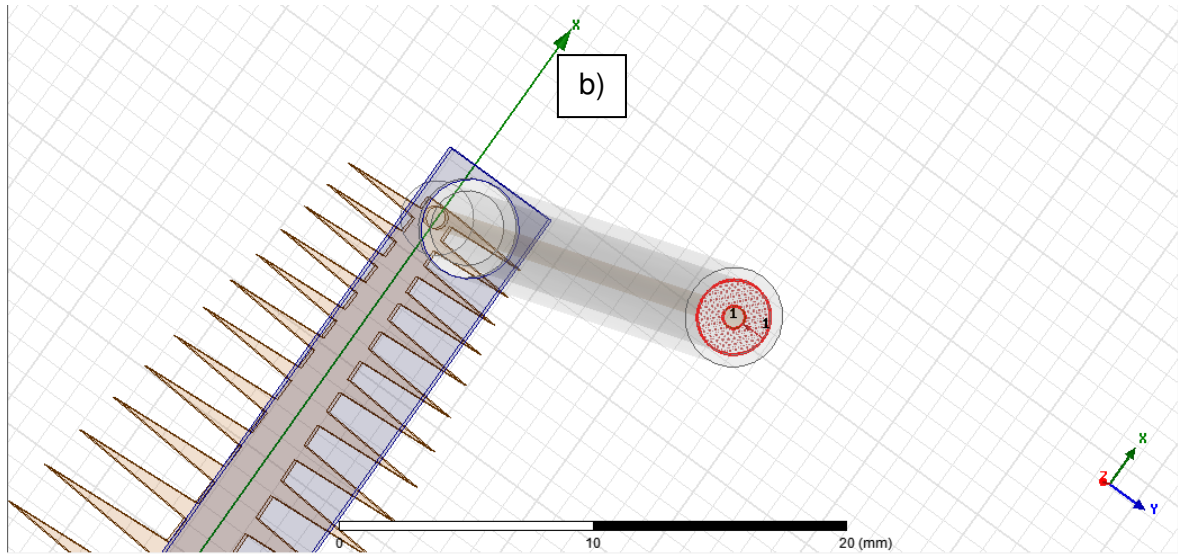
Aquí se definen los siguientes parámetros: método de alimentación, área de radiación, y frecuencias de trabajo.

##### 3.1.1 MÉTODO DE ALIMENTACIÓN

Existen dos métodos principales de alimentación en ANSYS HFSS: Wave Port y Lumped Port. Ambos definen un área de la estructura por donde entra una señal. Las diferencias radican en que un Wave Port no tiene una impedancia definida por el usuario y se define fuera del área de radiación, además es usado en líneas de transmisión circulares o cuadradas, tales como guías de onda y cables coaxiales. Un Lumped Port por otro lado necesita una impedancia definida por el usuario, y se coloca dentro del área de radiación, es principalmente utilizado para el modelamiento de estructuras microstrip.

Ya que la antena diseñada tiene una impedancia desconocida hasta el momento y al tener aplicaciones de radioastronomía en donde están involucrados guías de onda y cables coaxiales, el método de alimentación seleccionado fue Wave Port.



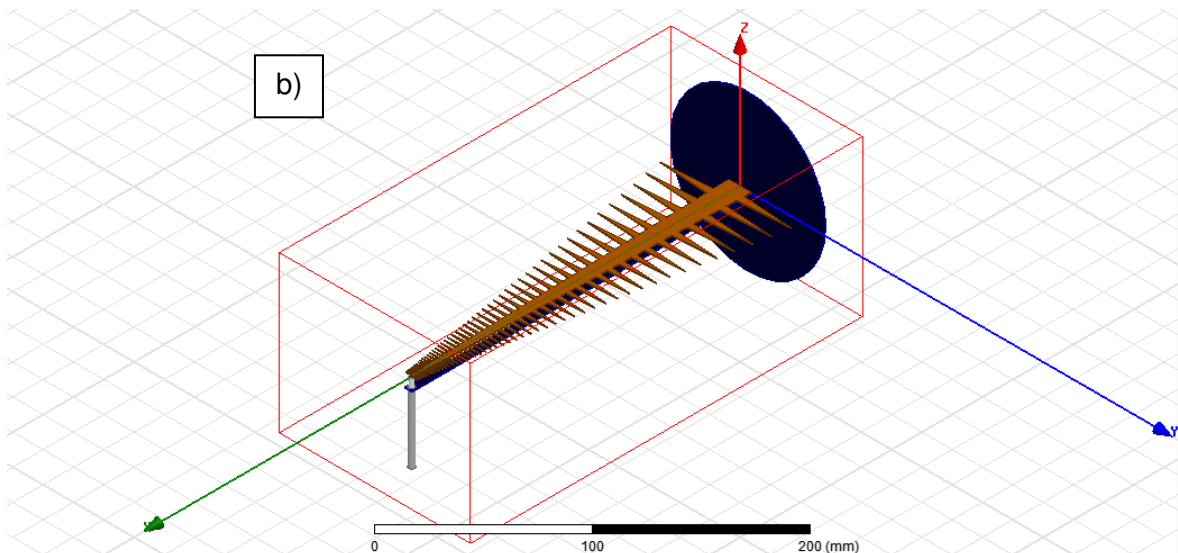
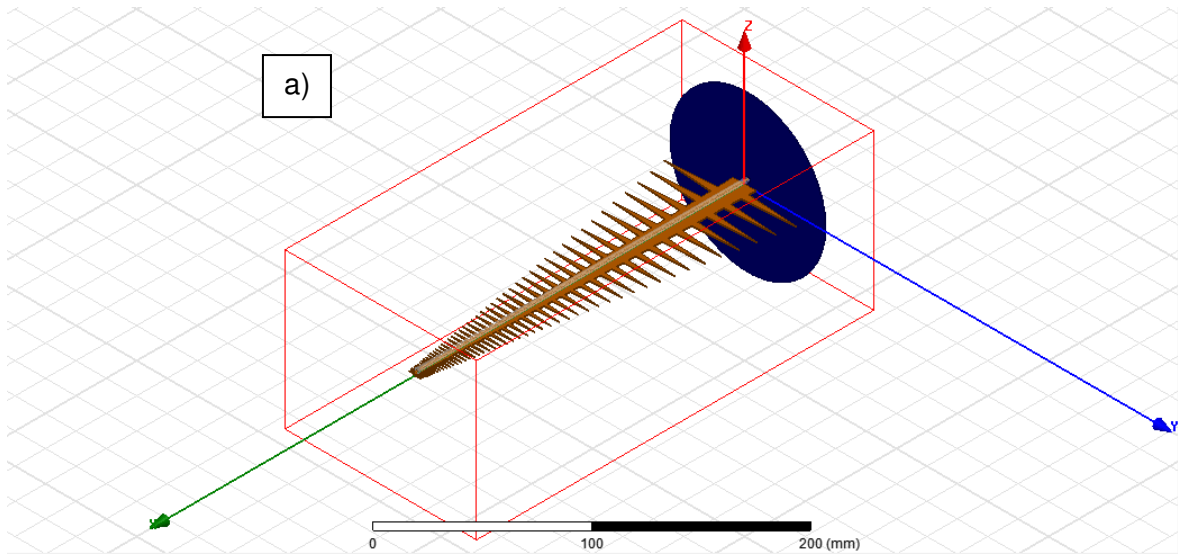


**Figura 3.1:** a) Wave Port (área en rojo) definido en el cable coaxial para la alimentación paralela. b) Wave Port (área en rojo) definido en el cable coaxial para la alimentación perpendicular.

### 3.1.2 REGIÓN DE RADIACIÓN

La región de radiación es una zona tridimensional dentro de la cual se encuentra la antena cuyo fin es el de simular el ambiente de trabajo y sus condiciones. En ANSYS HFSS esto se logra con la herramienta "Create region" en la barra de herramientas, una vez allí se definen las dimensiones de la región dependiendo del objetivo de simulación; como paso siguiente se asigna un material a dicha región.

Es necesario que el área asignada como Wave Port se encuentre en el límite de la región para poder funcionar.



**Figura 3.2:** a) Región de radiación (rojo) para el sistema de alimentación paralelo. b) Región de radiación (rojo) para el sistema de alimentación perpendicular.

ANSYS HFSS define la región de radiación tomando en cuenta las dimensiones del sistema a simular, es decir, para cada eje positivo y negativo se especifica la distancia desde el objeto a la cual se encuentra una cara límite de la región.

Al usar Wave Ports se necesita que estos estén en el límite de la región de radiación, para lograr esto en el caso del sistema de alimentación paralelo la distancia a la que se encuentra la región de radiación en  $-x$  es igual a 0, mientras que para el sistema de alimentación perpendicular es igual a 0 en  $-z$ .

El material escogido para la región de radiación fue el aire.

### 3.1.3 FRECUENCIAS DE SIMULACIÓN Y CAMPO LEJANO

Para encontrar cuál de los dos métodos de alimentación es el mejor, el análisis de frecuencia tiene las mismas condiciones, las cuales están descritas en la siguiente tabla:

**Tabla 3.1:** Condiciones de simulación en frecuencia.

<b>Tipo de simulación</b>	Barrido de frecuencia
<b>Tipo de barrido</b>	Discreto
<b>Paso</b>	Lineal
<b>Frecuencia inicial</b>	2 GHz
<b>Frecuencia final</b>	10 GHz
<b>Tamaño del paso</b>	0.05 GHz

La configuración inicial de simulación se dejó con los parámetros predeterminados.

Con un tamaño de paso de 0.05 GHz se obtienen 161 valores de frecuencia para generar el barrido.

Para graficar los diagramas de radiación es necesario establecer parámetros de campo lejano que en este caso está representado por una esfera infinita con un barrido en theta y phi de 0 a 360 grados con un paso de 1 grado.

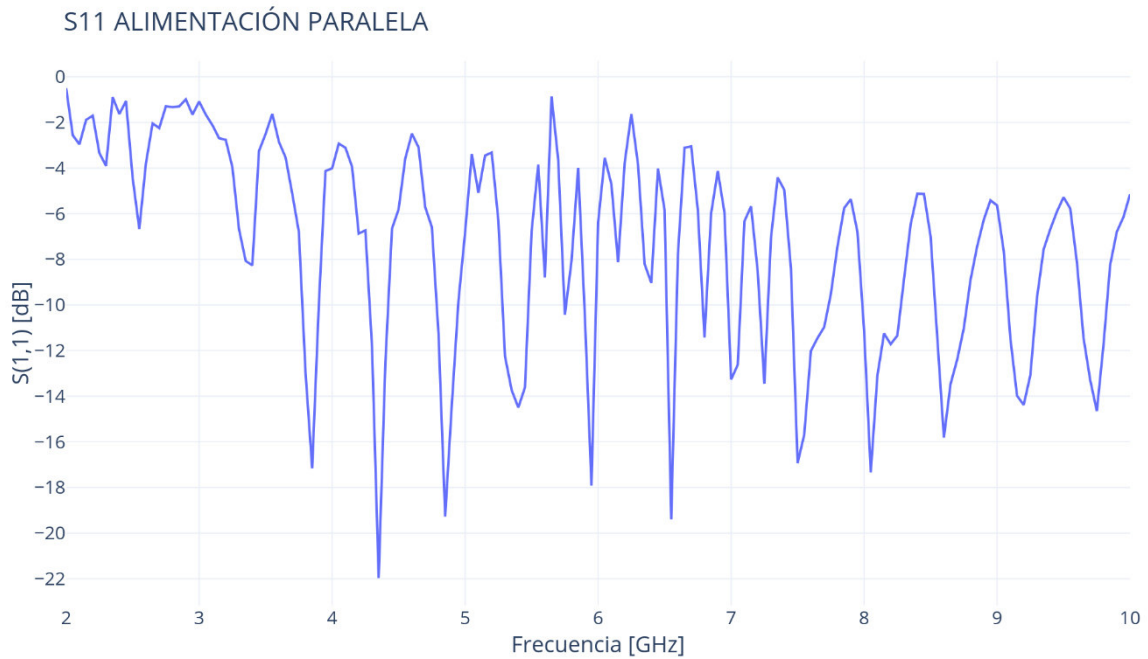
## 3.2 RESULTADOS

Para determinar cuál de los métodos de alimentación es mejor, se necesita una comparativa en cuanto a las siguientes características: parámetro S11, impedancia, ganancia y diagramas de radiación. El punto de alimentación en ambos casos es el mismo: a 216.8 mm de la base de la antena (extremo angosto).

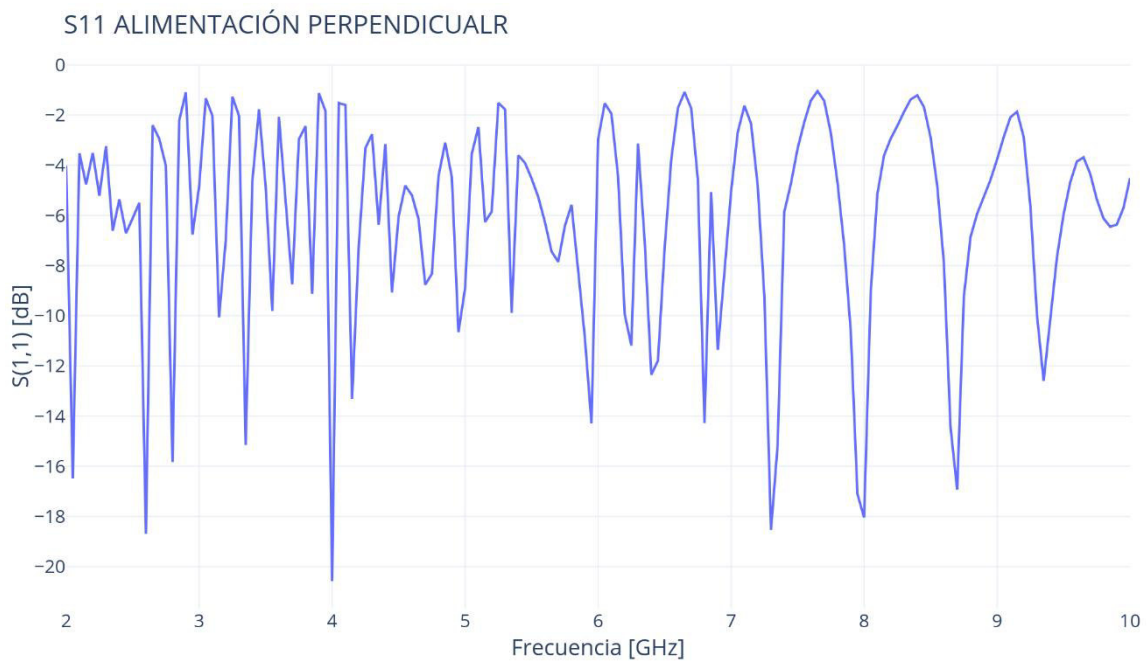
### 3.2.1 PARÁMETRO S11

El parámetro S11 es el único parámetro S existente en un sistema de antena, ya que es un sistema de un único puerto. El parámetro S11 indica la potencia de la señal reflejada en el puerto de alimentación de la antena en función de la frecuencia, esto ayuda a determinar las principales frecuencias a las que la antena tiene el mejor comportamiento/acoplamiento.

Se escogió un S11 igual a -10 dB como límite superior ya que así se asegura que al menos el 90% de la potencia de las señales detectadas será recibida por el sistema.



**Figura 3.3:** Parámetro S11 en función de la frecuencia de la antena con alimentación paralela.



**Figura 3.4:** Parámetro S11 en función de la frecuencia de la antena con alimentación perpendicular.

Con estas curvas se procedió a determinar las distintas bandas de trabajo para ambos casos, tomando en cuenta el límite de S11 igual a -10 dB:

**Tabla 3.1:** Bandas de trabajo de antena con alimentación paralela

<b>Banda</b>	<b>Frecuencia mínima [GHz]</b>	<b>Frecuencia Máxima [GHz]</b>	<b>Ancho de banda [MHz]</b>	<b>Frecuencia de mínimo S11 [GHz]</b>	<b>Valor de mínimo S11 [dB]</b>	<b>Ancho de banda relativo [%]</b>
<b>1</b>	3.776	3.9	124	3.85	-17.1655	3.22
<b>2</b>	4.2816	4.4219	140.3	4.35	-21.9720	3.23
<b>3</b>	4.7864	4.9480	161.6	4.85	-19.2755	3.33
<b>4</b>	5.2810	5.4764	195.4	5.4	-14.4953	3.62
<b>5</b>	5.7468	5.7592	12.4	5.75	-10.4318	0.22
<b>6</b>	5.8967	5.9843	87.6	5.95	-17.9117	1.47
<b>7</b>	6.5153	6.5905	75.2	6.55	-19.3970	1.15
<b>8</b>	6.7872	6.8131	25.9	6.8	-11.4302	0.38
<b>9</b>	6.9777	7.0709	93.2	7	-13.2690	1.33
<b>10</b>	7.2150	7.2770	62	7.25	-13.4568	0.86
<b>11</b>	7.4594	7.7336	274.2	7.5	-16.9338	3.66
<b>12</b>	7.9869	8.2773	290.4	8.05	-17.3415	3.59
<b>13</b>	8.5329	8.7741	241.2	8.6	-15.8161	2.81
<b>14</b>	9.0808	9.2953	214.5	9.2	-14.3781	2.33
<b>15</b>	9.6283	9.8251	196.8	9.75	-14.6509	2.02

**Tabla 3.2:** Bandas de trabajo de antena con alimentación perpendicular

Banda	Frecuencia mínima [GHz]	Frecuencia Máxima [GHz]	Ancho de banda [MHz]	Frecuencia de mínimo S11 [GHz]	Valor de mínimo S11 [dB]	Rendimiento [%]
1	2.0240	2.075	51	2.05	-16.4805	2.49
2	2.5671	2.6267	59.6	2.6	-18.6901	2.29
3	2.7753	2.8214	46.1	2.8	-15.8286	1.65
4	3.1496	3.1510	1.4	3.15	-10.0615	0.04
5	3.3304	3.3746	44.2	3.35	-15.1555	1.32
6	3.9718	4.0278	56	4	-20.5754	1.4
7	4.1358	4.1773	41.5	4.15	-13.3156	1
8	4.9447	4.9688	24.1	4.95	-10.6537	0.49
9	5.8837	5.9689	85.2	5.95	-14.2909	1.43
10	6.2021	6.2574	55.3	6.25	-11.1861	0.88
11	6.3780	6.4701	92.1	6.4	-12.3508	1.44
12	6.7779	6.8232	45.3	6.8	-14.2796	0.67
13	6.8892	6.9219	32.7	6.9	-11.3594	0.47
14	7.2542	7.3777	123.5	7.3	-18.5391	1.69
15	7.8908	8.0447	153.9	8	-18.0428	1.92
16	8.616	8.745	129	8.7	-16.9347	1.48
17	9.3003	9.4029	102.6	9.35	-12.5937	1.1

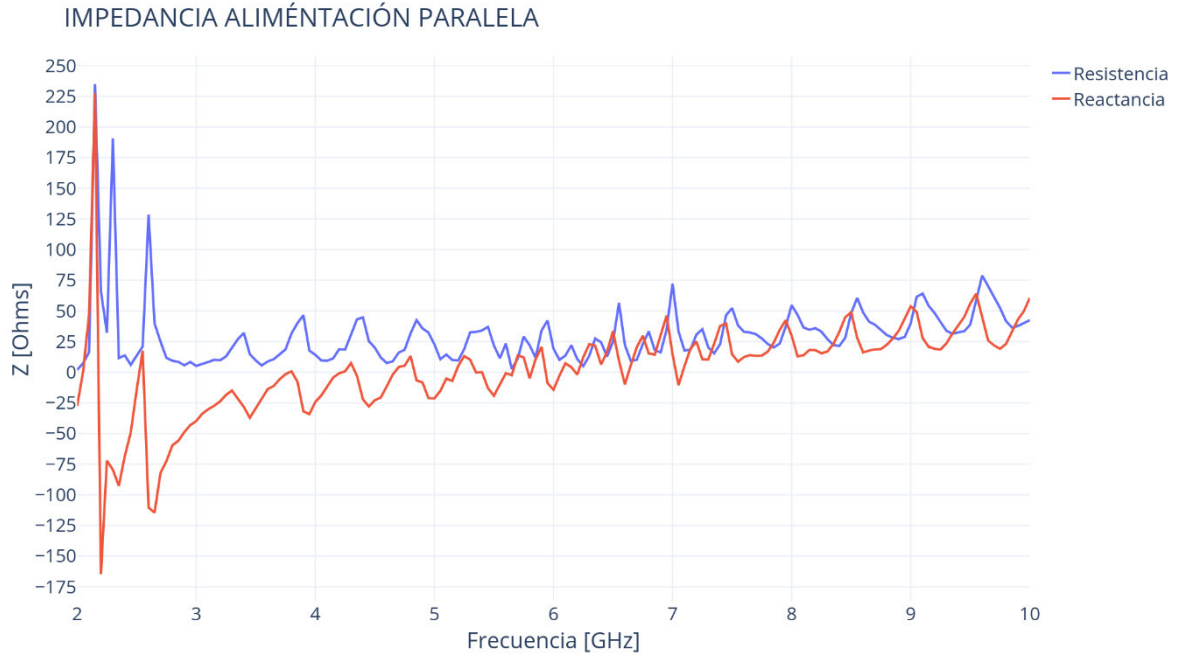
En color amarillo se puede observar que para el caso de la alimentación paralela existen dos bandas aprovechables tomando en cuenta la información de la Tabla 1.1, dentro de las bandas 3 y 13 es posible la detección de rayas espectrales de formaldehído ( $H_2CO$ ) y helio ( $^3He^+$ ).

Con la alimentación perpendicular en el mismo punto, solo la banda 16 es aprovechable para la detección de rayas espectrales de formaldehído ( $H_2CO$ ).

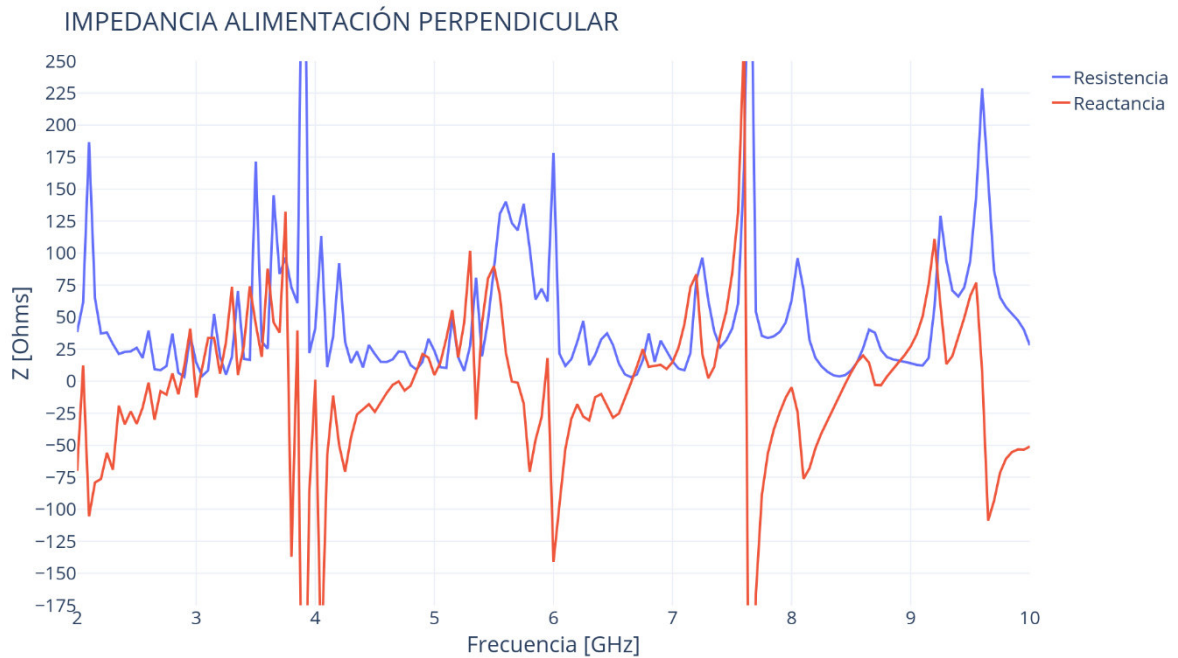
### 3.2.2 IMPEDANCIA

Al ser esta antena multiresonante, tendrá distintos valores de impedancia dependiendo de su frecuencia de trabajo. Lo que se busca idealmente en este caso es que, para todos los

valores de frecuencia de interés el valor real de la impedancia, es decir la resistencia, se encuentre en valores cercanos a 50 ohmios para acoplarse con el cable coaxial RG-223. El valor imaginario (reactancia) debe encontrarse alrededor de 0 ohmios.



**Figura 3.5:** Impedancia de la antena con alimentación paralela.



**Figura 3.6:** Impedancia de la antena con alimentación perpendicular



**Tabla 3.3:** Valores de impedancia en los puntos de mínimo S11 en la antena con alimentación paralela.

<b>Frecuencia de mínimo S11 [GHz]</b>	<b>Resistencia [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Reactancia [<math>\Omega</math>]</b>
3.85	39.99	-7.65
4.35	43.12	-3.04
4.85	42.40	-6.71
5.4	34.07	-0.02
5.75	29.08	12.03
5.95	42.16	-8.86
6.55	56.43	9.39
6.8	33.20	15.33
7	72.26	14.58
7.25	35.06	10.53
7.5	52.21	14.50
8.05	46.73	12.86
8.6	48.75	16.14
9.2	48.32	19.05
9.75	52.43	19.11

**Tabla 3.4:** Valores de impedancia en los puntos de mínimo S11 en la antena con alimentación perpendicular.

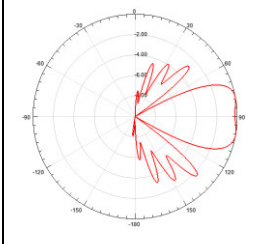
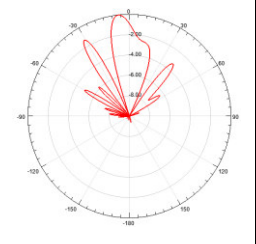
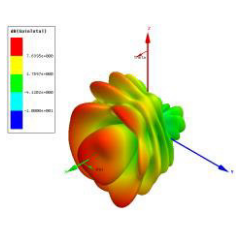
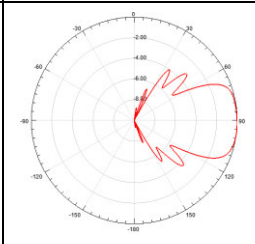
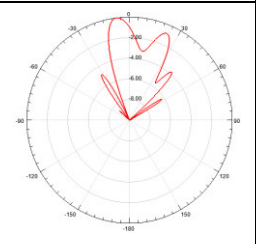
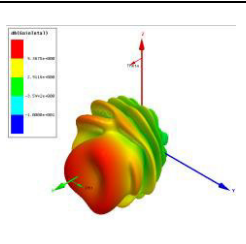
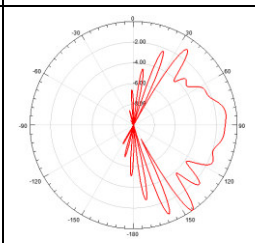
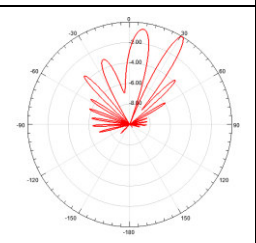
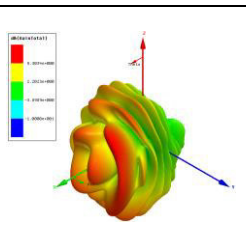
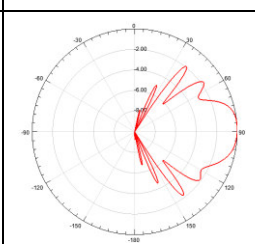
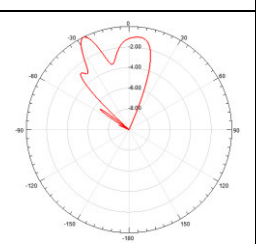
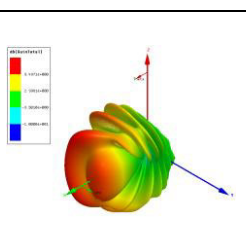
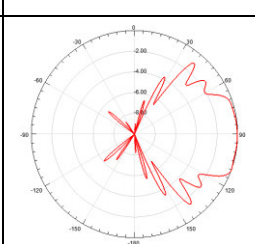
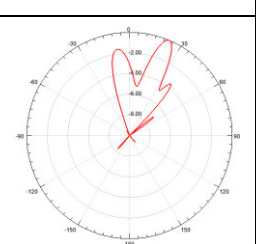
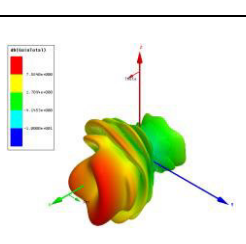
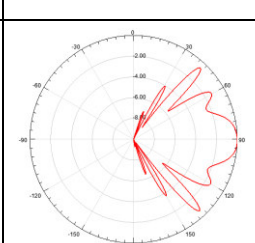
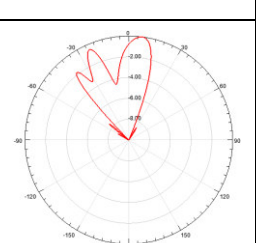
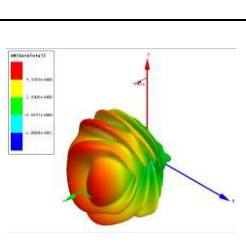
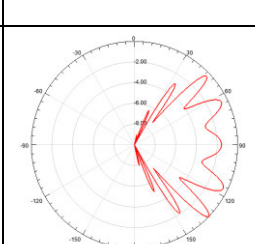
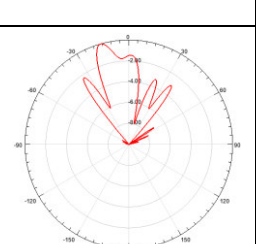
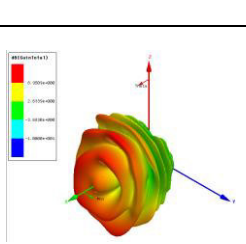
Frecuencia de mínimo S11 [GHz]	Resistencia [ $\Omega$ ]	Reactancia [ $\Omega$ ]
2.05	61.37	12.24
2.6	39.56	-1.13
2.8	37.13	5.98
3.15	52.58	33.76
3.35	70.38	4.75
4	41.43	1.16
4.15	35.14	-11.18
4.95	33.09	18.41
5.95	62.33	18.07
6.25	46.99	-27.64
6.4	32.54	-10.00
6.8	37.18	11.26
6.9	31.63	12.81
7.3	63.06	2.38
8	63.29	-4.71
8.7	37.76	-2.90
9.35	70.76	19.69

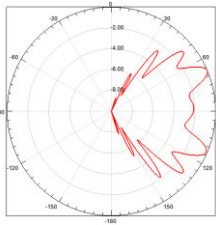
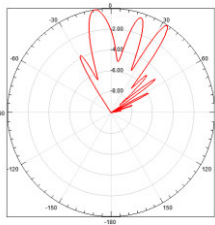
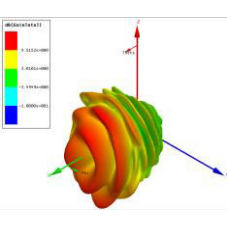
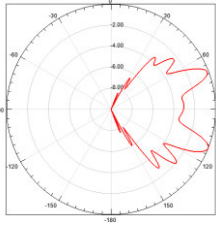
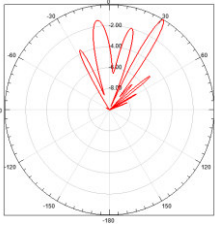
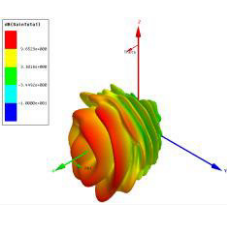
### 3.2.3 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN Y GANANCIA

El diagrama de radiación y la ganancia dependen de la frecuencia, esta antena al ser una antena multiresonante tendrá distintos diagramas y valores de ganancia dependiendo de la frecuencia de trabajo, a continuación, se presentan dos tablas que muestran el diagrama de radiación en dos planos principales, vista 3D y ganancia máxima tanto para el caso de alimentación paralela como perpendicular.

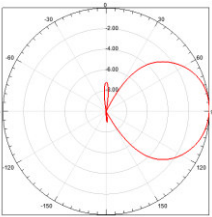
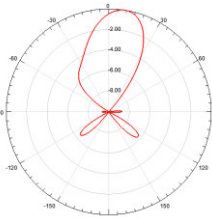
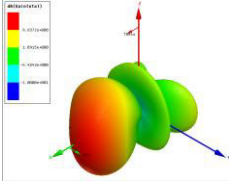
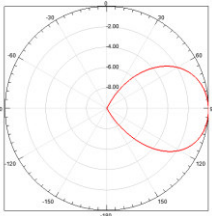
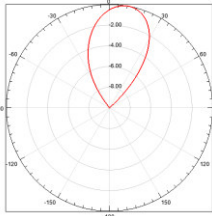
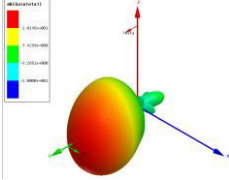
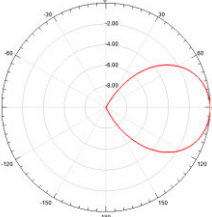
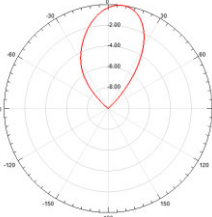
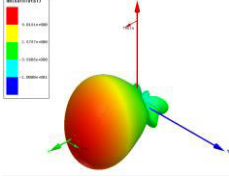
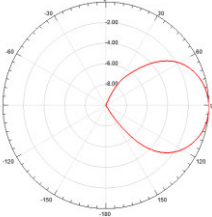
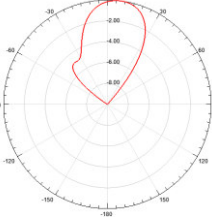
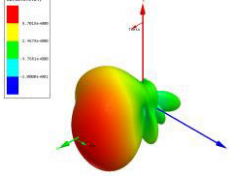
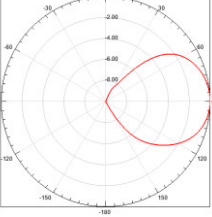
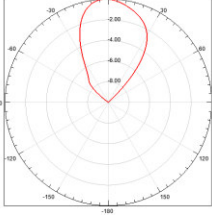
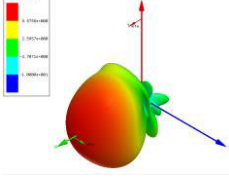
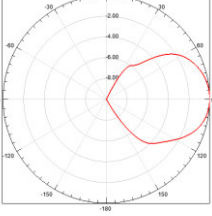
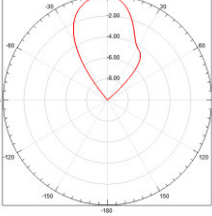
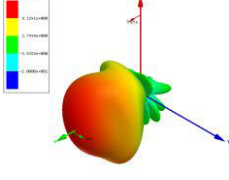
**Tabla 3.5:** Diagramas de radiación y ganancia máxima en las frecuencias de mínimo S11 para la alimentación paralela.

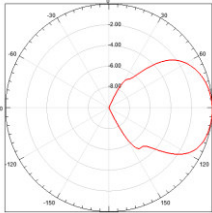
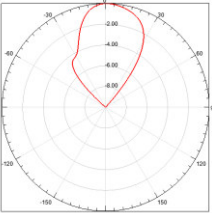
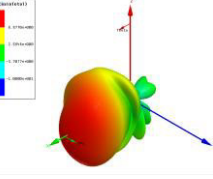
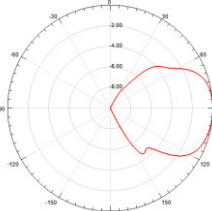
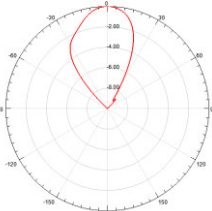
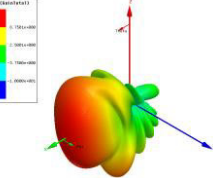
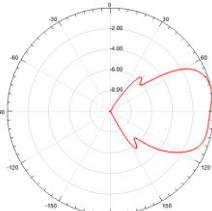
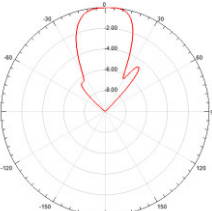
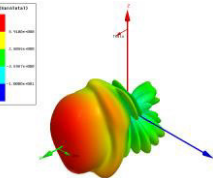
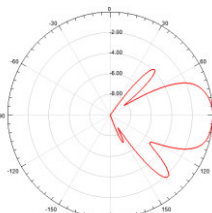
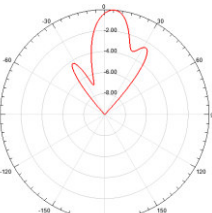
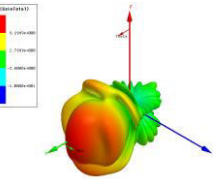
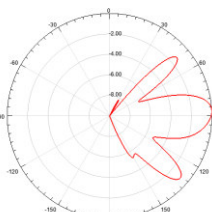
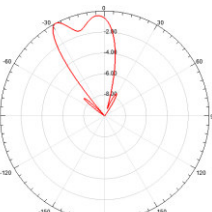
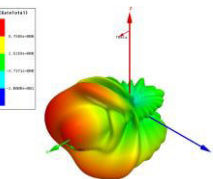
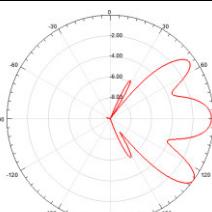
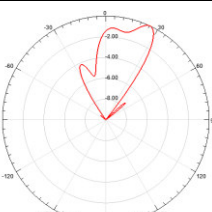
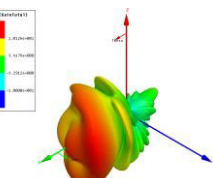
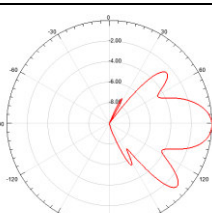
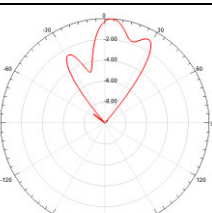
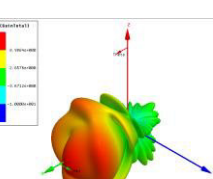
Frecuencia [GHz]	$\Phi=0$	$\Theta=90$	3D	Ganancia máxima [dB]
3.85				7.8
4.35				8.6507
4.85				8.1153
5.4				10.49
5.75				9.3872
5.95				10.896

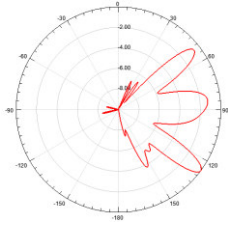
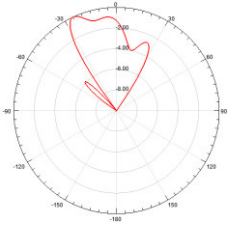
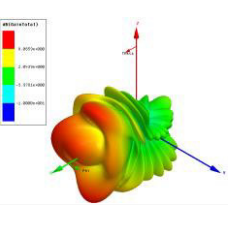
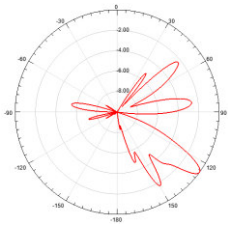
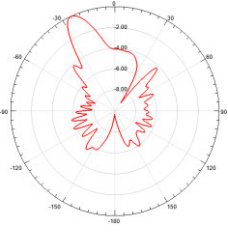
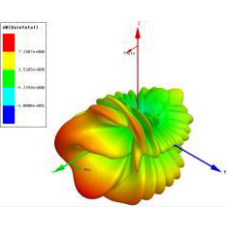
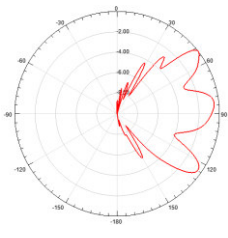
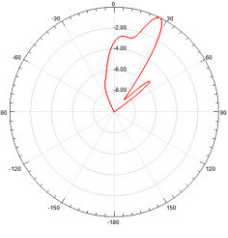
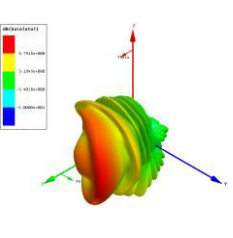
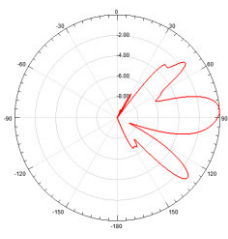
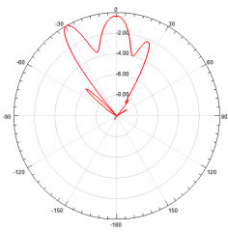
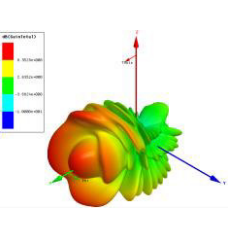
6.55				8.228
6.8				9.083
7				9.5388
7.25				9.1922
7.5				9.2081
8.05				8.5875
8.6				9.1115

<p>9.2</p>				<p>9.5152</p>
<p>9.75</p>				<p>9.6523</p>

**Tabla 3.6:** Diagramas de radiación y ganancia máxima en las frecuencias de mínimo S11 para la alimentación perpendicular.

Frecuencia [GHz]	$\Phi=0$	$\Theta=90$	3D	Ganancia máxima [dB]
2.05				7.5183
2.6				8.8749
2.8				4.545
3.15				5.9421
3.35				6.5668
4				6.5248

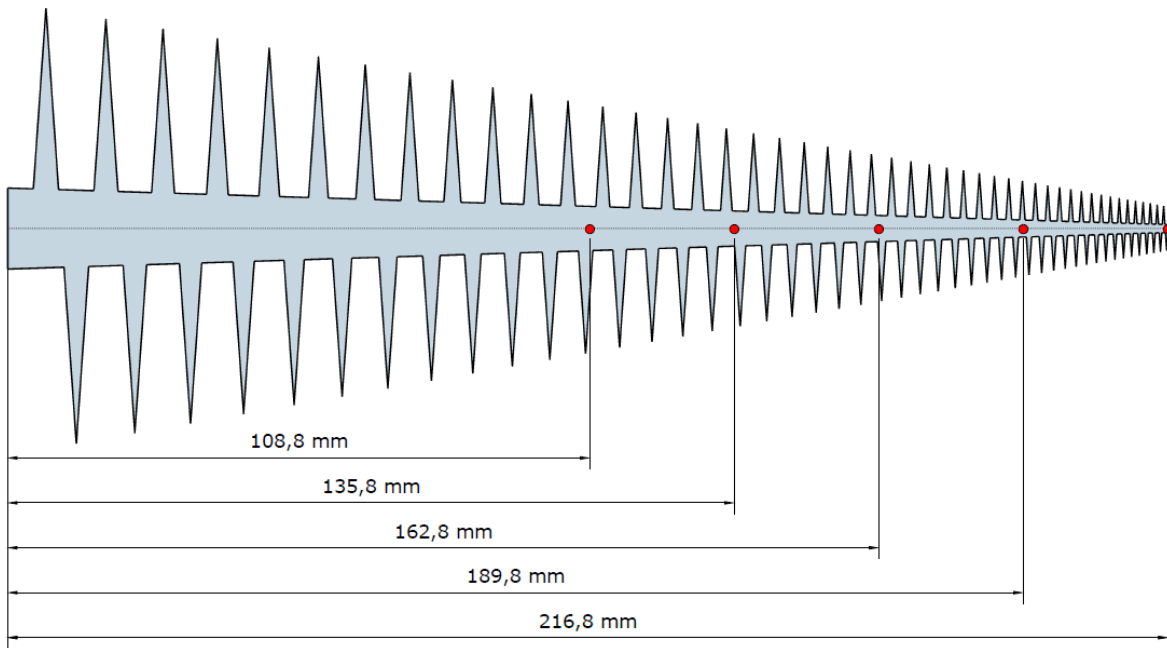
4.15				7.5569
4.95				7.3496
5.95				6.1197
6.25				6.8627
6.4				7.2193
6.8				6.5142
6.9				6.7571

7.3				6.4215
8				6.8313
8.7				6.3497
9.35				7.4388

### 3.2.4 COMPORTAMIENTO DEL PARÁMETRO S11 EN DISTINTOS PUNTOS DE ALIMENTACIÓN.

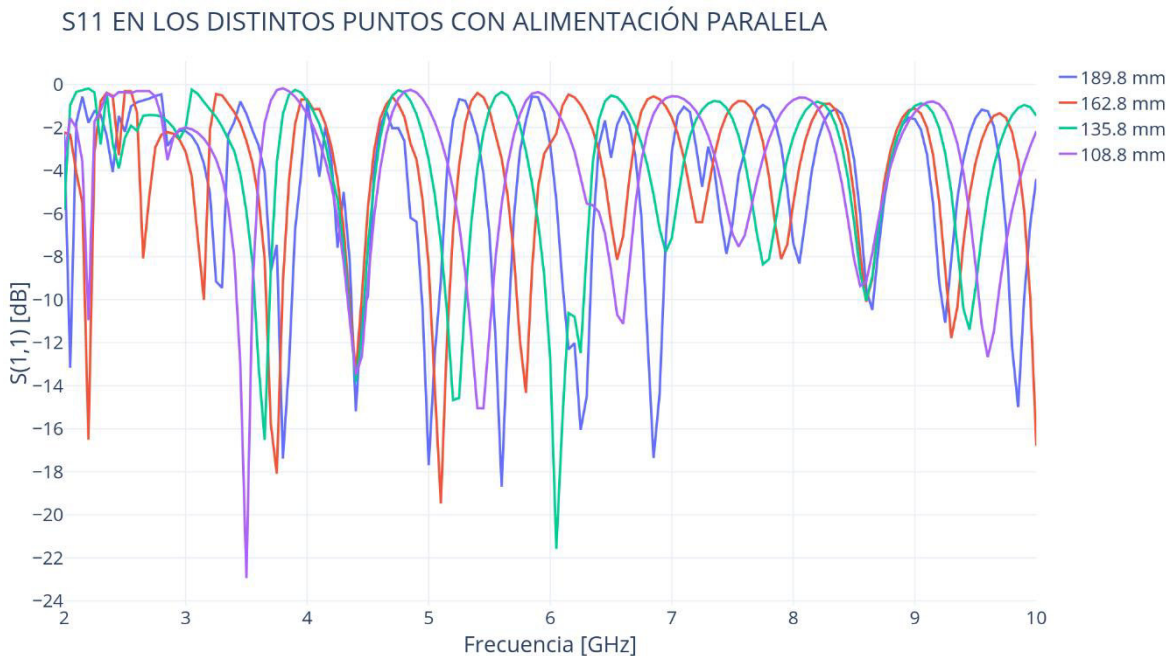
Como se vio en el Capítulo 1, el cambio del punto de alimentación de la antena puede ser de ayuda para la sintonización del sistema. Si bien en este trabajo no se propone un mecanismo de variación del punto de alimentación, se realiza el análisis computacional en los siguientes puntos:



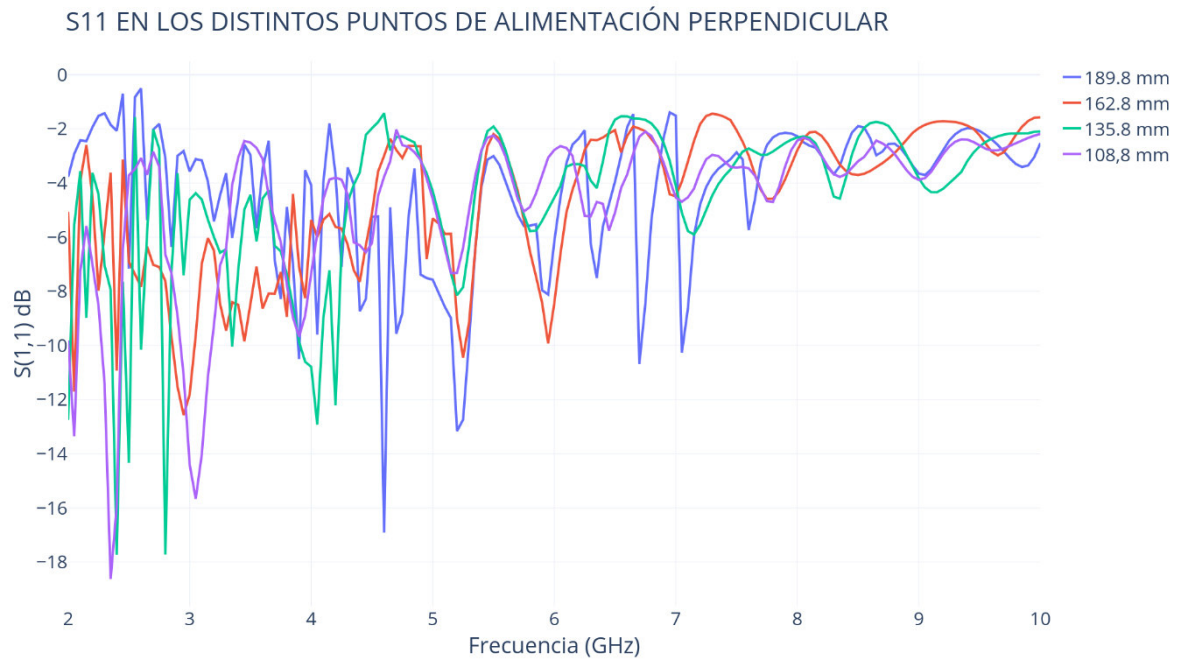


**Figura 3.7:** Puntos de alimentación para el análisis computacional del parámetro S11.

La separación entre cada uno de los puntos es de 27 mm, de esta manera logramos 4 puntos extra de análisis equidistantes desde el punto original de alimentación (216.8 mm) hasta el punto medio de la antena (108,8 mm).



**Figura 3.8:** Parámetro S11 en los distintos puntos con alimentación paralela.



**Figura 3.9:** Parámetro S11 en los distintos puntos con alimentación perpendicular.

En la Figura 3.9 se puede observar que, para la alimentación perpendicular, a medida que el punto de alimentación se acerca a la base de la antena, aparecen puntos de mínimo S11 a frecuencias más bajas, sin embargo, esto solo es fácilmente observable entre 0 y 3 GHz, mientras que para el resto de las frecuencias este comportamiento ya no es evidente.

Para la alimentación paralela el comportamiento es muy interesante. A medida que se acerca el punto de alimentación a la base de la antena, la gráfica se expande alrededor de 4.4 GHz, es decir, a valores menores de esta frecuencia, los puntos de menor S11 se trasladan hacia la izquierda, mientras que para frecuencias mayores se trasladan hacia la derecha. Gracias a este comportamiento el potencial de sintonización por movimiento del punto de alimentación es alto.

### 3.2.5 COMPARACIÓN ENTRE ALIMENTACIÓN PARALELA Y ALIMENTACIÓN PERPENDICULAR

**Tabla 3.7:** Comparación entre alimentación paralela y alimentación perpendicular.

	<b>Alimentación Paralela</b>	<b>Alimentación Perpendicular</b>
<b>Bandas de trabajo</b>	15	17
<b>Bandas potenciales de detección de elementos químicos</b>	2	1
<b>Impedancia</b>	La gráfica presentada en la Figura 3.5 no presenta comportamientos erráticos.	La gráfica presentada en la Figura 3.6 presenta cambios bruscos de resistencia y reactancia
<b>Diagramas de radiación</b>	La antena radia hacia la dirección esperada. Existen divisiones del lóbulo principal en el plano $\theta=0$	A bajas frecuencias el diagrama presenta un lóbulo principal. A altas frecuencias el diagrama se deforma notablemente.
<b>Ganancia máxima</b>	Entre 7.8 y 10.896 dB	Entre 4.545 y 8.8749 dB
<b>Sintonización por movimiento del punto de alimentación</b>	Parámetro S11 tiene un comportamiento estable con el movimiento	Parámetro S11 tiene un comportamiento errático con el movimiento

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- A partir de las expresiones de diseño propuestas por Engargiola, se puede concluir que existen dos formas de aumentar los puntos de máxima resonancia. Mantener la longitud de la antena y aumentar el ángulo del zigzag o, aumentar la longitud de la antena utilizando los rangos dimensionales de los extremos de la estructura manteniendo el mismo ángulo del zigzag.
- Las bandas de trabajo obtenidas en la simulación, tanto para la alimentación paralela como para la perpendicular, reflejan que la antena trabaja entre 3 y 10 GHz, parámetros propuestos en la etapa de diseño.
- El ancho de banda relativo de las rayas espectrales menores a 10 GHz es de menos del 1%. Las bandas de trabajo coincidentes con las rayas espectrales obtenidas de la antena con ambos métodos de alimentación tienen un ancho de banda relativo mayor por lo que podría usarse para la detección de estos elementos en un ancho de banda mayor al mínimo propuesto por la ITU.
- La impedancia en los puntos de máxima resonancia varía alrededor de 50 ohms para la resistencia y 0 ohms para la reactancia, lo que indica que un cable coaxial comercial RG-223 es perfectamente acoplable.
- Los diagramas de radiación para el caso de la alimentación paralela radian hacia la dirección esperada, sin embargo, no presentan un lóbulo principal definido como podría esperarse de una antena log-periódica ideal. Esto se debe a que a medida que la frecuencia aumenta, el área de radiación se vuelve excesivamente grande comparada con la longitud de onda y también por la presencia del cable conductor en el eje de la antena.
- Los diagramas de radiación para el caso de la alimentación perpendicular son muy cercanos a los ideales en las frecuencias de trabajo bajas, sin embargo, a medida que la frecuencia aumenta los diagramas empiezan a tener una clara deformación en un lado específico y aparece radiación hacia la parte trasera de la antena. Esto es debido nuevamente a que el área de radiación se vuelve grande comparada con la longitud de onda de las frecuencias más altas y por la presencia del eje metálico que conecta la malla del coaxial con el reflector.

- Los diagramas de radiación de la antena propuesta no serían críticos en radioastronomía, ya que la directividad y ganancia serían notablemente mejorados por el plato parabólico exterior.
- La antena diseñada no tiene una ganancia considerable por si sola. Es necesario que esté en el foco de una antena parabólica. Tomando en cuenta la ecuación (1.2), se puede mejorar por mucho la ganancia del sistema. Asumiendo un plato parabólico de 3 m se pueden obtener ganancias mayores a 40 dB sumando los valores de ganancia obtenidos en la simulación.
- La sintonización por movimiento es controlable y predecible para la antena con alimentación paralela, ya que presenta un comportamiento estable con el movimiento (Figura 3.8). Para la alimentación perpendicular y con este análisis, la sintonización por movimiento no es ideal.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Para la detección de rayas espectrales es imperativo hacerlo en un área geográfica libre de interferencias de todo tipo: radio AM y FM, televisión, telefonía móvil, etc. Ya que pueden introducir ruido al sistema y ciertos elementos químicos son detectables dentro de esas frecuencias.
- En HFSS el modelado se realiza mediante puntos en el espacio con coordenadas en XYZ que se unen mediante rectas. Si la estructura a simular posee muchos puntos como en este caso, se recomienda realizar el modelado en un software especializado como SketchUp o AutoCAD e importar el modelo hacia HFSS.
- Para conseguir un resultado más cercano a la realidad en la simulación, es recomendable utilizar un barrido discreto. De esta manera HFSS realiza los cálculos necesarios para cada una de las frecuencias especificadas por pasos discretos en el rango estudiado y no interpola resultados, sin embargo, este tipo de barrido aumenta considerablemente los tiempos de simulación.
- Por la geometría compleja de la antena. HFSS necesita grandes recursos computacionales al momento de realizar la simulación. Un computador de última generación disminuye considerablemente los tiempos de procesamiento.

- La geometría del reflector/plano de tierra necesita un estudio más profundo. Si bien los valores de ganancia son aceptables, un reflector en forma de V o cóncavo podría mejorarla.
- Un arreglo de estas antenas como se puede ver en el Capítulo 1, mejoraría considerablemente las características del sistema, la forma de conexión de estas sería un punto interesante para analizar en el futuro.
- Por la naturaleza plana de la antena, esta sería relativamente sencilla de implementar mediante técnicas de corte CNC, la tolerancia de la máquina de corte es de vital importancia principalmente para los elementos triangulares de alta frecuencia.
- Utilizar los mismos criterios de diseño en tecnología microstrip sería otra forma de implementación que puede tomarse en cuenta para futuros trabajos.
- Esta antena solo es una pequeña parte de un sistema radio astronómico. Existen muchos subsistemas que podrían diseñarse en trabajos complementarios, por ejemplo, los sistemas de movimiento del punto de alimentación y de refrigeración o el espectrómetro de banco de filtros.
- Finalmente, aliento al cuerpo docente de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, tomar en cuenta este trabajo para la enseñanza de este tipo de antena a los estudiantes. Ya que, comparada con la antena log-periódica de dipolos, tiene un diseño más sencillo.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. J. Álvarez, “¿Quién inventó el telescopio?,” Instituto de Astrofísica de Canarias • IAC, 13-Oct-2015. [Online]. Disponible: <https://www.iac.es/es/blog/vialactea/2015/10/quien-invento-el-telescopio>. [Acceso: 29-Ago-2021].
- [2] “Introducción,” OAQ. [Online]. Disponible: <https://oaq.epn.edu.ec/index.php/nosotros/introduccion>. [Acceso: 29-Ago-2021].
- [3] D. K. Lynch y W. Livingstone, Color and light in nature. Topanga: Thule Scientific, 2010.
- [4] “Radioastronomía: Señales del Espacio exterior,” VIU, 06-Jul-2018. [Online]. Available: <https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/radioastronomia-senales-del-espacio-exterior>. [Acceso: 29-Ago-2021].
- [5] “The science of radio astronomy,” National Radio Astronomy Observatory, 15-Oct-2020. [Online]. Disponible: <https://public.nrao.edu/radio-astronomy/the-science-of-radio-astronomy/>. [Acceso: 29-Ago-2021].
- [6] Manual sobre Radioastronomía. Geneva: International Telecommunication Union, 2013.
- [7] G. Engargiola, “LOG-PERIODIC ANTENNA,” 04-Oct-2005.
- [8] “Radio Telescopes,” Las Cumbres Observatory. [Online]. Disponible: <https://lco.global/spacebook/telescopes/radio-telescopes/>. [Acceso: 26-Nov-2021].
- [9] D. González, K. García, Cálculo de Ganancia en Las Antenas de Apertura. Universidad Particular de Loja, 2012 [Online]. Disponible: <https://www.slideshare.net/chelitoplindo/diapo-antenas-deapertura/7>. [Acceso: 24-Ago-2022].
- [10] B. F. Burke, F. G. Smith, y P. N. Wilkinson, An Introduction to Radio Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [11] P. N. Stroski / 10 de abril de 2019, “Tipos de antenas (parte 2, Antenas Reflectoras) – electrical E,” Library.com, 10-Apr-2019. [Online]. Disponible: <https://www.electricalibrary.com/2019/04/10/tipos-de-antenas-parte-2-antenas-reflectoras/>. [Acceso: 07-Dec-2021].
- [12] P. J. Bevelacqua, “The horn antenna,” Horn Antenna, 2015. [Online]. Disponible: <https://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn.php>. [Acceso: 07-Dec-2021].

- [13] I. Poole, "Microwave horn antenna," Electronics Notes. [Online]. Disponible: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/horn-antenna/basics-primer.php>. [Acceso: 07-Dec-2021].
- [14] R. D. Heydari, H. R. Hassani, and A. R. Mallahzadeh, "Quad Ridged Horn Antenna for UWB Applications," Progress In Electromagnetics Research, vol. 79, pp. 23–38, 05-Jul-2007.
- [15] A. N. Silva, R. G. Carvalho, A. G. D'Assunção Junior, and A. G. D'Assunção, "A new technique using axially slotted microstrip line for antenna impedance matching designs," Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, vol. 18, no. 2, pp. 208–218, Jun. 2019.
- [16] R. DuHamel and D. Isbell, "Broadband logarithmically periodic antenna structures," 1958 IRE International Convention Record, 1957, pp. 119-128, doi: 10.1109/IRECON.1957.1150566.
- [17] P. E. Mayes, "Log-periodic zig zag antenna," 28-Nov-1967.
- [18] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.
- [19] J. Welch, D. Backer, and L. Blitz, "The Allen Telescope Array: The First Widefield, Panchromatic, Snapshot Radio Camera for Radio Astronomy and SETI," Proceedings of the IEEE, Sep. 2009.
- [20] Pasternack, Flexible RG223 Coax Cable Double Shielded with Black PVC Jacket. Pasternack Enterprises, Irvine, California, 2014.
- [21] Ansys HFSS | 3D high frequency simulation software. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. [Accessed: 24-Aug-2022].



## **ANEXO A**

Características generales del software ANSYS HFSS [21]:

Ansyes HFSS es un software de simulación electromagnética (EM) 3D para diseñar y simular productos electrónicos de alta frecuencia como antenas, conjuntos de antenas, componentes de RF o microondas, interconexiones de alta velocidad, filtros, conectores, paquetes de circuitos integrados y placas de circuito impreso. Ingenieros de todo el mundo utilizan el software Ansyes HFSS para diseñar componentes electrónicos de alta frecuencia y alta velocidad que se encuentran en sistemas de comunicaciones, sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), satélites y productos de Internet de las cosas (IoT).

Posee:

- Kit de herramientas de diseño de antenas.
- Procesamiento previo/posterior de radar.
- Dominio de la frecuencia y el tiempo.
- Flujo ECAD de diseño 3D.
- Solucionadores de matriz de memoria.
- Mallado 3D inicial concurrente, etc.

## **ANEXO B**

Características del hardware utilizado:

- Procesador: Intel i7 de 8va generación.
- RAM: 16 GB DDR3
- OS: Windows 10.
- Tarjeta Gráfica: Intel Graphics (Integrada)

## **ORDEN DE EMPASTADO**