



**Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas Vivaldi impresa para  
la banda de frecuencias de VHF - UHF**

Acosta Córdova, José Humberto

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y  
Telecomunicaciones

Ing. Tinoco Salazar, Alexis Fabricio – D.Sc.

20 de agosto del 2020





## Document Information

**Analyzed document** Urkund\_ACOSTA\_JOSE\_Final.docx (D78405653)  
**Submitted** 8/31/2020 3:02:00 PM  
**Submitted by** TINOCO SALAZAR ALEXIS FABRICIO  
**Submitter email** atinoco.salazar@gmail.com  
**Similarity** 7%  
**Analysis address** aftinoco.espe@analysis.orkund.com



1706562178

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Orkund_Final.docx</b> Document Orkund_Final.docx (D62477112)		<b>3</b>
<b>SA</b>	<b>Urkud_Cyntia.docx</b> Document Urkund_Cyntia.docx (D62477105)		<b>2</b>
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Urkund_PEREZ_DANIEL.docx</b> Document Urkund_PEREZ_DANIEL.docx (D78376008) Submitted by: atinoco.salazar@gmail.com Receiver: aftinoco.espe@analysis.orkund.com		<b>2</b>
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Urkund_Andrade Machado.docx</b> Document Urkund_Andrade Machado.docx (D54503058) Submitted by: rdleon@espe.edu.ec Receiver: rdleon.espe@analysis.orkund.com		<b>4</b>
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Urkund_DiegoQuispe_Final.txt</b> Document Urkund_DiegoQuispe_Final.txt (D78321223) Submitted by: atinoco.salazar@gmail.com Receiver: aftinoco.espe@analysis.orkund.com		<b>1</b>
<b>SA</b>	<b>Diseño de arreglos de antenas de microcinta para sistemas inalámbricos en la banda ...</b> Document Diseño de arreglos de antenas de microcinta para sistemas inalámbricos en la banda ... (D46363935)		<b>1</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/6152/577882.pdf?sequence=1&amp;...">https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/6152/577882.pdf?sequence=1&amp;...</a> Fetched: 4/15/2020 1:36:39 AM		<b>3</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/11895/TFG-GISAT-Sergio-Pina-B...">https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/11895/TFG-GISAT-Sergio-Pina-B...</a> Fetched: 7/5/2020 10:28:11 PM		<b>2</b>



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

### **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas Vivaldi impresa para la banda de frecuencias de VHF - UHF" fue realizado por el señor **Acosta Córdova José Humberto**, el cual que ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 20 de agosto de 2020

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Sr. Alexis Fabricio Tinoco Salazar, escrita sobre una línea horizontal.

Ing. Alexis Fabricio Tinoco Salazar, D.Sc.

C.C: 1706562178



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Acosta Córdova José Humberto** con cédula de ciudadanía N° 1714625918, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas Vivaldi impresa para la banda de frecuencias de VHF - UHF"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 20 de agosto de 2020

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Acosta Córdova', escrita sobre una línea horizontal.

José Humberto Acosta Córdova

CC:1714625918





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

## AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Acosta Córdova José Humberto** con cédula de ciudadanía N° 1714625918, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas Vivaldi impresa para la banda de frecuencias de VHF - UHF"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 de agosto de 2020

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Acosta Córdova' y 'José Humberto', escrita sobre una línea horizontal.

José Humberto Acosta Córdova

CC:1714625918

## DEDICATORIA

Como miembro de la gloriosa arma del Enlace y Mando, Comunicaciones, al culminar este proyecto de investigación que ha sido fruto de mucho esfuerzo, se ha generado un diseño y herramientas para el empleo de nuevas tecnologías como parte de los sistemas de comunicaciones de la Fuerza Terrestre, es por ello que quiero dedicar este trabajo a quienes conforman este ejército vencedor y este estilo de vida muy noble, quienes supieron evidenciar la utilidad de este trabajo en operaciones militares mucho antes de ser sustentado.

Quiero dedicar este éxito a mi amada esposa, mi ángel, quien me apoyó en los momentos más duros de mi vida y es mi compañera de mil batallas, a mis hijas Raffaella y Luciana por ser mi motivación diaria para seguir adelante, a mis padres que me dieron la vida y a mi Mamá Luisina y Papá José que han sido mi más grande ejemplo de amor, trabajo, esfuerzo y honradez, a mi familia, amigos y personas especiales quienes de una u otra manera fueron parte importante en mi vida y en este proceso.

“FUN IS FUN, DONE IS DONE”

**José Humberto Acosta Córdova**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento con fe profunda al Divino Niño, a la Virgen María y a mi Dios, quienes son el soporte espiritual de mi vida y de mi familia y me han permitido seguir adelante a pesar de las adversidades y me han guiado en la consecución de mis objetivos.

Un profundo agradecimiento a mi profesor y director de tesis Ingeniero Alexis Fabricio Tinoco Salazar por ser una persona con grandes cualidades personales, excelentes atributos de docencia, y de liderazgo que me guiaron en la consecución de esta investigación.

Un agradecimiento sincero al Ejército Ecuatoriano por permitirme avanzar en mis metas y capacitarme para cumplir eficientemente mi trabajo como Oficial de Comunicaciones.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, que me permitió educarme desde la fase de nivelación hasta la titulación, y a mis docentes que siempre me guiaron en el camino del saber, gracias a ellos pude generar todo mi proyecto de investigación.

Y un agradecimiento especial al Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Ejército por facilitarme sus instalaciones y su personal en la consecución de esta investigación

**José Humberto Acosta Córdova**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN .....	3
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA .....	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTO.....	7
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS .....	12
RESUMEN .....	14
ABSTRACT .....	15
Capítulo I.....	16
Descripción Del Proyecto De Investigación .....	16
Planteamiento del problema.....	16
Antecedentes.....	17
Justificación e importancia .....	19
Objetivos.....	21
<i>Objetivo general</i> .....	21
<i>Objetivos específicos</i> .....	21
Capítulo II.....	22



	9
Marco teórico.....	22
Introducción .....	22
Parámetros fundamentales de las antenas .....	22
<i>Acoplamiento de impedancias</i> .....	23
<i>Línea de transmisión coaxial</i> .....	23
Parámetros de antenas en transmisión .....	24
<i>Impedancia</i> .....	24
<i>Patrón de radiación</i> .....	24
<i>Directividad</i> .....	25
<i>Polarización</i> .....	26
<i>Ancho de banda</i> .....	27
<i>Campo cercano y campo lejano</i> .....	27
<i>EIRP</i> .....	27
Parámetros de antenas en la recepción.....	28
<i>Adaptación</i> .....	28
<i>Área y longitud efectiva</i> .....	28
Antena banda ancha.....	29
Antena Vivaldi.....	30
Sustrato .....	33
Microstrip - slotline .....	33
Software.....	36
<i>ANSYS HFSS</i> .....	36
Capítulo III.....	38
Simulaciones y optimización.....	38
Introducción .....	38

	10
Diseño de la antena Vivaldi.....	40
Simulación y optimización inicial de las topologías propuestas.....	43
<i>Optimización de la antena Vivaldi.....</i>	<i>48</i>
<i>Variación de la longitud de la microcinta (Inline).....</i>	<i>51</i>
<i>Variación de la longitud cónica (rate).....</i>	<i>54</i>
<i>Variación de la longitud de la antena Vivaldi (TL).....</i>	<i>55</i>
<i>Variación del parámetro radio.....</i>	<i>56</i>
Capítulo IV .....	58
Análisis de resultados.....	58
Capítulo V .....	64
Conclusiones y recomendaciones .....	64
Conclusiones .....	64
Recomendaciones .....	65
Referencias .....	66
Anexos .....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Bandas de frecuencia según la ITU.....	33
<b>Tabla 2.</b> Características del sustrato de FR4.....	34
<b>Tabla 3.</b> Cálculos del microstrip. ....	35
<b>Tabla 4.</b> Parámetros de la antena Vivaldi clásica .....	43
<b>Tabla 5.</b> Resultados Iniciales de la simulación de la antena Vivaldi clásica.....	47
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de la antena Vivaldi optimizada.....	49
<b>Tabla 7.</b> Resultados de la simulación de la antena Vivaldi optimizada .....	51
<b>Tabla 8.</b> Parámetros de la antena Vivaldi de 10 MHz a 1 GHz.....	59
<b>Tabla 9.</b> Resultados finales de la simulación de la antena Vivaldi .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación de una línea de transmisión concéntrica .....	23
<b>Figura 2.</b> Sistemas de coordenadas para análisis del patrón de radiación.....	25
<b>Figura 3.</b> Polarización de acuerdo con la función del radio $E_2/E_1$ .....	26
<b>Figura 4.</b> Máscara espectral para 3.1 – 10.6 GHz para comunicaciones UWB. ....	30
<b>Figura 5.</b> Forma general de la antena Vivaldi.....	32
<b>Figura 6.</b> Módulo receptor de video de 8-40 GHz .....	32
<b>Figura 7.</b> Composición microstrip.....	34
<b>Figura 8.</b> Logotipo ANSYS HFSS .....	36
<b>Figura 9.</b> Interfaz gráfica software HFSS .....	37
<b>Figura 10.</b> Configuración en el simulador HFSS .....	38
<b>Figura 11.</b> Opciones de dirección de la configuración en HFSS.....	39
<b>Figura 12.</b> Opciones de barrido de frecuencia en HFSS .....	40
<b>Figura 13.</b> Antena Vivaldi en HFSS .....	41
<b>Figura 14.</b> Medidas de la antena Vivaldi clásica .....	41
<b>Figura 15.</b> Simulación de la antena Vivaldi clásica.....	44
<b>Figura 16.</b> Creación de reportes .....	45
<b>Figura 17.</b> Opciones y selección de reportes .....	45
<b>Figura 18.</b> Reporte VSWR vs. Frecuencia de la simulación .....	46
<b>Figura 19.</b> Antena Vivaldi Optimizada .....	48
<b>Figura 20.</b> Antena Vivaldi optimizada completa .....	48

<b>Figura 21.</b> Resultados de la simulación de la antena Vivaldi optimizada.....	50
<b>Figura 22.</b> Configuración del análisis del barrido de frecuencias.....	52
<b>Figura 23.</b> Selección de la variable y su configuración para el Barrido.....	52
<b>Figura 24.</b> Variación de la longitud de la microstrip.....	53
<b>Figura 25.</b> Resultado de la simulación del microstrip .....	54
<b>Figura 26.</b> Simulación de variación del Rate .....	55
<b>Figura 27.</b> Simulación de variación de la longitud de la antena.....	56
<b>Figura 28.</b> Simulación de variación del Radio .....	57
<b>Figura 29.</b> Simulación para el rango de VHF .....	58
<b>Figura 30.</b> Resultados finales del análisis de la antena Vivaldi .....	60
<b>Figura 31.</b> Resultados del análisis de la antena Vivaldi final .....	61
<b>Figura 32.</b> Ancho de banda útil de la antena Vivaldi .....	61
<b>Figura 33.</b> Gráfico de resultados $S_{11}$ .....	63
<b>Figura 34.</b> Gráfico del campo E .....	63

## RESUMEN

El “Diseñar, Simular, Analizar y Desarrollar un prototipo de red de antenas Vivaldi, de tipo impresa, para la banda de VHF - UHF”, es presentada aquí. Utilizando una metodología teórica/experimental, un elemento irradiador es diseñado, simulado y optimizado. Su desempeño es estudiado y se utilizó la infraestructura disponible en el Laboratorio de Telecomunicaciones que pertenece al Centro de Investigaciones de Aplicaciones Militares – CICTE. De esta manera se hace efectiva la aplicación de políticas y planes para el desarrollo tecnológico de las tecnologías de información y comunicación en el ámbito de la seguridad nacional, aumentando la eficiencia y la efectividad de respuesta del Ejército Ecuatoriano en situaciones de riesgo que requieran atención inmediata; el proyecto se realizará en apoyo a las operaciones militares del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica (AGRUCOMGE), se realizará un estudio y análisis del estado del arte en relación con el problema a resolver, se estudiará y analizará el irradiador denominado Vivaldi para la banda de VHF - UHF”, luego se diseñará la antena Vivaldi que cumpla con las especificaciones necesarias, que optimicen el ancho de banda de funcionamiento, diagrama de irradiación, peso y tamaño de la red, además se usará simuladores electromagnéticos específicos para optimizar las dimensiones y desempeño de la red (HFSS – *High Frequency Structure System*, de la empresa americana ANSYS®).

### **PALABRAS CLAVE:**

- **VIVALDI**
- **ANTENAS MICROSTRIP**
- **VHF - UHF**
- **MONITOREO**



## ABSTRACT

“Design, Simulate, Analyze and Develop a prototype of Vivaldi antenna network, of a printed type, for the VHF - UHF band”, is presented here. Using a theoretical / experimental methodology, for this, an irradiator element will be designed, simulated, and optimized. Its studied performance using the infrastructure available in the Telecommunications Laboratory that belongs to the Military Applications Research Center - CICTE. In this way, the application of policies and plans for the technological development of information and communication technologies in the field of national security becomes effective, increasing the efficiency and effectiveness of the response of the Ecuadorian Army in situations of risk that require immediate attention; the project will be carried out in support of the military operations of the Communications and Electronic Warfare Group (AGRUCOMGE), first, a study and analysis of the state of the art will be carried out in relation to the problem to be solved. It will study and will analyze the irradiator named Vivaldi for the VHF - UHF band will be studied and analyzed; a Vivaldi antenna will then be designed that meets the necessary specifications, which optimize the operating bandwidth, irradiation diagram, weight, and size of the network. It will use specific electromagnetic simulators to optimize the dimensions and performance of the network (HFSS – *High Frequency Structure System* from American enterprise ANSYS ®).

### KEYWORDS:

- **VIVALDI**
- **MICROSTRIP ANTENNAS**
- **VHF - UHF**
- **MONITORING**

## **Capítulo I**

### **Descripción Del Proyecto De Investigación**

#### **Planteamiento del problema**

En la actualidad la falta de soporte, la deficiencia en la transferencia de tecnología debido a que los sistemas son cerrados en su producción y la necesidad de obtener permisos de exportación de gobiernos extranjeros como el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norte América obligan a las instituciones nacionales a buscar nuevas formas de tecnología nacionales, con costos de fabricación más convenientes que permitan cumplir con las tareas delicadas en los campos de seguridad y defensa.

Existen varios estudios donde se optimizan antenas como partes de sistemas de radares tanto terrestres como aéreos. Mejoran sus capacidades al cambiar sus características y efectos, claro que son para aplicaciones específicas (Gopinath Gampala, 2015) en los campos de la defensa.

En el Ecuador no existe infraestructura para producir tecnologías de comunicaciones nacionales lo que hace que el país sea dependiente de los países extranjeros y sus políticas para los sectores sensibles.

El presente proyecto de investigación nace como requerimiento del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica de la Fuerza Terrestre, el mismo que tiene equipos y materiales como antenas de tamaños grandes, de complicado manejo y con altos costos de mantenimiento y reposición.

Y al no existir una solución tecnológica, científica endógena para cumplir con los procesos de mantenimiento, reposición o mejoramiento del sistema de antenas del AGRUCOMGE y de todas las Fuerzas Armadas en el país, la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE en conjunto con el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Ejército brindan sus recursos para que se pueda materializar el presente proyecto de investigación.

### **Antecedentes**

Una de las definiciones de antenas indica que es el dispositivo que acopla un sistema de transmisión/recepción al medio de propagación. Con base en esta definición se infiere que una antena es el dispositivo que posibilita la existencia de los sistemas inalámbricos de radio frecuencia.

Las antenas de Ultra Banda Ancha (*Ultra Wide Band*) son fascinantes y están estrechamente relacionadas con la ingeniería de radio frecuencia, combinadas con las ciencias y el arte para crear resultados específicos de acuerdo con la necesidad.

En los últimos años, la falta de reposición de equipos y materiales pertenecientes al sector de las comunicaciones militares han ocasionado un gran problema a los sectores encargados de la defensa del territorio nacional debido a la falta de recursos para mantenimiento y compra de nuevas herramientas que por su utilización ya han pasado su vida útil.

La Fuerza Terrestre comprometida con el cumplimiento de su misión y así los proyectos de fortalecimiento de la inteligencia de señales dentro de las Fuerzas Armadas para la realización de operaciones de Guerra Electrónica han impulsado que estudiantes

de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE con su conocimiento científico busquen nuevas soluciones para el mejoramiento de sus capacidades operativas. En este sentido, la investigación sobre la antena Vivaldi puede plasmar un arreglo de antenas que permita cubrir el rango de frecuencias de VHF y UHF para propósitos militares.

En la literatura consultada existen trabajos que presentan las características sobre las antenas de microcinta (*microstrip*), en la que se muestran las ventajas inherentes a la Antena Vivaldi. Propiedades como alta ganancia, gran ancho de banda, sus usos en las telecomunicaciones, además de brindar una metodología para su diseño son abarcadas con saciedad. (Ramírez, 2012).

Técnicas de alimentación para antenas impresas uniplanares con operación en frecuencia de 6,5 GHz con características de irradiación, pérdidas, además de características que hacen factible el uso de la antena Vivaldi para bandas ultra anchas son cotidianas en aplicaciones del tipo UWB. (Jan Schorer, 2012).

Entre otros estudios se presenta el proceso de diseño y evaluación de una antena Vivaldi antipodal modificadas, para aplicaciones GPR (*Ground Penetrating Radar*) para la banda de frecuencia de 700 MHz – 9 GHz con valores aceptables para su implementación. (Torres, 2014)

Otro trabajo presenta el estudio paramétrico de la Antena Vivaldi cumpliendo el rango especificado por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) (3,1 - 10,6 GHz) usado para aplicaciones UWB, con gran concordancia entre los resultados medidos. (Bayat, 2012)

Se puede verificar diferentes modelos de antenas Vivaldi, sus diferentes usos en bandas de radares, características y una alta ganancia al modificar el centro de fase son

presentados en trabajo como el de Hatami. (Ahmad Hatami, 2020). Antenas Vivaldi son usadas en radares, aplicaciones de sensoriamiento remoto en la banda de microonda operando en 2,9 GHz y modificando su diseño para obtener mejores resultados (G. K. Pandey, 2015)

En los análisis de los patrones de irradiación y el modelamiento de los elementos de la antena vivaldi se determinó que cada elemento debe tener una medida entre  $0,5\lambda$  y  $\lambda$  para obtener resultados que mejoran el desempeño en VSWR y los campos eléctricos irradiados. (Nurhayati, 2019).

En la caracterización de una antena Vivaldi (8-18 GHz) con doble cavidad obtuvieron valores de VSWR menores de 3 y se usa para transmisiones de datos digitales vía satélite y para transmisión de voz o audio. (P. Venu Madhav, 2019)

En otra investigación sobre el diseño de la antena Vivaldi con diferentes tamaños usando el software CST se determinó una cobertura entre 2 y 18 GHz con sus análisis de los efectos en los diferentes tamaños de abertura, brindando una guía para futuras investigaciones (NORHAYATI HAMZAH, 2011) y con valores de VSWR menores a 2 y con un tamaño de antena de 55 mm x 40 mm. Los ejemplos anteriormente mencionados permiten que se tenga el estado del arte para poder empezar una investigación específica al diseñar una antena Vivaldi para propósitos militares.

### **Justificación e importancia**

El presente proyecto pretende estudiar un elemento irradiador del arreglo de antenas Vivaldi para una banda de VHF - UHF con el fin de contribuir al fortalecimiento de la

inteligencia de señales dentro de Fuerzas Armadas para la realización de operaciones de Guerra Electrónica.

Es importante debido a que estos sistemas de arreglos de antenas no existen en el Ecuador, lo que permite la optimización de recursos y de antenas en la operatividad de los Sistemas de Monitoreo, adicionalmente, desarrollar tecnología endógena para el sector estratégico.

La compra de equipos o accesorios a empresas extranjeras siempre representará un gasto oneroso para el Estado, por tal motivo es necesario que los alumnos militares que están formándose como ingenieros electrónicos en telecomunicaciones, en la Universidad de la Fuerza Armadas – ESPE, aporten con conocimientos a través del respaldo del Centro de Investigación de Aplicaciones Militares del Ejército (CICTE).

Los principales problemas que se presentan a la hora de usar sistemas ya existentes en el mercado de Guerra Electrónica son:

- Los altos costos necesarios para su adquisición y la alta reserva tecnológica (propietarios de la industria de la defensa mundial).
- La falta de soporte, por ser consideradas áreas tecnológicas sensibles
- Deficiencia en la transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción.
- La necesidad de obtener permisos de exportación de gobiernos extranjeros como el DoD-USA (Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norte América).



## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Diseñar y optimizar un elemento de la red de antenas del Tipo Vivaldi impresas para la banda de frecuencias de VHF - UHF para el monitoreo por parte del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano (AGRUCOMGE), enfocado a incrementar la capacidad de respuesta de los sistemas de seguridad y vigilancia públicos.

### ***Objetivos específicos***

Los objetivos específicos están en concordancia con el objetivo principal propuesto y formarán parte de cada una de las etapas del desarrollo del presente proyecto. Además, los objetivos específicos se orientan a mejorar continuamente los procesos, la gestión estratégica y la aplicación de tecnologías de información y comunicación para optimizar los servicios de seguridad prestados por el Estado. Los objetivos específicos se pueden resumir de la siguiente forma:

- Realizar el estudio y análisis del estado del arte en relación con el problema a resolver.
- Diseñar un elemento de la red de antenas Vivaldi que cumpla con las especificaciones necesarias.
- Realizar la optimización de un elemento Vivaldi a través de simulaciones para verificar su correcto funcionamiento.

## Capítulo II

### Marco teórico

#### Introducción

El principal objetivo de este capítulo es detallar los temas que se van a tratar en el presente proyecto de investigación, y como primer punto se definen los parámetros que describen las características de las antenas, permitiendo entender el comportamiento de antenas con anchos de banda ultra grandes. Luego se detallarán los parámetros de una antena impresa, una breve introducción de la antena Vivaldi, llegando a concluir con la reseña del software utilizado para la optimización del elemento irradiador (*High Frequency Structure System – HFSS*), para luego tratar en el Capítulo III el diseño y optimización de la antena.

Las antenas son dispositivos conductores de características metálica que cumplen con la función de transformar la energía de las ondas electromagnéticas guiadas a ondas electromagnéticas propagándose por un medio específico. Estas son utilizadas para emitir y recibir esta energía a través de su canal de transmisión, el mismo que puede ser el espacio libre, o cualquier otro elemento. (Cardama Aznar, 2002), (Aleixandre, 2012).

Las antenas tienen características que varían de acuerdo con su dimensión, su geometría y la longitud de onda utilizada. Estas pueden ser consideradas como elementales, resonantes o directivas, dependiendo de su aplicación. (Ríos, 1993)

#### Parámetros fundamentales de las antenas

Entre los parámetros fundamentales de las antenas se tiene: los acoplamientos de impedancias, los parámetros de las antenas en transmisión, y los parámetros de antenas en la recepción.

### ***Acoplamiento de impedancias***

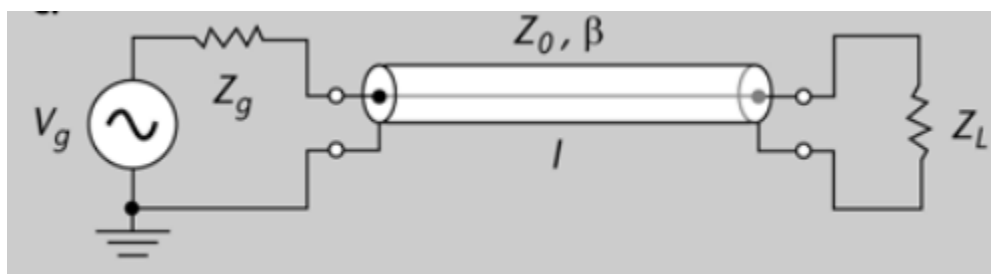
El acoplamiento de Impedancias es importante para satisfacer el teorema de máxima transferencia de potencia lo que hace que la potencia transmitida sea máxima sin pérdidas o atenuaciones desde un sistema a otro. Para cumplir con la transferencia total de potencia se utiliza también las líneas de transmisión, que son estructuras de determinado material que dirige la transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, esto se da para todo o una parte de la distancia entre el receptor y transmisor. (Aleixandre, 2012) Una de las principales líneas de transmisión es la de cable coaxial.

### ***Línea de transmisión coaxial***

Estas líneas de transmisión tienen en su constitución dos conductores, los mismos que tienen forma cilíndrica, y, en otras palabras, es un cilindro que está dentro de otro cilindro, separados y sin interferencia entre ellos, esta característica les da su nombre de concéntricas o coaxiales

### **Figura 1.**

*Representación de una línea de transmisión concéntrica*



*Nota.* El gráfico muestra la representación gráfica de una línea de transmisión concéntrica. Tomado de [https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica\\_II\\_ES/Fisica\\_II\\_ES\\_%28Modulo\\_6%29.pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_%28Modulo_6%29.pdf) (Aleixandre, 2012).

## **Parámetros de antenas en transmisión**

### ***Impedancia***

Al estar ubicada la antena a cierta distancia del transmisor, se utiliza una guía de onda o línea de transmisión para interconectar estos dos dispositivos, irradiando la máxima potencia y reduciendo las pérdidas en la antena.

Se puede expresar la impedancia como la relación de la tensión de voltaje sobre la corriente, en las cuáles están presentes los campos eléctricos y magnéticos en ese determinado escenario (Cardama Aznar, 2002).

Se debe hacer resonar a la frecuencia de trabajo a los dispositivos para de esta manera eliminar la reactancia de la antena.

$$Z_{ant} = (R_r + R_L) + jX_A \quad (1)$$

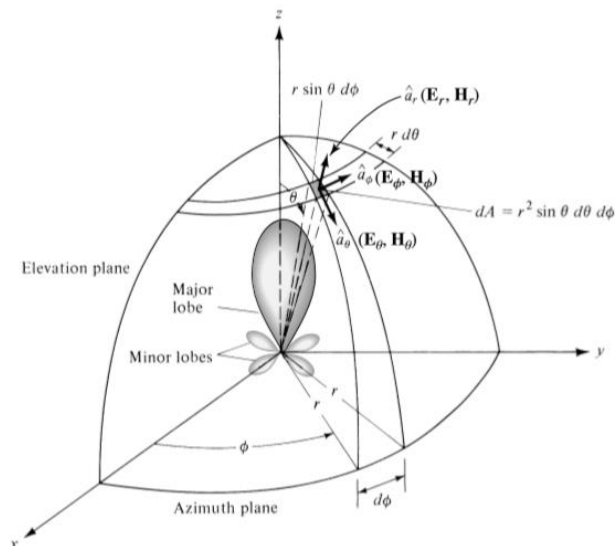
donde,  $Z_{ant}$  es la impedancia de la antena, la resistencia de la antena se compone de la suma de la resistencia de radiación  $R_r$  y  $R_L$  corresponde a las pérdidas del conductor dieléctrico, expresadas todas en  $\Omega$

### ***Patrón de radiación***

Es una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de determinadas coordenadas en el espacio. Se puede representar en dos o en tres dimensiones, y está conformado por los campos eléctrico y magnético.

**Figura 2.**

*Sistemas de coordenadas para análisis del patrón de radiación*



*Nota.* El gráfico muestra el sistema de coordenadas para el análisis de las antenas.

Tomado del *Libro de Teoría del análisis y diseño de Antenas*, (Balanis, 2005).

De la figura 2 se definen parámetros como el lóbulo principal que presenta la radiación máxima de la antena, seguido de los lóbulos menores donde se concentra los máximos de menor amplitud, además de los lóbulos secundarios o laterales que son lóbulos menores con mayores amplitudes, por último, se pueden verificar el lóbulo posterior o trasero que se encuentra en la dirección contraria al lóbulo principal.

### **Directividad**

La Directividad es el valor de la función de directividad en la dirección de máxima irradiación. Siendo que la función directividad se representa como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, en la condición de campo distante, y la densidad de potencia radiada por una antena isotrópica.

Prácticamente, la directividad es una medida de la capacidad de concentrar la energía irradiada por la antena en una determinada dirección. (Balanis, 2005).

### **Polarización**

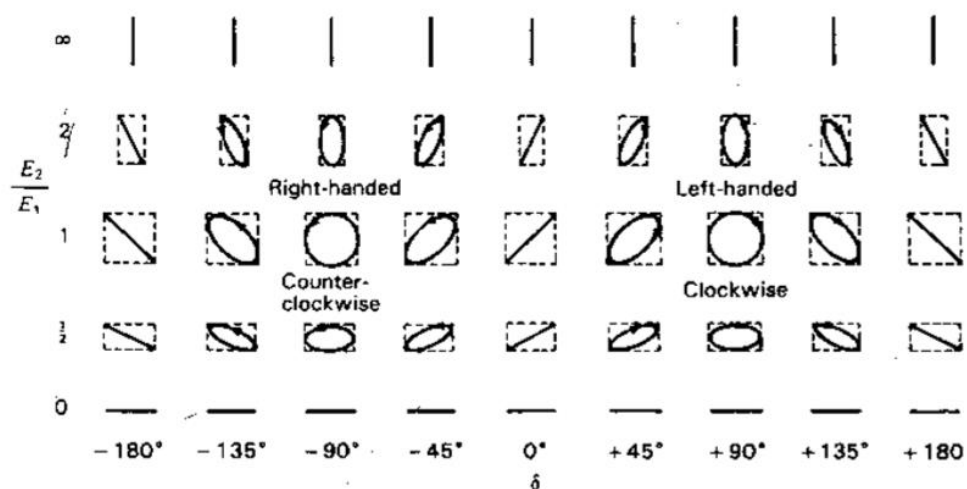
La polarización es una indicación de la orientación del vector campo eléctrico en un determinado punto fijo del espacio al transcurrir determinado tiempo.

La punta del vector describe la figura geométrica que forma la polarización.

De acuerdo con el plano de coordenadas donde se mueve la onda irradiada se pueden determinar la polarización lineal, elíptica o circular

### **Figura 3.**

*Polarización de acuerdo con la función del radio  $E_2/E_1$ .*



*Nota.* El gráfico muestra las elipses de polarización en función del ratio  $E_2/E_1$ , con el enfoque de los ángulos de fase. Tomado del *Libro de Antenas*, (Krauss, 1988).



### **Ancho de banda**

El ancho de banda de una antena es definido por el rango de frecuencias en las que puede trabajar dicha antena de forma eficiente de acuerdo con algunas características propias de esta (impedancia de entrada, patrón de radiación, ancho del haz, ganancia, etc.), las cuales no siempre varían en la misma proporción (Cardama Aznar, 2002). Normalmente el ancho de banda se mide en porcentaje con respecto a la frecuencia central, donde se hace un barrido de frecuencias con un VSWR  $\leq 2$  o con pérdidas por regreso menores a -10 dB.

$$\%BW = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_c} * 100 \quad (2)$$

donde %BW corresponde al ancho de banda fraccional en porcentaje,  $F_{max}$  y  $F_{min}$  son las frecuencias máximas y mínimas y  $F_c$  es la frecuencia central.

### **Campo cercano y campo lejano**

En el campo cercano los campos que predominan son los reactivos, y en el campo lejano es donde la radiación de los campos predomina, y que además es donde la distribución del campo angular es independiente de la antena.

Entre estos dos campos se encuentra la región de Fresnel donde los campos radiantes son los predominantes.

### **EIRP**

La Potencia Isotrópica Radiada Equivalente - PIRE (*Effective Isotropic Radiated Power - EIRP*) es la cantidad de potencia que emitiría una antena isotrópica teórica para

producir la densidad de potencia observada en la dirección de máxima ganancia de una antena.

La PIRE lleva en cuenta las pérdidas de la línea de transmisión y en los conectores e incluye la ganancia de la antena.

$$PIRE = P_T - L_C + G_A \quad (3)$$

donde PIRE y  $P_T$  (potencia del transmisor) son dBm, las pérdidas del cable ( $L_C$ ) están en dB, y la ganancia de la antena ( $G_A$ ) se expresa en dBi, relativos a la antena de referencia isotrópica.

## Parámetros de antenas en la recepción

### ***Adaptación***

La impedancia de una antena de recepción es la misma que la impedancia de dicha antena cuando actúa en la transmisión.

En la recepción, la antena se conecta a una línea de transmisión o bien directamente a un receptor. Para que haya máxima transferencia de potencia, la impedancia de la antena  $Z_a = R_a + jX_a$  y la impedancia de carga  $Z_L = R_L + jX_L$  deben ser complejas conjugadas  $Z_L = Z_a^*$

### ***Área y longitud efectiva***

El área efectiva es la relación entre la potencia que entrega la antena a su carga (sin pérdidas y adaptada a la carga) y la densidad de potencia de la onda incidente

$$A_{ef} = \frac{P_L}{\rho} \quad (4)$$

La longitud efectiva es la relación entre la tensión inducida en circuito abierto en los bornes de la antena y la intensidad del campo incidente en la onda.

$$l_{ef} = \frac{|V_{Ca}|}{|E|} \quad (5)$$

### **Antena banda ancha**

Las antenas de Banda Ancha fueron desarrolladas después de la Segunda Guerra Mundial debido a la necesidad de hacer más pequeñas las antenas que se instalaban en vehículos, barcos y aeronaves, además de permitir las comunicaciones en varias frecuencias, aumentando así la seguridad en las comunicaciones, aumentó las capacidades en operaciones de radionavegación, y otras aplicaciones militares en primer lugar.

Las Antenas de Banda Ancha son consideradas como antenas que mantienen algunos de sus parámetros como la dirección del haz principal, la impedancia, la directividad y otras con variaciones relativamente pequeñas en relación con la frecuencia grande, es decir, las antenas no varían con respecto a la frecuencia. (Cardama Aznar, 2002)

Los criterios para determinar a las antenas ultra banda ancha (UWB) fueron determinadas por DARPA en 1990 fueron en primer lugar el ancho de banda fraccional mayor a 0,25 y la FCC determinó que debe ser mayor a 0,20 como se determina en la siguiente ecuación:

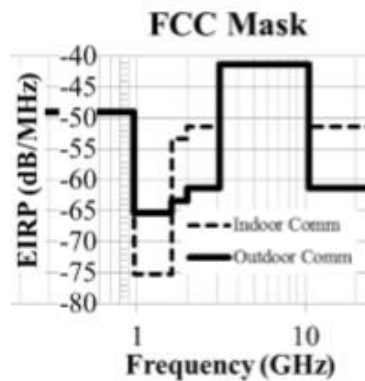
$$bw = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \geq \begin{cases} 0.25 \text{ DARPA} \\ 0.2 \text{ FCC} \end{cases} \quad (6)$$

donde  $bw$  es el ancho de banda,  $f_H$  es más grande, más alta o el final de la banda operacional de la antena, y  $f_L$  es la más baja, pequeña o el fin de la banda operacional de la Antena.

Otro criterio dado por la FCC es cualquier antena con un ancho de banda mayor a 500 MHz. Además, se determina que los límites inicial y final de la banda operacional de la antena está definida por la potencia radiada bajo -10 dB de su nivel pico.

#### Figura 4.

*Máscara espectral para 3.1 – 10.6 GHz para comunicaciones UWB.*



*Nota.* El gráfico muestra la máscara espectral para Comunicaciones Ultra-Wide band Communications para escenarios puerta adentro y puerta afuera. Tomado del *Libro El Art y Ciencia de UWB Antenas*, pág 12. (Schantz, 2015).

#### Antena Vivaldi

En 1979, Gibson propuso una antena de ranura cónica también conocida como Antena Vivaldi. La antena Vivaldi funciona con característica Endfire, además permite una

mejora en la antena debido a su gran ancho de banda. La forma que tiene la antena Vivaldi sigue la siguiente ecuación:

$$y = \pm Ae^{Px} \quad (7)$$

donde  $y$  es la distancia de separación media,  $x$  es el parámetro de longitud y  $P$  es el factor que determina el ancho de banda.

La forma exponencial permita que se cubra el rango de frecuencia de microondas entre 2 GHz y 20 GHz.

En funcionamiento, la antena irradia preferentemente desde el extremo abierto de la muesca en una dirección alejada de la muesca y a lo largo del eje de simetría. Por lo tanto, la antena puede clasificarse como una antena Endfire (Fisher, 2006).

Las antenas Aéreas Vivaldi han sido utilizadas para comunicaciones por satélite, la teledetección y el radiotelescopio.

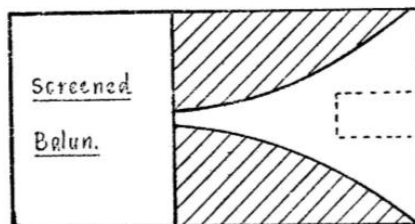
Las ventajas de las antenas de ranura cónica Endfire producen un haz simétrico en el plano E y H, y se puede modificar el ancho de este haz al variar su forma, longitud, espesor dieléctrico y constante dieléctrica de la antena de ranura cónica (Wu, 2006).

Las antenas de ranura cónica convencionales son construidas con técnicas convencionales, esta es con el uso de la película delgada litográfica de microondas en el sustrato con alta constante dieléctrica como es la alúmina (EE.UU Patente nº US 7,088,300 B2, 2006).

Las antenas Vivaldi originales eran antenas de muesca cónica con muescas que se abrían en forma de destello exponencial, como se puede observar en la figura 5.

### Figura 5.

*Forma general de la antena Vivaldi*



*Nota.* El gráfico muestra la forma general de la antena Vivaldi con su balun. Tomado de "The Vivaldi Aerial", (Gibson, 1979).

La alimentación de la Antena Vivaldi se la realiza con líneas de transmisión, entre la más usada es líneas de microcinta o *microstrip*.

### Figura 6.

*Módulo receptor de video de 8-40 GHz*

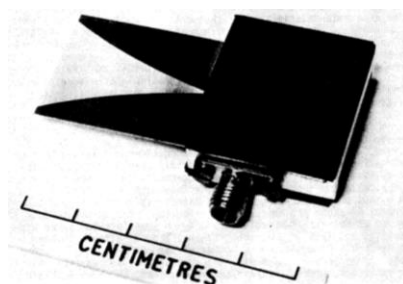


Fig. 7 8 GHz to 40 GHz Video Receiver Module  
(Incorporating Vivaldi Aerial and integrated  
broadband detector circuit)

*Nota.* Gráfico del módulo Receptor de video de 8-40 GHz, para la Antena Vivaldi Aérea integrada a un circuito detector de banda ancha. Tomado de "The Vivaldi Aerial", (Gibson, 1979).

El ancho de banda de la antena Vivaldi varía de acuerdo con su aplicación, encontrándose entre las bandas VHF y UHF de acuerdo con la tabla 1.

**Tabla 1.**

*Bandas de frecuencia según la ITU.*

<b>Nombre</b>	Abreviatura	Banda ITU	Frecuencia
<b>Muy Alta Frecuencia</b>	VHF	8	30-300 MHz
<b>Ultra Alta Frecuencia</b>	UHF	9	300-3000 MHz

*Nota.* Esta tabla muestra las bandas de frecuencias según la Unión Internacional de Telecomunicaciones de acuerdo con los requerimientos para el diseño de la antena Vivaldi. Tomado de *la Unión Internacional de Telecomunicaciones* (ITU, 2019).

### **Sustrato**

Según (Yngvesson, 1989) existe características con valores definidos para determinar el grosor del sustrato y que este funcione adecuadamente con la antena Vivaldi.

Debido a la poca disponibilidad de sustratos y de acuerdo con sus costos de fabricación, se utilizó en la simulación de la Antena Vivaldi el sustrato conocido como FR4, el cual tiene las siguientes propiedades:

### **Microstrip - slotline**

La microcinta tiene el funcionamiento como una línea de transmisión para acoplar determinados elementos, en la antena Vivaldi tiene que permitir el acoplamiento a  $50 \Omega$ .

La siguiente figura muestra los componentes de una línea microstrip y sus especificaciones técnicas (medidas), para un correcto uso de acuerdo con las necesidades requeridas.

**Tabla 2.**

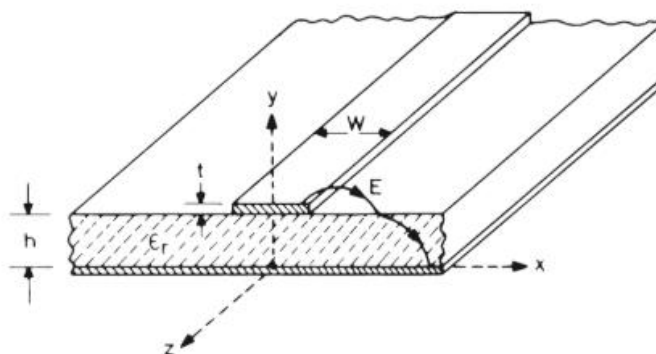
*Características del sustrato de FR4.*

Característica	Valor
<b>Grosor</b>	1.524 [mm]
<b>Permitividad Relativa</b>	4.4
<b>Tangente de Pérdidas</b>	0.2

*Nota.* Esta tabla muestra las características del sustrato FR4 que se utilizará en el diseño de la antena Vivaldi. Tomado de *"The tapered slot antenna-a new integrated element for millimeter-wave applications"*. (Yngvesson, 1989).

**Figura 7.**

*Composición microstrip*



*Nota.* El gráfico muestra la composición y las características de un microstrip orientada en el sistema de coordenadas XYZ. Tomado de *"The Microstrip lines and slotlines"*, (Garg, 2013).

Para el cálculo del ancho del microstrip se utilizó el software *EEWEB Microstrip Impedance Calculator*, *Easy Calculation Microstrip Line Calculator* y *Pasternak Microstrip Calculator*, teniendo en cuenta en la siguiente tabla las variables utilizadas



**Tabla 3.***Cálculos del microstrip.*

<b>Característica</b>	<b>EEWEB Impedance Calculator</b>	<b>Easy Calculation Microstrip Line Calculator</b>	<b>Pasternak Microstrip Calculator</b>
<b>Altura del Sustrato (h)</b>	1,524 mm	1.524 mm	1.524 mm
<b>Permitividad Relativa (<math>\epsilon_r</math>)</b>	4,4	4,4	4,4
<b>Ancho de la Cinta (t)</b>	0,001 $\mu\text{m}$	-----	-----
<b>Impedancia de Salida Salida (<math>Z_0</math>)</b>	50 $\Omega$	50 $\Omega$	50 $\Omega$
<b>W obtenido</b>	2,937	2,91	2,922

*Nota.* Esta tabla del cálculo obtenido de  $W$ , a través de software online, para obtener una línea de transmisión de 50  $\Omega$ . Tomado de: <https://www.eeweb.com/tools/microstrip-impedance>, <https://www.easycalculation.com/engineering/electrical/microstrip-pcb-impedance.php>, y <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip.aspx>.

Por lo que, al realizar el promedio de  $W$ , da un resultado de 2,923 mm para las simulaciones.

Además, se comprobó los datos obtenidos utilizando la siguiente fórmula (Pozar, 2005).

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{2e^A}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \left\{ \begin{array}{l} \text{para } \frac{W}{h} < 2 \\ \text{para } \frac{W}{h} > 2 \end{array} \right. \end{cases} \quad (8)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (9)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

Suponiendo que  $\frac{W}{h} < 2$  y reemplazando las variables por los valores mostrados en la tabla 3, se obtuvo  $A = 3,0125$ ,  $B = 1,785521$  y  $\frac{W}{h_0} = -0,12962$ , con lo cual demostró que la suposición realizada era correcta. Así se encontró  $W = 2,922$  mm.

## Software

Para el diseño, análisis, simulación y optimización de las Antenas Vivaldi se utilizará el software de simulación ANSYS HFSS.

### ANSYS HFSS

El software de simulación electromagnética 3D, ANSYS *High Frequency Structure Simulator* (HFSS), es utilizado para diseñar y simular productos electrónicos de altas frecuencias, es decir antenas, conjunto de antenas, componentes de microondas y RF, filtros, entre otros.

#### Figura 8.

*Logotipo ANSYS HFSS*



*Nota.* Logo del Software de Simulación ANSYS HFSS. Tomado de *la página oficial de ANSYS HFSS*, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (ANSYS, 2020).

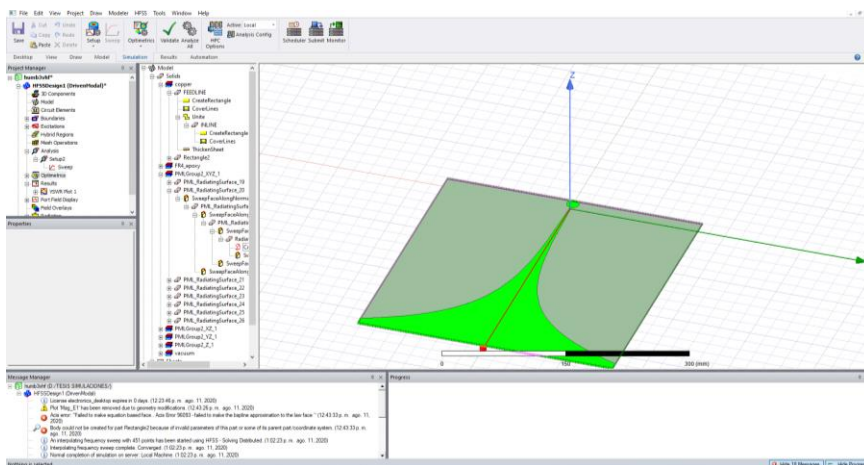
Estas simulaciones son usadas para diseñar y verificar el funcionamiento de sistemas de comunicaciones, sistemas de radares y otros productos de RF de alta velocidad.

HFSS utiliza herramientas de altos estándares en precisión y confiabilidad para modelar estructuras electromagnéticas 3D y esto se debe a su mallado adaptativo y un conjunto de solucionadores que mejoran y se aceleran con tecnología computacional de alto rendimiento, además el software le permite al usuario solucionar problemas en las simulaciones con una interfaz muy amigable.

La simulación y la optimización de la antena Vivaldi será realizada en el software ANSYS HFSS, el mismo que utiliza las tecnologías de resolución basadas en elementos finitos (FEM), cuenta con métodos híbridos avanzados y ecuaciones diferenciales. Se puede observar en la figura 9 la interfaz gráfica de usuario intuitiva del software de simulación HFSS, la misma que permite un óptimo aprovechamiento de todas las herramientas que este posee.

**Figura 9.**

*Interfaz gráfica software HFSS*



*Nota.* Interfaz gráfica del del Software de Simulación ANSYS HFSS. Tomado de *la simulación de la Antena Vivaldi en el software ANSYS HFSS*, (ANSYS, 2020)

## Capítulo III

### Simulaciones y optimización

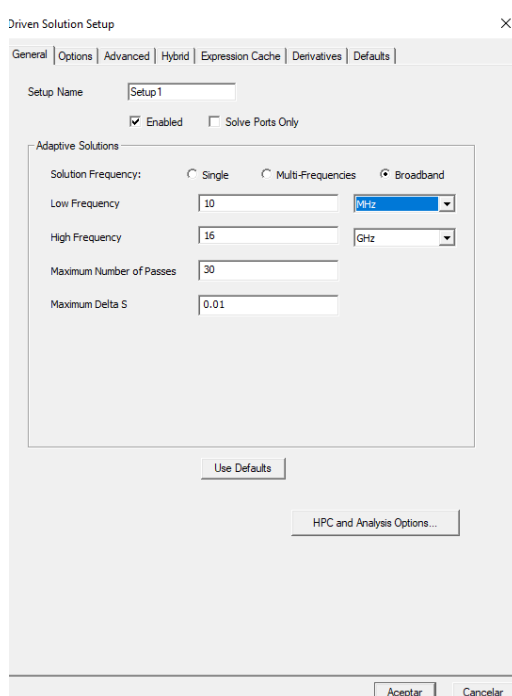
#### Introducción

Las antenas Vivaldi para el rango de Frecuencias de VHF y UHF se diseñaron, simularon y se optimizaron en el software ANSYS HFSS 2019.

Los parámetros de la configuración fueron: frecuencia de solución en banda ancha, con una frecuencia mínima de 10 MHz y una frecuencia alta de 16 GHz, máximo número de pasos de 30, y un máximo delta  $S$  del 1%, en la opción General.

#### Figura 10.

*Configuración en el simulador HFSS*

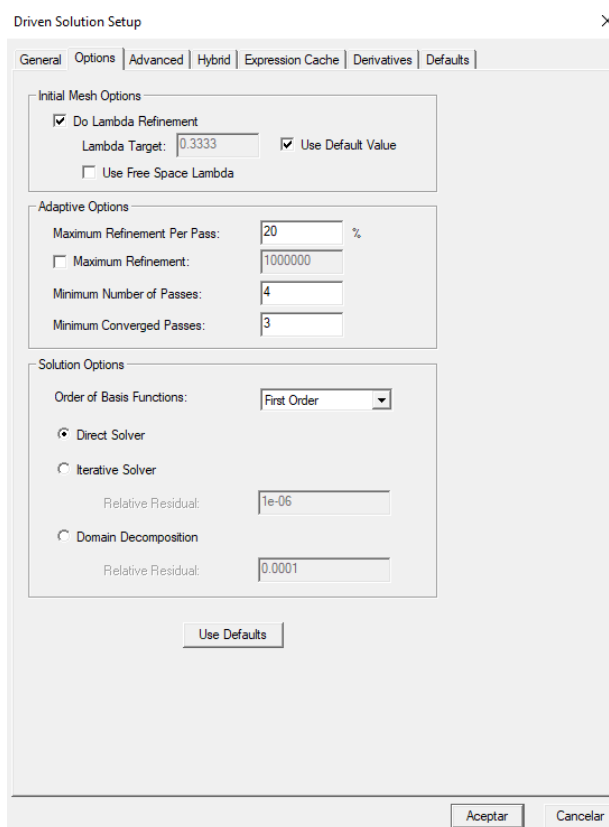


*Nota.* El gráfico muestra las opciones generales para la Configuración de la simulación en HFSS, en la cual se indica el Ancho de Banda que es necesario para los objetivos de la investigación.

Luego en Opciones se procede a determinar que se realice el refinamiento de lambda, en opciones adaptativas con un máximo refinamiento por pasos del 20%, mínimo número de pasos de 4 y mínimo pasos de convergencia de 3.

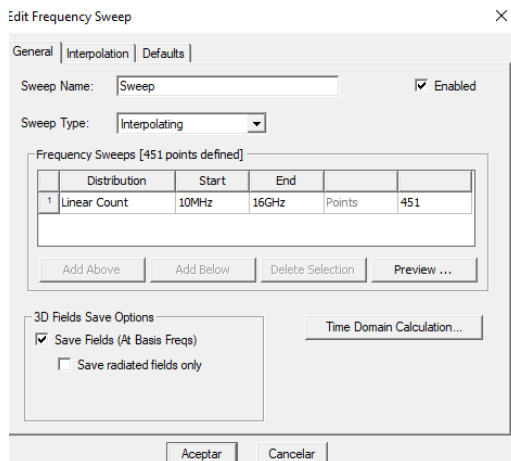
**Figura 11.**

*Opciones de dirección de la configuración en HFSS*



*Nota.* El gráfico muestra las opciones de dirección de la Configuración de la simulación en HFSS, en la cual se indica las opciones adaptativas que brindan la fiabilidad de la simulación y de los datos a obtenerse.

Y al configurar los barridos de frecuencia para la simulación en la opción general se debe detallar la frecuencia de inicio 10 MHz, la frecuencia final 16 GHz, 451 puntos y activar la opción de guardar los campos, además en el tipo de barrido se debe escoger la opción interpolación.

**Figura 12.***Opciones de barrido de frecuencia en HFSS*

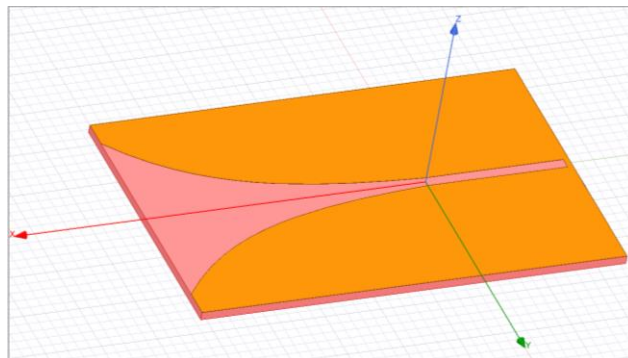
*Nota.* El gráfico muestra las opciones de barrido de frecuencia de la simulación en HFSS, en la cual se indica la frecuencia de inicio, la frecuencia final, el ancho de banda, el tipo de barrido y los puntos para la interpolación.

Se empleó como frontera de radiación a caja de aire localizada a  $\lambda/2$  equidistante con la antena Vivaldi.

**Diseño de la antena Vivaldi**

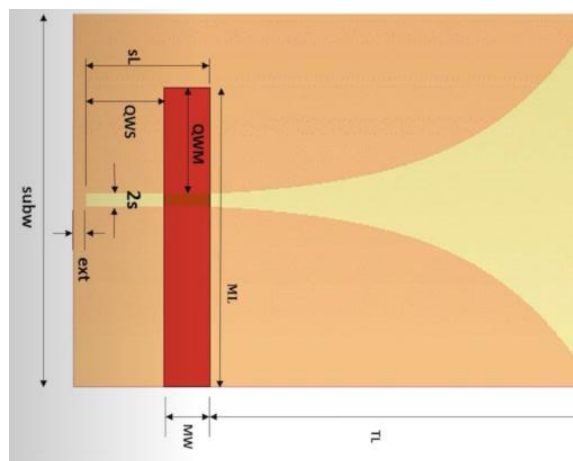
Una vez finalizado el diseño de la geometría de la antena Vivaldi se procede a realizar su simulación en el software ANSYS HFSS para analizar su desempeño.

La antena Vivaldi tiene una sola capa, esta capa es la superior y es de cobre con un espesor de 0,035 mm. En la capa inferior se encuentra la microstrip en forma de “L” con un ancho de 2,922 mm, utilizada como línea de transmisión a 50  $\Omega$ . La longitud y la anchura de la antena Vivaldi de este diseño son de 49 mm x 68 mm.

**Figura 13.***Antena Vivaldi en HFSS*

*Nota.* El gráfico muestra la antena Vivaldi clásica simulada en HFSS, la cuál es la base de inicio de la investigación, dentro del eje de coordenadas “XYZ”.

Los parámetros utilizados en el diseño de la Antena Vivaldi Clásica se presentan en la figura 14, donde se observan sus nombres e identificación dentro de la Antena Vivaldi.

**Figura 14.***Medidas de la antena Vivaldi clásica*

*Nota.* El gráfico muestra la Antena Vivaldi clásica y todas sus variables con sus respectivos nombres para el diseño antes de la simulación en HFSS. Tomado de *la* <https://www.youtube.com/watch?v=1QLuP3zLUfl>. (Headley, 2019)

donde:

TL= (Tapering Length, según sus siglas en inglés), es la longitud cónica y esta debe ser  $\frac{\lambda}{2}$ .

ML= (Microstrip Length), es la longitud de la microcinta, para el Proyecto se considera como Inline (20,46 mm x 2,922 mm) y Feedline (20,46 mm x 2,922 mm).

MW= (Microstrip Width), el ancho de la microcinta es lo que determina las frecuencias que puede propagar y está casada para 50  $\Omega$ .

QWM= (Quarter Wavelength of Microstrip), es un cuarto de la longitud de onda de la microcinta, es decir  $\frac{\lambda}{4}$ .

sL= (Slot length), la longitud de la ranura es un valor que se debe ajustar y se empieza con  $\frac{\lambda}{2}$ .

QWS= (Quarter Wavelength of Slot), es un cuarto de la longitud de onda de la ranura y debe ser sintonizada, se empieza en  $\frac{\lambda}{4}$ .

2s= (Slot width), Ancho de la ranura, debe ser aproximadamente de 1 mm, se debe probar diferentes anchos para ver qué tipo de resultado se obtiene.

Ext= (Extension length) La longitud de la extensión desde la ranura hacia el borde posterior del cobre, su extensión será aproximadamente de 1 mm.



**Tabla 4.***Parámetros de la antena Vivaldi clásica*

<b>Medida</b>	<b>Valor [mm]</b>
<b>TL</b>	49
<b>MW</b>	2,9
<b>sL</b>	18
<b>Ext</b>	1
<b>s</b>	1
<b>ML</b>	20,46
<b>Subw</b>	49
<b>QWM</b>	25
<b>Rudgen</b>	5
<b>Lamb inf</b>	100
<b>Aqy</b>	10
<b>Bqy</b>	10
<b>cThickness</b>	0,035
<b>SubT</b>	1.5

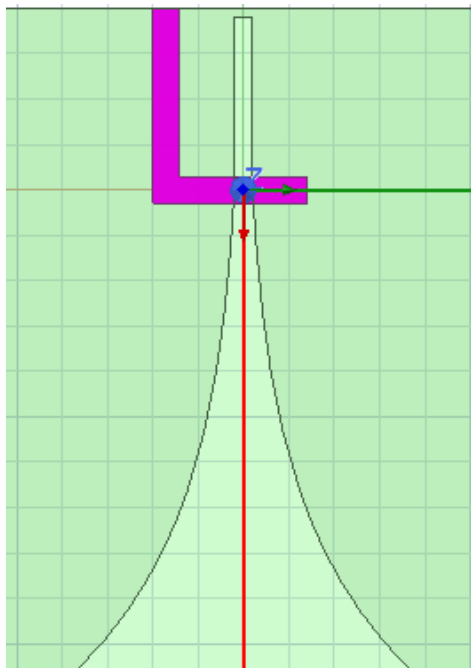
*Nota.* Esta tabla determina todos los parámetros, variables y medidas iniciales involucrados en el diseño de la Antena Vivaldi.

### **Simulación y optimización inicial de las topologías propuestas**

Empleando la topología antes descrita se procede a simular en el software ANSYS HFSS la antena Vivaldi con el fin de obtener los parámetros de desempeño requeridos.

### Figura 15.

*Simulación de la antena Vivaldi clásica*



*Nota.* El gráfico muestra la simulación de la Antena Vivaldi Clásica y se muestra además la parte posterior con el diseño de la microstrip en color morado, calculada para  $50 \Omega$ . Tomado de *la simulación en el Software HFSS*. (Autor)

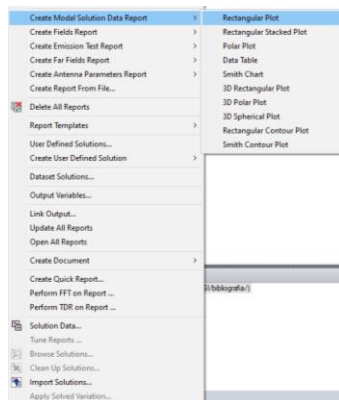
En la figura 15 se puede visualizar las dos caras de la antena Vivaldi, la cara anterior esta de color verde, mientras que la cara posterior está materializada por color morado, que viene representada por la microcinta a  $50 \Omega$ .

Para poder analizar esta simulación se crea un reporte de solución de datos con la opción de gráfico rectangular.

Luego se procede a seleccionar la categoría en VSWR, en función se selecciona dB, en el dominio se selecciona Barrido, en barrido primario se selecciona frecuencia, en la opción de familias se selecciona todas las frecuencias, y seleccionamos nuevo reporte.

**Figura 16.**

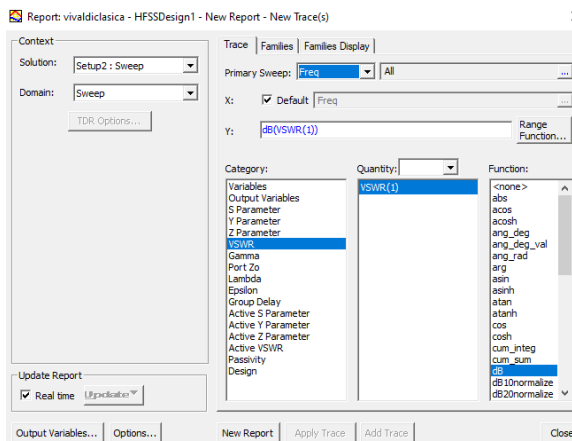
*Creación de reportes*



*Nota.* El gráfico muestra los pasos para la creación de Reportes de Datos de la solución en el programa de simulación ANSYS HFSS, después de haber realizado la correcta simulación.

**Figura 17.**

*Opciones y selección de reportes*

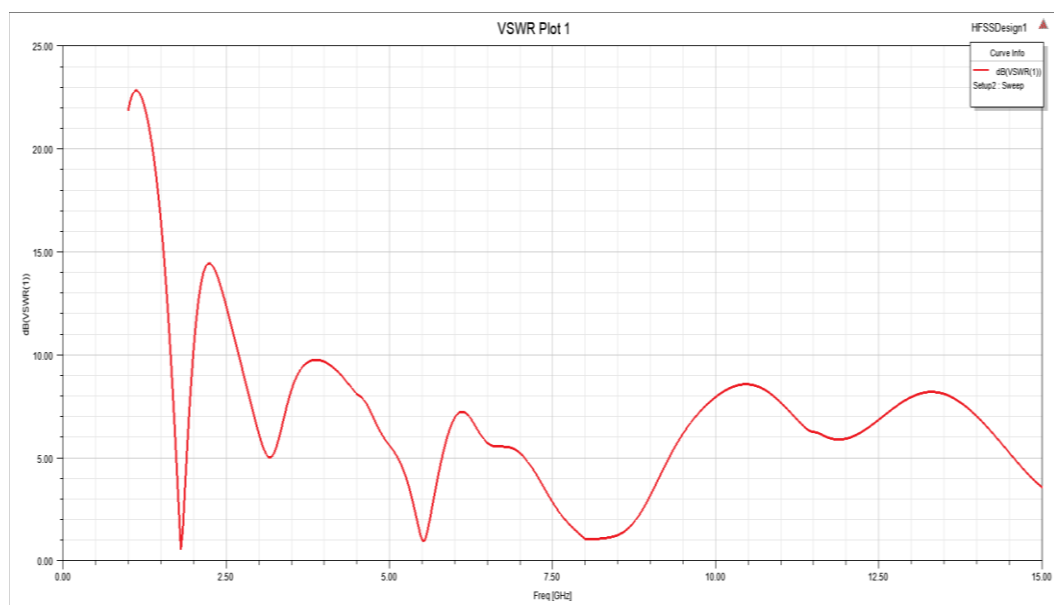


*Nota.* Opciones para generar un nuevo reporte. La función en la que se desea el reporte y las familias de frecuencias, o variables del proyecto que estarán involucradas, además permite escoger la opción de barrido, obteniéndose de esta manera los reportes deseados por el usuario de acuerdo con los requerimientos del proyecto de investigación.

Como resultado se obtiene el siguiente gráfico, en el mismo que se verifica el VSWR en dB en relación con las frecuencias, y se observa los parámetros analizados que estén dentro de los lineamientos esperados en el diseño de la Antena Vivaldi.

**Figura 18.**

*Reporte VSWR vs. Frecuencia de la simulación*



*Nota.* Simulación inicial de la antena Vivaldi clásica, en la cual está representada la Frecuencia GHz y el VSWR, como punto de partida de la presente investigación. Todo valor debe encontrarse debajo de 2 caso contrario debe ser mejorado.

Luego del resultado obtenido se puede verificar los resultados en indicar el rango de frecuencias de la Vivaldi Clásica en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

*Resultados Iniciales de la simulación de la antena Vivaldi clásica*

<b>Frecuencia [GHz]</b>	<b>VSWR [dB]</b>
<b>1</b>	20
<b>2</b>	0,8
<b>3</b>	5
<b>4</b>	10
<b>5</b>	6
<b>6</b>	2
<b>7</b>	5
<b>8</b>	1,2
<b>9</b>	10
<b>10</b>	5
<b>11</b>	8
<b>12</b>	8,5
<b>13</b>	7
<b>14</b>	6
<b>15</b>	4
<b>16</b>	3

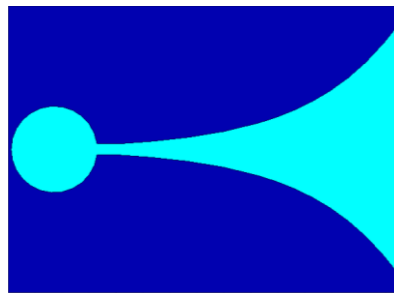
*Nota.* Esta tabla determina todos los valores obtenidos en la simulación inicial de la Antena Vivaldi, y los valores menores de 2 dB son óptimos, y estos se encuentran en las frecuencias de 2, 6 y 8 GHz.

### **Optimización de la antena Vivaldi**

Al modificar los diferentes parámetros geométricos para satisfacer con valores de VSWR menor a 2dB, se procedió a optimizarla y para eso se diseñó una circunferencia adicional al diseño de la Antena Vivaldi Clásica, la misma que tendrá un radio de 8mm.

#### **Figura 19.**

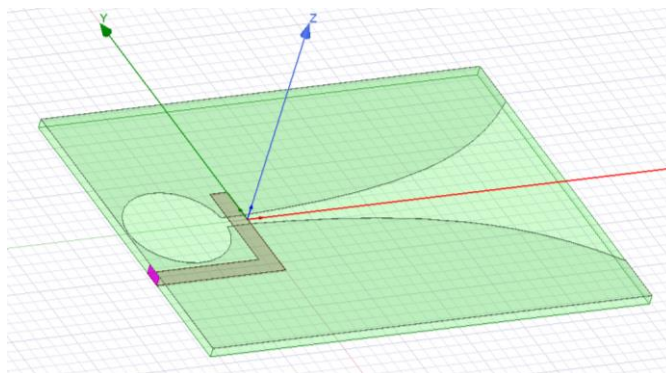
*Antena Vivaldi Optimizada*



*Nota.* El gráfico muestra la modificación de la antena Vivaldi clásica, con una circunferencia en su diseño lo que permite mejorar el ancho de banda de la antena.

#### **Figura 20.**

*Antena Vivaldi optimizada completa*



*Nota.* El gráfico muestra la modificación de la antena Vivaldi clásica, con su microstrip como línea de transmisión, mostrando en 3D a la antena Vivaldi optimizada.

**Tabla 6.***Parámetros de la antena Vivaldi optimizada*

<b>Medida</b>	Valor [mm]
<b>TL</b>	49
<b>MW</b>	2,9
<b>sL</b>	18
<b>Ext</b>	1
<b>S</b>	1
<b>ML</b>	20,46
<b>Subw</b>	49
<b>QWM</b>	25
<b>Rudgen</b>	5
<b>Lamb inf</b>	100
<b>Aqy</b>	10
<b>Bqy</b>	10
<b>cThickness</b>	0,035
<b>SubT</b>	1,5
<b>Radio</b>	8

*Nota.* Esta tabla determina todos los parámetros, variables y medidas iniciales involucrados en el diseño de la antena Vivaldi optimizada.

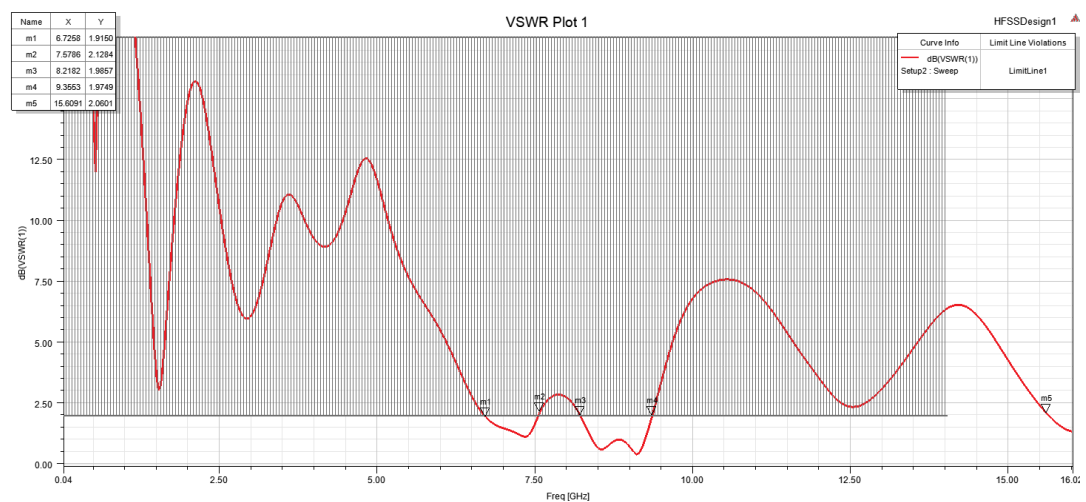
En la figura 19 se puede visualizar la parte delantera de la antena Vivaldi Optimizada, mientras que en la figura 20 se visualiza toda la Antena Vivaldi Optimizada tanto en la parte posterior como anterior.

Para poder analizar esta simulación se crea un reporte de solución de datos con la opción de gráfico rectangular, luego se procede a seleccionar la categoría en VSWR, en función se selecciona dB, en el dominio se selecciona Barrido, en barrido primario se selecciona frecuencia, en la opción de familias se selecciona todas las frecuencias, y se selecciona nuevo reporte.

Como resultado se obtiene el siguiente gráfico, en el mismo que se verifica el VSWR en dB en relación con las frecuencias, y se observa los parámetros analizados que estén dentro de los lineamientos esperados en el diseño de la Antena Vivaldi Optimizada.

**Figura 21.**

*Resultados de la simulación de la antena Vivaldi optimizada*



*Nota.* El gráfico muestra el reporte Frecuencia – VSWR de la simulación de la Antena Vivaldi optimizada, como punto de partida para el posterior análisis, mejoramiento y optimización de acuerdo con los objetivos de este proyecto de investigación.



Luego del resultado obtenido se puede identificar los resultados y con esto determinar el rango de frecuencias de la Vivaldi Optimizada en la Tabla 7.

**Tabla 7.**

*Resultados de la simulación de la antena Vivaldi optimizada*

<b>Rango de Frecuencia [GHz]</b>	<b>VSWR [dB]</b>
<b>6,7 – 7,6</b>	$\leq 2$
<b>8,2 – 9,3</b>	$\leq 2$
<b>15,6 – 16</b>	$\leq 2$

*Nota.* Esta tabla determina el ancho de banda y las frecuencias de operación de la Antena Vivaldi simulada.

Como se puede verificar en la tabla 7 muestra los primeros resultados de los rangos de frecuencia válidos.

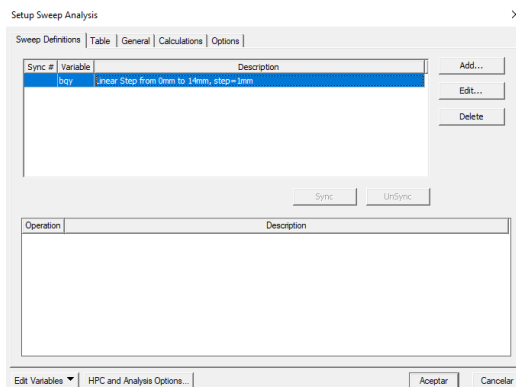
### ***Variación de la longitud de la microcinta (Inline)***

El programa de simulación ANSYS HFSS permite realizar el estudio de la variación de uno o varios parámetros considerados como variables en el proyecto.

Para eso se configura la Opción “Optimetrics” en la cual se ingresa la variable para modificar el tamaño de la microcinta en la parte superior de la configuración del barrido:

**Figura 22.**

*Configuración del análisis del barrido de frecuencias*

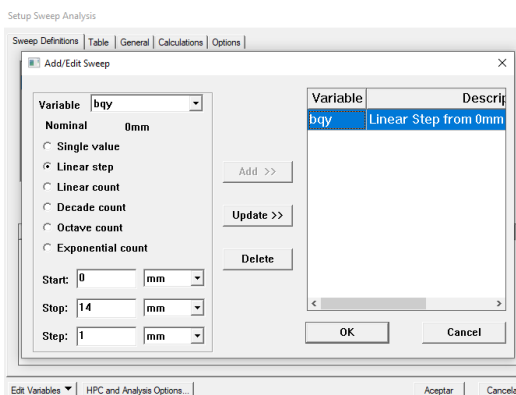


*Nota.* El gráfico muestra la configuración del Análisis del Barrido en el cual se determina la variable y los indicadores que se ejecutaran con la opción Optométricos del ANSYS HFSS.

Luego se procede a agregar el barrido, seleccionando la variable deseada, como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 23.**

*Selección de la variable y su configuración para el Barrido*

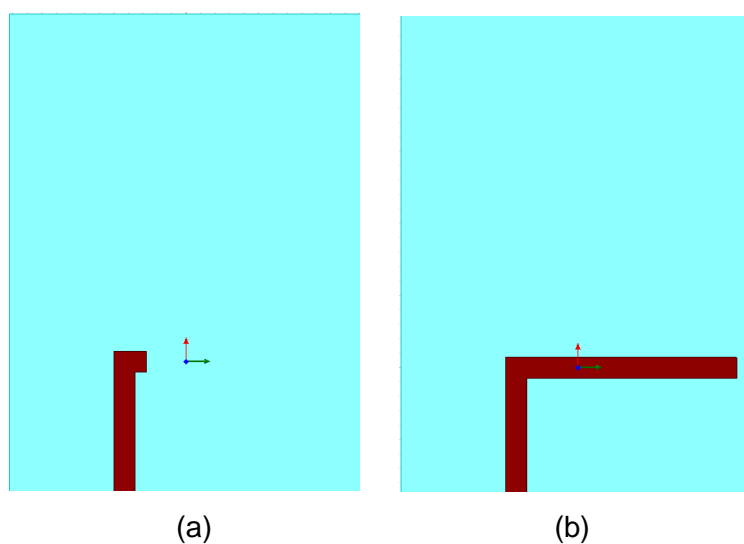


*Nota.* El gráfico muestra la selección de la variable, la forma de conteo, el inicio, el final y los pasos para que se ejecute el barrido en la opción Optométricos del Análisis del software ANSYS HFSS.

Después de seleccionar el análisis de la variable y sus variaciones, se verifica que varía las dimensiones del Inline perteneciente a la microcinta como se visualiza en las siguientes figuras.

**Figura 24.**

*Variación de la longitud de la microstrip*

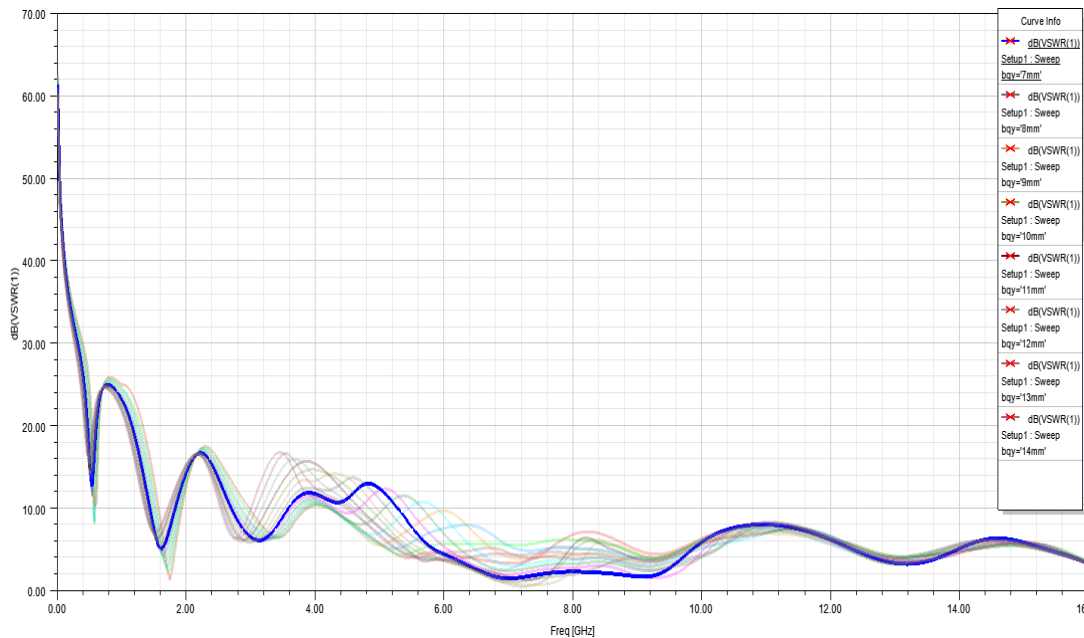


*Nota.* El gráfico muestra la variación de la longitud de la microcinta que cumple la función de línea de transmisión a  $50 \Omega$ , para determinar el resultado óptimo para la simulación de acuerdo con los requerimientos del proyecto.

Cuando se verifica los resultados para obtener la mejor solución, se determina que los valores óptimos son los de la séptima opción que está representada en la figura 25 con la línea azul.

**Figura 25.**

*Resultado de la simulación del microstrip*



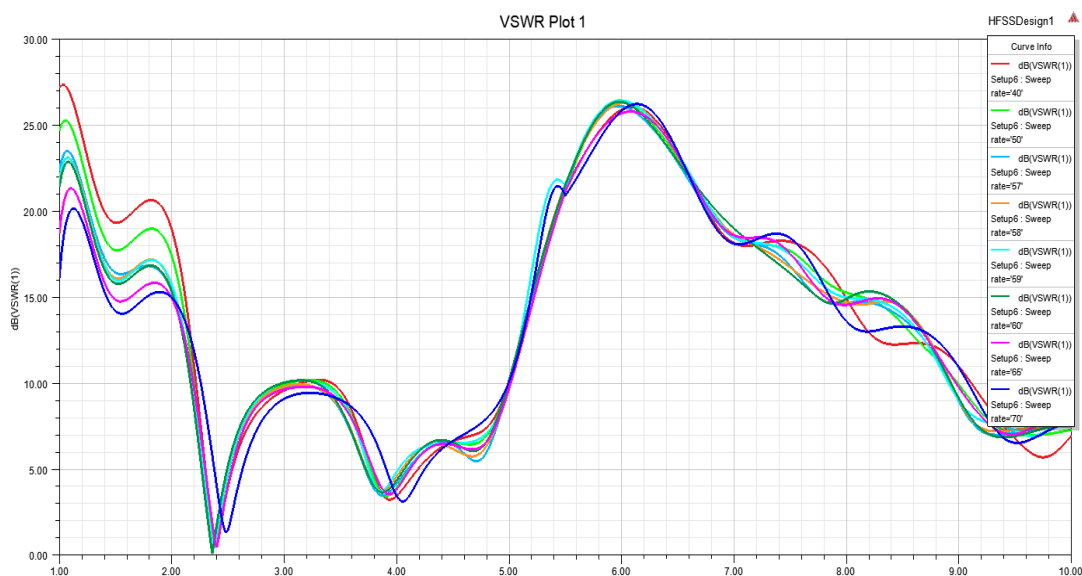
*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución de la simulación de la Antena Vivaldi, analizando la variación de la microstrip y permitiendo identificar la opción más viable con el ancho de banda más grande.

### ***Variación de la longitud cónica (rate)***

Al realizar las simulaciones con los valores de las variables obtenidos, se modifica la variación de la opción "Optimetrics" con la variable Rate desde 30 a 90 en pasos de 1, obteniendo los siguientes resultados en la simulación.

**Figura 26.**

*Simulación de variación del Rate*



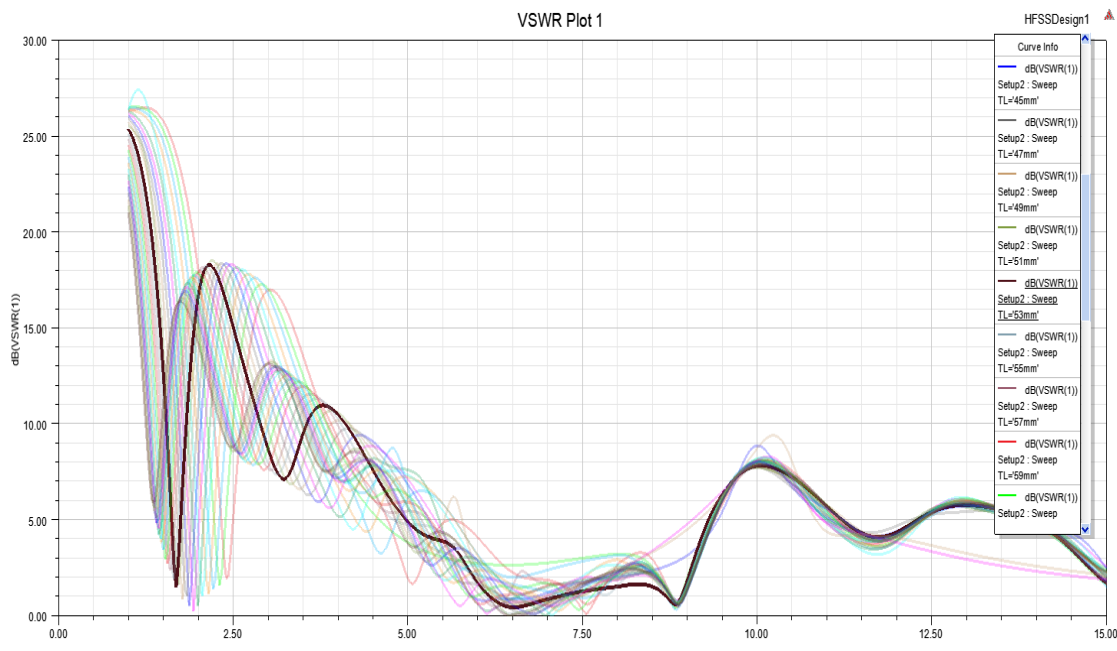
*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución de la simulación de la Antena Vivaldi, analizando la variación de la longitud cónica y permitiendo identificar la opción más viable con el ancho de banda más grande, utilizando la opción Optimétricos.

### ***Variación de la longitud de la antena Vivaldi (TL)***

Al realizar las simulaciones con los valores de las variables obtenidos, se modifica la variación de la opción “Optimetrics” con la variable TL desde 30 a 90 en pasos de 1, obteniendo los siguientes resultados en la simulación.

**Figura 27.**

*Simulación de variación de la longitud de la antena*



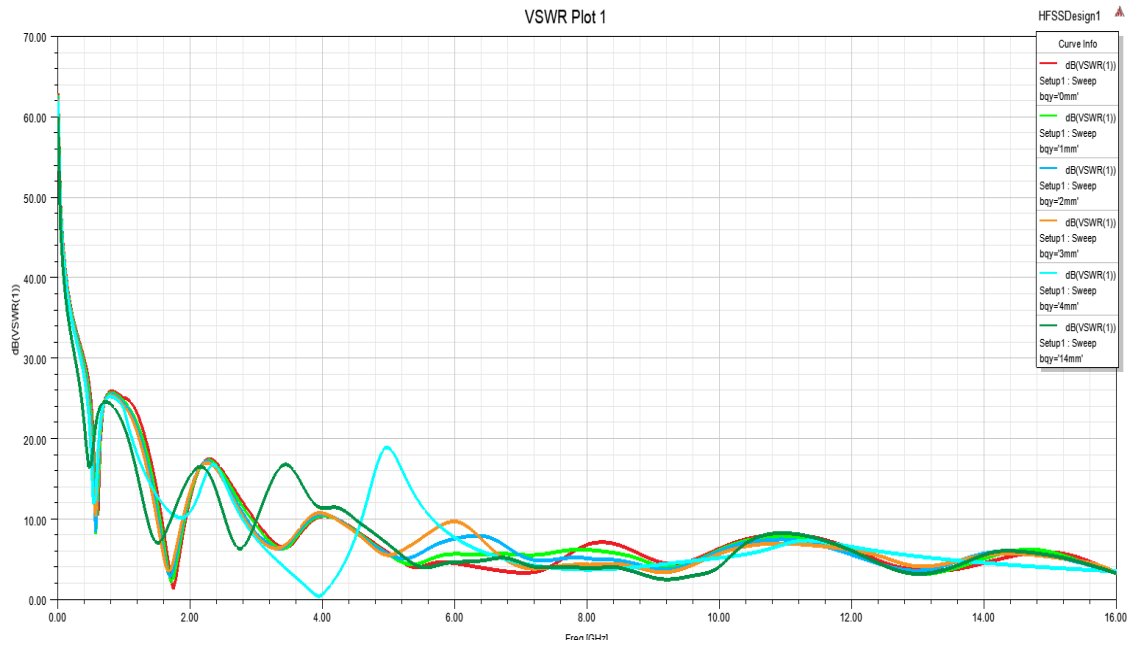
*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución de la simulación de la Antena Vivaldi, analizando la variación de la longitud de la Antena (Variable TL) y permitiendo identificar la opción más viable con el ancho de banda más grande, utilizando la opción Optimétricos.

### **Variación del parámetro radio**

Al realizar las simulaciones con los valores de las variables obtenidos, se modifica la variación de la opción "Optimetrics" con la variable radio desde 1 a 10 mm en pasos de 1 mm, obteniendo los siguientes resultados en la simulación.

**Figura 28.**

*Simulación de variación del Radio*



*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución de la simulación de la Antena Vivaldi, analizando la variación del radio de la circunferencia de la Antena (Variable Radio) y permitiendo identificar la opción más viable con el ancho de banda más grande, utilizando la opción Optimétricos.

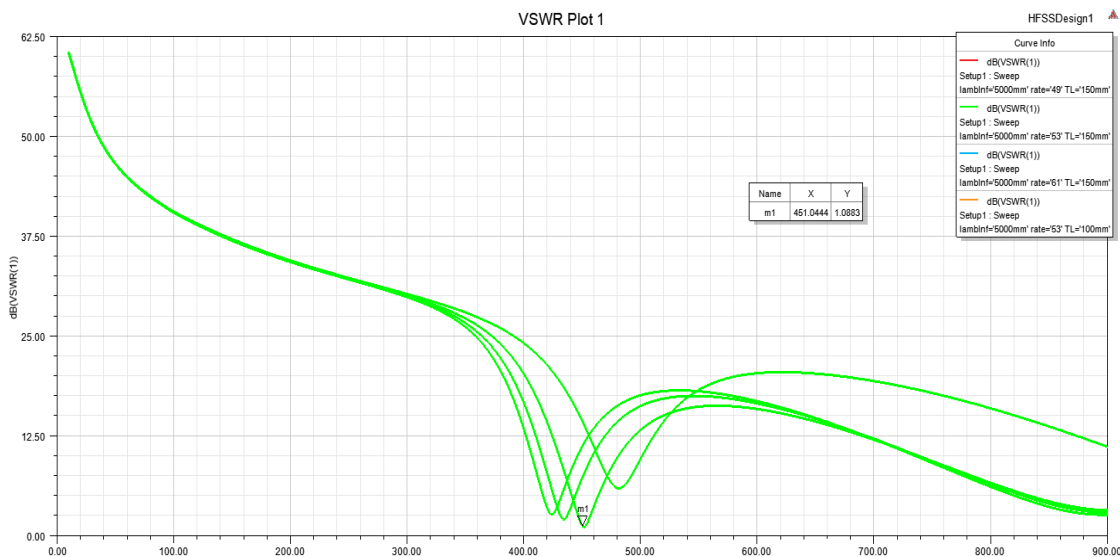
## Capítulo IV

### Análisis de resultados

Debido al gran ancho de banda y al tiempo de procesamiento computacional en las simulaciones se dividió en dos rangos las simulaciones una de 10 MHz a 1 GHz y la segunda de 1 GHz a 16 GHz. En el primer escenario se realizó un análisis para determinar la mejor respuesta para el rango de frecuencia de 10 MHz a 1 GHz que incluye la banda de frecuencia VHF, de los resultados obtenidos se puede verificar que se tiene los datos necesarios para obtener una antena que cubre solo los 451 MHz.

**Figura 29.**

*Simulación para el rango de VHF*



*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución de la simulación de la Antena Vivaldi, con un barrido en la cual está las frecuencias de VHF y determinando su viabilidad, utilizando la opción Optométricos.



De los datos obtenidos se puede identificar los valores de los parámetros de la antena que se resume en la tabla 8.

**Tabla 8.**

*Parámetros de la antena Vivaldi de 10 MHz a 1 GHz*

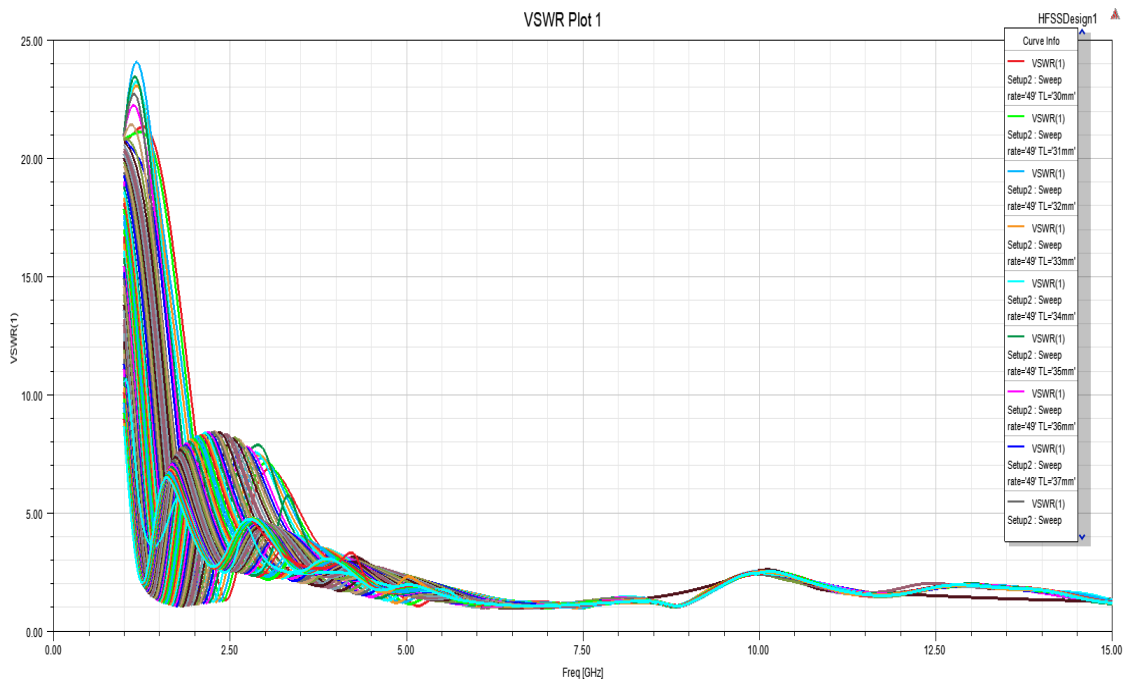
<b>Medida</b>	Valor [mm]
<b>TL</b>	150
<b>MW</b>	2,922
<b>sL</b>	19
<b>ML</b>	20,46
<b>Subw</b>	49
<b>QWM</b>	25
<b>Lamb inf</b>	5000
<b>Radio</b>	8

*Nota.* Esta tabla determina todos los parámetros, variables y medidas finales involucrados en el diseño de la Antena Vivaldi para los rangos de 10 MHz a 1 GHz.

Después de realizar las simulaciones con sus respectivos análisis en las variaciones de los parámetros de diseño de la Antena Vivaldi con el software ANSYS HFSS, se puede determinar los valores deseados de los parámetros y sus resultados se muestran en la figura 30.

**Figura 30.**

*Resultados finales del análisis de la antena Vivaldi*



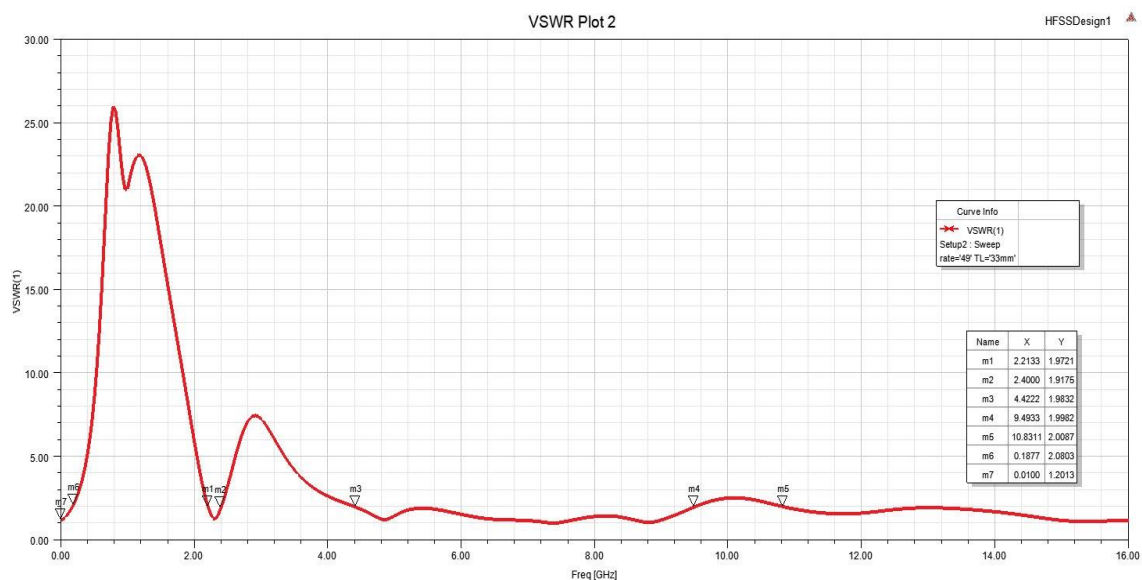
*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución de la simulación de la Antena Vivaldi, con un barrido en la cual están las frecuencias de UHF y determinando su viabilidad, utilizando la opción Optométricos.

De todos estos resultados el mejor resultado analizado es el de color celeste en la figura 30, la misma que se encuentra detallada en la figura 31.

De la simulación se obtuvo los valores óptimos del diseño de la Antena Vivaldi Optimizada, los mismos que se resumen en la tabla 9.

**Figura 31.**

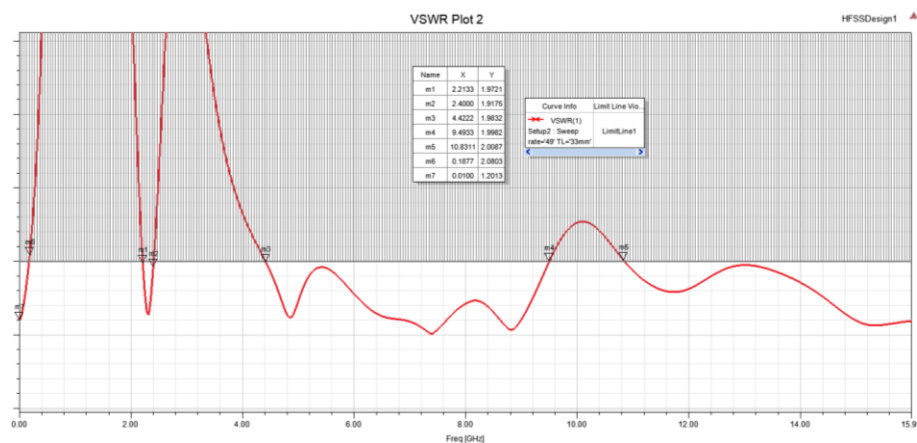
Resultados del análisis de la antena Vivaldi final



*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución de la simulación de la Antena Vivaldi, con un barrido en la cual están las frecuencias de 1 a 16 GHz y muestra la mejor opción de implementación con un ancho de banda mayor a los 9 GHz.

**Figura 32.**

Ancho de banda útil de la antena Vivaldi



*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución de la simulación de la Antena Vivaldi, determinando el ancho de banda de operación de la antena.

De esta manera se verifica el ancho de banda que se encuentre bajo el límite de los 2 en el eje del VSWR.

**Tabla 9.**

*Resultados finales de la simulación de la antena Vivaldi*

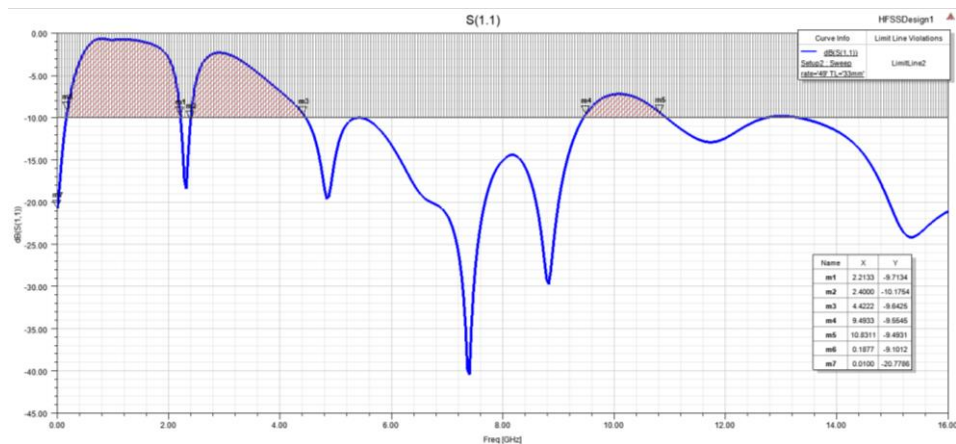
<b>Rango de Frecuencia [GHz]</b>	<b>VSWR [dB]</b>
<b>0,01 – 0,187</b>	$\leq 2$
<b>2,2 – 2,4</b>	$\leq 2$
<b>4,4 – 9,4</b>	$\leq 2$
<b>10,8 – 16</b>	$\leq 2$

*Nota.* Esta tabla determina todos los valores obtenidos de los rangos de frecuencias útiles en la simulación final de la Antena Vivaldi, con un ancho de banda aproximado de 10,4 GHz.

Como se puede verificar en la tabla 9 se obtiene con esta antena un ancho de banda de aproximadamente 10,4 GHz, cubriendo rangos de frecuencias de 10 MHz a 187 MHz que cubre una parte de las frecuencias en VHF y de 2,2 a 2,4 GHz, de 4,4 a 9,4 GHz y de 10,8 a 16 GHz, los mismos que cubren una gran parte de las frecuencias UHF, cumpliendo con los objetivos de investigación del presente proyecto.

**Figura 33.**

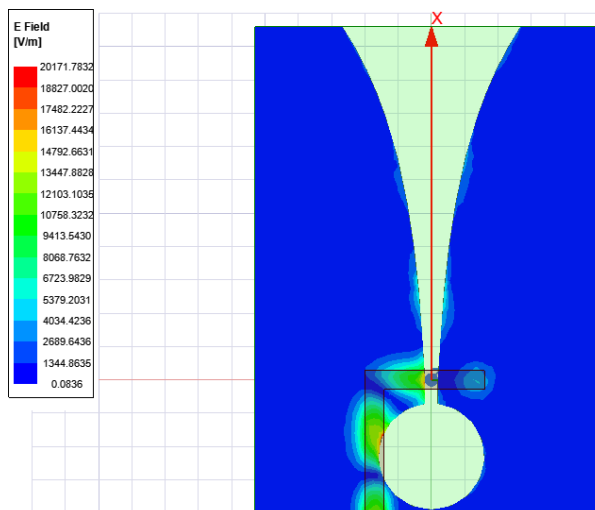
*Gráfico de resultados  $S_{11}$*



*Nota.* El gráfico muestra el reporte del coeficiente  $S_{11}$  de la simulación de la Antena Vivaldi, determinando el ancho de banda de operación imponiendo el criterio de  $\leq -10$  dB.

**Figura 34.**

*Gráfico del campo E*



*Nota.* El gráfico muestra el reporte de la solución del campo E sobre la simulación de la Antena Vivaldi, determinando las medidas de [V/m] pertenecientes al diseño obtenido.

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

Se simuló un elemento irradiador del arreglo de antenas Vivaldi para VHF y UHF. Esta implementación permite cumplir misiones de monitoreo en las frecuencias establecidas por la antena VIVALDI como parte del apoyo a operaciones militares, con especial énfasis en las operaciones de monitoreo y vigilancia.

Se realizó un estudio del estado del arte sobre formas de diseño y optimización de antenas Vivaldi. Todos estos estudios más los desarrollados por el Centro de Investigación de Aplicaciones Militares CICTE, facilitaron el desarrollo y optimización de las antenas Vivaldi con un ancho de banda de 10,4 GHz en conjunto, los mismos que tienen un VSWR menor a 3.

Se estableció que los rangos de frecuencias de operación de la antena vivaldi optimizada se encuentran en: desde los 10 MHz a 187 MHz en la banda de frecuencia VHF y en la frecuencia de 451 MHz, y el rango de frecuencias desde los 2,2 GHz hasta los 2,4 GHz en la banda UHF, además tienen un rango de frecuencias de operación de 4,4 GHz a 9,24 GHz y de 10,82 GHz a 16 GHz.

Se implementó un sistema de parametrización para el diseño y optimización de antenas a través del software de simulación ANSYS HFSS.

Para el sistema de acople la microcinta está definida desde el inicio del proyecto para que funcione como una línea de transmisión a 50  $\Omega$ .

Las dimensiones de la antena Vivaldi son de 75 mm x 35 mm, lo que permite que su tamaño sea de mucha utilidad en los sistemas de Comunicaciones e Inteligencia de Señales del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica de la Fuerza Terrestre.

En base a los resultados obtenidos se observa que el tamaño, el costo de fabricación y la utilidad fueron los parámetros bases para el diseño de las Antenas Vivaldi en las bandas de frecuencias requeridas.

### **Recomendaciones**

En referencia a los sistemas de comunicaciones militares se recomienda que este arreglo de antenas sea utilizado de acuerdo con las características de estos, y sean utilizadas para el monitoreo del espectro dentro del rango establecido.

Se recomienda realizar pruebas de campo de acuerdo con la diversa geografía del Ecuador, para determinar en trabajos futuros los sectores operativos más adecuados de acuerdo con las misiones militares realizadas.

Se recomienda se sigan realizando modificaciones a los diseños parametrizados de simulaciones en el software HFSS con un sistema computacional más robusto, debido a que las simulaciones y las parametrizaciones depende del nivel de procesamiento de las computadoras y entre más alta es esta mucha más simulación al mismo tiempo se pueden realizar y así se optimiza tiempo.

## Referencias

- Ahmad Hatami, A. S. (2020). Phase center controlling in Vivaldi Antenna. *Journal of Computational Electronics*, 14.
- Aleixandre, X. X. (2012). Líneas de Transmisión. *XX Aleixandre, JB Muñoz, MF Atienza, & AP Navarro, Fisica II*, 66-80.
- ANSYS, I. (2020). *Simulador de campo electromagnético 3D para RF y diseño inalámbrico*. Retrieved from HFSS: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*. Canada: Jhon Wiley & Sons, INC.
- Bayat, A. a. (2012). A parametric study and design of the Balanced Antipodal Vivaldi Antenna (BAVA). *PIERS Proceedings*.
- Cardama Aznar, A. L. (2002). *Antennas*.
- Fisher, J. J. (2006). Vivaldi Antenna. *World Intellectual Property Organization*.
- G. K. Pandey, H. S. (2015). Antenna Vivaldi. *International Journal of Signal Processing Systems*, 3.
- Garg, r. e. (2013). *Microstrip lines and slotlines*. Artech House.
- Gibson, P. (1979). The Vivaldi aerial. *9th European Microwave Conference*. IEEE.



- Gopinath Gampala, M. V. (2015). "Efficient Design and Analysis of Airborne Radomes " .  
*Microwave Journal*.
- Headley, C. (2019, Jun 26). *How to Design a Vivaldi Antenna in HFSS*. Retrieved from  
<https://www.youtube.com/watch?v=1QLuP3zLUfl>
- ITU. (2019). *Bandas de Frecuencias*.
- Jan Schorer, J. B. (2012). "Broadband Feed for Low Cross-Polarization Uniplanar  
Tapered Slot Antennas on Low-Permittivity Substrate". *Wireless Engineering and  
Technology*, 4-5.
- Joseph, F. J. (2006, August 8). *EE.UU Patent No. US 7,088,300 B2*.
- Krauss, J. D. (1988). *Antennas*. TATA McGRW-HILL.
- NORHAYATI HAMZAH, K. A. (2011). Designing Vivaldi Antenna with various Sizes using  
CST Software. *Proceedings of the World Congress on Engineering, II*, 6.
- Nurhayati, E. S. (2019). Radiation Pattern Analysis and Modelling of Coplanar Vivaldi  
Antenna Element for Linear Array Pattern Evaluation. *Progress in  
Electromagnetics Research*, 79-96.
- P. Venu Madhav, M. S. (2019). Characterization of Printed Vivaldi Antennas (8-18 GHz)  
on Rt Duroid With Single and Double Cavity. *International Journal of Recent  
Technology and Engineering (IJRTE)*, 6.
- Pozar, D. M. (2005). *Microwave Engineering*. Wiley.
- Ramírez, R. T. (2012). *Diseño y construcción de antenas planares de banda ancha con  
aplicaciones en sistemas de telecomunicaciones*. CENTRO DE INVESTIGACIÓN

CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSANADA, Electrónica y Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California, México,: Posgrado en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones.

Ríos, O. M. (1993). *Antennas*.

Schantz, H. (2015). *The Art and Science of Ultra - Wideband Antennas*. Artech House.

Torres, L. L. (2014). *Diseño de una antena Vivaldi antipodal modificada para aplicaciones GPR en la banda de 700 MHz - 9 GHz*. Universidad Javeriana, Electrónica. Quito: UJ.

Wu, Q. (2006). An approach to the determination of the phase center of Vivaldi-based UWB antenna. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. IEEE.

Yngvesson, K. T. (1989). The tapered slot antenna-a new integrated element for millimeter-wave applications. (I. Transactions, Ed.) *Microwave Theory and Techniques*, 37.

**Anexos**