



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA PARA LA CREACIÓN DEL CURSO DE LABORATORIO DE
RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES, ENFOCADO AL DISEÑO Y SIMULACIÓN DE
ANTENAS *MICROSTRIP* DE PARCHE RECTANGULAR Y CIRCULAR, EN LA ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

José Félix Herrera Rodríguez

Asesorado por Ing. Helmut Federico Chicol Cabrera

Guatemala, agosto 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA LA CREACIÓN DEL CURSO DE LABORATORIO DE
RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES, ENFOCADO AL DISEÑO Y SIMULACIÓN DE
ANTENAS *MICROSTRIP* DE PARCHE RECTANGULAR Y CIRCULAR, EN LA ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ FÉLIX HERRERA RODRIGUEZ

ASESORADO POR ING. HELMUNT FEDERICO CHICOL CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, AGOSTO 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz Gonzáles
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Walter Jacobo Galicia García
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Christian Antonio Orellana López
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROPUESTA PARA LA CREACIÓN DEL CURSO DE LABORATORIO DE
RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES, ENFOCADO AL DISEÑO Y SIMULACIÓN DE
ANTENAS *MICROSTRIP* DE PARCHE RECTANGULAR Y CIRCULAR, EN LA ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 10 de mayo de 2022.



José Félix Herrera Rodríguez

Ingeniero
Julio Cesar Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero Solares.

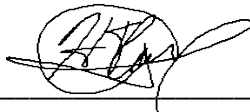
Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titular. **“PROPUESTA PARA LA CREACION DEL CURSO DE LABORATORIO DE RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES, ENFOCADO AL DISEÑO Y SIMULACION DE ANTENAS MICROSTRIP DE PARCHE RECTANGULAR Y CIRCULAR , EN LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA”**, del señor José Félix Herrera Rodríguez, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente.

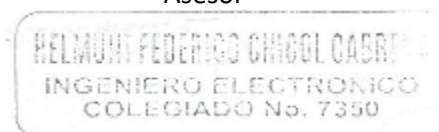
F. _____



Ing. Helmunt Federico Chicol Cabrera

Colegiado 7350

Asesor





Guatemala, 24 de abril de 2023

Señor director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **“PROPUESTA PARA LA CREACION DEL CURSO DE LABORATORIO DE RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES, ENFOCADO AL DISEÑO Y SIMULACION DE ANTENAS MICROSTRIP DE PARCHE RECTANGULAR Y CIRCULAR, EN LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA,** desarrollado por el estudiante **José Félix Herrera Rodríguez,** ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Julio César Solares Peñate'.

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

REF. EIME 33.2023.

El director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del asesor, con el Visto Bueno del coordinador de área, del trabajo de graduación del estudiante José Félix Herrera Rodríguez: PROPUESTA PARA LA CREACIÓN DEL CURSO DE LABORATORIO DE RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES, ENFOCADO AL DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS MICROSTRIP DE PARCHE RECTANGULAR Y CIRCULAR, EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, procede a la autorización correspondiente.



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 21 de julio de 2023.



LNG.DECANATO.OI.594.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA PARA LA CREACIÓN DEL CURSO DE LABORATORIO DE RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES, ENFOCADO AL DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS MICROSTRIP DE PARCHE RECTANGULAR Y CIRCULAR, EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por: **José Félix Herrera Rodríguez**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

A handwritten signature in blue ink, followed by an official circular stamp. The stamp contains the text 'UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA', 'DECANO a.i.', and 'Facultad de Ingeniería'.

Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, agosto de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Jose Felix Herrera López y Ingrid Julissa Rodríguez Godínez, por ser los pilares y guías en el camino para alcanzar mis metas.
- Mi hermano** Nathan Manuel Herrera Rodríguez por brindarme su apoyo y cariño.
- Mis abuelos** Víctor Manuel Rodríguez, Tomasa Godínez Zamora, Jose Felix Herrera García y Argentina López Álvarez por acompañarme en mi camino y darme su cariño incondicional.
- Mis amigos** Manuel Osorio, Edson Martínez, William Iquité, Jonathan Ignacio, Axl Galicia por hacer mi carrera universitaria una experiencia inolvidable.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una institución que educa a los
ciudadanos para formar su futuro.

Ing. Helmunt Chicol

Por apoyarme y ser un catedrático modelo para
cada uno de los estudiantes.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTENA DE PARCHE <i>MICROSTRIP</i>	1
1.1. Estructura de una antena de parche <i>microstrip</i>	2
1.2. Antena de parche rectangular <i>microstrip</i>	3
1.2.1. Modelo de línea de transmisión.....	4
1.2.1.1. Métodos de alimentación.....	10
1.2.2. Modelo de cavidad.....	16
1.3. Antenas de parche circular <i>microstrip</i>	20
2. SOFTWARE DE SIMULACIÓN ANSYS HFSS	27
2.1. ANSYS HFSS.....	28
2.1.1. Introducción a Ansys HFSS.....	29
2.1.1.1. Configuración básica y perfiles.....	29
2.1.1.1.1. Perfil de máquina.....	30
2.1.1.1.2. Tipo de solución	32
2.1.1.2. Área de trabajo	35
2.1.1.3. Modelo 3D	36
2.1.1.3.1. Volumétricos.....	37
2.1.1.3.2. Figuras planas.....	41

	2.1.1.3.3.	Operaciones.....	44
	2.1.1.4.	Materiales, puertos y limites	47
	2.1.1.4.1.	Materiales.....	47
	2.1.1.4.2.	Puertos.....	49
	2.1.1.4.3.	Limites.....	52
	2.1.1.5.	Configuración y barrido de frecuencia ..	54
	2.1.1.6.	Resultados	58
	2.1.1.7.	Gráficos y animaciones	60
2.1.2.		Metodología de diseño y guía de simulación.....	63
	2.1.2.1.	Metodología de diseño de antenas	63
	2.1.2.2.	Guía de simulación de antenas.....	64
3.		SIMULACIÓN DE ANTENAS <i>MICROSTRIP</i> DE PARCHE.....	67
3.1.		Ejemplos de simulación de antenas <i>microstrip</i> de parche.....	67
	3.1.1.	Simulación de algunos componentes <i>microstrip</i>	67
	3.1.1.1.	Línea <i>microstrip</i> de 50 Ω	67
	3.1.1.2.	Trasformador de cuarto de onda	72
	3.1.1.3.	Acople de ramal	75
	3.1.2.	Simulación de antena de parche rectangular	77
	3.1.3.	Simulación de antena de parche circular	87
4.		LABORATORIO DE RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES.....	93
4.1.		Curso de radiocomunicaciones terrestres	93
	4.1.1.	Descripción del curso	93
	4.1.2.	Objetivos del curso.....	93
	4.1.3.	Metodología de curso.....	94
	4.1.4.	Programa de estudio	95
	4.1.5.	Esquema de evaluación	97
4.2.		Propuesta de creación de laboratorio.....	97

4.2.1.	¿Por qué un curso de laboratorio?	98
4.2.2.	¿Por qué aprender sobre las antenas <i>microstrip</i> ? ..	98
4.2.3.	Descripción del curso	99
4.2.4.	Actividades propuestas.....	99
4.2.5.	Esquema de evaluación	101
4.2.6.	Herramientas de simulación	101
	4.2.6.1. Simulación por <i>software</i>	101
4.2.7.	Literatura del curso	103
4.2.8.	Estructura del curso de laboratorio	104
	4.2.8.1. Clase de exposición de conceptos	104
	4.2.8.2. Clase de ejecución práctica	105
	4.2.8.3. Diagrama estructural de curso.....	105
4.2.9.	Metodología del curso de laboratorio.....	106
4.2.10.	Antecedentes del curso de laboratorio	106
5.	PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	107
5.1.	Práctica 1.....	107
5.2.	Práctica 2.....	108
5.3.	Práctica 3.....	109
5.4.	Práctica 4.....	110
5.5.	Práctica 5.....	111
5.6.	Proyecto de laboratorio.....	111
	CONCLUSIONES	113
	RECOMENDACIONES	115
	REFERENCIAS	117

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Configuración de antena de parche <i>microstrip</i>	2
2.	Antena de parche rectangular <i>microstrip</i>	3
3.	Modelo de línea de transmisión simplificado	5
4.	Longitud física y efectiva del parche rectangular <i>microstrip</i>	6
5.	Visualización de los campos marginales	7
6.	Ubicación del punto de activación o punto de alimentación	11
7.	Métodos de alimentación para una antena de parche.....	12
8.	Trasformador de cuarto de onda	15
9.	Campos de orden superior	18
10.	Geometría de la antena de parche circular	21
11.	Representación del modelo de cavidad	21
12.	Patrones de los campos magnéticos y eléctricos.....	24
13.	Pestaña de herramientas y configuración de simulación	31
14.	Ventana de configuración de análisis.....	31
15.	Barra de opciones de solución HFSS.....	33
16.	Ventana tipo de solución	34
17.	Área de trabajo de HFSS	35
18.	Pestaña de Dibujo y herramientas de modelado.....	35
19.	Ventana emergente de datos de medidas.....	37
20.	Caja de demostración de herramienta	38
21.	Cilindro de demostración de herramienta.....	39
22.	Polígono de demostración de herramienta.....	39
23.	Cono de demostración de herramienta	40

24.	Esfera de demostración de herramienta	40
25.	Toroide de demostración de herramienta	41
26.	Dibujo de un plano rectangular	42
27.	Dibujo de un círculo	42
28.	Dibujo sobre un polígono regular	43
29.	Dibujo de una elipse... ..	43
30.	Figuras sobrepuestas de una caja y un cilindro	45
31.	Unión de un cilindro con una caja rectangular	45
32.	Sustracción de una caja rectangular sobre un cilindro.....	46
33.	Sustracción de un cilindro sobre una caja rectangular.....	46
34.	Intersección de un cilindro y una caja rectangular	47
35.	Venta de modelo del objeto	48
36.	Venta de gestor de materiales de HFSS.....	49
37.	Asignación de excitación.....	51
38.	Línea de integración para una solución modal.....	51
39.	Plano de referencia para elemento de excitación	52
40.	Visualización de limite E perfecto sobre objeto	53
41.	Visualización de límite de un objeto de región abierta	53
42.	Opción de análisis para configuración de simulación	55
43.	Ventana de configuración de la solución de control.....	56
44.	Ventana de edición de barrido de frecuencia.....	57
45.	Visualización previa de los valores de frecuencia	57
46.	Pestaña de simulación, botón de validar y analizar todo	58
47.	Ejemplo de ventana de resultados tipo grafica	60
48.	Resultado mostrado en una gráfica 2D.....	61
49.	Resultado mostrado en una gráfica 3D.....	62
50.	Metodología de diseño y fabricación de antenas <i>microstrip</i>	64
51.	Modelo 3D de la línea de transmisión <i>microstrip</i>	68
52.	Magnitud del campo eléctrico sobre la línea <i>microstrip</i>	69

53.	Vectores del campo eléctrico sobre la línea <i>microstrip</i>	69
54.	Comportamiento del campo eléctrico	70
55.	Comportamiento del campo magnético	70
56.	Parámetro S de una línea <i>microstrip</i> de 50 Ω	71
57.	VSWR para una línea <i>microstrip</i>	71
58.	Modelo 3D del transformador de cuarto de onda	72
59.	Magnitud del campo eléctrico.....	73
60.	Vector de Poynting real sobre el transformador	74
61.	Densidad de corriente superficial del conductor metálico	74
62.	Carta de Smith del transformador de cuarto de onda.....	75
63.	Línea de acople de ramal.....	76
64.	Campo eléctrico en $t = 0$	76
65.	Campo eléctrico en $t = t_1$	77
66.	Campo eléctrico en $t = t_2$	77
67.	Proceso de cálculo con Mathcad.....	79
68.	Proceso de cálculo con Mathcad.....	79
69.	Ejemplo de antena de parche rectangular.....	80
70.	Gráfica de parámetro S de la antena ejemplo	81
71.	Diagrama de radiación de la antena de parche rectangular	81
72.	Magnitud del campo eléctrico en el parche metálico.....	82
73.	Magnitud del campo eléctrico presente en el sustrato	83
74.	Modelo de antena con transformador de cuarto de onda.....	84
75.	Diagrama de radiación de parche rectangular.....	85
76.	Diagrama de radiación 2D.....	86
77.	Campo magnético dentro del sustrato dieléctrico.....	86
78.	Campo magnético en el sustrato dieléctrico.....	87
79.	Proceso de cálculo de parche circular por Bancroft	88
80.	Proceso de cálculo de parche circular por Balanis	88
81.	Modelo de antena de parche circular	89

82.	Parámetro S.....	90
83.	Diagrama de radiación.....	90
84.	Visualización de la magnitud del campo eléctrico.....	91
85.	Campo eléctrico sobre el parche circular.....	91
86.	Diagrama estructural de curso.....	105

TABLAS

I.	Descripción de <i>software</i> hfss.....	28
II.	Tipos de maquinas.....	32
III.	Especificaciones de simulación de antena.....	68
IV.	Especificaciones del elemento a simular.....	73
V.	Especificaciones de diseño de antena.....	78
VI.	Tabla de objetivos del curso.....	94
VII.	Metodología de curso magistral.....	94
VIII.	Tabla de contenido de curso.....	95
IX.	Esquema de evolución.....	97
X.	Actividades propuestas.....	100
XI.	Puntuación otorgada a cada actividad.....	101
XII.	Literatura recomendada.....	104
XIII.	Metodología del curso de laboratorio.....	106

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Y	Admitancia
W	Ancho
Φ	Ángulo azimutal
θ	Ángulo polar
Δl	Cambio de longitud
G	Conductancia
x	Coordenada en eje x
y	Coordenada en eje y
I	Corriente
Cos	Coseno
h	Espesor
J	Función de Bessel
GHz	Giga Hertz
Hz	Hertz
Z	Impedancia
Si	Integral senoidal
L	Largo
Ln	Logaritmo natural
Λ	Longitud de onda
k	Número de onda
Ω	Ohm
X	Parámetro de simplificación
μ	Permeabilidad

ϵ	Permitividad
r	Radio de un círculo
Sin	Seno
B	Susceptancia
j	Unidad imaginaria

GLOSARIO

ADAS	El sistema ADAS (siglas en inglés para Advanced Driver Assistance Systems), sistema de asistencia dedicado para la seguridad del conductor.
Admitancia	Es la medida de un circuito, que describe la facilidad que este ofrece al paso de la corriente.
ADS	<i>Software</i> ADS (siglas en inglés para Advanced Design System), <i>software</i> de tipo EDA para la simulación y diseño de circuitos avanzados.
Ansys	Empresa de desarrollo de <i>software</i> dedicada a la ingeniería, para aplicaciones de diseño y simulación de proyectos.
Ansys HFSS	<i>Software</i> HFSS (siglas en inglés para High Frequency Simulation Software), <i>software</i> para el diseño y simulación de elementos electromagnéticos de microondas.
Borde no radiante	Borde físico de una antena que no genera emisión de energía.
Borde radiante	Borde físico de una antena que permite la pérdida de energía en forma de radiación electromagnética.

Cable coaxial	Cable utilizado para la transmisión de señal de alta frecuencia, conformado por dos elementos conductores.
CAD	El sistema CAD (siglas en inglés para Computer Aided Design), sistema para el diseño de elementos asistido por computadoras.
Campo eléctrico	Campo físico que describe las fuerzas y comportamiento de partículas con cargas eléctricas.
Campo magnético	Campo físico que describe la influencia magnética generada por una corriente eléctrica.
Campos lejanos	Campos electromagnéticos, lo suficientemente alejados de la fuente generadora, para no sufrir de sus efectos.
Conductancia	Medida de la facilidad de un material que ofrece al paso de corriente eléctrica.
Conductor eléctrico	Material con la propiedad de poca resistencia física al movimiento de las cargas eléctricas.
CST Studio Suite	<i>Software</i> de simulación de campos electromagnéticos y análisis de EM 3D.
Densidad de corriente	Vector que describe el movimiento de una carga eléctrica, sobre un área trasversal de un conductor,

poseyendo unidades de corriente por unidad de superficie.

DNS	Dirección DNS (siglas en inglés para Domain Name System), sistema de dirección por nombre de dominio.
FEM	Herramienta matemática FEM (siglas en inglés para Finite Element Method), es un método numérico para aproximar la solución de ecuaciones diferenciales parciales complejas.
GPU	Unidad GPU (siglas en inglés para Graphics Processing Unit), unidad especializada para el procesamiento de gráficos u operaciones de coma flotante.
Impedancia	Medida de oposición de la circulación de corriente eléctrica en un circuito.
IoT	Sistema IoT (siglas en inglés para Internet Of Things), red de dispositivos de sensores, <i>software</i> y otras tecnológicas dedicadas a la transmisión de información.
IP	Dirección IP (siglas en inglés para Internet Protocol), sistema de direccionamiento de identificación de equipos de red.
Línea <i>microstrip</i>	Línea de transmisión de dos conductores de estructura plana para microondas.

Microonda	Ondas electromagnéticas, en el rango de frecuencia de 300MHz a 30GHz.
PCB	Tarjetas PCB (siglas en inglés para Printed Circuit Board), placa de circuito impreso, para soportar y conectar componentes electrónicos.
Permeabilidad	Capacidad de los materiales conductores de afectar o ser afectado por los efectos de los campos magnéticos.
Permitividad	Propiedad de los materiales que determina cuanto son afectados por los campos eléctricos.
Plano de tierra	Plano de referencia como vía de retorno común de la corriente eléctrica hacia la fuente eléctrica.
Software Mathcad	<i>Software</i> de cálculo matemático numérico, simbólico y programable.
UNC	Estándar UNC (Universal Naming Convention), estándar de identificación de servidor.
VNA	Instrumento VNA (siglas en inglés para Vector Network Analyzer), instrumento que mide los parámetros de las redes eléctricas.

VSWR

Medida VSWR (siglas en inglés para Voltage Standing Wave Ratio), medida de comportamiento de onda estacionaria en línea de transmisión y carga.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se desarrolla la propuesta para la implementación del curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres. En las secciones siguientes se presenta la estructura y fundamentos para el curso de laboratorio, tomando un enfoque para el curso de experiencia basada en la simulación por ordenador.

El capítulo uno presenta la propuesta de implementación del curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres, especificando su estructura interna, desarrollo de actividades y objetivos.

El capítulo dos desarrolla los fundamentos para una introducción rápida de la teoría de antenas de parche *microstrip* de tipo rectangular y circular.

El capítulo tres muestra una introducción rápida al *software* de simulación Ansys HFSS, estableciendo una metodología y guía para la simulación de antenas de parche *microstrip*.

El capítulo cuatro es un conjunto de ejemplos de simulación de prototipos de antenas *microstrip* para aplicaciones de ingeniería.

El capítulo cinco presenta una serie de prácticas de laboratorio que se pueden utilizar de guía para el curso de laboratorio.

OBJETIVOS

General

Definir el curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres.

Específicos

1. Establecer la estructura del curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres.
2. Introducción a los fundamentos de antenas de parche *microstrip*.
3. Especificar el proceso de diseño y simulación en ANSYS HFSS.
4. Mostrar la simulación de antenas *microstrip* de parche rectangular y circular.
5. Diseñar prácticas de laboratorio para el curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los dispositivos inalámbricos se encuentran en todas partes. Con las nuevas tendencias en el desarrollo de IoT e industria 4.0, es necesaria la conexión a internet o a una red privada. En muchos casos los dispositivos inteligentes o de IoT, se conectan por medios inalámbricos, además cada vez restringen el tamaño y peso de las antenas. Una solución a estas especificaciones rigurosas de tamaño y peso, son las antenas de parche *microstrip*. Con este trabajo se propone el desarrollo de un curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres, dedicado únicamente a introducir al estudiante de las carreras de ingeniería electrónica y eléctrica en los fundamentos de las antenas *microstrip*.

En los siguientes capítulos se establecen los objetivos del curso, conceptos introductorios de la teoría de antenas *microstrip*, herramientas de *software* para el diseño y simulación de antenas, y ejemplos. Esto con la finalidad de formar una estructura sólida para un curso de laboratorio basado en la práctica y simulación a nivel de ingeniería.

Para un entendimiento completo de la teoría de antenas *microstrip*, se busca reforzar los conceptos utilizando las herramientas más avanzadas de simulación y diseño de antenas. Con este ideal se desarrolla una guía rápida al *software* Ansys HFSS. Con el *software* Ansys HFSS podemos diseñar y simular una antena *microstrip* de parche rectangular o circular en uno cuantos minutos.

1. ANTENA DE PARCHE *MICROSTRIP*

En el momento que los dispositivos requieren antenas de transmisión y recepción de perfil bajo de estructuras compactas, las antenas *microstrip* salen a relucir. Las antenas *microstrip* están presentes en distintas aplicaciones como militares, móviles, aeronaves y satelitales.

Las antenas *microstrip* presentan ventajas en comparación a otros tipos de antenas, como, por ejemplo: perfil bajo, adaptación fácil a superficies planas y no planas, implementación económica, restricciones de tamaño, implementación con tecnología de circuito impreso y versatilidad de frecuencia de resonancia. La antena *microstrip* presenta muchas ventajas, pero también presentan muchas desventajas como el ancho de banda estrecho, baja eficiencia, ondas superficiales y modelos de difícil implementación.

¿Por qué las antenas *microstrip* presentan estas características en su estructura?, la estructura base de la antena *microstrip* es una derivación de la estructura de las líneas de transmisión *microstrip*, donde esta es modificada para tener la capacidad de irradiar energía electromagnética. Dentro de la categoría de antenas *microstrip*, existe diferentes tipos de antenas *microstrip* como:

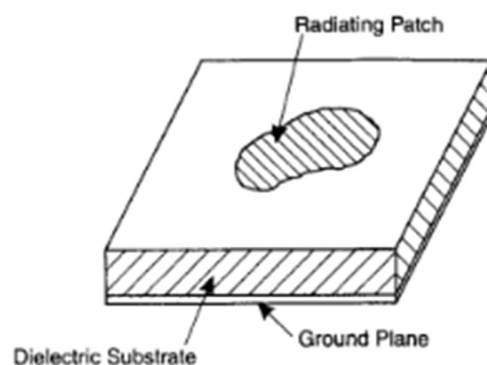
- Antena de parche *microstrip*
- Antena *microstrip* o de dipolo impreso
- Antena de ranura impresa
- Antena *microstrip* de ondas viajeras

En este trabajo únicamente se estudiará las antenas de parche rectangular y circular. Se iniciará explicando lo que es la estructura de la antena *microstrip* de parche, continuando con la antena de parche rectangular, métodos de alimentación, modelos de análisis y finalizando con las antenas de parche circular.

1.1. Estructura de una antena de parche *microstrip*

La estructura de una antena de parche *microstrip* es simple, se compone de tres elementos base. El primer elemento es el substrato dieléctrico, que determina algunas de las características principales de la antena, el segundo es el parche *microstrip* metálico y de ultimo, pero no menos importante el plano de tierra. La configuración de la antena es un parche metálico sobre un plano de tierra, separados por el substrato dieléctrico de altura h . El parche *microstrip* metálico no tiene forma específica, dependiendo de las características deseadas, se puede proponer una forma conocida como un rectángulo o un círculo.

Figura 1. Configuración de antena de parche *microstrip*



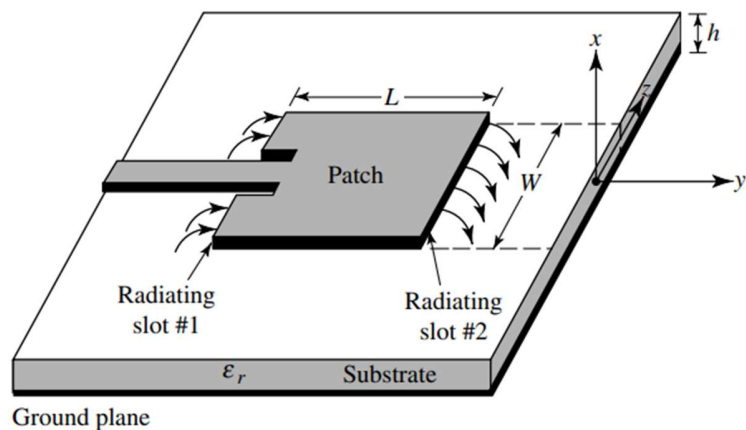
Fuente: Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl, Apisak Ittipiboon (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*.

Hay que tener en cuenta que dependiendo de los requisitos especificados para el diseño de la antena que se utilizara en un proyecto, la configuración puede tener distintas variaciones. Como, por ejemplo, cambios en la geometría del plano de tierra. Para las configuraciones descritas en este trabajo, se asumirá que el plano de tierra es mayor al área del parche metálico, más adelante se determinara un criterio para establecer las medidas del plano de tierra.

1.2. Antena de parche rectangular *microstrip*

La antena de parche rectangular es una de las antenas *microstrip* más conocidas y fácil de elaborar con tecnología de PCB. En este tipo de antena el parche tiene una geometría con forma rectangular, cuenta con un largo y un ancho definido por el sustrato dieléctrico y la frecuencia de resonancia.

Figura 2. Antena de parche rectangular *microstrip*.



Fuente: Constantine A. Balanis (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*.

Para entender una antena de parche rectangular existen diferentes modelos de análisis para describir el funcionamiento y sus parámetros. Los modelos más conocidos son el modelo de línea de transmisión y el modelo de cavidad. El modelo de línea de transmisión nos ayudara a comprender el funcionamiento de la antena y el modelo de cavidad es un modelo más complejo que nos permite calcular los distintos parámetros de la antena.

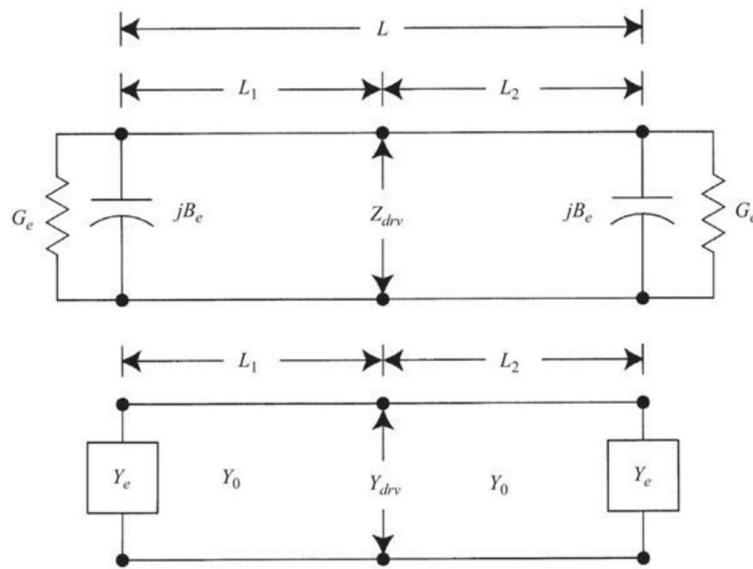
1.2.1. Modelo de línea de transmisión

El modelo de línea de transmisión es descrito de la siguiente forma:

The transmission line model provides a very lucid conceptual picture of the simplest implementation of a rectangular microstrip antenna. In this model, the rectangular microstrip antenna consists of a microstrip transmission line terminated with a pair of loads at either end. The resistive loads at each end of the transmission line represent loss due to radiation. At resonance, the imaginary components of the input impedance seen at the driving point cancel, and therefore, the driving point impedance becomes exclusively real. [El modelo de línea de transmisión proporciona una imagen conceptual muy lúcida de la implementación más simple de una antena *microstrip* rectangular. En este modelo, la antena *microstrip* rectangular consta de una línea de transmisión *microstrip* terminada con un par de cargas en cada extremo. Las cargas resistivas en cada extremo de la línea de transmisión representan pérdidas por radiación. En resonancia, las componentes imaginarias de la impedancia de entrada vistas en el punto de activación se cancelan y, por lo tanto, la impedancia del punto de activación se vuelve exclusivamente real.]. (Bancroft, 2019, p. 27)

Para entender la descripción anterior, hay que comprender que cuando se conecta una fuente de microondas a la antena, esta entra en resonancia. Este tipo de antena irradia energía electromagnética gracias a los campos marginales. Al momento de entrar en resonancia se generan los campos marginales en dos de los cuatro bordes del parche rectangular. Estos bordes radiantes se representan en el modelo de línea de transmisión como las resistencias que describen las pérdidas por radiación. En la figura 3 podemos ver una representación de esta descripción.

Figura 3. **Modelo de línea de transmisión simplificado**

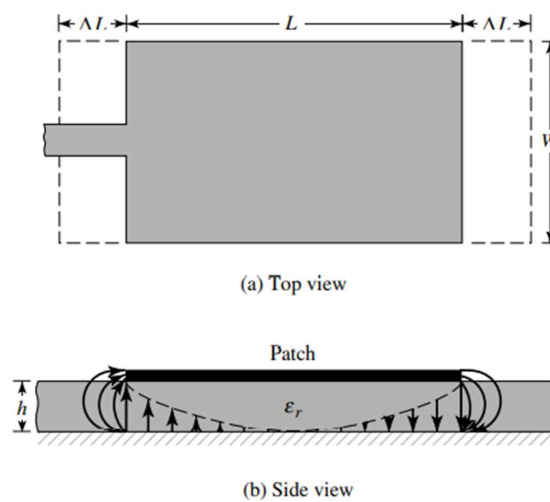


Fuente: Randy Bancroft (2019). *Microstrip and Printed Antenna Design*.

Utilizaremos el modelo de línea de transmisión para el cálculo de la geometría del parche rectangular. Para este cálculo utilizaremos el formulario y métodos presentados por Balanis (2005), Bancroft (2019) y Pandey (2019).

Por los efectos de franjas presentes en los bordes radiantes se tiene que calcular la geometría con base a los valores efectivos de la constante dieléctrica del sustrato. Ya que, viendo la antena desde el punto de vista eléctrico, esta presenta dimensiones de mayor longitud.

Figura 4. **Longitud física y efectiva del parche rectangular *microstrip***



Fuente: Constantine A. Balanis (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*.

Como paso inicial se calcula el ancho del parche en función de la frecuencia de resonancia de diseño y la permitividad dieléctrica relativa.

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

Seguidamente procedemos a calcular la permitividad dieléctrica relativa efectiva.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}, \quad W/h > 1$$

Teniendo el valor del ancho y la constante dieléctrica efectiva, ya se puede determinar el valor de la expansión del parche por los efectos de las franjas de los campos marginales.

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

Para finalizar el cálculo de la geometría del parche rectangular, calculamos el largo real del parche con que se construirá la antena, con la siguiente formula:

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L$$

Figura 5. **Visualización de los campos marginales**



Fuente: Randy Bancroft (2019). Microstrip and Printed Antenna Design.

Como se puede observar en la figura 6, la antena presenta una expansión en sus dimensiones por los campos eléctricos generados. También podemos notar la existencia de campos dentro del sustrato. Con la geometría del parche establecida, podemos enfocarnos en el cálculo de las características de circuito de la antena de parche rectangular. Como se mencionó anteriormente los bordes radiantes se representan como dos admitancias, que en resonancia son valores

reales. La admitancia de cada borde está compuesta por una conductancia G_e y una susceptancia B_e .

$$Y_e = G_e + jB_e$$

Una forma fácil para el cálculo de la conductancia y susceptancia es utilizando una aproximación asintótica de los valores. Podemos utilizar la siguiente aproximación bajo condiciones según Bancroft (2019).

$$G_e = 0.00836 \frac{W}{\lambda_0}$$

$$B_e = 0.01668 \frac{\Delta l W}{h \lambda_0} \epsilon_{reff}$$

Conseguimos encontrar una mayor claridad de las condiciones para el cálculo de la conductancia en la publicación hecha por Balanis (2005), donde nos explica que podemos utilizar dos tipos diferentes de ecuaciones según condiciones.

Para el caso de $W \gg \lambda_0$ podemos utilizar las aproximaciones anteriores, ya que los valores son idénticos a los valores de la conductancia y susceptancia de una ranura de borde finita de ancho W .

$$G_e = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right], \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10}$$

$$B_e = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0.636 \ln(k_0 h)], \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10}$$

Simplificando el cálculo de la conductancia para valores asintóticos utilizaremos la aproximación siguiente:

$$G_e = \begin{cases} \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda_0}\right)^2, & W \ll \lambda_0 \\ \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda_0}\right), & W \gg \lambda_0 \end{cases}$$

Uno de los valores principales que se busca en el diseño de antenas, es la impedancia de entrada. Para calcular la impedancia de entrada primero debemos proponer un método de alimentación para la antena. Para mejorar el cálculo de la impedancia, utilizaremos el modelo de cavidad. Derivando la conductancia de la ecuación del campo eléctrico, podemos mejorar su exactitud.

$$G_e = \frac{I_1}{120\pi^2}$$

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 \sin(\theta)^3 d\theta$$

$$= -2 + \cos(X) + X S_i(X) + \frac{\sin(X)}{X}$$

$$X = k_0 W$$

La impedancia de entrada nos permite acoplar de forma correcta la antena, con los dispositivos de transmisión o recepción. Para este trabajo siempre se buscará que la antena tenga una impedancia de entrada o de activación de 50 Ω . La tarea de establecer una impedancia de entrada, conlleva a seleccionar

algún tipo de método de alimentación. Según el método de alimentación que se escoja para la antena de parche, se realizaran distintos cálculos y suposiciones.

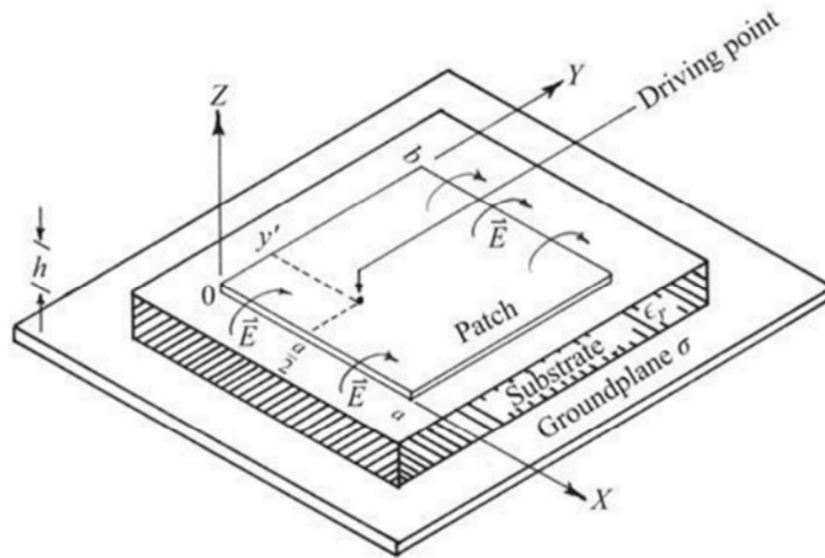
1.2.1.1. Métodos de alimentación

Existen diferentes formas de alimentar una antena de parche rectangular con una señal de microondas, pero los más conocidos son estos cuatro métodos.

- Sonda coaxial.
- Línea *microstrip* en borde no radiante.
- Línea *microstrip* en borde radiante.
- Línea *microstrip* en borde radiante con ranura.

Cada uno de los métodos de alimentación tienen sus ventajas y desventajas, pero estos son los métodos más comunes y fáciles de implementar. Estos cuatro métodos tienen en común que su conexión se ubica a la mita de la línea imaginaria que divide el parche rectangular a lo ancho. Para una idea más clara de la ubicación del punto de activación, podemos ver la imagen de la figura 7.

Figura 6. **Ubicación del punto de activación o punto de alimentación**

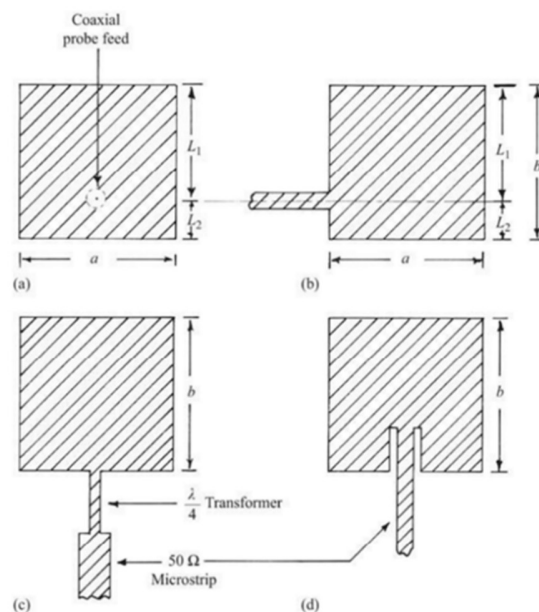


Fuente: Randy Bancroft (2019). *Microstrip and Printed Antenna Design*.

El método de sonda coaxial es considerado el método de alimentación más puro. Derivado a la perturbación en el diagrama de radiación que este agrega es de magnitud depreciable. En este método, el hilo conductor del cable coaxial atraviesa el sustrato dieléctrico y se conecta al parche. El segundo método de alimentación es más fácil de fabricar, ya que consiste en agregar una línea de transmisión *microstrip* conductora al parche metálico al momento de su elaboración. El segundo método de igual forma agrega una perturbación de magnitud despreciable al diagrama de radiación, ya que este se conecta en un borde no radiante. Un caso diferente son los dos últimos métodos de alimentación, ya que estos se conectan a un borde radiante del parche, y si logran perturbar el diagrama de radiación de la antena de forma considerable. En todos los métodos de alimentación mencionados se busca establecer una impedancia de entrada de 50Ω . Buscar una impedancia de entrada de 50Ω significa ubicar

el punto de activación en algún punto a lo largo de la antena. Para el método de línea *microstrip* simple en un borde radiante es necesario agregar un elemento adicional. Este elemento adicional es un transformador de cuarto de onda, sin este elemento no se puede establecer una impedancia de entrada de 50Ω . Para el ultimo método de línea *microstrip* en borde radiante se agregan dos pequeñas ranuras incrustadas a la antena, a los lados de la línea de alimentación para alcanzar el objetivo de una impedancia de 50Ω . Una representación gráfica de cada uno de los métodos de alimentación se presenta en la figura 8. Para un entendimiento más profundo de los métodos de alimentación de las antenas *microstrip* se puede revisar el desarrollo de Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl y Apisak Ittipiboon (2001).

Figura 7. **Métodos de alimentación para una antena de parche**



Fuente: Randy Bancroft (2019). *Microstrip and Printed Antenna Design*.

Para el método de alimentación por sonda coaxial se tiene que definir un punto de activación ubicado dentro del parche. Para establecer la ubicación de este punto tenemos que calcular de primero la impedancia de entrada del parche en referencia a un borde. Con este valor ya podemos estimar la ubicación del punto que nos permitirá tener un valor de 50Ω como impedancia de entrada.

En resonación tenemos que la impedancia del parche es real. Esto significa que la admitancia se puede representar de la siguiente forma, tomando en cuenta la conductancia de las dos ranuras:

$$Y_{drv} = 2G_e$$

Teniendo la admitancia de entrada podemos despejar la impedancia de entrada y nos quedaría una impedancia en función de la conductancia de cada ranura.

$$R_{drv} = \frac{1}{2G_e}$$

La representación de la impedancia de entrada que se mostró anteriormente no toma en cuenta los efectos entre las ranuras. La representación anterior se modifica para tomar todos los efectos posibles entre ranuras, esta modificación consiste en agregar el término de la conductancia mutua entre ranuras.

$$R_{drv} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})}$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 J_0(k_0 L \sin(\theta)) \sin(\theta)^3 d\theta$$

Para determinar el signo de la conductancia mutua se tiene que tomar en cuenta lo siguiente “where the plus (+) sign is used for modes with odd (antisymmetric) resonant voltage distribution beneath the patch and between the slots while the minus (-) sign is used for modes with even (symmetric) resonant voltage distribution” [donde el signo más (+) se usa para modos con distribución de voltaje resonante impar (antisimétrico) debajo del parche y entre las ranuras, mientras que el signo menos (-) se usa para modos con distribución uniforme (simétrica) de voltaje resonante] (A. Balanis, 2005, p. 823) y donde J_0 es la función de Bessel de primer tipo y de orden cero.

Ya con todo lo anterior calculado, podemos estimar la posición del punto de activación donde tendremos una impedancia de entrada de 50Ω para la conexión del hilo de la línea coaxial. Utilizando como referencia la figura 7 podemos encontrar la coordenada y .

$$x = \frac{W}{2}$$

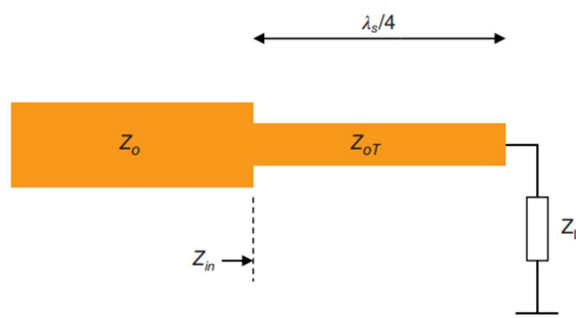
$$R_{in} = R_{drv} \cos^2\left(\frac{\pi y}{L}\right) = R_{in}(y=0) \cos^2\left(\frac{\pi y_0}{L}\right)$$

Continuando con los métodos de alimentación. El método de alimentación de línea *microstrip* en borde no radiante es un método que se puede calcular con las ecuaciones del método anterior. Esto se debe a que la alimentación de sonda coaxial y de línea *microstrip* en un borde no radiante se modelan de la misma

forma. La línea de transmisión *microstrip* de 50Ω se ubica fácilmente en un borde no radiante, que coincida con las coordenadas (x, y) . Un ejemplo de la ubicación de la línea *microstrip* en un borde no radiante colocada en el parche se encuentra en la figura 8. Los últimos dos métodos de alimentación son más fáciles de ubicar, ya que el transformador de cuarto de onda del tercer método y la línea insertada del cuarto método se ubicarán a la mitad del ancho del parche.

Podemos apreciar la forma de un transformador de cuarto de onda en la figura 9, la descripción del transformador y su funcionamiento es la siguiente: “*The quarter-wave transformer ($\lambda/4$ transformer) is a particularly useful microstrip component that enables two resistances (or two lines of different characteristic impedance) to be matched at a given frequency.*” [El transformador de cuarto de onda (transformador $\lambda/4$) es un componente *microstrip* particularmente útil que permite igualar dos resistencias (o dos líneas de diferente impedancia característica) a una frecuencia determinada.] (E. Free & S. Aitchison, 2021, p. 63)

Figura 8. **Transformador de cuarto de onda**



Fuente: Charles E. Free, Colin S. Aitchison (2021). *RF and Microwave Circuit Design Theory and Applications*.

Para el ultimo método de alimentación se necesita agregar dos ranuras de profundidad y_0 , a los lados de la línea de alimentación *microstrip*. La profundidad de la ranura se calcula fácilmente con la siguiente formula:

$$\acute{x} = \frac{W}{2}$$

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2\left(\frac{\pi y_0}{L}\right) = 50 \Omega$$

Con esto ya se puede establecer una impedancia de entrada de 50 Ω para la antena, teniendo en cuenta que es muy diferente la impedancia de entrada del parche y la impedancia de entrada de la antena. Como se ve en la figura 6, existen campos dentro y fuera del sustrato dieléctrico. Pero determinar una expresión de los campos dentro y fuera del sustrato es complicado, ya que es necesario cambiar el modelo de análisis. El modelo de línea de transmisión no permite tener una expresión lo suficientemente aproximada de estos campos.

1.2.2. Modelo de cavidad

Para definir una representación matemática física de los campos eléctricos y magnéticos de la antena es necesario crear otro modelo representativo de la antena. Para solucionar este problema de alta complejidad se desarrolló el modelo de cavidad. El modelo de cavidad es demasiado extenso para desarrollarlo desde cero en este capítulo, únicamente se describirá el modelo y se realizará la mención de sus características.

“The microstrip rectangular patch antenna may be considered to be a magnetic wall cavity. This is an approximate model, which in principle leads to a reactive input impedance, and it does not radiate any power. To account for radiation, a

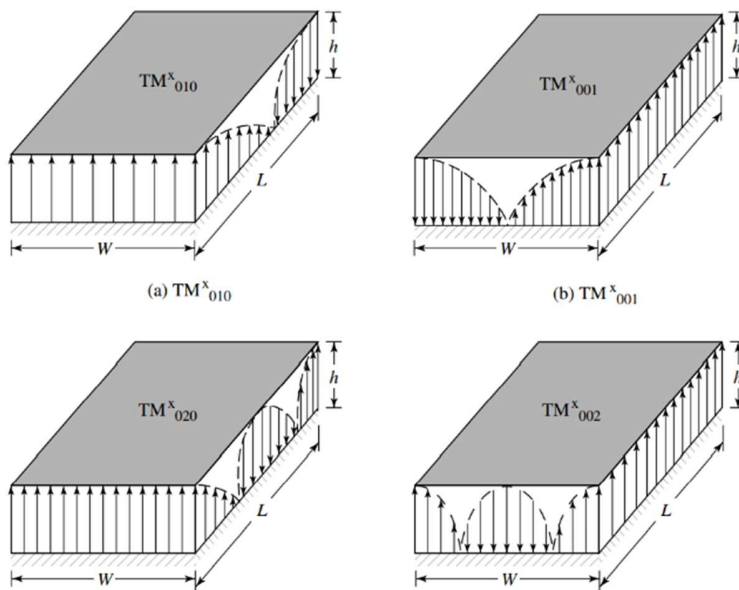
loss mechanism has to be introduced. Then we consider the perimeter of the patch as radiation slot. The radiation resistance caused by the radiation, and the loss resistance caused by the conduction-dielectric losses, result in the input impedance being complex. Although the separate consideration of the resistance and reactance implies some contradiction, this model has been verified by experiments to be an acceptable one, when the electric thickness is small.” [La antena de parche rectangular *microstrip* puede considerarse como una cavidad de pared magnética. Este es un modelo aproximado, que en principio conduce a una impedancia de entrada reactiva, y no irradia ninguna potencia. Para tener en cuenta la radiación, se debe introducir un mecanismo de pérdida. Entonces consideramos el perímetro del parche como ranura de radiación. La resistencia a la radiación provocada por la radiación y la resistencia de pérdida provocada por las pérdidas dieléctricas por conducción dan como resultado que la impedancia de entrada sea compleja. Aunque la consideración separada de la resistencia y la reactancia implica alguna contradicción, se ha comprobado experimentalmente que este modelo es aceptable, cuando el espesor eléctrico es pequeño.] (Fang, 2010, p. 97).

En resumen, se toma la antena como una cavidad de paredes laterales conductoras magnéticas perfectas y paredes superior e inferior como conductoras eléctricas perfectas. Las paredes laterales se toman como ranuras que irradian energía electromagnética. Para una descripción más detallada puede revisar lo descrito por Balanis (2005). En el caso que se dese indagar más en su desarrollo o generalización puede hacer revisión a la publicación realizada por Garg, Bhartia, Bahl y Ittipiboon (2001) .

Como la antena en la realidad muestra resonancia de orden superior que no toma en cuenta el modelo de línea de transmisión simple. El modelo de cavidad

nos permite encontrar con mayor precisión los campos dentro del sustrato dieléctrico. Estos campos de orden superior se pueden ver en la figura 10.

Figura 9. Campos de orden superior



Fuente: Constantine A. Balanis (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*.

Con el modelo de cavidad podemos escribir las expresiones de los campos eléctrico y magnético dentro del sustrato:

$$E_x = -j \frac{(k^2 - k_x^2)}{\omega\mu\epsilon} A_{mnp} \cos(k_x \hat{x}) \cos(k_y \hat{y}) \cos(k_z \hat{z})$$

$$E_y = -j \frac{k_x k_y}{\omega\mu\epsilon} A_{mnp} \sin(k_x \hat{x}) \sin(k_y \hat{y}) \cos(k_z \hat{z})$$

$$E_z = -j \frac{k_x k_z}{\omega\mu\epsilon} A_{mnp} \sin(k_x \hat{x}) \cos(k_y \hat{y}) \sin(k_z \hat{z})$$

$$H_x = 0$$

$$H_y = -j \frac{k_z}{\mu} A_{mnp} \cos(k_x \hat{x}) \cos(k_y \hat{y}) \sin(k_z \hat{z})$$

$$H_z = -j \frac{k_y}{\mu} A_{mnp} \cos(k_x \hat{x}) \sin(k_y \hat{y}) \cos(k_z \hat{z})$$

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu \epsilon$$

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2}$$

Con este conjunto de ecuaciones ya nos podemos encaminar a la descripción compleja de los fenómenos electromagnéticos presentes en la antena. Con las ecuaciones de los campos eléctricos y magnéticos del sustrato en función de su modo de resonancia podemos desarrollar las expresiones necesarias para los campos radiados por la antena. Para los campos radiados se toma en cuenta la teoría de las antenas de apertura, densidades de corriente y el principio de equivalencia de campos de Huygen.

Las expresiones de los campos obtenidas de la publicación de Balanis (2005) son:

$$E_\phi^t = +j \frac{k_0 W V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \cos(\phi)\right)}{\frac{k_0 h}{2} \cos(\phi)} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin(\phi)\right)$$

Plano – E ($\theta = 90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ y $270^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$)

$$H_\theta^t \cong +j \frac{k_0 W V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin(\theta) \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2}\right) \sin(\theta) \sin\left(\frac{k_0 W}{2}\right) \sin(\theta)}{\frac{k_0 h}{2} \sin(\theta) \frac{k_0 W}{2} \sin(\theta)} \right\}$$

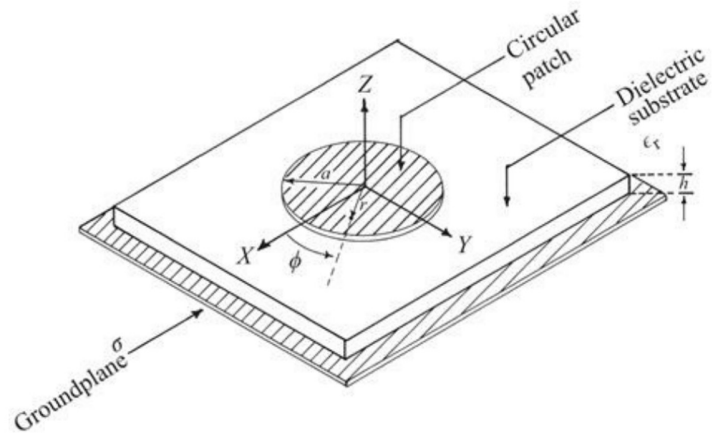
$$\text{Plano} - H (\phi = 0^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$$

Con las dos expresiones anteriores, ya podemos describir todos los fenómenos de radiación presentes en la antena. Esto permite calcular con gran facilidad los parámetros y características de esta.

1.3. Antenas de parche circular *microstrip*

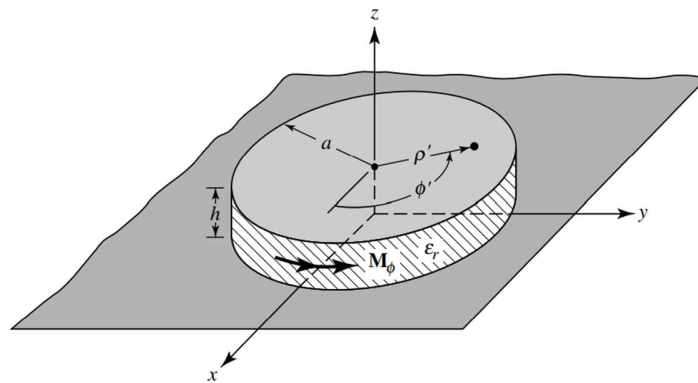
La descripción y modelado de la antena de parche circular, no es muy diferente al de la antena de parche rectangular. En el caso de la antena de parche circular igualmente se utiliza el modelo de cavidad para determinar las ecuaciones de los campos eléctrico y magnético. La utilización de la antena de parche circular se debe a que se puede conseguir patrones de radiación o polarizaciones que con la antena de parche rectangular no se puede conseguir de forma sencilla o con un único elemento de radiación. Una descripción más detallar sobre todo el proceso de cómo se aplica el modelo de cavidad para las antenas de parche circular se encuentra en la publicación. Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl y Apisak Ittipiboon (2001)

Figura 10. **Geometría de la antena de parche circular**



Fuente: Randy Bancroft (2019). *Microstrip and Printed Antenna Design*.

Figura 11. **Representación del modelo de cavidad**



Fuente: Constantine A. Balanis (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*.

La representación de los campos descritos por el modelo de cavidad de la antena de parche circular son las siguientes, tomando en cuenta que esta configuración también presenta una resonancia de modos de orden superior.

$$E_z = E_0 J_n(kr) \sin(n\phi)$$

$$H_r = -\frac{j\omega\epsilon n}{k^2 r} E_0 J_n(kr) \sin(n\phi)$$

$$H_\phi = -\frac{j\omega\epsilon}{k} E_0 J'_n(kr) \cos(n\phi)$$

donde k es la constante de propagación en el dieléctrico, J_n es la función de Bessel de primer tipo de orden n y J'_n es la derivada de la función de Bessel respecto a su argumento. Las condiciones de borde de la antena para circuito abierto requieren que $J'_n(kr) = 0$, debido a que existe un radio asociado para cada modo de resonancia, que depende de los ceros de la derivada de la función de Bessel. La frecuencia de resonancia para cada modo está dada por la siguiente ecuación:

$$f_{nm} = \frac{A_{nm} c}{2\pi a_{eff} \sqrt{\epsilon_r}}$$

Cuando A_{nm} es el m -ésimo cero de la derivada de la función de Bessel de orden n , a_{eff} es el radio efectivo del parche.

$$a_{eff} = a \left[1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left(\ln \left\{ \frac{\pi a}{2h} \right\} + 1.7726 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

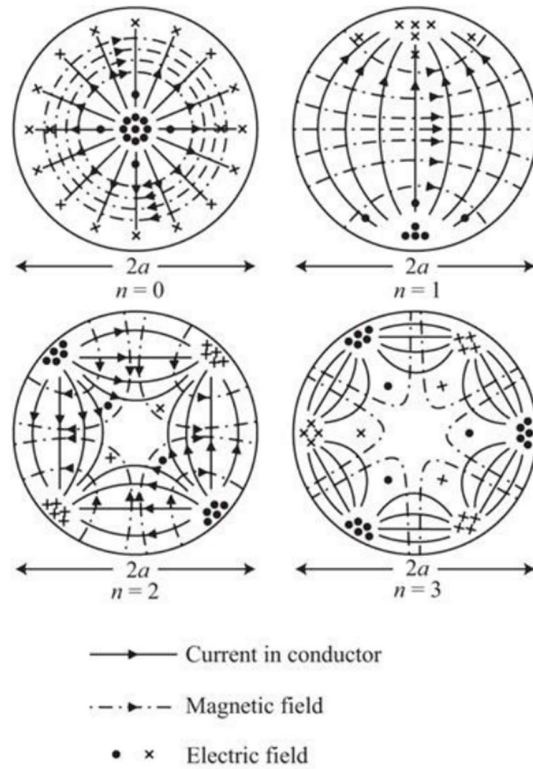
El proceso de diseño para una antena de parche circular no es muy complejo. Ya que este tipo de antenas de parche solo necesita de una medida de radio para establecer su geometría.

Con las expresiones anteriores podemos desarrollar una fórmula para el cálculo del radio de la antena de parche circular.

$$a = \frac{A_{nm}c}{2\pi f_{nm}\sqrt{\epsilon_r}} \left[1 + \frac{2h}{\pi a} \left(\ln \left\{ \frac{\pi a}{2h} \right\} + 1.7726 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, a_0 = \frac{A_{nm}c}{2\pi f_{nm}\sqrt{\epsilon_r}}$$

Para solucionar la expresión del radio de longitud a para la antena de parche circular, se puede utilizar el método numérico de punto fijo.

Figura 12. Patrones de los campos magnéticos y eléctricos



Fuente: Randy Bancroft (2019). *Microstrip and Printed Antenna Design*.

Para una impedancia de entrada y un punto de activación para el parche circular simplemente se tiene que resolver la siguiente ecuación:

$$Z_{in}(r) = \frac{1}{G} \frac{J_n^2(kr)}{J_n^2(ka)}$$

Todo este proceso de diseño esta especificado en la publicación elaborada por Bancroft (2019), al mismo tiempo podemos ver un desarrollo similar con algunas especificaciones de diseño en lo publicado por Balanis (2005).

El diseño de antenas de parche circular y rectangular es relativamente sencillo dependiendo de las condiciones de aceptación. Los procesos y formulas utilizadas en este capítulo dan una exactitud lo suficientemente buena para aplicaciones de ingeniera. Como últimos pasos para concluir con el diseño de antenas, es el de establecer la geometría del plano de tierra. Normalmente no se utiliza un desarrollo o una formulación compleja para establecer estas medidas.

Para establecer la geometría del plano de tierra se toma el criterio de establecer un ancho o longitud lo suficientemente grande para no distorsionar los campos marginales. Es muy normal que el diseñador proponga las medidas que más le convengan. Dentro de la comunidad de desarrollo de antenas de parche *microstrip* se utilizan las siguientes fórmulas para establecer esa geometría para una antena de parche rectangular:

$$W_g = 6h + W$$

$$L_g = 6h + L$$

Para el caso del parche circular, también podemos definir un par de ecuaciones similar para la geometría del plano de tierra:

$$W_g = 6h + a$$

$$L_g = 6h + a$$

Conociendo las medidas del plano de tierra, la geometría del parche rectangular o circular, ya se puede simular la propuesta de la antena. Con la

simulación de la antena podemos ver y analizar su funcionamiento en condiciones muy similares a las reales.

2. SOFTWARE DE SIMULACIÓN ANSYS HFSS

Una de las herramientas más utilizadas en la ingeniería, es el *software* de simulación por computadora. Estas herramientas digitales están destinadas para simular y analizar distintos objetos o problemas para determinar un resultado o llegar a una conclusión. Los *softwares* de simulación por computadora son herramientas muy versátiles, esto es gracias a la capacidad actual de los ordenadores modernos.

La simulación por *software* nos permite realizar proyectos de forma más eficiente, ya que permite economizar al momento de desarrollar una solución al problema de interés. Utilizando un *software* de simulación, podemos ahorrar en tiempo de desarrollo, gasto de prototipado, diseño del modelo, entre otros.

En el estudio y desarrollo de la ingeniería de antenas, específicamente en la rama de antenas de parche *microstrip*, se encuentran distintas soluciones de *software* para la simulación de antenas o desarrollo de circuitos *microstrip* para microondas. Dependiendo del tipo de usuario o presupuesto, se puede escoger una solución u otra. Para el desarrollo de un curso introductorio sobre el diseño y análisis de antenas *microstrip*, se encuentran varias soluciones de *software* populares como:

- Ansys Electronic: HFSS.
- CST Studio Suite.
- Advanced Design System (ADS).
- Matlab ToolBox Microstrip Antenna.

Para el curso de laboratorio de radio comunicaciones terrestres se propone utilizar el *software* que provee Ansys, Inc. Ansys como desarrolladora de *software* para la simulación de ingeniería cuenta con diferentes soluciones para diferentes ramas de la ingeniería. Teniendo interés únicamente en los fenómenos electromagnéticos, análisis de circuito, diseño de antenas, líneas de transmisión, filtro, guías de onda y barrido de frecuencia, nos centraremos directamente en el paquete de programas Ansys Electronic, particularmente en la solución HFSS (High Frequency Simulation Software).

2.1. ANSYS HFSS

Ansys HFSS es un *software* comercial de simulación y análisis de fenómenos electromagnéticos, que utiliza el método de elementos finitos (FEM) para la solución de campos en tres dimensiones. Ansys presenta su programa de la siguiente forma:

Tabla I. Descripción de *software* HFSS

Descripción de <i>software</i> HFSS por Ansys
Ansys HFSS es un <i>software</i> 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 <i>software</i> Ansys HFSS para diseñar componentes electrónicos de alta frecuencia y velocidad que se encuentran en sistemas de comunicaciones, sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), satélites y productos de Internet de las cosas (IoT).

Fuente: Ansys, Inc. (2022). *Ansys HFSS Help*. Consulta el 1 de agosto de 2022. Recuperado <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.

El *software* HFSS es uno de los programas de simulación de ingeniería más utilizados para elementos de microondas. En las siguientes secciones se determinarán las configuraciones de simulación, herramientas básicas, análisis, graficas, animaciones, modelado y perfiles de simulación para diseñar y evaluar una propuesta de antena *microstrip* de parche rectangular o circular. En resumen, el *software* Ansys HFSS es un *software* CAD que nos permitirá diseñar desde cero una antena *microstrip*, especificando materiales de construcción, geometría, área de análisis, propiedades de los materiales y fuentes microondas.

2.1.1. Introducción a Ansys HFSS

El sistema de Ansys HFSS, nos permitirá realizar todo tiempo de simulaciones dedicadas a la ingeniería de microondas y RF. El sistema de HFSS para simulación únicamente se encuentra para la plataforma de Windows. Para fines didácticos y de este trabajo se utilizará Ansys HFSS con una licencia temporal para estudiantes.

2.1.1.1. Configuración básica y perfiles

Una configuración previa a la elaboración del modelo 3D y análisis de resultados, es la de establecer un perfil de simulación o configuración de análisis. El *software* HFSS nos da a opción de crear varios tipos de perfiles de simulación que configuraran la capacidad de análisis, esta capacidad de análisis se determina según los recursos del equipo a utilizar. HFSS nos permite especificar en cada perfil el tipo de maquina o recurso que se utilizara para el procesamiento de toda la información al simular.

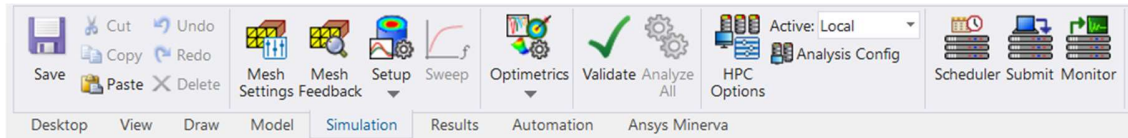
2.1.1.1.1. Perfil de máquina

La configuración del perfil de maquina determina en qué tipo de maquina se realizará la carga de trabajo de los cálculos de la simulación. HFSS presentan dos tipos de perfiles: maquina local y red de cálculo.

El perfil de maquina local especifica que todo el proceso de cálculo se realizara con nuestro ordenador, donde este no se encuentra en una red o sea un servidor web. En este perfil se puede determinar los recursos que puede consumir HFSS de nuestra máquina. Para el perfil de maquina local podemos establecer la cantidad de tareas simultáneas a realizar, cantidad de núcleos de procesador a ocupar, unidades de GPU a utilizar y porcentaje de memoria RAM disponible para el simulador. Los valores especificados en los campos anteriormente mencionados, determinara el esfuerzo del ordenador al realizar los cálculos de la solución. HFSS permite realizar cálculos con unidades GPU, pero no cuenta con una amplia gama de tarjetas gráficas compatibles. Para la consulta de unidades GPU compatibles se puede consultar la documentación de Ansys sobre unidades Nvidia (Ansys, 2021, p. 2).

La segunda opción de tipo de perfil es la de máquina de red, este perfil nos permite establecer una conexión por medio de IP, DNS o UNC a una red determinada para cálculos de simulación. En esta configuración se trasmite la carga de trabajo a una red o servidor. Trasmitiendo la carga de trabajo se disminuye el esfuerzo del ordenador local. En las imágenes siguientes se mostrará de forma ordena las ventanas de configuración para el perfil de maquina local.

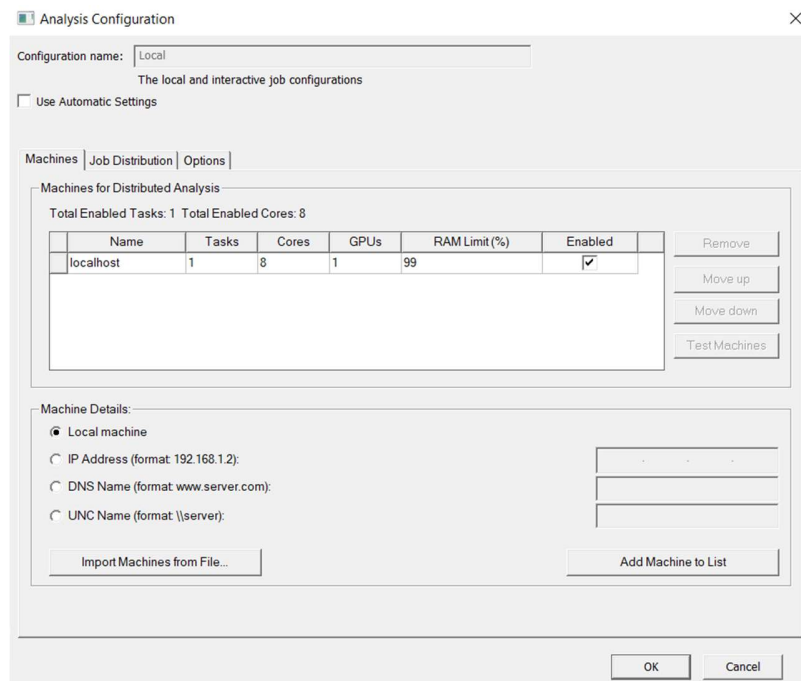
Figura 13. Pestaña de herramientas y configuración de simulación



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Para ingresar a las opciones de configuración de análisis, seleccionamos la pestaña de simulación, seguido de la opción de configuración de análisis. Dentro de la ventana de configuración de análisis, ya se puede establecer el tipo de perfil de máquina.

Figura 14. Ventana de configuración de análisis



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Tabla II. **Tipos de maquinas**

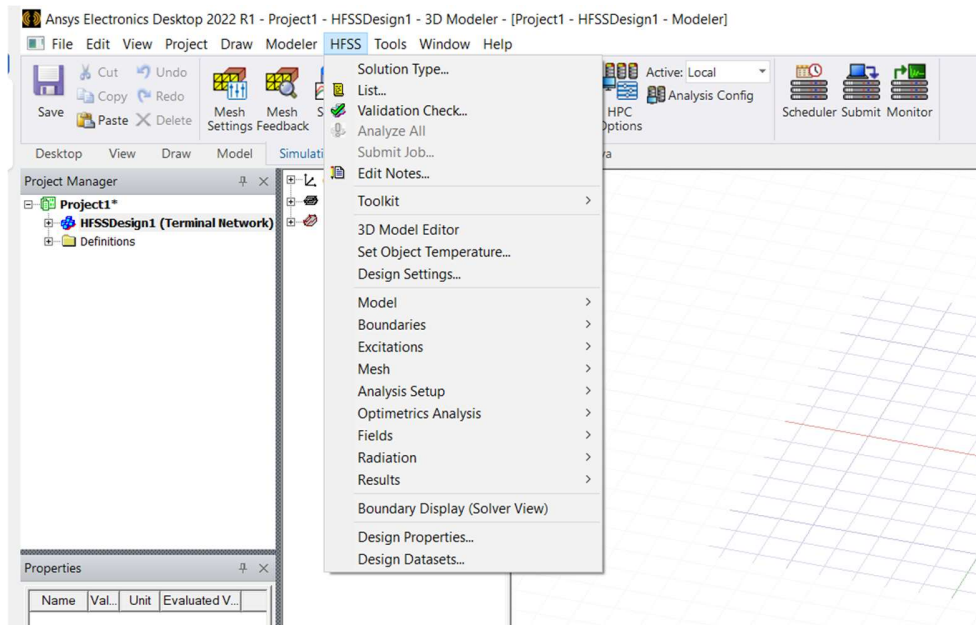
Tipo de maquina	Descripción de maquina	Información solicitada
Máquina local	Este tipo de maquina especifica nuestro ordenador.	La máquina local no solicita información adicional.
Dirección IP	Este tipo de maquina especifica un conjunto de máquinas o servidores de procesado por medio de dirección IP.	Se solicita la ip del servidor a utilizar (Formato 192.168.1.2)
DNS	Este tipo de maquina especifica un conjunto de máquinas o servidores de procesado por medio de un nombre de DNS.	Se solicita la dirección DNS a utilizar (Formato www.servidor.com)
UNC	Este tipo de maquina especifica un conjunto de máquinas o servidor de procesado por medio de un nombre de UNC.	Se solicita la dirección UNC a utilizar (Formato \\ servidor)

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

2.1.1.1.2. Tipo de solución

Antes de empezar el diseño 3D se debe seleccionar el tipo de solución que se requiere. Esto determina el alcance y método de análisis para nuestro proyecto de simulación. No se abordará en profundidad los métodos de las soluciones, ya que sobre pasan el objetivo de una introducción al simulador. A continuación, se mencionará de forma breve los tipos de solución y opciones que se pueden definir. Para ingresar a la ventana de tipo de soluciones se debe desplegar las opciones de HFSS y seleccionar la herramienta de tipo de soluciones.

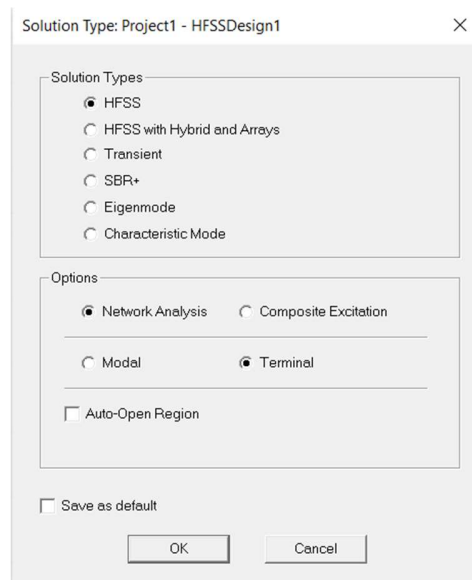
Figura 15. Barra de opciones de solución HFSS



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

En el recuadro de tipos de soluciones podemos encontrar las siguientes opciones de solución: HFSS, HFSS con híbrido y arreglos, Transitorio, SBR+, modo propio y modo característico. La solución HFSS es la opción por utilizar en ejemplos y prácticas de laboratorio para este trabajo. La solución HFSS es la opción predeterminada, que establece el método función de malla, donde los elementos del modelo 3D se discretizarán, para poder trabajar bajo el método de elementos finitos (FEM), La solución HFSS FEM se utilizara normalmente para aplicaciones de señales de microondas, antenas y PCB.

Figura 16. **Ventana tipo de solución**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Dependiendo del tipo de solución seleccionada, nos desbloqueara el recuadro de opciones. Para soluciones como HFSS de tipo impulsora. Podemos escoger entre una gama de opciones impulsoras para seleccionar. Al hablar de soluciones impulsoras, nos referimos directamente a las soluciones que dependen de un elemento fuente de energía, potencia o corriente/voltaje.

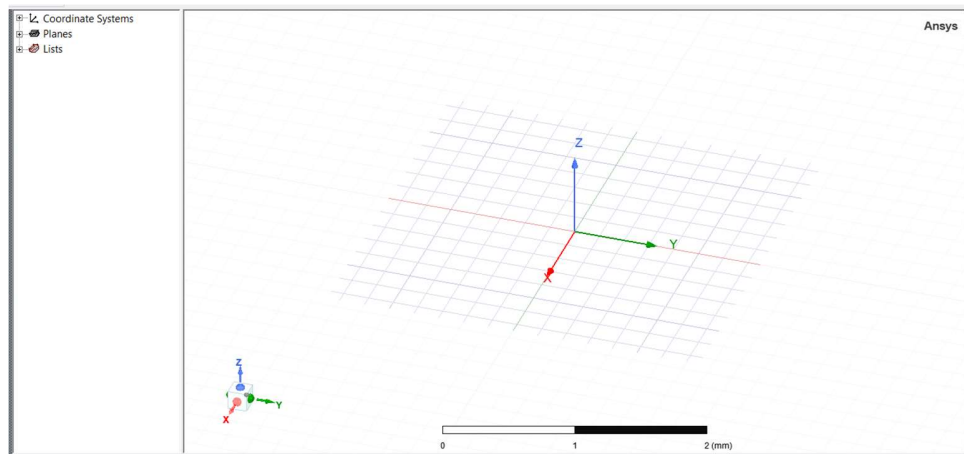
Las opciones de nuestro interés dentro de las opciones son: modo y terminal. Para calcular el parámetro S basado en el modo de excitación según la estructura se marca la opción modo. Para el cálculo del parámetro S basado en terminales de línea multiconductores se marca la opción terminal. De forma simple podemos decir que, si se busca la solución en función de los modos de resonancia de la estructura basándonos en energía para micro bandas, guías de ondas, líneas de transmisión impulsadas por una fuente, la opción es modal. En

cambio, si se busca una solución en términos de voltaje/corriente, basadas en terminales, se marca la opción de terminal.

2.1.1.2. Área de trabajo

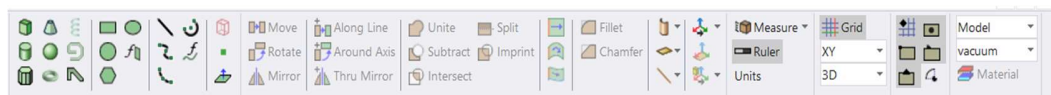
El área de trabajo no lleva mayor configuración, ya que se trabaja con los valores predeterminados, pero se modifican algunos aspectos para mayor comodidad. Al final de la pestaña de Dibujo, podemos encontrar cuatro opciones para el área de trabajo: medida, regla, unidades y cuadrícula.

Figura 17. Área de trabajo de HFSS



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 18. Pestaña de Dibujo y herramientas de modelado



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

La opción de medida nos permite seleccionar el marco de trabajo de la acción a realizar. La opción regla nos activa o desactiva una regla en el área de trabajo, para tomar medidas de referencia del modelo 3D. La opción unidades, es una de las opciones más importantes, ya que con ella se establece la unidad de medida de longitud de HFSS. Opción de cuadrícula, esta opción nos activa o desactiva una cuadrícula de referencia para cuando se está trabajado en el modelo 3D.

2.1.1.3. Modelo 3D

Para simular en HFSS es necesario construir un modelo 3D de nuestro elemento de microondas. Este elemento de microondas se puede construir a base de volúmenes y figuras planas de diferentes materiales y propiedades. Para dibujar o modelar un elemento de microondas como: antenas, líneas de transmisión, guías de ondas, se debe trabajar como en cualquier programa de modelado 3D.

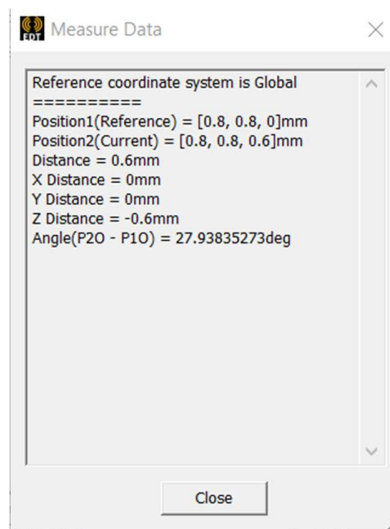
HFSS cuenta con las típicas herramientas de modelado 3D como: crear caja, crear cilindro, crear polígono, crear cono, dibujar plano rectangular, dibujar círculo, dibujar polígono, dibujar línea, dibujar curva, dibujar arco, entre otros. Para el caso en que se desea crear o dibujar un elemento de forma no predefinida se puede usar las herramientas de operaciones entre elementos. Las operaciones entre elementos son unir, sustraer, intersección, curvar e imprimir. Existen otras herramientas para el diseño y modelado que se mencionaran solo si es necesario, ya que son herramientas típicas y fáciles de reconocer de otros programas de modelado y diseño 3D.

2.1.1.3.1. Volumétricos

Estas herramientas son utilizadas para crear elementos de tres dimensiones. Cada herramienta genera un volumen sobre el plano seleccionado y del tamaño definido. Cada una de las medidas de los elementos se nombran con la letra del eje en que está orientado. La altura se representa con la letra z, el ancho con la letra y, y la profundidad con la letra x.

Las distintas herramientas de creación de volúmenes son herramientas intuitivas, ya que se puede determinar el largo, ancho o profundidad simplemente manteniendo el cursor y estirando la figura base. Al momento de comenzar a crear el volumen nos saldrá una ventana emergente que mostrará las distintas medidas de la figura a crear.

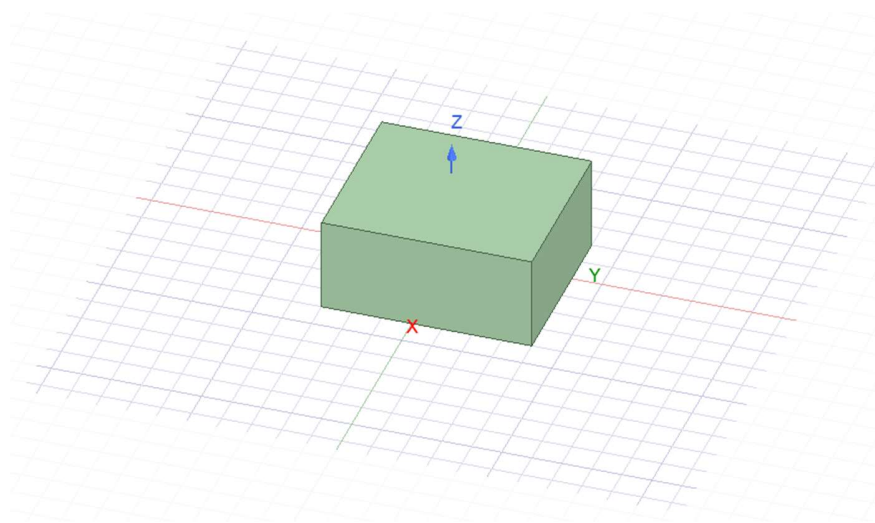
Figura 19. **Ventana emergente de datos de medidas**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

La herramienta de crear caja, nos permite genera un volumen en forma de caja sobre el área de trabaja, esta es una de las herramientas que más se utilizara para la creación de modelos *microstrip*.

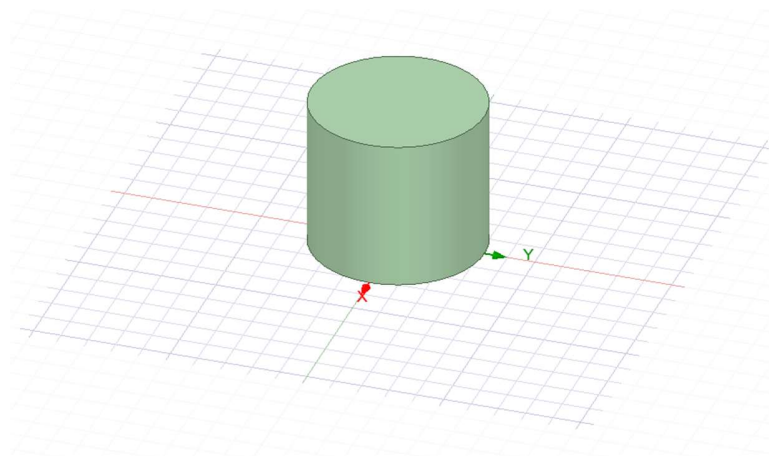
Figura 20. **Caja de demostración de herramienta**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

La herramienta de crear cilindro permite al usuario crear un elemento volumétrico en forma de cilindro.

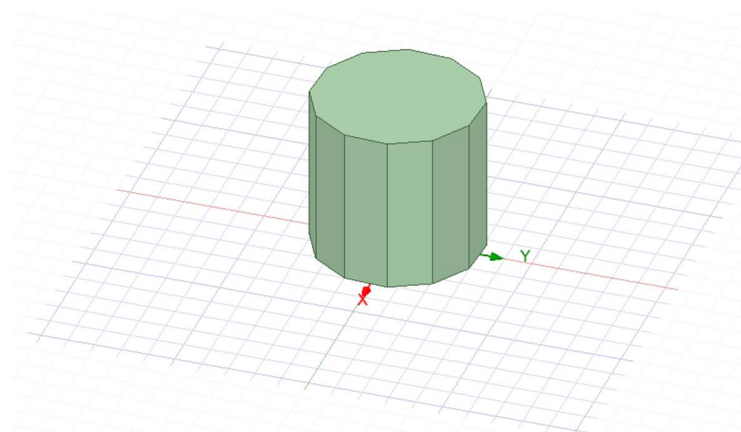
Figura 21. **Cilindro de demostración de herramienta**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

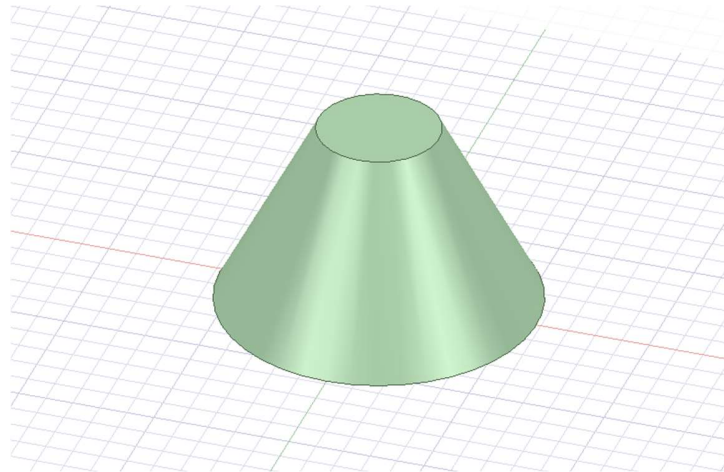
Todas las herramientas para definir un volumen se trabajan de la misma forma para la creación de las figuras. En las siguientes imágenes se mostrarán un conjunto de figuras demostrativas de cada una de las herramientas restantes.

Figura 22. **Polígono de demostración de herramienta**



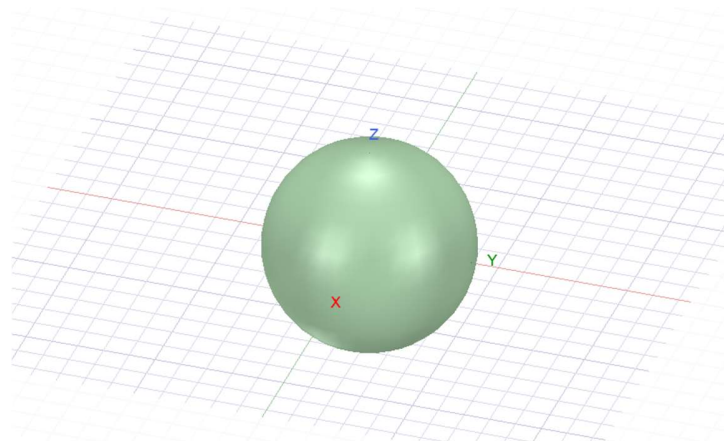
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 23. **Cono de demostración de herramienta**



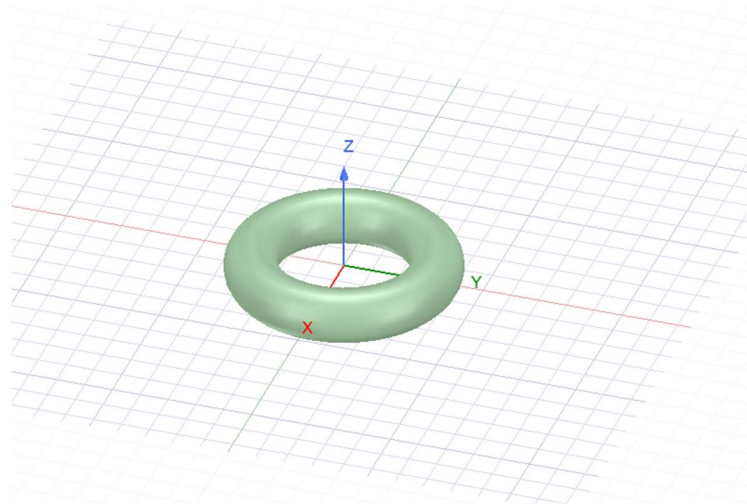
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 24. **Esfera de demostración de herramienta**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 25. **Toroide de demostración de herramienta**

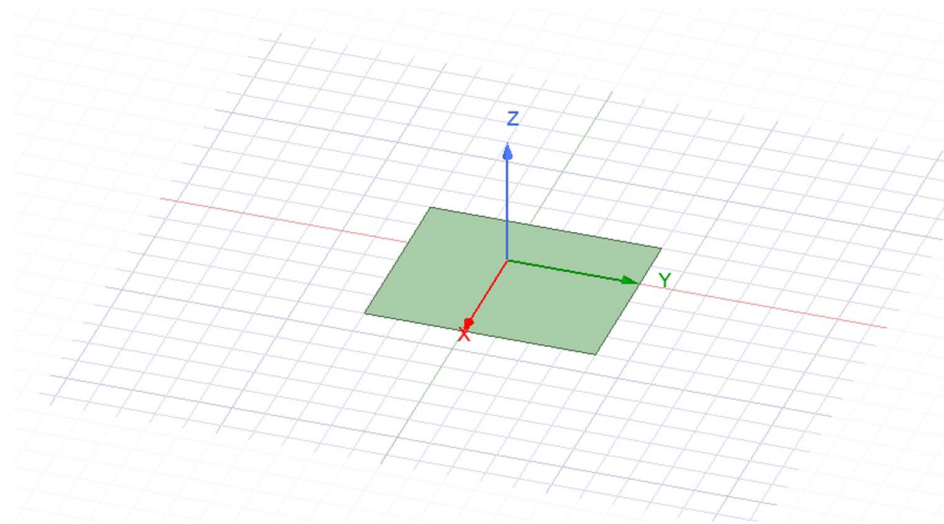


Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

2.1.1.3.2. Figuras planas

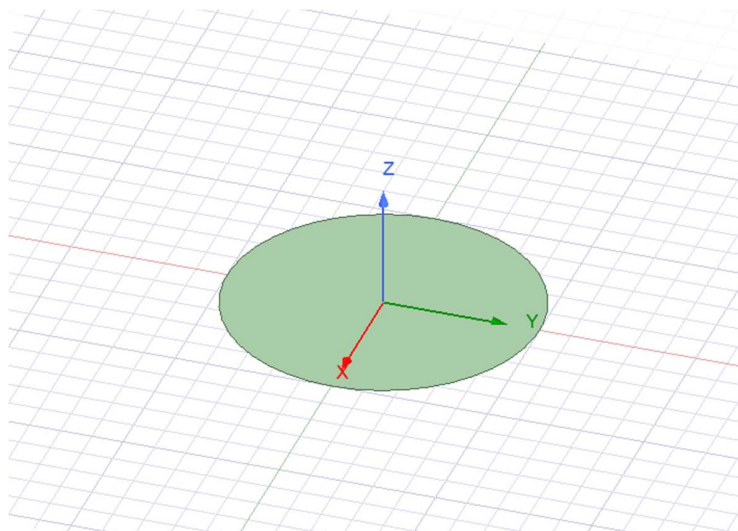
Las herramientas de dibujo de las figuras planas son análogas a las herramientas de creación de volumen. La diferencia radica en que en vez de crear un elemento de 3D, se crea un elemento bidimensional sobre un plano determinado. Para crear una figura sobre un plano determinado se selecciona un punto sobre el plano, seguidamente se arrastra el curso sobre el área de trabajo para determinar las dimensiones de la figura. Al soltar el curso la figura se crea automáticamente sobre el plano. Como demostración de las herramientas de dibujo se crea una figura de ejemplo sobre el plano de trabajo predeterminado x-y.

Figura 26. **Dibujo de un plano rectangular**



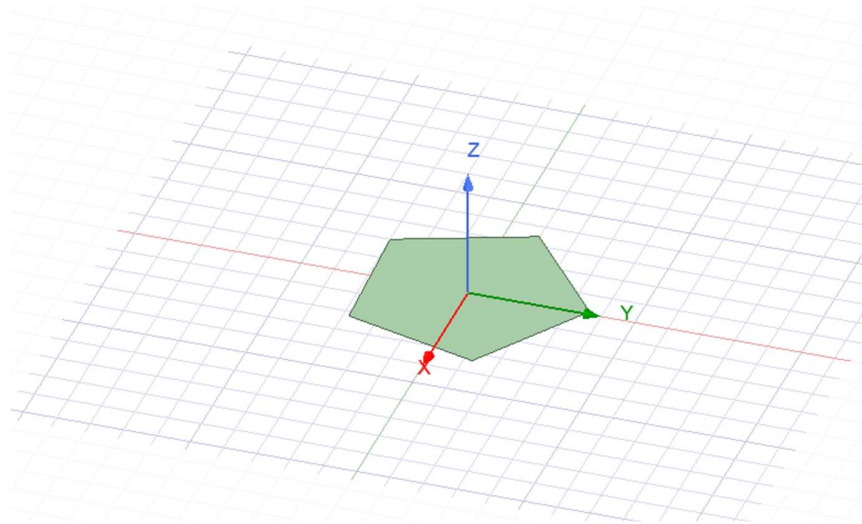
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 27. **Dibujo de un círculo**



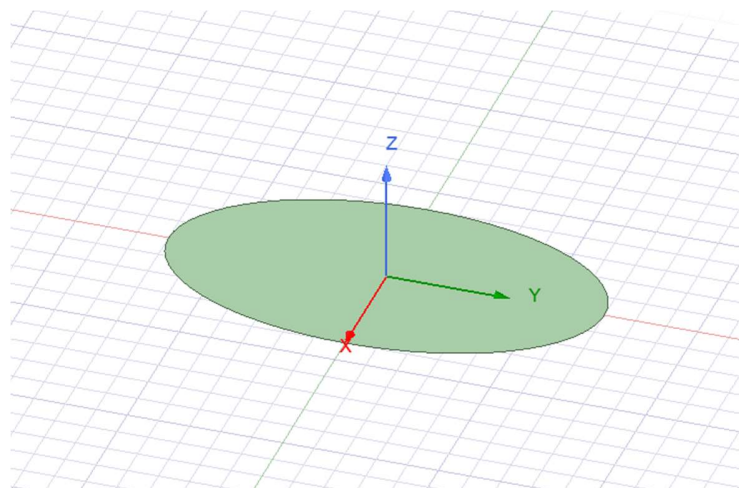
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 28. **Dibujo sobre un polígono regular**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 29. **Dibujo de una elipse**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

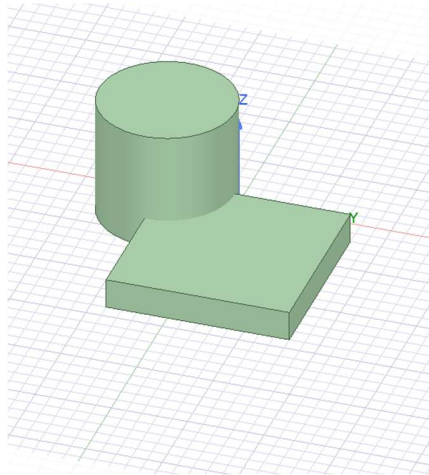
2.1.1.3.3. Operaciones

Las operaciones entre elementos se utilizan para modificar elementos volumétricos o figuras planas previamente creadas. De esta forma se puede crear cualquier tipo de figura no predefinidas por HFSS.

Las operaciones entre elementos que más se utilizaran en este curso son: unir, substraer e intersección. La operación de unir nos permite seleccionar dos o más elementos para generar un nuevo elemento, este nuevo objeto adquirirá la forma de la suma de todos los elementos seleccionados. La herramienta de substraer nos permite crear un nuevo objeto con la forma de uno de los elementos seleccionados, eliminando el área del segundo elemento sobrepuesto. Realizar la operación de interacción nos permite crear un nuevo objeto o elemento con la forma y área de intersección de dos o más elementos seleccionados. Las operaciones entre elementos únicamente modifican áreas y volúmenes, no modifican posición.

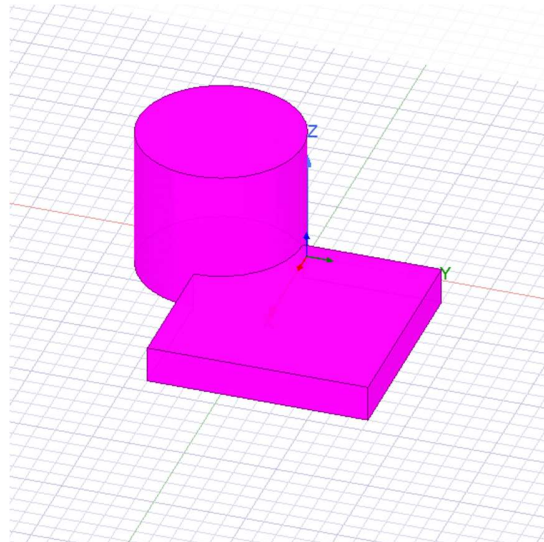
Como ejemplo de las operaciones entre elementos, se creará un cilindro y una caja, donde sobre ellos se aplicarán las distintas operaciones entre elementos.

Figura 30. **Figuras sobrepuestas de una caja y un cilindro**



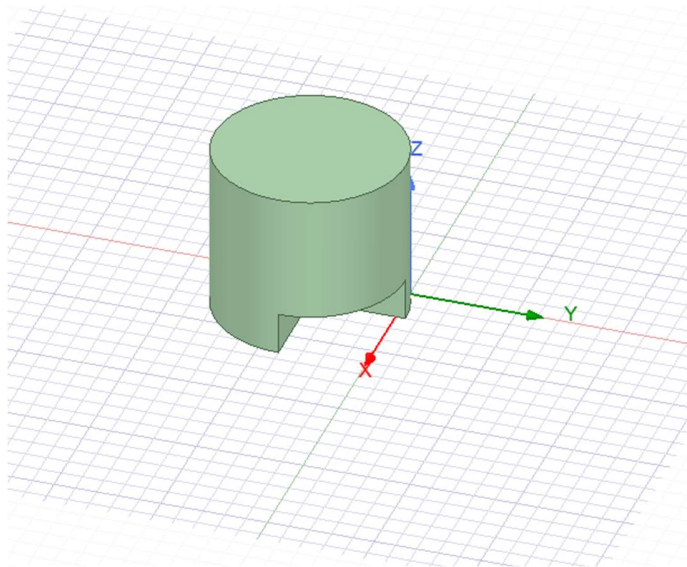
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 31. **Unión de un cilindro con una caja rectangular**



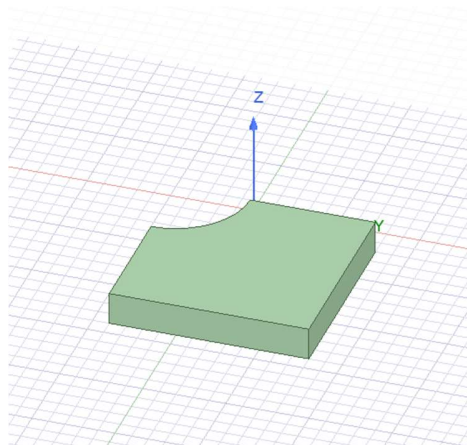
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 32. **Sustracción de una caja rectangular sobre un cilindro**



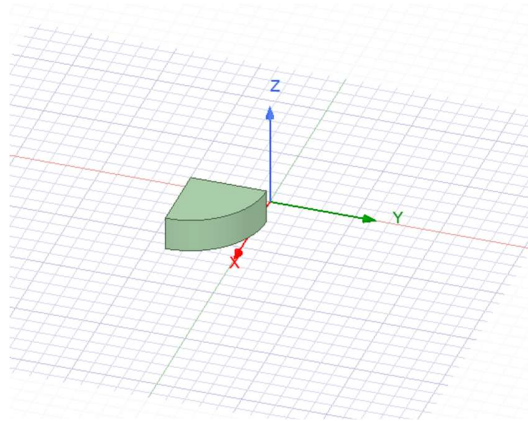
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 33. **Sustracción de un cilindro sobre una caja rectangular**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 34. **Intersección de un cilindro y una caja rectangular**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

2.1.1.4. Materiales, puertos y límites

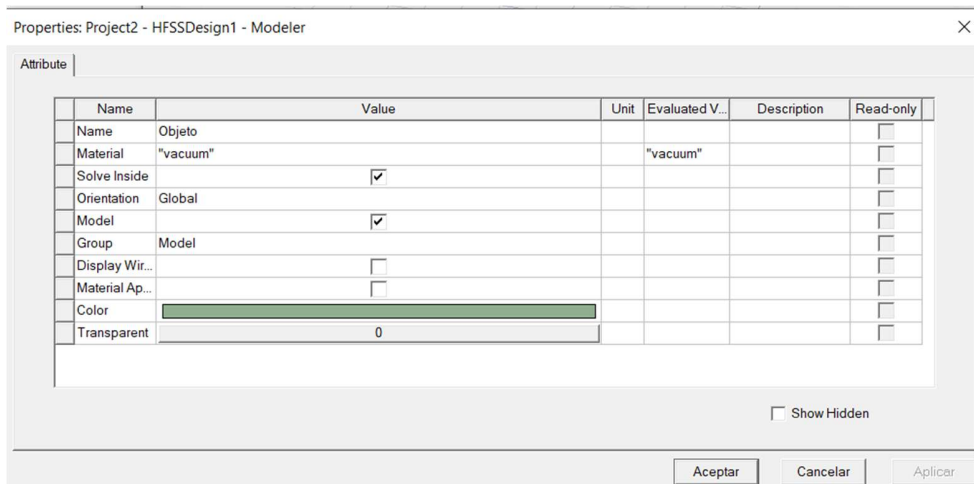
En el momento que nosotros desarrollamos un modelo 3D de la antena, es necesario establecer los materiales, puertos de alimentación y límites. Al momento de seleccionar el material de cada elemento, el tipo de alimentación o puerto y los límites de los objetos, establecemos las condiciones de los sistemas de ecuaciones que se utilizara para la simulación. Cuando hablamos de definir límites en la simulación, hablamos sobre las condiciones de contornos para cada región u objeto que se tomara en cuenta en el método de elementos finitos al simular.

2.1.1.4.1. Materiales

La elección del material para el objeto nos permitirá caracterizar ese objeto, estableciendo las propiedades y parámetros del volumen seleccionado.

Existen diferentes materiales dentro el gestor de materiales de HFSS. Dependiendo del dispositivo a desarrollar podemos seleccionar entre sustratos dieléctricos, metales, plásticos, elementos comunes y entre otros. En el momento de seleccionar el objeto, en la ventana de modelo se puede visualizar la opción de material. Por defecto todos los objetos volumétricos creados están definidos como objetos de vacío.

Figura 35. **Venta de modelo del objeto**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Como se puede ver en la figura 36 la casilla de material esta predefinida como vacío. Para cambiar el material del objeto se selecciona la casilla del material. Instantáneamente nos desplegara la venta de gestión de materiales y nos mostrara la lista de materiales seleccionables.

Figura 36. Venta de gestor de materiales de HFSS

The screenshot shows the 'Select Definition' window for materials in HFSS. It includes a search bar at the top and a table of material properties. The table columns are: Name, Location, Origin, Relative Permittivity, Relative Permeability, Bulk Conductivity, Dielectric Loss Tangent, Magnetic Loss Tangent, Magnetic Saturation, Lande G Factor, Delta H, Mass Density, and T. The first row is highlighted in blue.

Name	Location	Origin	Relative Permittivity	Relative Permeability	Bulk Conductivity	Dielectric Loss Tangent	Magnetic Loss Tangent	Magnetic Saturation	Lande G Factor	Delta H	Mass Density	T
FR4_epoxy	SysLibrary	Materials	4.4	1	0	0.02	0	0	2	0	1900	None
gallium_arsenide	SysLibrary	Materials	12.9	1	0	0	0	0	2	0	5300	None
GE GETEK ML200/RG200 (tm)	SysLibrary	Materials	3.9	1	0	0.012	0	0	2	0	0	None
GIL GML1000 (tm)	SysLibrary	Materials	3.12	1	0	0.005	0	0	2	0	0	None
GIL GML1032 (tm)	SysLibrary	Materials	3.2	1	0	0.003	0	0	2	0	0	None
GIL GML2032 (tm)	SysLibrary	Materials	3.2	1	0	0.0029	0	0	2	0	0	None
GIL MCS (tm)	SysLibrary	Materials	3.2	1	0	0.014	0	0	2	0	0	None
glass	SysLibrary	Materials	5.5	1	0	0	0	0	2	0	2500	None
glass_PTFEneif	SysLibrary	Materials	2.5	1	0	0.002	0	0	2	0	0	None
gold	SysLibrary	Materials	1	0.99996	4100000siemens/m	0	0	0	2	0	19300	None
graphite	SysLibrary	Materials	1	1	70000siemens/m	0	0	0	2	0	2250	None
HDPE plastic	SysLibrary	Materials	2.3	1	0	0.0005	0	0	2	0	0	None
HyperV_R1755V	SysLibrary	Materials	4.4	1	0	0.016	0	0	2	0	0	None
Indium	SysLibrary	Materials	1	1	6440000siemens/m	0	0	0	2	0	0	None

Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

En la figura anterior podemos ver una pequeña muestra de la cantidad de materiales dentro de HFSS. En el catálogo de materiales podemos encontrar los siguientes: aire, FR4, aluminio, cerámica y materiales Rogers. El gestor de materiales nos muestra las propiedades físicas de cada material como la permitividad, permeabilidad, tangente de pérdida y de más. Los materiales más comunes que se utilizara en el diseño de antenas para el sustrato dieléctrico son FR4 y Rogers RT/Duroid, para este trabajo cuando definamos una región abierta de radiación se definirá como aire.

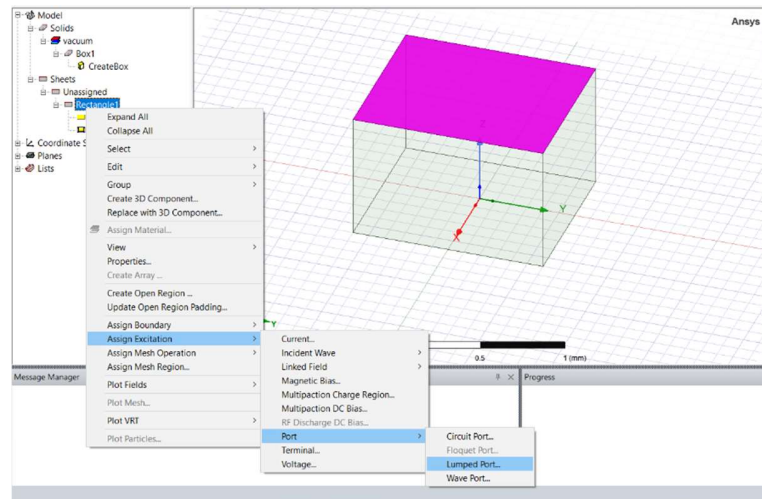
2.1.1.4.2. Puertos

Para la simulación de elementos de microondas es necesario definir un componente que tome el rol de fuente de energía. Para esto se definen los elementos de excitación en HFSS. Un elemento o componente de excitación define un objeto del modelo como fuente de campos electromagnéticos. Existen diferentes tipos de elementos de excitación que se pueden establecer para una simulación.

- Puertos de ondas.
- Puertos agrupados.
- Puertos Floquet.
- Terminal.
- Onda incidente.
- Campos vinculados.
- Fuentes actuales.
- Fuentes de voltaje.
- Fuente de polarización magnética.

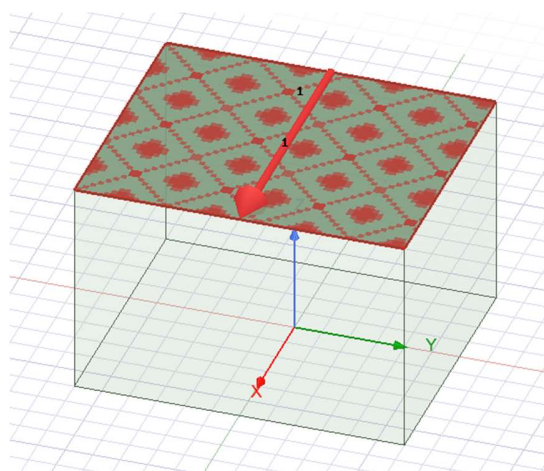
Para simular elementos *microstrip* se trabajará únicamente con el elemento definido como puerto agrupado. Los puertos agrupados son los tipos de excitación más utilizados para la simulación de componentes *microstrip*. Los puertos agrupados generan campos y parámetros S, Y, Z, pero no brindan ninguna información de gamma o impedancia de onda. Las opciones de configuración de los puertos agrupados van a variar según el tipo de solución que se trabajara en la simulación. Si se trabaja con la solución tipo modo o terminal, al momento de definir un puerto nos mostrara una ventana emergente distinta para cada tipo de solución. Para los objetivos de este trabajo las dos soluciones son igualmente funcionales, tomando en cuenta que una define una línea de integración para la fuente de excitación y la otra se basa en planos de referencia para la fuente de excitación.

Figura 37. Asignación de excitación



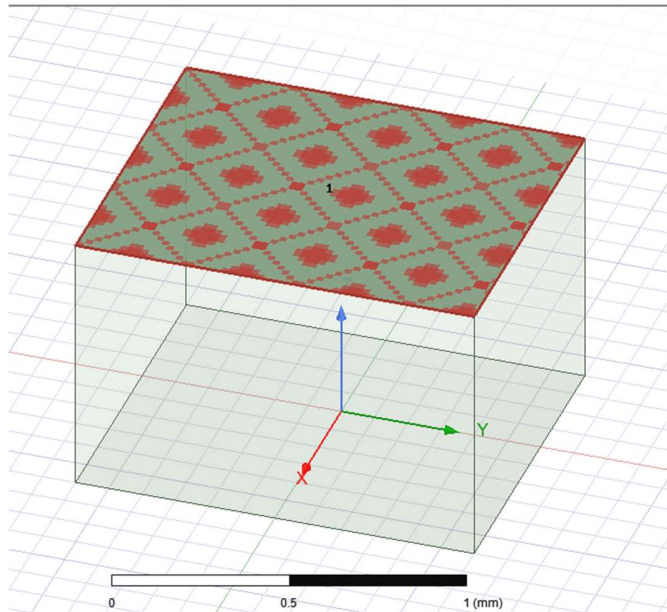
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 38. Línea de integración para una solución modal



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 39. **Plano de referencia para elemento de excitación**

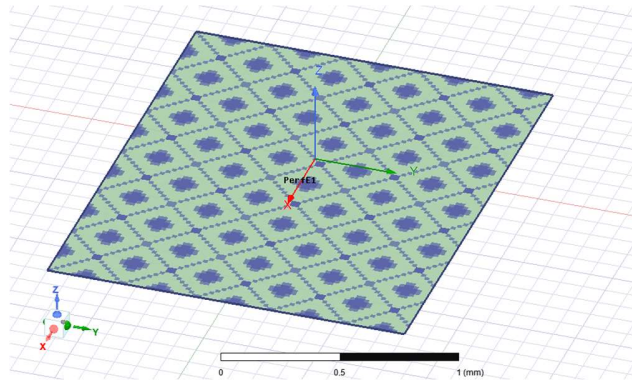


Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

2.1.1.4.3. Límites

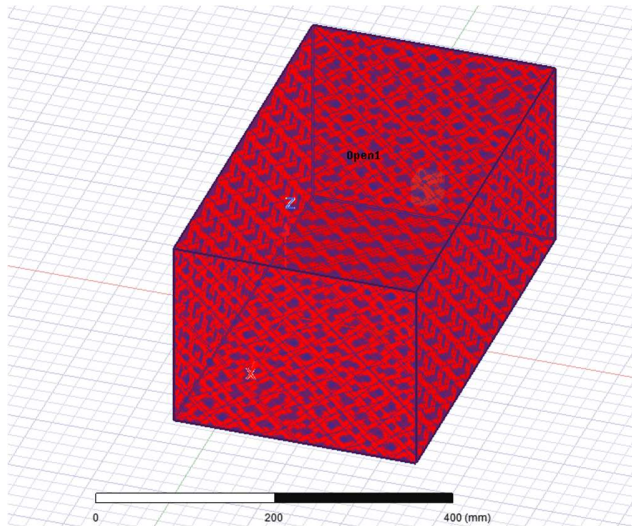
En HFSS cuando asignamos un límite a un objeto definimos las condiciones de contorno que limita al objeto del modelo 3D de nuestro dispositivo. Asignando el límite a un elemento, separamos las condiciones de un objeto de otro. Como, por ejemplo: cuando queremos definir un objeto bidimensional como conductor, seleccionamos el objeto como E perfecto. Cuando definimos un objeto como E perfecto asignamos un límite natural donde se puede propagar los campos eléctricos. El límite E perfecto se utiliza para modelar un objeto del modelo, como conductor eléctrico perfecto. Los mismo sucede para H perfecto, pero para el caso de conductor magnéticos perfecto.

Figura 40. **Visualización de limite E perfecto sobre objeto**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 41. **Visualización de limite de un objeto de región abierta**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

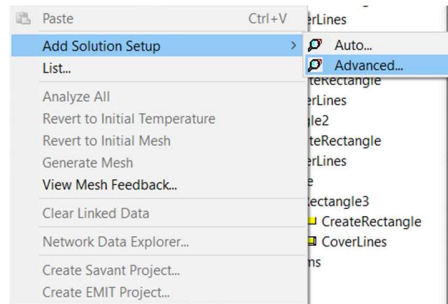
Como se puede ver en la figura 41 y figura 42, cada tipo de limite es representado de formas distintas. Como se mencionó anteriormente los limites

define el comportamiento de los campos en la simulación. Para la simulación correcta de un dispositivo es necesario entender también que los límites definen dos tipos de modelos esenciales para la simulación. El modelo cerrado y modelo abierto, el modelo cerrado representa un volumen con una solución donde la energía no se escapa, excepto por una terminal. En los modelos abiertos se permite que la energía se irradie. Para la simulación de antenas el modelo abierto es el utilizado.

2.1.1.5. Configuración y barrido de frecuencia

Cuando el modelo 3D de nuestra antena *microstrip* está terminado, como siguiente paso es definir las configuraciones de simulación y sobre qué dominio se va a simular el dispositivo. En el gestor del proyecto de HFSS podemos ver la opción de crear un elemento de análisis que nos permite establecer la configuración de la simulación y sobre qué rango de frecuencia se va a evaluar la antena.

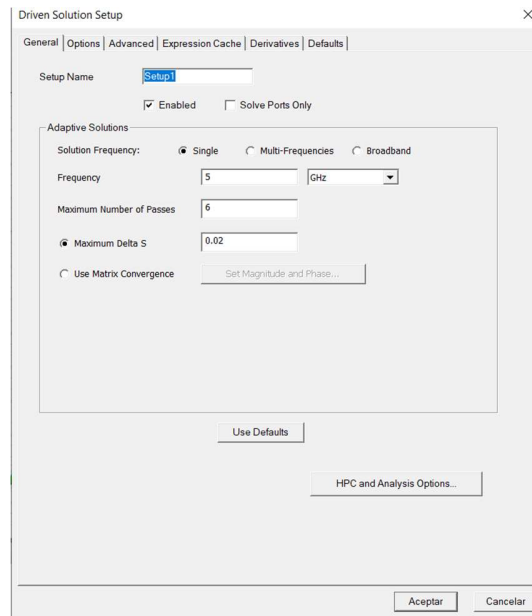
Figura 42. **Opción de análisis para configuración de simulación**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

En la figura 43 se muestran las opciones para agregar una configuración avanzada para la simulación. En la ventana de configuración establecemos la frecuencia de operación de la antena y el número máximo de pases. La opción de número máximo de pases determina el número de iteraciones adaptativas que HFSS realizara en la simulación y establece el criterio de parada para la simulación.

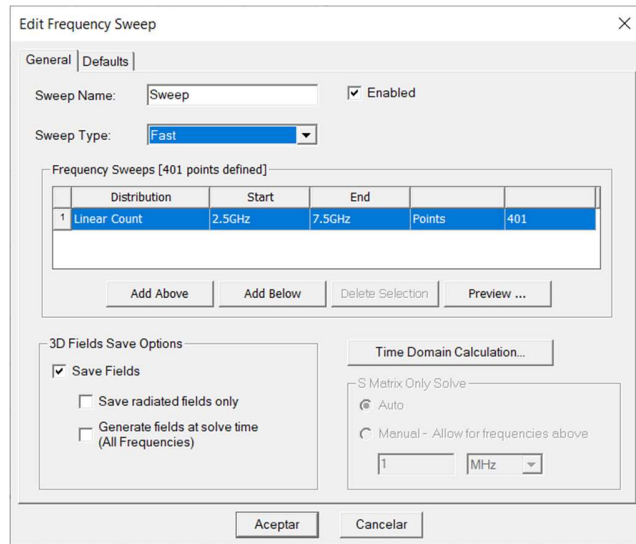
Figura 43. **Ventana de configuración de la solución de control**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

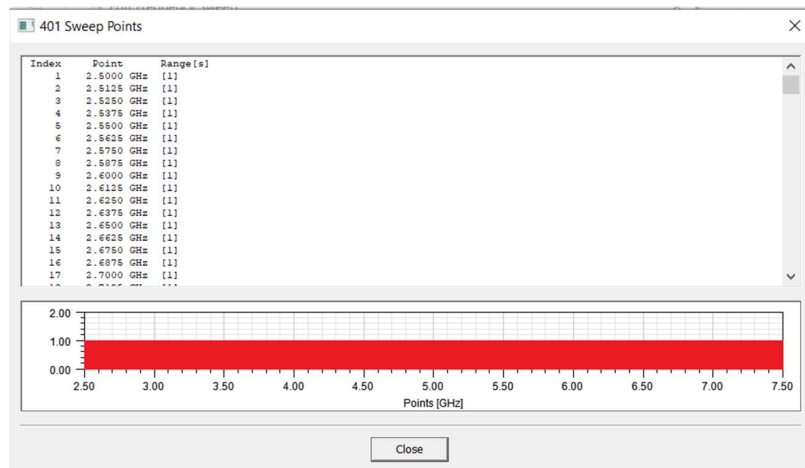
En el momento que se establece una configuración de control para la simulación, nos desplegará una nueva ventana que nos permitirá definir el rango del barrido de frecuencia, donde la antena será evaluada, para el cálculo de todos sus parámetros y resultados. Esta venta nos permite establecer en que valor de frecuencia iniciara el análisis de la antena y en que frecuencia terminara. En esta ventana también podemos seleccionar diferentes tipos de barridos de frecuencias. El tipo de barrido que utilizaremos a lo largo de este trabajo es el barrido de frecuencia rápido. La ventana de edición de barrido de frecuencia nos da la opción de una visualización previa, de todos los valores de frecuencia que se utilizaran en la simulación.

Figura 44. **Ventana de edición de barrido de frecuencia**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 45. **Visualización previa de los valores de frecuencia**

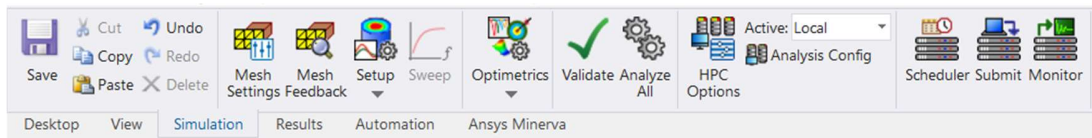


Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

2.1.1.6. Resultados

Cuando ya se elaboró el modelo 3D de la antena, se definió cada uno de sus materiales y límites, y se estableció una configuración de análisis con su barrido de frecuencia. El último paso es validar y realizar el análisis sobre todo el proyecto. Validar el proyecto significa realizar una revisión automática de todo lo anteriormente establecido y que este correctamente definido. En el caso que alguna configuración o valor genere un error en la simulación, la validación notificara de ese error o genera una alarma de cambio de configuración. En la misma pestaña del botón de validar, podemos encontrar el botón de analizar todo. Este botón de analizar todo nos permite iniciar con la simulación.

Figura 46. Pestaña de simulación, botón de validar y analizar todo



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Finalizando el análisis de todo el proyecto, HFSS nos notificara de que la simulación a concluido de forma normal. En este momento HFSS en memoria ya cuenta con una representación de todas las propiedades de la antena y el comportamiento y desarrollo de sus campos.

Para visualizar todos estos resultados, nos dirigimos a al gestor de proyecto, a la opción de resultados. En la opción de resultados ya podemos seleccionar los resultados que nos interesan y seleccionar en que forma los queremos visualizar. Por ejemplo: una antena que ya se simulo y se desea saber

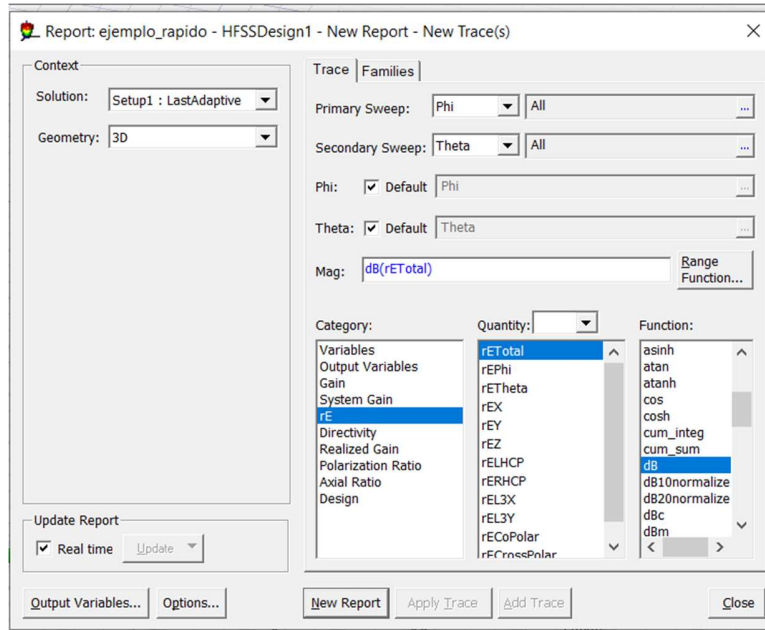
el diagrama de radiación para campos lejanos. Podemos seleccionar la opción de resultados, dirigirnos a las opciones de campos lejanos y especificar el parámetro a visualizar, como el campo eléctrico real, ganancia, entre otros.

Los resultados se pueden visualizar de dos formas principalmente: tablas y graficas. Una tabla nos mostrara todos los valores de la curva características del resultado de interés. En cambio, una gráfica, realizara una gráfica de los valores de la tabla del resultado de interés. En la opción de resultados podemos encontrar distintas categorías de resultados.

- Informe de datos de solución modal.
- Informe de campos.
- Informe de prueba de emisiones.
- Informe de campos lejanos.
- Informe de parámetros de antena.

Cada una de las categorías anteriormente mencionadas desplegara distintas opciones de visualización de resultados. Cada visualización de resultados abrirá una nueva venta para especificar el parámetro o característica que se desea conocer. En esta venta se puede detallar que parámetro se va a visualizar, con que dimensiones se va a graficar y otras opciones del gráfico.

Figura 47. **Ejemplo de ventana de resultados tipo grafica**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Como se ve en la figura anterior, podemos especificar la categoría o el tipo de variable a mostrar, la cantidad y en función de o su dimensión.

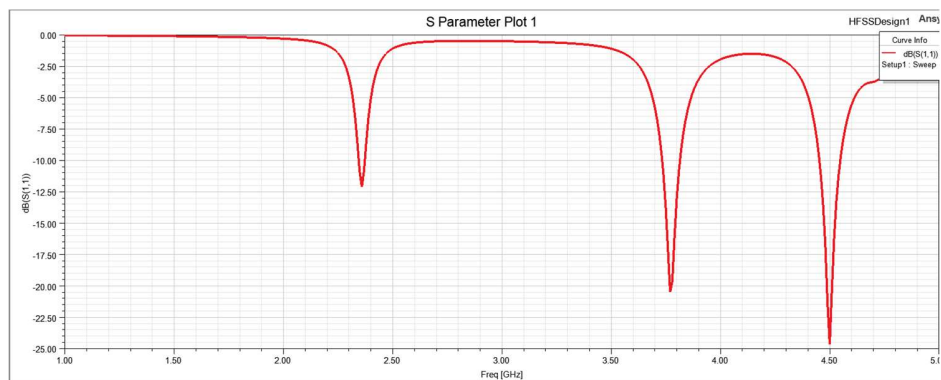
2.1.1.7. **Gráficos y animaciones**

Como se mencionó en la sección anterior, los resultados se pueden visualizar en forma de grafica. La visualización por medio de gráficas es una de las formas más utilizadas, ya que nos exhibe el comportamiento del parámetro en cada uno de los valores de las frecuencias establecidas.

En el apartado de graficas tenemos dos opciones: graficas 2D y graficas 3D. En cada uno de los tipos de graficas se puede establecer el tipo de sistemas

de coordenadas a utilizar, como las coordenadas cartesianas, cilíndricas y esféricas. Otra ventaja de las gráficas es que cuando uno coloca el cursor sobre la función graficada, esta nos muestra las coordenadas del punto marcado.

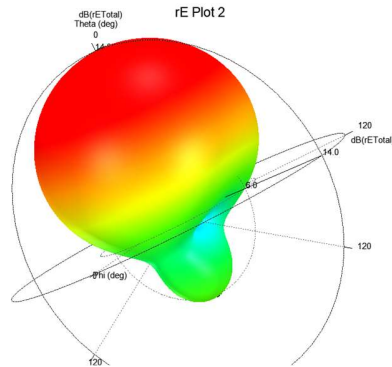
Figura 48. **Resultado mostrado en una gráfica 2D**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

En la figura 49, podemos ver el resultado del análisis para el parámetro S de una antena. La línea roja, representa el comportamiento del parámetro S en función de la frecuencia. Como podemos notar, solo la imagen de la función graficas ofrece mucha información. Para el caso de resultados graficados en 3D, también nos ofrece una enorme cantidad de información de tipo espacial.

Figura 49. **Resultado mostrado en una gráfica 3D**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

La grafica 3D nos ofrece una visualización de tipo espacial, que nos permite modificar el ángulo de la cámara para ver todo lo representado en la gráfica.

Otra forma de visualizar lo analizado por el simulador, es la opción de superposiciones de campo. En esta opción HFSS sobrepone una visualización de los campos en el modelo 3D de la antena. El análisis realizado por el simulador nos permite tener una representación de los campos por su magnitud o forma vectorial sobre el modelo 3D. Este tipo de visualización se puede ver en las figuras de la siguiente sección, donde podemos graficar la magnitud del campo eléctrico y magnético. También podemos sobre poner una representación del campo vectorial en el modelo 3D. Este tipo de representación cuenta con la característica de la animación. Una animación de las superposiciones de campos nos permite ver la evolución de la magnitud o campo vectorial en función del tiempo o cambio de fase. Se puede tener una idea de la animación de los campos, gracias a las figuras 64, 65 y 66.

2.1.2. Metodología de diseño y guía de simulación

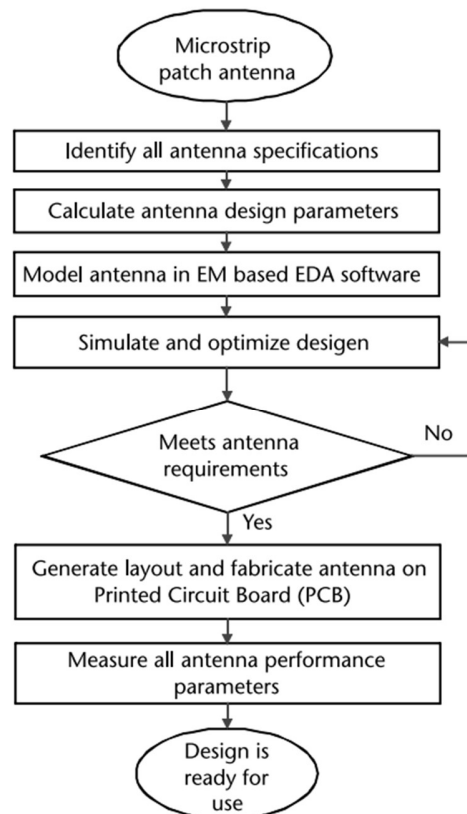
Para diseñar una antena *microstrip* podemos dar seguimiento a la metodología presentada por Pandey (2019) para el diseño de antenas. Teniendo una fórmula metodológica para el diseño y análisis de antenas, podemos derivar una guía para la simulación de antenas *microstrip* de parche circular y rectangular.

2.1.2.1. Metodología de diseño de antenas

La metodología presentada por Pandey (2019) es utilizada para el diseño y fabricación de antenas *microstrip*, describiendo el proceso de diseño, hasta el proceso de fabricación. La metodología está conformada por la siguiente fórmula metodológica:

- Identificar todas las especificaciones de la antena.
- Calcular los parámetros de diseño de la antena.
- Modelo de antena en *software* EDA basado en EM.
- Simule y optimice el diseño.
- Cumple con los requisitos de la antena.
- Genere el diseño y fabrique la antena en la placa de circuito impreso.
- Mida todos los parámetros de rendimiento de la antena.
- El diseño está listo para usar.

Figura 50. Metodología de diseño y fabricación de antenas *microstrip*



Fuente: Anil Pandey (2019). *Practical Microstrip and Printed Antenna Design*.

2.1.2.2. Guía de simulación de antenas

La siguiente guía describirá cada uno de los pasos que se debe realizar para la simulación de antenas *microstrip*. Esta guía está diseñada para la simulación de antenas en el *software* HFSS. Siguiendo la metodología anteriormente descrita, podremos especificar los pasos necesarios para el modelado de la antena, y su respectiva simulación. Esta guía enumera cada uno

de los pasos para la simulación de la antena. Los pasos para la simulación de antenas de parche rectangular y circular son los siguientes:

- Paso 1: Identificar las especificaciones o requisitos de la antena.
- Paso 2: Calcular la geometría de la antena de parche.
- Paso 3: Calcular el punto de activación de la antena.
- Paso 4: Crear modelo 3D de la antena.
 - Crear objeto 2D de tipo plano para definir el plano de tierra.
 - Crear objeto tipo volumen para representar el sustrato dieléctrico.
 - Crear objeto 2D de tipo plano para definir la geometría del parche.
 - Especificar el tipo de solución para el simulador.
 - Crear objeto 2D para establecer un objeto de tipo puerto.
 - Establecer el límite tipo E perfecto para el plano de tierra y parche.
 - Establecer el material del sustrato dieléctrico.
 - Crear regio abierta para el mecanismo de radiación.
- Paso 5: Agregar configuración y barrido de frecuencia.
 - Establecer frecuencia de operación.
 - Definir tipo de barrido de frecuencia.
 - Especificar rango de frecuencia y cantidad de puntos a evaluar.
- Paso 6: Validar simulación.
- Paso 7: Analizar el proyecto para iniciar el proceso de simulación.
- Paso 8: Agregar representación gráfica de resultados.
 - Seleccionar categoría de resultados.
 - Seleccionar tipo de visualización o grafica de resultados.
- Paso 9: Sobre poner representación de los campos electromagnéticos
 - Seleccionar visualización de la magnitud o campo vectorial de los campos.
- Paso 10: Crear reporte del resultado de la simulación y hoja de especificaciones de la antena.

3. SIMULACIÓN DE ANTENAS *MICROSTRIP* DE PARCHE

3.1. Ejemplos de simulación de antenas *microstrip* de parche

Como referencia para el estudiante de ingeniería se elaborarán distintas simulaciones de carácter demostrativo de componentes *microstrip* y antenas *microstrip* tipo parche. Iniciaremos realizando la simulación de algunos componentes que serán de gran utilidad: línea de transmisión *microstrip* rectangular, transformador de cuarto de onda, acople de ramal. Para el tema de antenas *microstrip*, se simulará antenas de parche rectangular y circular, ambos en distintas configuraciones.

3.1.1. Simulación de algunos componentes *microstrip*

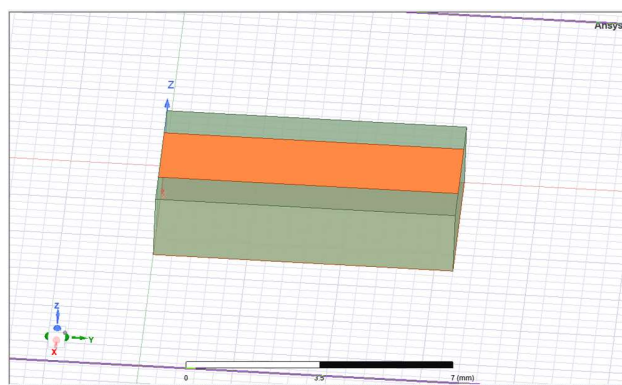
En esta sección se realizará la simulación de tres componentes *microstrip*. El proceso de simulación no varía mucho entre componentes, ya que todos son similares, excepto por la geometría de la lámina o parche metálico sobre el sustrato dieléctrico.

3.1.1.1. Línea *microstrip* de 50 Ω

Para el cálculo de una línea *microstrip* se pueden encontrar distintas herramientas en línea, que se pueden utilizar para ahorrar tiempo en el proceso de diseño.

La descripción de la línea *microstrip* a simular es la siguiente: Simular una línea de transmisión *microstrip* utilizando como sustrato FR4, para una frecuencia de 10 GHz, con espesor del sustrato de 1.6 mm y una impedancia de 50 Ω .

Figura 51. **Modelo 3D de la línea de transmisión *microstrip***



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Tabla III. **Especificaciones de simulación de antena**

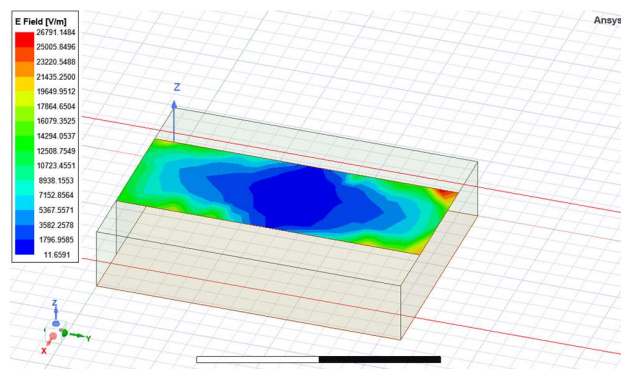
Parámetro	Valor
Ancho	3.0589 mm
Largo	8.00 mm
Constante dieléctrica relativa	4.4
Sustrato dieléctrico	FR4
Espesor del sustrato	1.6 mm
Impedancia de línea	50 Ω
Frecuencia de resonancia	10 GHz
Tipo de solución	Modal

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Ejecutando la simulación, podemos ver las variaciones en los distintos parámetros o el comportamiento de la línea de transmisión. La representación

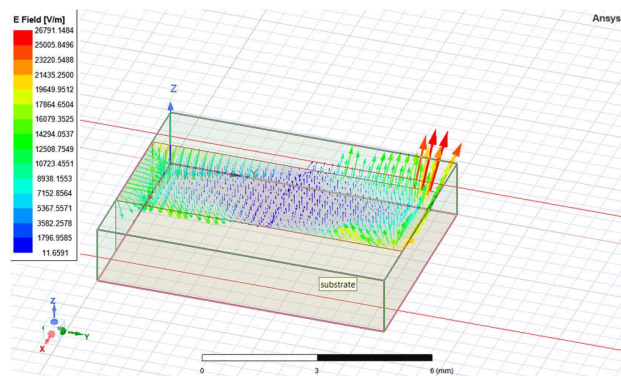
gráfica del comportamiento del campo eléctrico y magnético es uno de los resultados más vistosos y que otorgan más información a simple vista.

Figura 52. **Magnitud del campo eléctrico sobre la línea *microstrip***



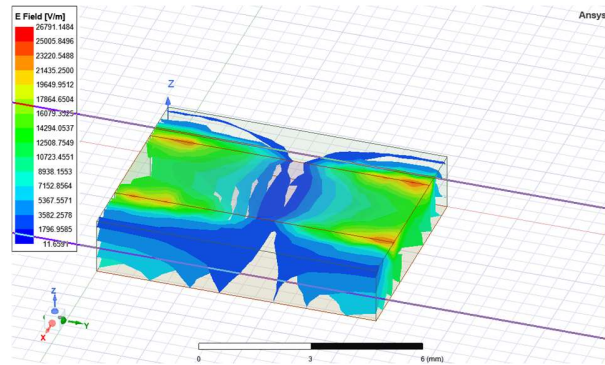
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 53. **Vectores del campo eléctrico sobre la línea *microstrip***



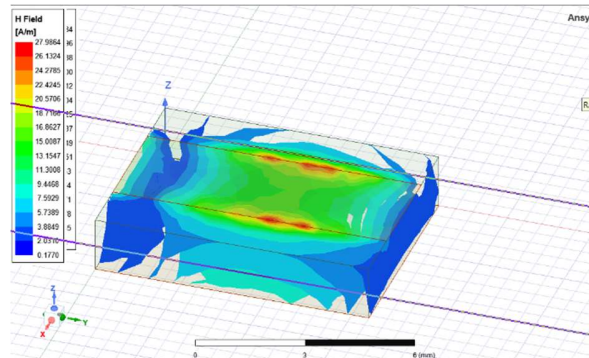
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 54. **Comportamiento del campo eléctrico**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 55. **Comportamiento del campo magnético**

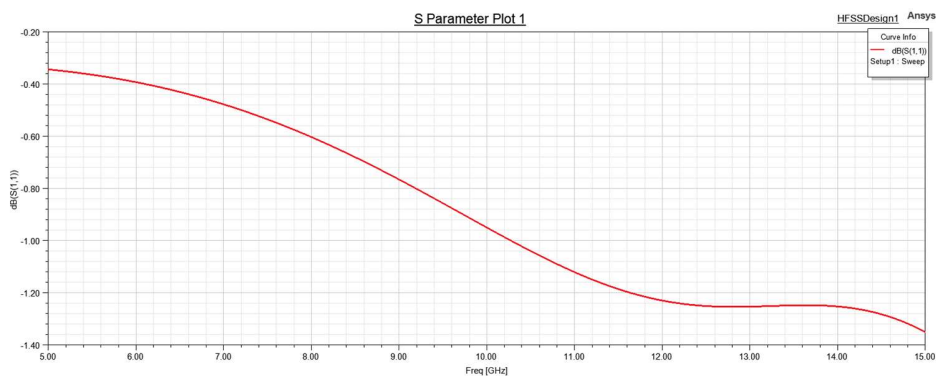


Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Uno de los parámetros fundamentales al momento de diseñar componentes *microstrip* es el parámetro S (perdida de retorno) y VSWR. El parámetro S y el valor de VSWR son valores que están en función de la frecuencia de la impedancia de entrada, y estos valores son sumamente importantes para componentes RF. Para determinar físicamente estos dos valores es necesario

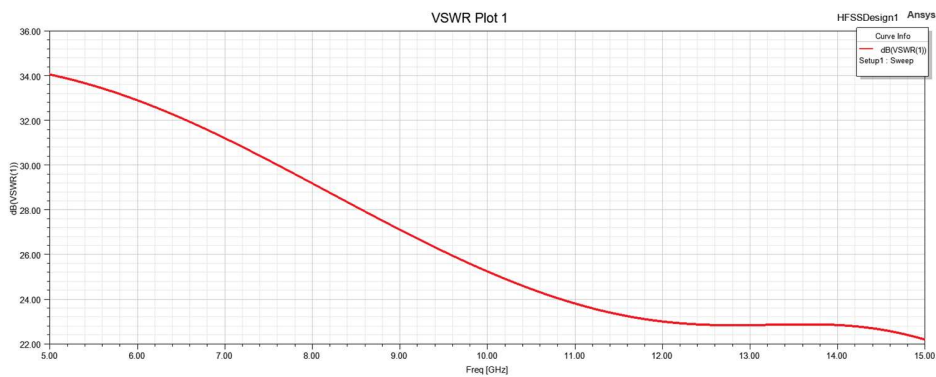
mediar el componente *microstrip* con un VNA. En HFSS podemos graficar ambos valores, como resultado de la simulación.

Figura 56. **Parámetro S de una línea *microstrip* de 50 Ω**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 57. **VSWR para una línea *microstrip***



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

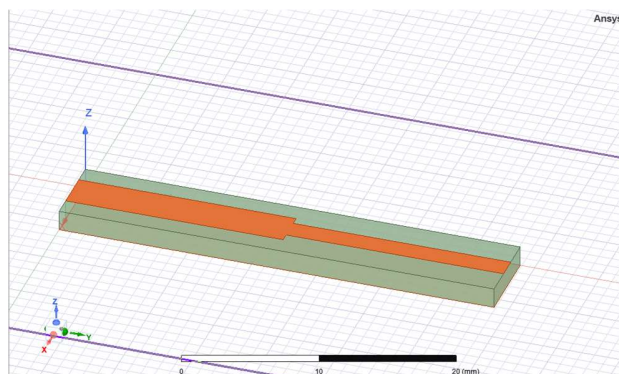
Utilizando el simulador como herramienta de diseño podemos evaluar diferentes propuestas de forma rápida. También nos permite ahorrar tiempo, ya

que podemos realizar modificaciones de forma rápida al prototipo o proyecto, sin la necesidad de construir el diseño para determinar algún fallo o resultado no esperado.

3.1.1.2. Transformador de cuarto de onda

El procedimiento para determinar las medidas y valores del transformador de cuarto de onda se puede encontrar en el libro de Free y Aitchison (2021) . Se simulará un transformador de cuarto de onda para acoplar una impedancia $Z_1 = 50 \Omega$ y otra impedancia de carga $Z_2 = 96 \Omega$, para una frecuencia de 2.48 GHz. Como sustrato utilizaremos FR4 con un espesor de 1.6 mm. De igual forma como en el ejemplo anterior primero realizaremos el modelo 3D del componente, validaremos la simulación y procederemos a analizar el transformador. Como resultado de la simulación podemos ver el comportamiento del transformador en diferentes parámetros.

Figura 58. **Modelo 3D del transformador de cuarto de onda**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

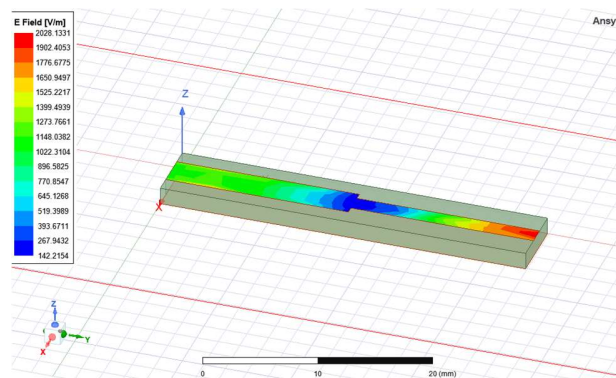
Tabla IV. **Especificaciones del elemento a simular**

Parámetro	Valor
Impedancia de entrada	50 Ω
Impedancia de carga	96 Ω
Impedancia de transformador	69.282 Ω
Longitud de cuarto de onda	16.938 mm
Sustrato dieléctrico	FR4
Constante dieléctrica	4.4
Espesor del sustrato	1.6 mm
Ancho de transformador	1.68 mm
Ancho de línea	3.0589 mm

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

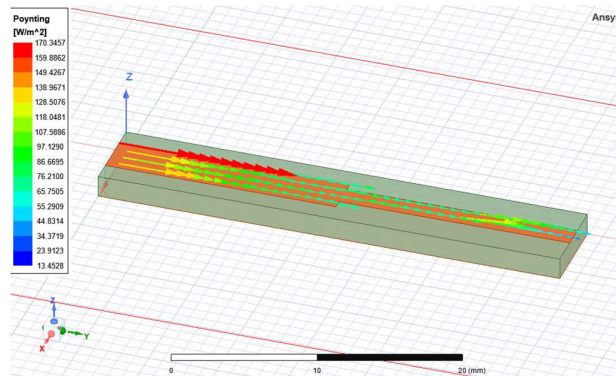
Para este ejemplo solo se revisará la magnitud del campo eléctrico y el vector de Poynting real y densidad de corriente sobre la superficie.

Figura 59. **Magnitud del campo eléctrico**



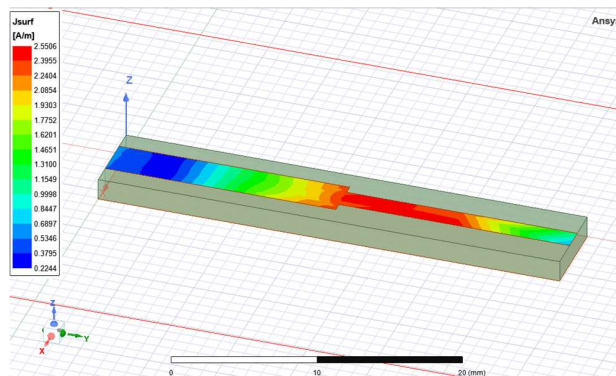
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 60. **Vector de Poynting real sobre el transformador**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 61. **Densidad de corriente superficial del conductor metálico**

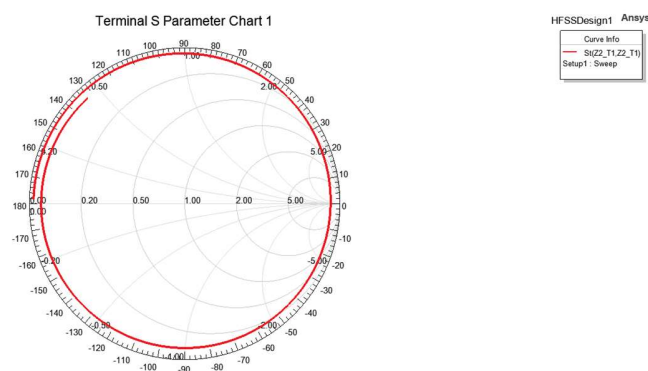


Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Como se pueden ver en las figuras anteriores, es fácil visualizar sobre el elemento *microstrip*. Existen otros tipos de visualizaciones como la temperatura, densidad de corriente, entre otros. Para ver el comportamiento completo del elemento *microstrip*, podemos agregar una animación sobre él. Una animación permite ver la evolución del sistema en función del tiempo.

Los resultados de la simulación nos permiten calcular u obtener diferentes propiedades del dispositivo. En el caso del transformador de cuarto de onda, podemos determinar una carta de Smith.

Figura 62. **Carta de Smith del transformador de cuarto de onda**



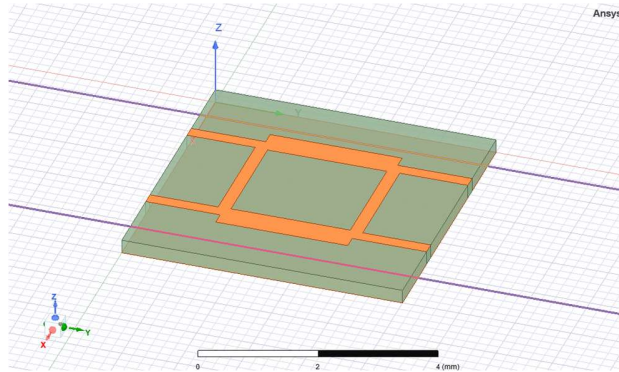
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

3.1.1.3. Acople de ramal

Para la siguiente simulación se tomará los valores obtenidos del ejemplo presentado por Free y Aitchison (2021). Utilizando una frecuencia de 12 GHz con una impedancia de puerto de 50Ω . Trabajando sobre un sustrato de espesor de 0.25 mm y una permitividad relativa de 9.8. Para este ejemplo se demostrará que se pueden realizar estructuras de mayor complejidad.

Como se verá a continuación, es fácil simular un acople de ramal y que este pueda mostrar el comportamiento del campo eléctrico en función del tiempo.

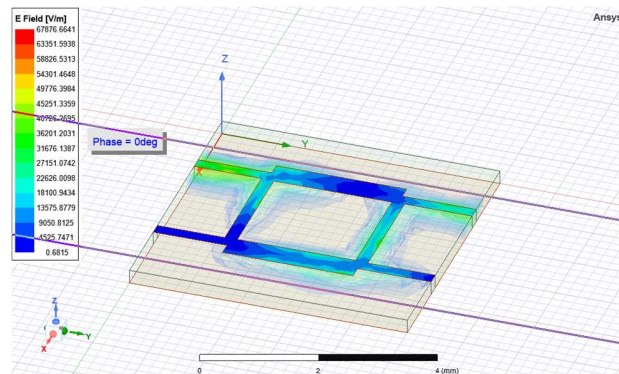
Figura 63. Línea de acople de ramal



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

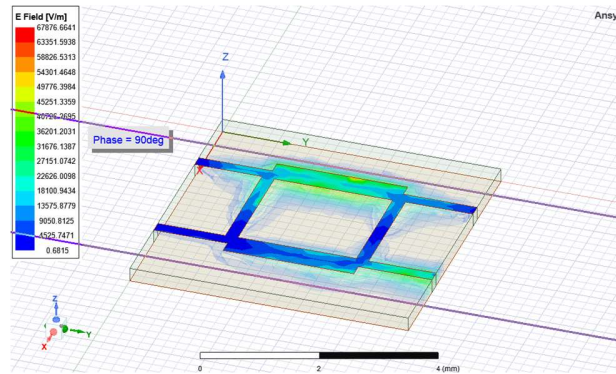
Para ver el comportamiento del elemento simulado en función del tiempo, se toman diferentes capturas de la animación realizada por HFSS.

Figura 64. Campo eléctrico en $t = 0$



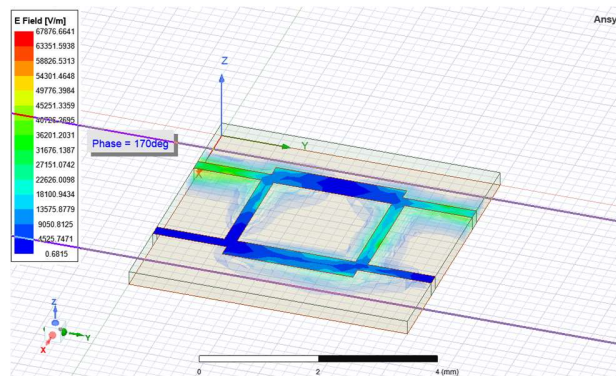
Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 65. Campo eléctrico en $t = t_1$



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Figura 66. Campo eléctrico en $t = t_2$



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

3.1.2. Simulación de antena de parche rectangular

La simulación de antenas *microstrip* se realizará bajo la metodología propuesta por Pandey (2019). Esta metodología se menciona en el capítulo anterior.

- Identificar las especificaciones de la antena.
- Cálculo de los parámetros de diseño de la antena.
- Modelado de la antena en *software* CAD.
- Simular y optimizar el diseño.

Para esta sección se realizará la simulación de una antena *microstrip* de parche rectangular con dos distintos métodos de alimentación.

Las especificaciones para el diseño de la antena son las siguientes:

Tabla V. **Especificaciones de diseño de antena**

Parámetro	Valor
Substrato dieléctrico	FR4 epoxy
Constante dieléctrica	4.4
Espesor del sustrato	1.6 mm
Frecuencia de operación	2.48 GHz
Tipo de alimentación	Alimentación de borde

Fuente: Anil Pandey (2019). *Practical Microstrip and Printed Antenna Design*.

Utilizando el formulario del capítulo 2, calculamos la geometría del parche rectangular para la frecuencia de 2.48 GHz. El proceso de cálculo se realizará en el *software* de matemática Mathcad.

Figura 67. Proceso de cálculo con Mathcad

$$\begin{aligned} \epsilon_r &:= 4.4 \\ f_r &:= 2.48 \text{ GHz} \\ c &:= 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ W &:= \frac{c}{2 \cdot f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{\frac{-1}{2}} = 36.809 \text{ mm} \\ \epsilon_e &:= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W} \right)^{\frac{-1}{2}} = 4.078 \quad \frac{W}{h} = 23.006 \\ \Delta l &:= 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_e + 0.3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} = 0.738 \text{ mm} \\ L &:= \frac{c}{2 \cdot f_r \cdot \sqrt{\epsilon_e}} - 2 \cdot \Delta l = 28.474 \text{ mm} \\ \lambda_0 &:= \frac{c}{f_r} = 12.097 \text{ cm} \\ k_0 &:= \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} = 51.941 \frac{1}{\text{m}} \\ X &:= k_0 \cdot W = 1.912 \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

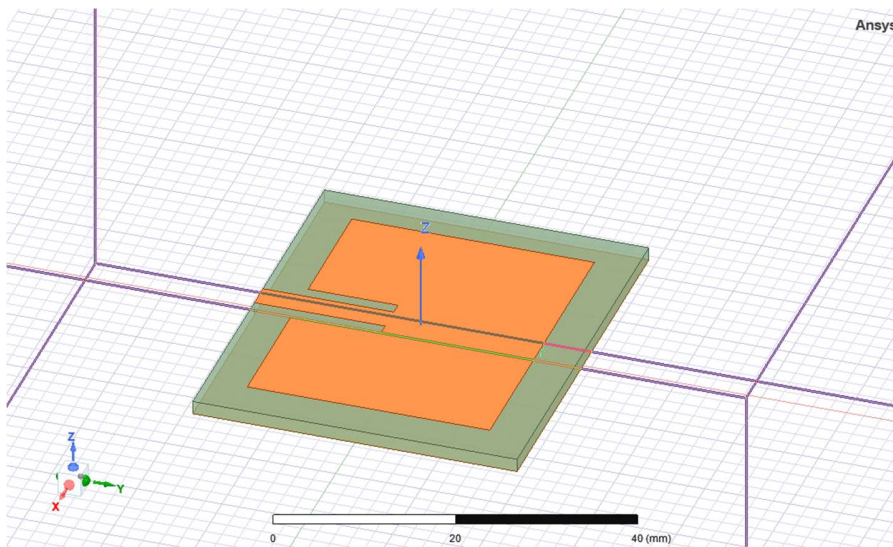
Figura 68. Proceso de cálculo con Mathcad

$$\begin{aligned} X &:= k_0 \cdot W = 1.912 \\ I_1 &:= -2 + \cos(X) + X \cdot \text{Si}(X) + \frac{\sin(X)}{X} \rightarrow 1.1479757280698534064 \\ G_e &:= \frac{I_1}{120 \pi^2} = 9.693 \cdot 10^{-4} \\ W_g &:= 6 \cdot h + W = 46.409 \text{ mm} \\ L_g &:= 6 \cdot h + L = 38.074 \text{ mm} \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

Utilizando el método de alimentación de ranura insertada y la geometría anteriormente calculada, el modelo 3D de la antena queda de la siguiente forma:

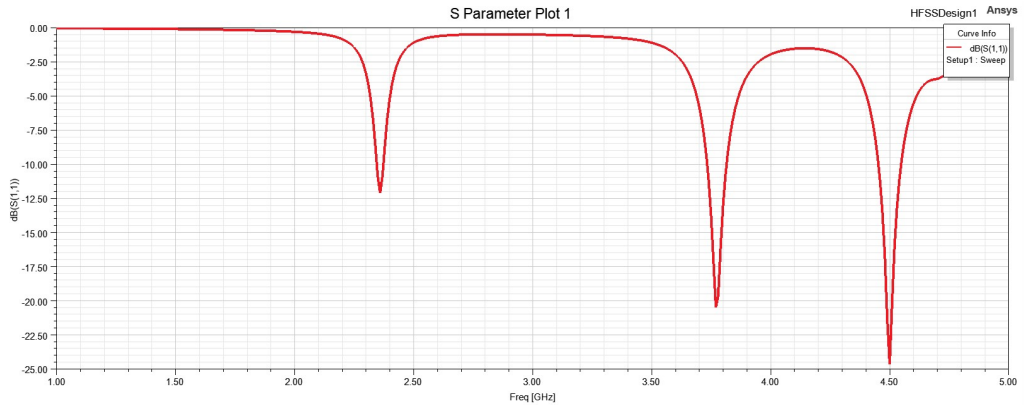
Figura 69. **Ejemplo de antena de parche rectangular**



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Luego de crear el modelo 3D de la antena, definimos los límites y materiales del modelo. Estableceremos un área de simulación para una frecuencia de 2.48 GHz. Como último paso validamos la simulación y analizamos el modelo. Uno de los primeros resultados a visualizar es el parámetro S, en la siguiente figura veremos el desarrollo del parámetro según el barrido de frecuencia establecido para la simulación:

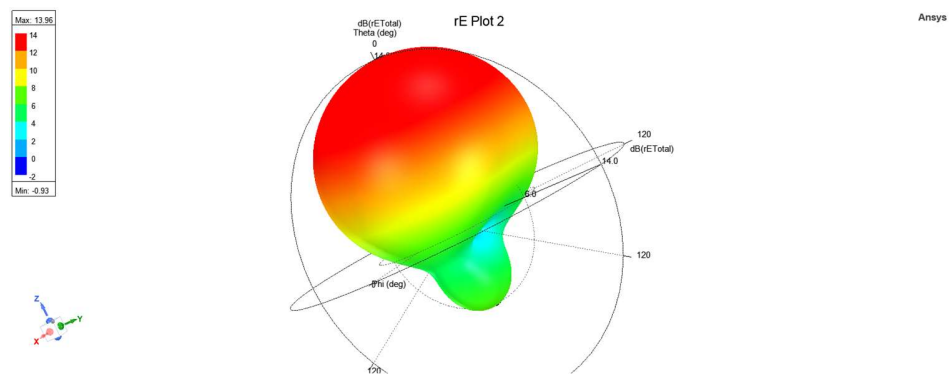
Figura 70. Gráfica de parámetro S de la antenna ejemplo



Fuente: elaboración propia, realizada con las herramientas de Windows.

Otro de los gráficos importantes al momento de simular una antenna es el diagrama de radiación para campos lejanos. Este es igual de fácil de generar con las herramientas de HFSS.

Figura 71. Diagrama de radiación de la antenna de parche rectangular

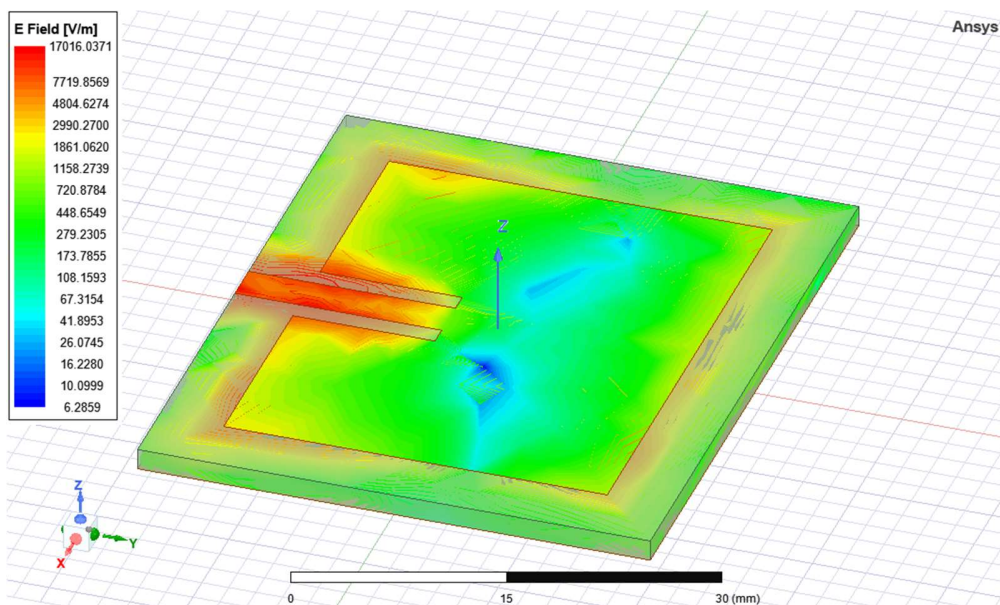


Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

Dependiendo de lo que se solicite investigar sobre el diseño de la antena, se pueden generar más resultados de forma gráfica o en formato de tabla según sea necesario. Igual que en los ejemplos anteriores podemos ver el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos que actúan sobre la antena.

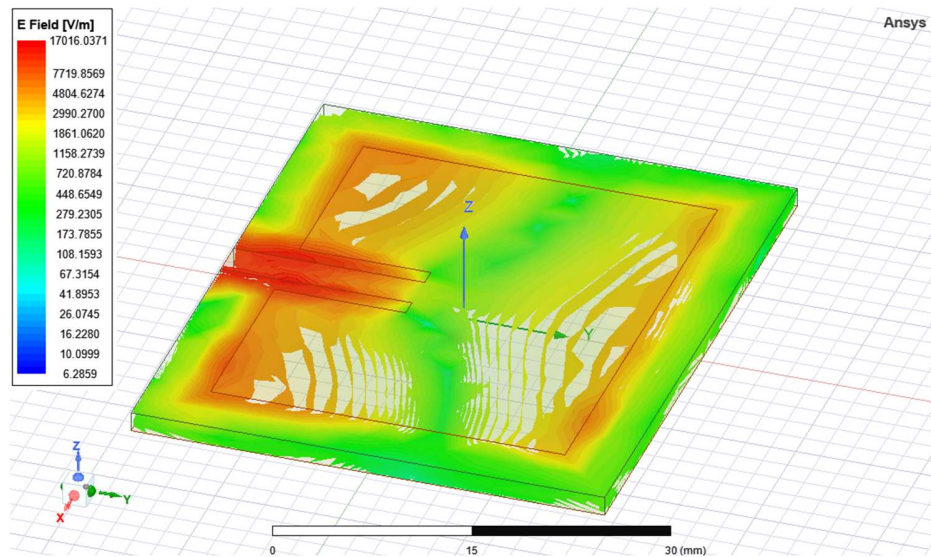
En los gráficos del campo eléctrico y magnético únicamente se muestra el primer modo de resonancia. Si se desea ver los modos de orden superior se deben calcular las frecuencias según el modelo de cavidad. En la visualización del campo eléctrico dentro del sustrato dieléctrico podemos ver la expansión del parche metálico producido por las franjas de los campos marginales.

Figura 72. **Magnitud del campo eléctrico en el parche metálico**



Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

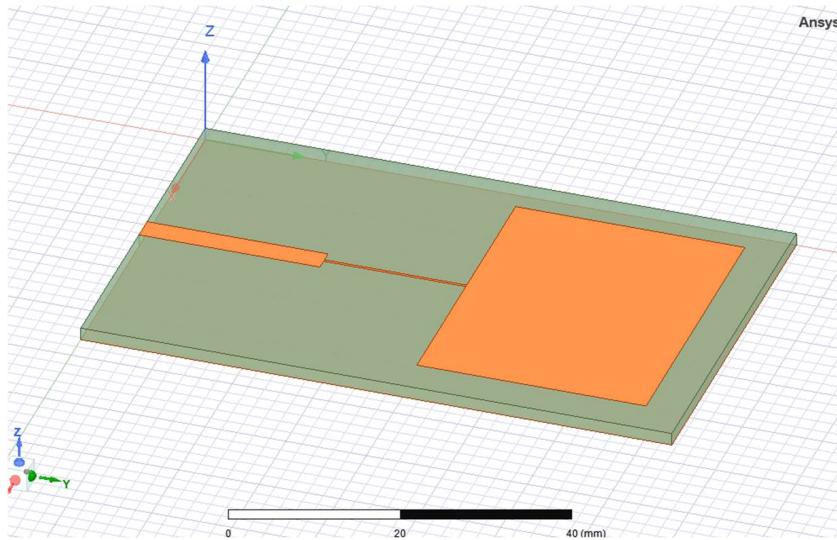
Figura 73. **Magnitud del campo eléctrico presente en el sustrato**



Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

La segunda simulación de ejemplo para las antenas de parche rectangular es una antena con las especificaciones descritas en la tabla XIII, con la diferencia de una alimentación con transformador de cuarto de onda.

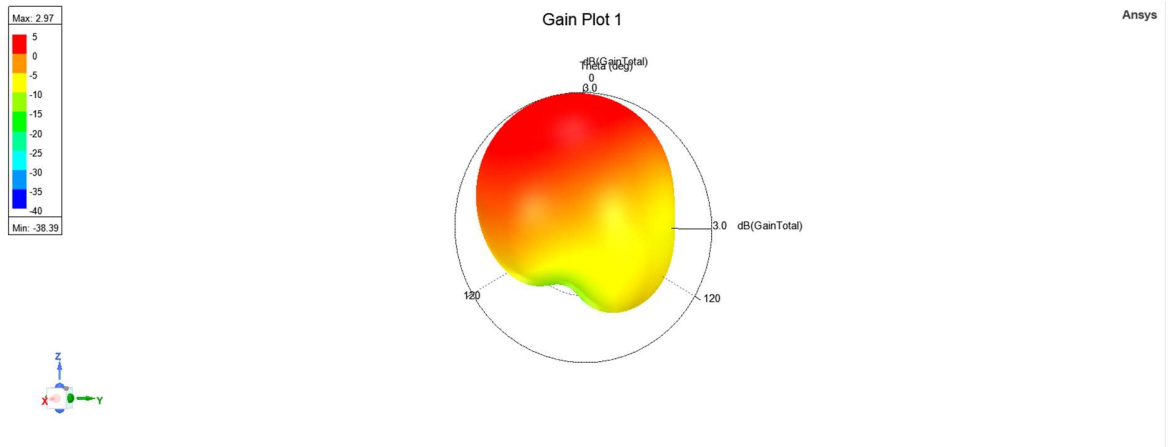
Figura 74. **Modelo de antena con transformador de cuarto de onda**



Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

Podemos ver la diferencia entre los métodos de alimentación en el diagrama de radiación, ya que cada uno de los métodos afectan al diagrama de radiación de diferente forma.

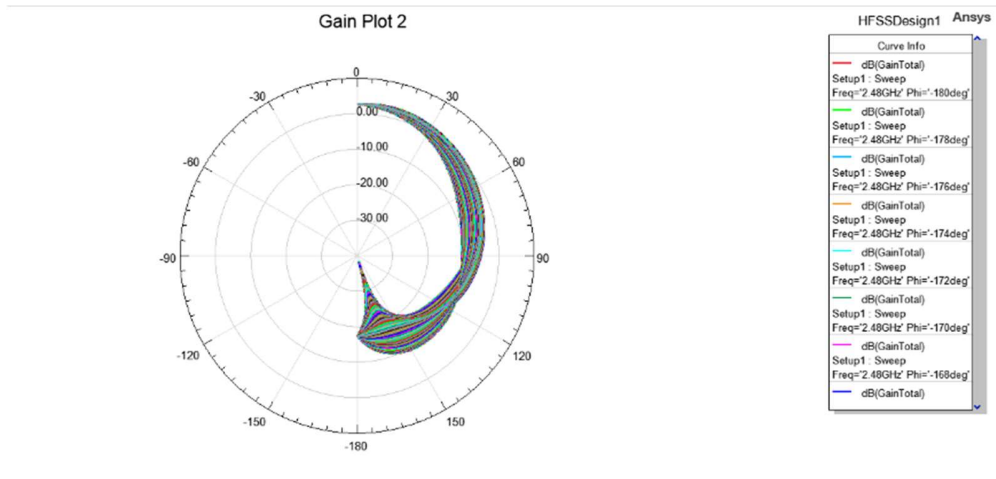
Figura 75. Diagrama de radiación de parche rectangular



Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

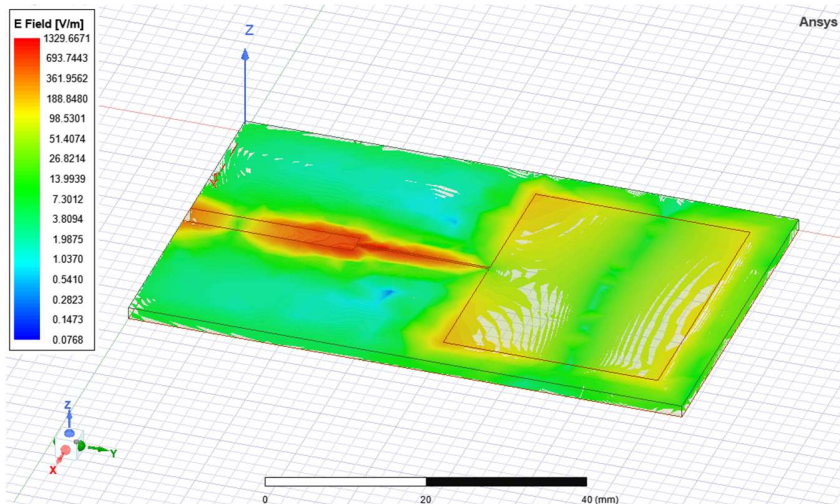
Para una mejor visualización del diagrama de radiación podemos realizar una gráfica en dos dimensiones.

Figura 76. Diagrama de radiación 2D



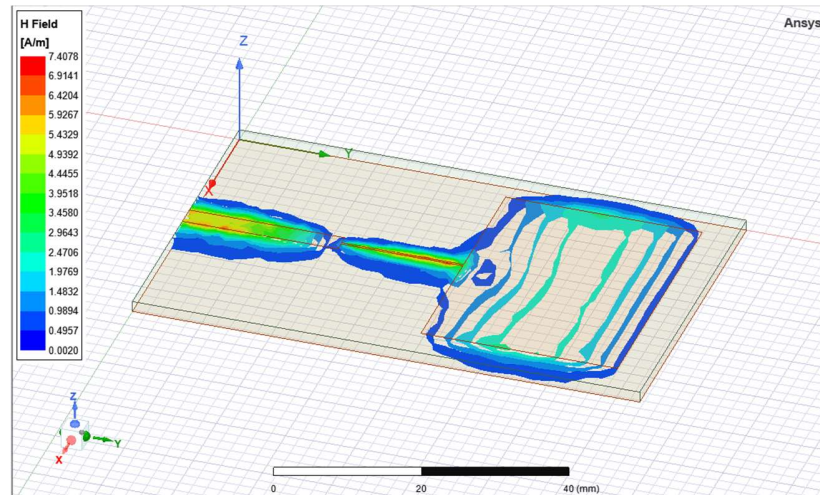
Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

Figura 77. Campo magnético dentro del sustrato dieléctrico



Fuente: elaboración propia, realizando con las herramientas de Windows.

Figura 78. **Campo magnético en el sustrato dieléctrico**



Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

3.1.3. Simulación de antena de parche circular

Para la simulación de antena *microstrip* de parche circular se propone el siguiente ejercicio:

Diseñar una antena de parche circular para una frecuencia de operación de 2.4 GHz con un sustrato FR4 de densidad 1.6 mm. La antena debe ser alimentada por medio de una sonda coaxial. El proceso de cálculo de las medidas del parche se realizó con el *software* de cálculo Mathcad. Para el cálculo de la geometría del parche circular podemos utilizar el método numérico utilizado por Bancroft (2019) o la fórmula otorgada por Balanis (2005).

Figura 79. **Proceso de cálculo de parche circular por Bancroft**

$$\begin{aligned}
 A_{11} &:= 1.84118 & v &:= 3 \cdot 10^8 \\
 f_{11} &:= 2.40 \cdot 10^9 \\
 \epsilon_r &:= 4.4 \\
 h &:= 1.6 \cdot 10^{-3} \\
 a_0 &:= \frac{A_{11} \cdot v}{2 \pi \cdot f_{11} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = 17.462 \cdot 10^{-3} \\
 a_1 &:= \frac{A_{11} \cdot v}{2 \pi \cdot f_{11} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \left(1 + \frac{2h}{\pi \cdot a_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \left(\ln \left(\frac{\pi \cdot a_0}{2 \cdot h} \right) + 1.7726 \right) \right)^{\frac{-1}{2}} = 16.951 \cdot 10^{-3} \\
 a_2 &:= \frac{A_{11} \cdot v}{2 \pi \cdot f_{11} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \left(1 + \frac{2h}{\pi \cdot a_1 \cdot \epsilon_r} \cdot \left(\ln \left(\frac{\pi \cdot a_1}{2 \cdot h} \right) + 1.7726 \right) \right)^{\frac{-1}{2}} = 16.94 \cdot 10^{-3} \\
 a_3 &:= \frac{A_{11} \cdot v}{2 \pi \cdot f_{11} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \left(1 + \frac{2h}{\pi \cdot a_2 \cdot \epsilon_r} \cdot \left(\ln \left(\frac{\pi \cdot a_2}{2 \cdot h} \right) + 1.7726 \right) \right)^{\frac{-1}{2}} = 16.94 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

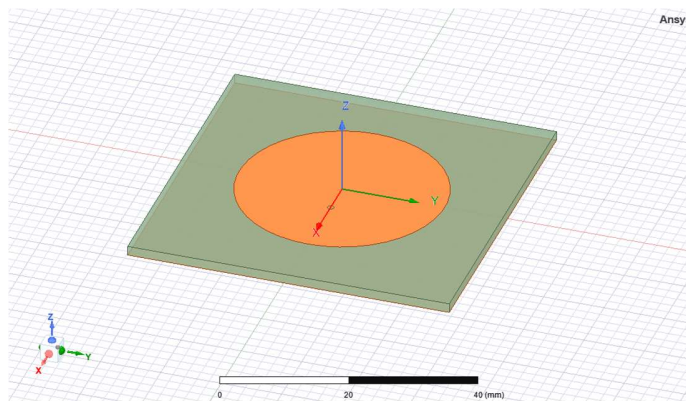
Figura 80. **Proceso de cálculo de parche circular por Balanis**

$$\begin{aligned}
 F &:= \frac{8.791 \cdot 10^9}{f_{11} \sqrt{\epsilon_r}} = 1.746 \\
 a &:= \frac{F}{\left(1 + \frac{2 \cdot h}{\pi \cdot \epsilon_r \cdot F} \cdot \left(\ln \left(\frac{\pi \cdot F}{2 \cdot h} \right) + 1.7726 \right) \right)^{\frac{1}{2}}} = 1.745161
 \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

El modelo tridimensional de la antena de parche circular queda de la siguiente forma:

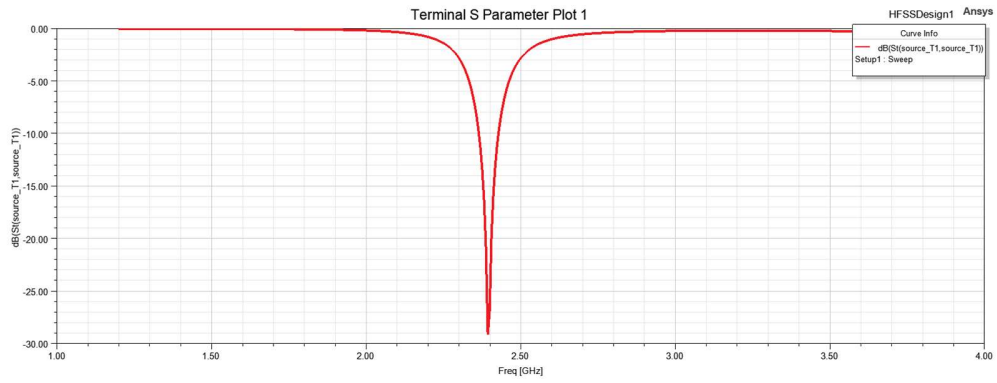
Figura 81. **Modelo de antena de parche circular**



Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

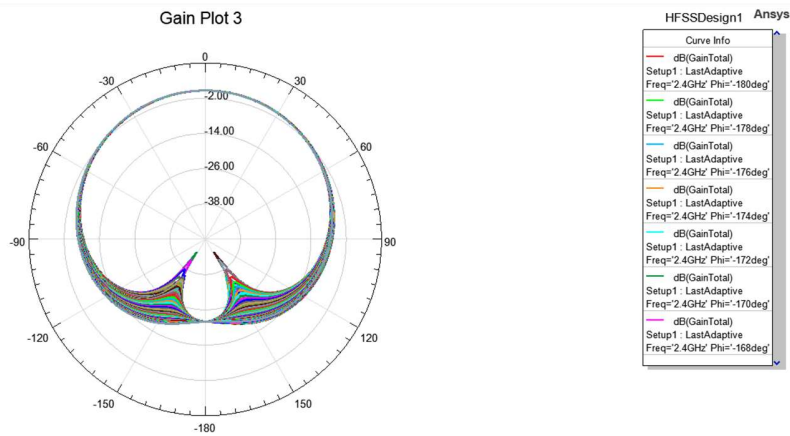
Como toda simulación de antena *microstrip* podemos obtener la representación del parámetro S, visualización del campo eléctrico y magnético y diagrama de radiación.

Figura 82. **Parámetro S**



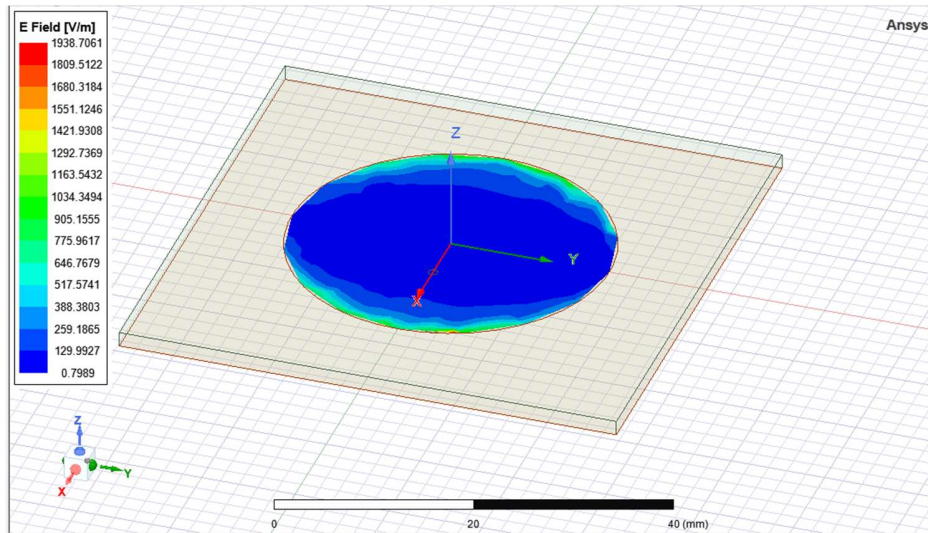
Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

Figura 83. **Diagrama de radiación**



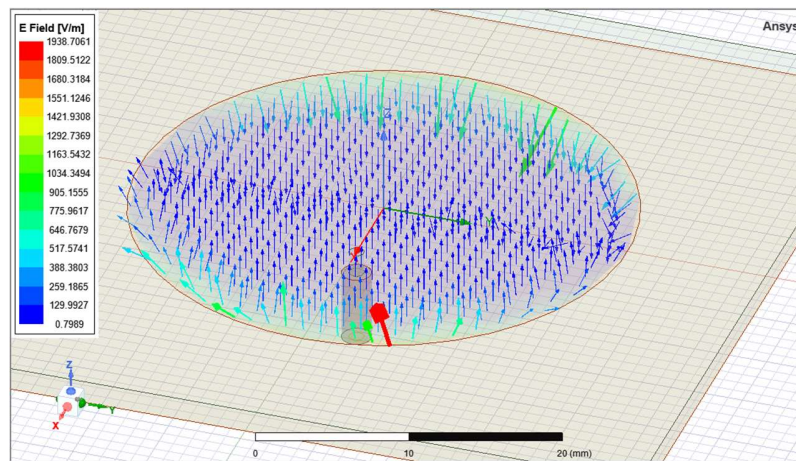
Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

Figura 84. Visualización de la magnitud del campo eléctrico



Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

Figura 85. Campo eléctrico sobre el parche circular



Fuente: elaboración propia, realizado con las herramientas de Windows.

4. LABORATORIO DE RADIOCOMUNICACIONES TERRESTRES

4.1. Curso de radiocomunicaciones terrestres

En el capítulo siguiente se describirá el contenido y estructura del curso de radiocomunicaciones terrestres para establecer una idea, de las necesidades del curso.

4.1.1. Descripción del curso

El curso de radiocomunicaciones terrestres concreta toda la línea de estudio de los fenómenos electromagnéticos propagados en un medio. Este curso es impartido por la escuela de ingeniería mecánica eléctrica de la facultad de ingeniería de la universidad San Carlos. Los temas abordados dentro del curso, son las aplicaciones de los temas vistos en los cursos de Teoría Electromagnética 1 y 2. El curso se dedica directamente al análisis de antenas, arreglos y enlaces de comunicación.

4.1.2. Objetivos del curso

Los objetivos planteados por la escuela de ingeniería mecánica eléctrica para el curso de radiocomunicaciones terrestres son:

Tabla VI. **Tabla de objetivos del curso**

Objetivos	
•	Desarrollar la capacidad de análisis de antenas basado en su geometría y excitación.
•	Comprender los parámetros que caracterizan a las antenas.
•	Estudiar y diseñar arreglos de antenas para mejorar las características de transmisión o recepción.
•	Comprender el efecto del medio de transmisión en la propagación de ondas electromagnéticas.
•	Diseñar enlaces de comunicaciones basados en la transmisión y recepción de energía electromagnética.

Fuente: Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica (2022). *Programa de Curso: radiocomunicaciones terrestres*. Consultado el 13 de mayo de 2022. Recuperado de https://eime.ingenieria.usac.edu.gt/docs/Programas/Electronica/241_RADIOCOMUNICACIONES_TERRESTRES.pdf.

4.1.3. Metodología de curso

Para que el estudiante del curso de radiocomunicaciones terrestres tenga la mayor comprensión posible de los temas abordados en clase, se emplea la siguiente metodología:

Tabla VII. **Metodología de curso magistral**

Metodología
Lectura anticipada del libro de texto, sesiones de resolución de dudas, clase magistral de tópicos selectos, exámenes cortos.

Fuente: Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica (2022). *Programa de curso: radiocomunicaciones terrestres*. Consultado el 10 de mayo de 2022. Recuperado de https://eime.ingenieria.usac.edu.gt/docs/Programas/Electronica/241_RADIOCOMUNICACIONES_TERRESTRES.pdf.

4.1.4. Programa de estudio

El programa del curso nos permite ver con claridad los temas que se verán durante el semestre dentro del curso. Conociendo el contenido podemos proponer actividades o idas que apoyen al estudiante, para tener mayor comprensión del contenido visto.

Tabla VIII. **Tabla de contenido de curso**

Contenido	Actividad	Objetivo terminal
Conceptos Fundamentales		
<ul style="list-style-type: none"> • Ecuaciones de Maxwell. • Características de medio. • Ecuación de onda y sus soluciones. • Forma fasorial de las ecuaciones. • Radiación de un filamento de corriente. • Parámetros básicos de antenas. • Patrón de radiación. • Directividad y ganancia. • Resistencia de radiación. • Radiación de un anillo de corriente. • Radiación de distribuciones arbitraria de corriente. 	<p>Sesiones de resolución de dudas, clase magistrales.</p>	<p>Entendimiento de la aplicación de conceptos generales de la teoría electromagnética al problema de las antenas.</p> <p>Capacidad para plantear y resolver problemas de radiación de campos electromagnéticos si se conocen las distribuciones de corriente que los provocan.</p> <p>Conocimiento de los parámetros principales usados para categorizar antenas y compararlas.</p>

Continuación de tabla III.

Contenido	Actividad	Objetivo terminal
Antenas		
<ul style="list-style-type: none"> • Dipolos. • Monopolos. • Arreglos de antenas. • Efectos del suelo. • Antenas de apertura. • Antenas reflectoras. 	<p>Clase magistral introducción y desarrollo de características de antenas prácticas.</p> <p>Introducción a métodos de síntesis de patrones de radiación deseados.</p> <p>Sesiones de resolución de dudas.</p>	<p>Que el estudiante conozca las características de antenas usada en la práctica y de donde derivan estas dichas propiedades.</p> <p>Que comprenda cuando menos dos métodos de síntesis de patrones de radiación.</p>
Propagación		
<ul style="list-style-type: none"> • Reflexión. • Refracción. • Difracción. • Perdidas en el espacio. • Atenuación por el medio. • Ruido. • Consideraciones de radioenlaces. 	<p>Clase magistral. Introducción y desarrollo de los aspectos de radiaciones electromagnéticas relacionadas con el transporte de dichas ondas. Efecto del ambiente y entorno térmico.</p> <p>Consideraciones prácticas sobre la propagación de las ondas y el diseño de enlaces.</p>	<p>Que el estudiante conozca la forma en que el ambiente afecta la propagación de ondas electromagnéticas y los criterios bajo los cuales se puede garantizar una transmisión confiable de información.</p>

Fuente: Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica (2022). *Programa de curso: Radiocomunicaciones terrestres*. Consultado el 13 de mayo de 2022. Recuperado de https://eime.ingenieria.usac.edu.gt/docs/Programas/Electronica/241_RADIOCOMUNICACIONES_TERRESTRES.pdf.

4.1.5. Esquema de evaluación

Con el esquema de evaluación establecemos un sistema de calificación para cada una de las actividades del curso, para que el estudiante pueda llevar el control de los puntos que necesita para aprobar el curso.

Tabla IX. Esquema de evolución

Actividad	Puntuación
Tareas	25 pts.
1er. Examen Parcial	25.pts
2do. Examen Parcial	25 pts.
Examen Final	25 pts.
Total	100 pts.

Fuente: Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica (2022). *Programa de curso: Radiocomunicaciones terrestres*. Consultado el 13 de mayo de 2022. Recuperado de https://eime.ingenieria.usac.edu.gt/docs/Programas/Electronica/241_RADIOCOMUNICACIONES_TERRESTRES.pdf.

4.2. Propuesta de creación de laboratorio

En la clase magistral de radiocomunicaciones terrestres el estudiante de ingeniería electrónica e ingeniería eléctrica es introducido en los conceptos básicos y en el análisis de antenas y sus arreglos. Para mejorar el aprendizaje sobre la ingeniería de antenas, se propone trazar la estructura y enfoque temático del curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres.

Por lo anterior, se propone la implementación del curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres, como complemento para el curso del mismo nombre, que se imparte en la facultad de ingeniería de la universidad San Carlos.

Como campo de estudio y desarrollo para el curso de laboratorio se elige la temática: antenas *microstrip* de tipo parche rectangular y circular.

4.2.1. ¿Por qué un curso de laboratorio?

El uso de prácticas de laboratorio como agregado a cursos de temática científica y técnica, para la construcción de conocimiento en estudiantes, es una práctica común en cursos a nivel de ingeniería. Los cursos a nivel de ingeniería con temática científica y técnica, no solo se pueden basarse en ejemplos otorgados por la literatura; es de obligación la demostración correspondiente del resultado en un entorno controlado. La necesidad de un trabajo práctico utilizando los conceptos teóricos para el completo entendimiento del tema desarrollado en clase, se justifica simplemente con que el estudiante necesita experiencia y criterio para desarrollar los temas aprendidas en el campo laboral. La idea principal de la elaboración de prácticas de laboratorio es acercar al estudiante a situaciones que se puede encontrar al momento de ejercer su carrera.

Un curso magistral se enfoca en establecer los cimientos teóricos de la rama de ingeniería a estudiar. De forma paralela el curso de laboratorio se puede enfocar directamente al uso de herramientas, aplicaciones e instrumentos para el desarrollo de una o más tareas que se necesitara al momento de laborar como ingeniero.

4.2.2. ¿Por qué aprender sobre las antenas *microstrip*?

Las antenas *microstrip* se ha vuelto un tema necesario dentro del conocimiento básico del estudiante de ingeniería electrónica e ingeniería eléctrica. Cada vez más este tipo de antenas son utilizadas en los dispositivos

como: sensores, controladores, módulos de prototipado y microcomputadoras. Al no conocer la forma de desarrollar este tipo de tecnología, el estudiante pierde una gran cantidad de conocimiento y oportunidades. Ya que dependiendo del tipo de proyecto que desea implementar se necesita que un sistema tenga la capacidad de recepción o transmisión por medio de antenas que se acople a la estructura del proyecto o que tenga características físicas muy específicas.

4.2.3. Descripción del curso

El curso toma un enfoque practico dirigido al diseño y simulación de antenas *microstrip*, iniciando con el estudio de modelos básicos para la descripción de una antena, hasta culminar con los conceptos de arreglos de antenas *microstrip*.

El estudiante del curso de laboratorio aprenderá a diseñar, evaluar, redactar informes y hoja de datos de los diseños propuesto de las antenas de parche, con la ayuda de las herramientas de *software* para la ingeniería de antenas.

4.2.4. Actividades propuestas

Las actividades propuestas para el curso de laboratorio de radiocomunicaciones se presentan en la siguiente tabla. Cada una de las actividades presentadas, tiene como fin que el estudiante se familiarice con las herramientas y temas vistos en clase.

Tabla X. **Actividades propuestas**

Actividad	Descripción de actividad	Objetivos
Práctica nro. 1	Realizar simulación de antena dipolo e informe de práctica.	Aprender sobre los programas de simulación y sus herramientas para la creación de antenas con su respectivo análisis.
Práctica nro. 2	Realizar simulación de una línea de transmisión <i>microstrip</i> .	Entender los conceptos detrás de las líneas de transmisión <i>microstrip</i> , y diseñar y simular una línea de transmisión.
Práctica nro. 3	Realizar simulación de antena <i>microstrip</i> de parche rectangular.	Elaborar el diseño de una antena de parche rectangular.
Práctica nro. 4	Realizar simulación de antena <i>microstrip</i> de parche circular.	Elaborar el diseño de una antena de parche circular.
Práctica nro. 5	Realizar simulación de antena <i>microstrip</i> .	Examinar las diferentes configuraciones básicas de las antenas de parche rectangular y circular.
Proyecto de laboratorio	Implementación de antena <i>microstrip</i> para la aplicación propuesta.	Poner en práctica los conocimientos obtenidos en el diseño de antenas <i>microstrip</i> .
Evolución parcial	Evaluar los conocimientos adquiridos de los conceptos base de la antena <i>microstrip</i> .	Examinar al estudiante sobre los temas presentados en clase para establecer un estatus.
Evolución final	Evaluación sobre los temas expuestos en el curso y la experiencia obtenida en el desarrollo del proyecto de laboratorio.	Examinar al estudiante sobre los conceptos del curso para la aprobación de este.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

4.2.5. Esquema de evaluación

El estudiante del curso de laboratorio será evaluado según sus conocimientos, habilidad de análisis y generalización de conceptos. La ponderación de las actividades propuesta es:

Tabla XI. **Puntuación otorgada a cada actividad**

Actividad	Puntuación
Práctica nro.1	3 pts.
Práctica nro.2	3 pts.
Práctica nro.3	3 pts.
Práctica nro.4	3 pts.
Práctica nro.5	3 pts.
Proyecto de laboratorio	50 pts.
Evaluación parcial	10 pts.
Evaluación final	25 pts.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

4.2.6. Herramientas de simulación

La herramienta de simulación destinada para aplicaciones de ingeniería nos permitirá tener una respuesta de forma rápida sobre un problema, las herramientas de *software* mencionadas en el siguiente trabajo se encuentran únicamente para sistemas *Windows*.

4.2.6.1. Simulación por *software*

Una simulación por *software* o simulación por computadora es un programa informático que forma un modelo virtual para un sistema determinado. El programa informático tiene la tarea de calcular todas las variables establecidas

por el usuario en distintos entornos o configuraciones del modelo, con el fin de estudiar su comportamiento en tales arreglos.

Existe una gran diversidad de *softwares* dedicados a la simulación para los diferentes campos de la ingeniería. Los programas informáticos que se dedican al desarrollo o simulación de aplicaciones de ingeniería implementan una enorme cantidad de herramientas para distintos tipos de proyectos.

Los *softwares* dedicados a la ingeniería de antenas y microondas determinan una solución rápida a problemas complejos, donde la solución analítica no se puede realizar de forma práctica. Estos tipos de programas informáticos utilizan normalmente métodos numéricos para establecer la solución del problema a desarrollar. La simulación por computadora presenta diversas ventajas:

- Ahorro económico.
- Ahorro de tiempo.
- Flexibilidad de diseño.
- Fácil acceso a herramientas de análisis.
- Diferentes entornos de estudio para el sistema de interés.
- Presentación gráfica de resultados de 2-D y 3-D.
- Redacción de informes.

De igual forma la simulación por computadora presenta algunas desventajas:

- Requisitos computacionales altos.
- Casos de estudios ideales.
- Licencias de activación de *software* con costo muy altos.

Como propuesta de *software* para la simulación de antenas, fenómenos y aplicaciones electromagnéticas se nombran los siguientes:

- Ansys HFSS.
- CST Studio Suite.
- Advanced Design System (ADS).

Una ventaja de los tres programas anteriormente mencionados es la de una licencia estudiantil. La empresa desarrolladora otorga de forma sencilla una licencia de *software* para estudiantes. Esta permite el uso limitado de su programa a estudiantes, pero siendo igualmente robustos para los trabajos que se realizaran en el curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres. En los siguientes capítulos se utilizará únicamente el programa Ansys HFSS para el desarrollo del curso y prácticas de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres.

4.2.7. Literatura del curso

La literatura presentada al estudiante es uno de los pilares en que se debe apoyar para la resolución de dudas y entendimiento de conceptos nuevos. Ya que esta permite llevar un seguimiento detallado de los nuevos conceptos.

Tabla XII. **Literatura recomendada**

Titulo	Autor
<i>Microstrip and Printed Antenna Design</i>	Randy Bancroft
<i>Microstrip Antenna Design for Wireless Applications</i>	Praveen Kumar Malik; Sanjeevikumar Padmanaban; Jens Bo Holm-Nielsen
<i>Antenna Theory and Microstrip Antennas</i>	D. G. Fang
<i>Advanced Engineering Electromagnetics</i>	Constantine A. Balanis
<i>RF and Microwave Circuit Design Theory and Applications</i>	Charles E. Free; Colin S. Aitchison

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

4.2.8. Estructura del curso de laboratorio

A lo largo del curso de se presentarán dos tipos diferentes de sesiones explicativas.

- Clase de exposición de conceptos
- Clase de ejecución práctica

4.2.8.1. Clase de exposición de conceptos

En este tipo de sesión se mostrarán al estudiante los conceptos básicos, términos y demostraciones matemáticas para el conocimiento y entendimiento de la teoría detrás de las antenas *microstrip*. Se presentará al estudiante la teoría de antenas *microstrip* de parche según sea el avance del curso.

4.2.8.2. Clase de ejecución práctica

En las sesiones prácticas se presentará una breve explicación de las herramientas y procesos para el desarrollo de las prácticas de laboratorio, donde el estudiante tendrá la tarea de poner en práctica los conceptos aprendidos.

En este tipo de sesiones, se le mostrara paso a paso al estudiante la manipulación y el proceso de simulación en formato de tutorial.

4.2.8.3. Diagrama estructural de curso

En la siguiente figura podemos ver la estructura interna del curso, dividida por áreas y temática de clase.

Figura 86. Diagrama estructural de curso



Fuente: elaboración propia, realizado con Inkscape.

4.2.9. Metodología del curso de laboratorio

La metodología utilizada dentro del curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres será la siguiente:

Tabla XIII. **Metodología del curso de laboratorio**

Metodología
Sesiones de tipos explicativo y de ejecución práctica, elaboración de videos tipo tutorial, clases para la resolución de dudas, ejemplos y ejercicios para la elaboración dentro del periodo de clase, ejercicios para trabajo en casa, elaboración de proyecto y evaluación de conceptos y uso del <i>software</i> .

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

4.2.10. Antecedentes del curso de laboratorio

El curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres fue propuesto en años anteriores orientado al radio enlace y conexiones de red. En este trabajo se exponen los conceptos básicos de redes y antenas. Para mayor desarrollo se puede consultar el trabajo de Implementación de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres. (Trinidad Ortega, 2013)

5. PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

5.1. Práctica 1

- Tema: simulador Ansys HFSS.
- Objetivo: que el estudiante se familiarice con el entorno y herramientas de trabajo del *software* Ansys HFSS.
- Descripción: la práctica de laboratorio consiste en simular una antena de alambre de tipo monopolo, definiendo sus límites, materiales y puertos. La geometría de la antena es de media longitud de onda, el estudiante debe calcular todos los parámetros necesarios para definir la efectividad de la antena.

Dentro del simulador se debe presentar los resultados siguientes:

- Parámetro S.
 - Grafica de VSWR.
 - Diagrama de radiación de la antena.
 - Directividad.
 - Visualización de la magnitud del campo eléctrico y magnético.
- Formato de entrega: el estudiante debe presentar un reporte en norma IEEE mostrando los resultados de la simulación, proceso de cálculo y diseño. El reporte debe entregarse por medio de la plataforma institucional.

5.2. Práctica 2

- Tema: línea de transmisión *microstrip*
- Objetivo: que el estudiante comprenda el proceso de simulación de componentes *microstrip*. Entender los efectos dependientes del sustrato dieléctrico y como afecta en el diseño de componentes.
- Descripción: la práctica de laboratorio consiste en que el estudiante simule tres elementos *microstrip*.
 - Línea de transmisión *microstrip*.
 - Transformador de cuarto onda.
 - Línea de acople ramal.

El estudiante debe simular los tres componentes por separado. Cada componente se tiene que simular variando la altura y la constante del sustrato dieléctrico. En cada componente se debe ilustrar la magnitud y campo vectorial del campo eléctrico y graficar el parámetro S y VSWR.

- Formato de entrega: el estudiante debe presentar un reporte en norma IEEE mostrando los resultados de la simulación, proceso de cálculo y diseño. El reporte debe entregarse por medio de la plataforma institucional.

5.3. Práctica 3

- Tema: antena *microstrip* de parche rectangular
- Objetivo: que el estudiante ponga en práctica los conceptos de antenas *microstrip* de parche rectangular. Por medio de ejemplos debe entender la metodología de simulación de antenas *microstrip* de parche.
- Descripción: simule una antena *microstrip* de parche rectangular con dos distintos sustratos dieléctricos. Se debe compara los resultados de amabas simulaciones tomando en cuenta los criterios mencionados por el instructor.

Calcule la geometría y método de alimentación según instrucciones dadas en clase. Calcular los siguientes resultados:

- Parámetro S.
 - Directividad.
 - Diagrama de radiación.
 - Representación de la magnitud del campo eléctrico.
- Formato de entrega: el estudiante debe presentar un reporte en norma IEEE mostrando los resultados de la simulación, proceso de cálculo y diseño. El reporte debe entregarse por medio de la plataforma institucional.

5.4. Práctica 4

- Tema: antena *microstrip* de parche circular.
- Objetivo: que el estudiante comprenda la diferencia entre las antenas de parche rectangular y parche circular. Determinar las diferencias y destacar las ventajas de cada tipo de antena.
- Descripción: calcular y simular una antena de parche circular y una antena de parche rectangular para la misma frecuencia de resonancia, utilizando los mismos valores del sustrato dieléctrico para ambas simulaciones.

El estudiante debe comparar los resultados de la simulación para los siguientes parámetros:

- Parámetro S.
 - Diagrama de radiación.
 - Densidad de corriente.
 - Directividad.
 - Ancho de banda.
- Formato de entrega: el estudiante debe presentar un reporte en norma IEEE mostrando los resultados de la simulación, proceso de cálculo y diseño. El reporte debe entregarse por medio de la plataforma institucional.

5.5. Práctica 5

- Tema: antena *microstrip* de parche
- Objetivo: que el estudiante ponga en práctica los conocimientos básicos de antenas *microstrip* que permita calificar un estudio o publicación.
- Descripción: el estudiante de laboratorio tiene que buscar dos publicaciones en line sobre antenas de parche rectangular o circular, se tiene que replicar el estudio de ambos trabajos. La práctica se divide en dos pasos:
 - Replicar el estudio y verificar las conclusiones del estudio.
 - Redactar un reporte debatiendo los resultados y conclusiones de ambos estudios seleccionados.
- Formato de entrega: el estudiante debe presentar un reporte en norma IEEE mostrando los resultados de la simulación, proceso de cálculo y diseño. El reporte debe entregarse por medio de la plataforma institucional.

5.6. Proyecto de laboratorio

- Tema: arreglo de antena *microstrip* para la recepción de imágenes de satélites NOAA
- Descripción: el proyecto consiste en que el estudiante debe diseñar y construir un sistema receptor de imágenes de alta resolución de los satélites NOAA. El estudiante de laboratorio debe investigar los conceptos

de arreglos de antenas *microstrip* de parche rectangular y de la recepción de imágenes satelitales NOAA.

Para la elaboración de la antena *microstrip*, el estudiante debe proponer un prototipo de antena. Debe mostrar el proceso de diseño y cálculos. Por medio de un reporte deberá especificar las características del arreglo de antenas a utilizar. Al mismo tiempo el estudiante debe realizar un video explicando su criterio de diseño para el prototipo.

- Formato de entrega: el estudiante debe presentar un reporte en norma IEEE mostrando los resultados de la simulación, proceso de cálculo y diseño. El reporte debe entregarse por medio de la plataforma institucional.

CONCLUSIONES

1. Se presento la propuesta de implementación del curso de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres especificando la estructura interna del curso, objetivos y visión sobre la misma. En la estructura propuesta para el curso de laboratorio se especifica cada concepto necesario para la implementación del laboratorio.
2. Se brindaron los concetos fundamentales para entender la teoría detrás de las antenas *microstrip* de parche. En el desarrollo de los conceptos de las antenas *microstrip* de parche se estableció un formulario para un cálculo rápido de la antena.
3. Se mostraron las ventajas mecánicas y eléctricas de las antenas de parche *microstrip*, estas ventajas resaltan en las aplicaciones presentadas donde otro tipo de antena no puede ser implementadas.
4. Se estableció una formula metodológica y una guía para el diseño y simulación de antena de parche *microstrip* utilizando el *software* de ingeniería de antenas Ansys HFSS, especificando paso a paso el proceso.
5. Para entender el alcance del simulado se presenta la ejecución de una simulación para las antenas de parche rectangular y circular, se mostraron distintos ejemplos de sus diferentes revisiones y resultados.
6. Se proponen cinco prácticas de laboratorio y un proyecto final para el curso de laboratorio, enfocadas en el análisis de requisitos para distintos

proyectos donde es necesario una antena con características muy específicas.

RECOMENDACIONES

1. Para evitar fallos de ordenador, se recomienda tener como mínimo 8 GB de memoria RAM.
2. Se recomienda tener una aproximación de dos decimales para el cálculo de la geometría de antenas. Teniendo en cuenta que, si se elabora una antena por técnica de planchado, se presentara el efecto de expansión térmica.
3. Para el diseño de una antena *microstrip*, es recomendable evaluar como mínimo cuatro diferentes tipos de materiales y diferentes tipos de alturas para el sustrato dieléctrico.
4. Realizar la fabricación de la antena utilizando CNC. Esto evitará problemas con las medidas y será suficientemente precisa para aplicaciones de laboratorio.
5. Se recomienda al auxiliar de laboratorio o profesor de curso que considere utilizar este trabajo como una guía rápida para el diseño de antenas, sin profundizar demasiado en la teoría detrás de ellas. Esta aproximación permitirá a los estudiantes obtener una visión práctica y aplicada del proceso de diseño, facilitando el aprendizaje de conceptos clave de manera más accesible y práctica.
6. Profundizar en el *software* HFSS, Ansys da acceso gratuito a cursos específicos sobre antenas y otros dispositivos en su página web.

7. Utilizar el *software* Matlab, ya que existe un paquete de herramientas para antenas *microstrip*. Para la utilización de *software* Matlab es necesario adquirir una licencia con un costo aproximado de USD 55. El paquete *Antenna Toolbox* de Matlab nos permite una variedad de herramientas para el cálculo de antenas, limitado únicamente por los ejemplos y diseños preestablecidos en el paquete de *software*.

REFERENCIAS

1. A. Balanis, C. (2005). *Antenna Theory Analysis And Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
2. Ansys. (2021). *Ansys*. Obtenido de [https://www.ansys.com/content/dam/it-solutions/platform-support / gpu-accelerator-capabilities-2021-r1.pdf](https://www.ansys.com/content/dam/it-solutions/platform-support/gpu-accelerator-capabilities-2021-r1.pdf)
3. Ansys, Inc. (2022). *Ansys*. Obtenido de <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
4. Balanis, C. A. (1938). *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons.
5. Bancroft, R. (2019). *Microstrip and Printed Antenna Design* (Tercera ed.). Londres: The Institution of Engineering and Technology.
6. Boufrioua, A. (2016). *Microstrip Antennas Modeling for Recent Applications*. nova publishers.
7. Cheema, H. M., Khlid, F., & Shamim, A. (2021). *Antenna-on-chip Design, Challenges, and Opportunities*. Artech House.
8. E. Free, C., & S. Aitchison, C. (2021). *RF and Microwave Circuit Design Theory and Applications*. Wiley.

9. Edwards, T., & Steer, M. (2016). *Foundations for Microstrip Circuit Design*. John Wiley & Sons.
10. Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. (13 de mayo de 2022). *Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica*. Recuperado el 13 de mayo de 2022, de https://eime.ingenieria.usac.edu.gt/docs/Programas/Electronica/241_RADIOCOMUNICACIONES_TERRESTRES.pdf
11. Fang, D.-G. (2010). *Antenna Theory and Microstrip Antennas*. CRC Press Taylor & Francis Group.
12. Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., & Ittipiboon, A. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House, Inc.
13. Garg, R., Gahl, I., & Bozzi, M. (2013). *Microstrip Lines and Slotlines* . Artech House.
14. Hayt, W. H., & Buck, J. A. (2012). *Teoria eletromagnética*. The McGraw-Hill.
15. Hueber, G., & Niknejad, A. M. (2019). *Millimeter-Wave Circuits for 5G and Radar*. Cambridge University .
16. James, J. R., & Hall, P. S. (1989). *Handbook of Microstrip Antennas*. Londres: Peter Peregrinus.
17. James, J., Hall, P., & Wood, C. (1966). *Microstrip Antenna Theory And Design*. Londres: Peter Peregrinus.

18. Jingchang , N., & Mingming, G. (2022). *Nonlinear Modeling Analysis And Predistortion Algorithm Researcg Of Radio Frequency Power Amplifiers*. CRC Press.
19. Kin-Lu, W. (1999). *Design of Nonplanar Microstripp Antennas and Transmission Lines*. John Wiley & Sons.
20. M. Pozar, D., & Schaubert, D. (s.f.). *Microstrip Antennas*. Hoboken: John Wiley & Sons.
21. Pandey, A. (2019). *Práctica Microstrip and Printed Antenna Design*. Artech House.
22. Praveern, K. M., Sanjeevikumar, P., & Jens, B. H.-N. (2022). *Microstrip Antenna Design For Wireless Applications*. CRC Press.
23. Quintana, J. C., & Aguilar, F. L. (2012). *Interacción Electromagnética Teoría Clásica* . Reverté.
24. Trinidad Ortega, R. A. (2013). *Implementación de laboratorio de radiocomunicaciones terrestres*. Guatemala, Ciudad de Guatemala. Recuperado el 16 de mayo de 2022, de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0341_EO.pdf
25. Waterhouse, R. B. (2003). *Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide*. New York: Springer.

