



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA EL  
COSECHAMIENTO DE ENERGÍA DE RADIOFRECUENCIA EN  
LA BANDA ISM”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y  
REDES**

**AUTOR:**

**JORGE LUIS SANTAMARIA ACOSTA**

Riobamba – Ecuador

2022



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA EL  
COSECHAMIENTO DE ENERGÍA DE RADIOFRECUENCIA EN  
LA BANDA ISM”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y  
REDES**

**AUTOR: JORGE LUIS SANTAMARIA ACOSTA**

**DIRECTOR: Ing. JEFFERSON ALEXANDER RIBADENEIRA RAMÍREZ PhD.**

Riobamba – Ecuador

2022

**©2022, Jorge Luis Santamaria Acosta**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, JORGE LUIS SANTAMARIA ACOSTA, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 28 de enero de 2022



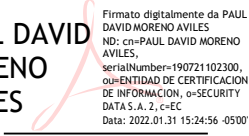
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jorge', with a large, stylized flourish extending upwards and to the right.

Jorge Luis Santamaria Acosta

060441060-5

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: el Trabajo de Titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA EL COSECHAMIENTO DE ENERGÍA DE RADIOFRECUENCIA EN LA BANDA ISM**”, realizado por el señor: **JORGE LUIS SANTAMARIA ACOSTA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés PhD. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>HUGO OSWALDO MORENO AVILES</b>	2022-01-28
Ing. Jefferson Alexander Ribadeneira Ramírez PhD. <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>JEFFERSON ALEXANDER RIBADENEIRA RAMIREZ</b>	2022-01-28
Ing. Paúl David Moreno Avilés PhD. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	<b>PAUL DAVID MORENO AVILES</b>  Firmato digitalmente da PAUL DAVID MORENO AVILES ND: cn=PAUL DAVID MORENO AVILES, serialNumber=190721102300, ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION, o=SECURITY DATA S. A. 2, c=EC Data: 2022.01.31 15:24:56 -0500'	2022-01-28

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación es dedicado a mis padres; mi madre Pilar y mi padre Luis, por su constante esfuerzo y dedicación, por brindarme todo lo necesario a lo largo de mi vida y por su apoyo y comprensión a lo largo de mi formación académica. Los quiero y aprecio todo lo que han hecho por mí. A mis hermanas, Melissa y Daniela, quienes estuvieron pendientes de mí a lo largo de todo este proceso de formación, apoyándome y alentándome en los buenos y malos momentos.

Jorge

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más sincero agradecimiento a los docentes de la Escuela de Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes que han aportada en mi formación profesional a lo largo de mi etapa como estudiante, por sus conocimientos y experiencias impartidas en las aulas de clase. A mi tutor de tesis el Ingeniero Jefferson Ribadeneira por guiarme a lo largo del desarrollo de este trabajo, por su tiempo, conocimiento y recomendaciones aportadas.

A mis padres por ser la principal razón que me impulsa a seguir adelante, por el esfuerzo y confianza depositada en mí y a todas las personas que aportaron y creyeron en la realización de este trabajo de titulación.

Jorge

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	2
JUSTIFICACIÓN APLICATIVA.....	3
OBJETIVOS.....	4
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4

## CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
1.1. Campos eléctricos y magnéticos.....	5
1.1.1. <i>Campo Eléctrico</i> .....	5
1.1.2. <i>Campo Magnético</i> .....	6
1.2. Ondas Electromagnéticas.....	6
1.2.1. <i>Ecuaciones de Maxwell</i> .....	7
1.2.1.1. <i>Ley de Gauss para campos magnéticos</i> .....	8
1.2.1.2. <i>Ley de Gauss para campos eléctricos</i> .....	8
1.2.1.3. <i>Ley de Faraday</i> .....	8
1.2.1.4. <i>Ley de Ampere-Maxwell</i> .....	8
1.2.2. <i>Propagación de ondas electromagnéticas</i> .....	8
1.2.3. <i>Tipos de ondas electromagnéticas</i> .....	9
1.2.4. <i>Tipos de radiaciones</i> .....	9
1.2.4.1. <i>Radiaciones ionizantes</i> .....	10
1.2.4.2. <i>Radiaciones no ionizantes</i> .....	10
1.3. El espectro radioeléctrico.....	10



1.3.1.	<i>Las microondas</i> .....	11
1.3.2.	<i>La Banda ISM</i> .....	11
1.3.2.1.	<i>Distribución de bandas en ISM</i> .....	12
1.3.2.2.	<i>Tecnologías que trabajan en las bandas ISM</i> .....	12
1.4.	<b>Fundamentos de las antenas</b> .....	13
1.4.1.	<i>Definición de antena</i> .....	13
1.4.2.	<i>Parámetros de las antenas</i> .....	14
1.4.2.1.	<i>Regiones de Campo</i> .....	14
1.4.2.2.	<i>Patrón de radiación</i> .....	15
1.4.2.3.	<i>Densidad de Potencia Radiada</i> .....	15
1.4.2.4.	<i>Intensidad de radiación</i> .....	16
1.4.2.5.	<i>Directividad</i> .....	16
1.4.2.6.	<i>Eficiencia</i> .....	16
1.4.2.7.	<i>Ganancia</i> .....	17
1.4.2.8.	<i>Impedancia de entrada</i> .....	17
1.4.2.9.	<i>Ancho de Banda</i> .....	18
1.4.2.10.	<i>Polarización</i> .....	18
1.4.2.11.	<i>Tipos de Antenas</i> .....	19
1.5.	<b>Tecnología Microstrip</b> .....	21
1.5.1.	<i>Líneas Microstrip</i> .....	22
1.5.1.1.	<i>Constante dieléctrica efectiva</i> .....	22
1.5.1.2.	<i>Impedancia</i> .....	23
1.5.2.	<i>Antenas Microstrip</i> .....	24
1.5.2.1.	<i>Características</i> .....	24
1.5.2.2.	<i>Geometrías de una antena microstrip</i> .....	24
1.5.2.3.	<i>Tipos de alimentación</i> .....	25
1.5.2.4.	<i>Aplicaciones de antenas microstrip</i> .....	26
1.6.	<b>Sistemas de cosecha de energía RF</b> .....	27
1.6.1.	<i>Definición</i> .....	28
1.6.2.	<i>Las Rectennas</i> .....	28
1.6.2.1.	<i>Funcionamiento de una rectenna</i> .....	29
1.6.3.	<i>Red de adaptación</i> .....	29
1.6.4.	<i>Etapa Rectificadora</i> .....	30
1.6.4.1.	<i>Tipos de rectificadores</i> .....	31
1.6.5.	<i>Etapa de filtrado</i> .....	32
1.6.6.	<i>Primeros experimentos y su evolución</i> .....	32
1.6.7.	<i>Limitaciones del cosechamiento de energía RF</i> .....	33

1.6.8.	<i>Aplicaciones de la cosecha de energía de RF</i>	34
--------	--	----

## CAPÍTULO II

2.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	34
2.1.	<b>Mediciones de intensidad de campo en las bandas ISM</b>	34
2.1.1.	<i>Descripción del equipo NARDA SRM 3006</i>	35
2.1.1.1.	<i>Software para computadora SRM-3006 Tools</i>	36
2.1.2.	<b>Mediciones de Intensidad de campo eléctrico</b>	36
2.1.2.1.	<i>Bandas de frecuencia ISM medidas</i>	36
2.1.2.2.	<i>Tecnologías que operan en la banda ISM</i>	37
2.1.2.3.	<i>Puntos de medición</i>	38
2.1.3.	<b>Frecuencia de diseño</b>	39
2.1.3.1.	<i>La Banda ISM 2.4 GHz</i>	39
2.1.3.2.	<i>Wi-Fi</i>	39
2.1.3.3.	<i>Canales de Wi-Fi</i>	40
2.1.3.4.	<i>Selección de la banda de frecuencia</i>	40
2.2.	<b>Diseño y simulación del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF</b>	41
2.2.1.	<b>Antena parche microstrip</b>	42
2.2.1.1.	<i>Selección del substrato</i>	42
2.2.1.2.	<i>Parámetros de simulación</i>	44
2.2.1.3.	<i>Cálculo de dimensionamiento de la antena microstrip</i>	44
2.2.1.4.	<i>Alimentación de la antena</i>	45
2.2.1.5.	<i>Definición de Variables</i>	47
2.2.1.6.	<i>Simulación de la Antena parche microstrip</i>	47
2.2.1.7.	<i>Optimización</i>	50
2.2.2.	<b>Circuito Multiplicador-Rectificador</b>	51
2.2.2.1.	<i>Elementos del circuito multiplicador – rectificador</i>	51
2.2.2.2.	<i>Diseño del circuito Multiplicador- Rectificador</i>	54
2.2.2.3.	<i>Red de Acoplamiento</i>	57
2.2.2.4.	<i>Simulación del circuito multiplicador-rectificador</i>	61
2.2.2.5.	<i>Esquemático Final</i>	68
2.2.2.6.	<i>Layout y Co-simulación</i>	70
2.3.	<b>Fabricación del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF</b>	72
2.3.1.	<i>Materiales empleados</i>	72
2.3.2.	<i>Procedimiento de fabricación</i>	72
2.4.	<b>Escenarios empleados para la medición del dispositivo</b>	75

2.4.1.	<i>Equipos de medición</i> .....	75
2.4.2.	<i>Escenario para la evaluación de la antena parche microstrip</i> .....	75
2.4.3.	<i>Escenario para la evaluación del circuito rectificador</i> .....	76

### CAPÍTULO III

3.	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	77
3.1.	<b>Resultado de las mediciones de intensidad de campo en las bandas ISM</b> .....	77
3.1.1.	<i>Mediciones en la banda ISM de 2.4 GHz</i> .....	80
3.2.	<b>Resultados del diseño, simulación y fabricación del dispositivo</b> .....	80
3.2.1.	<i>Resultados de la etapa de diseño y simulación de la antena parche microstrip</i> .....	80
3.2.2.	<i>Resultados de la etapa de diseño y simulación del circuito rectificador</i> .....	84
3.2.3.	<i>Resultados de la etapa de fabricación del dispositivo</i> .....	87
3.3.	<b>Mediciones y Pruebas del dispositivo para el cosechamiento de energía RF</b> .....	87
3.3.1.	<i>Mediciones de la antena parche microstrip</i> .....	87
3.3.2.	<i>Mediciones del circuito rectificador</i> .....	92
3.3.3.	<i>Prueba con antena y generador de señales como transmisor</i> .....	99
3.3.4.	<i>Prueba con router WiFi</i> .....	101
3.4.	<b>Discusión de resultados</b> .....	104

<b>CONCLUSIONES</b> .....	108
---------------------------	-----

<b>RECOMENDACIONES</b> .....	109
------------------------------	-----

### BIBLIOGRAFÍA

### ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Tecnologías que usan la banda ISM.....	13
<b>Tabla 2-1:</b>	Tipos de Alimentación Microstrip .....	25
<b>Tabla 3-1:</b>	Áreas de aplicación de las antenas microstrip .....	26
<b>Tabla 4-1:</b>	Comparación entre las fuentes alternativas de energía.....	27
<b>Tabla 1-2:</b>	Bandas ISM que pueden ser medidas con el equipo disponible.....	37
<b>Tabla 2-2:</b>	Bandas ISM más comunes .....	37
<b>Tabla 3-2:</b>	Ubicación de los puntos de medición.....	38
<b>Tabla 4-2:</b>	Protocolos Wi-Fi.....	40
<b>Tabla 5-2:</b>	Dependencia del substrato dieléctrico .....	42
<b>Tabla 6-2:</b>	Substratos dieléctricos de bajo costo y baja pérdida .....	43
<b>Tabla 7-2:</b>	Parámetros del substrato .....	43
<b>Tabla 8-2:</b>	Parámetros de simulación .....	44
<b>Tabla 9-2:</b>	Dimensiones de la antena.....	47
<b>Tabla 10-2:</b>	Características del diodo Schottky .....	52
<b>Tabla 11-2:</b>	Características de los capacitores .....	53
<b>Tabla 12-2:</b>	Elementos del circuito equivalente del diodo HSMS-2850.....	58
<b>Tabla 1-3:</b>	Mediciones de intensidad de campo en el primer punto.....	78
<b>Tabla 2-3:</b>	Resultado de mediciones de intensidad de campo E en bandas ISM.....	79
<b>Tabla 3-3:</b>	Resultado de estudio de mediciones en la banda ISM de 2.4 GHz.....	80
<b>Tabla 4-3:</b>	Dimensiones de la antena optimizadas.....	81
<b>Tabla 5-3:</b>	Resultados de la simulación.....	84
<b>Tabla 6-3:</b>	Niveles de potencia recibido en canales de WiFi .....	88
<b>Tabla 7-3:</b>	Referencia de niveles de potencia recibido .....	89
<b>Tabla 8-3:</b>	Voltaje a la salida del rectificador $f_0 = 2.45$ GHz .....	95
<b>Tabla 9-3:</b>	Voltaje a la salida del rectificador $f_0 = 2.69$ GHz .....	96
<b>Tabla 10-3:</b>	Voltaje a la salida del rectificador $f_0 = 2.2$ GHz .....	96
<b>Tabla 11-3:</b>	Potencia vs Voltaje para diodo led.....	98
<b>Tabla 12-3:</b>	Cosechamiento de energía (Antena y Generador de señales como Tx).....	100
<b>Tabla 13-3:</b>	Características de operación del router WiFi .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Representación gráfica del campo eléctrico .....	5
<b>Figura 2-1:</b>	Campos Magnéticos .....	6
<b>Figura 3-1:</b>	Ecuaciones de Maxwell.....	7
<b>Figura 4-1:</b>	Tipos de ondas electromagnéticas .....	9
<b>Figura 5-1:</b>	Radiaciones no ionizantes y ionizante .....	10
<b>Figura 6-1:</b>	Espectro radioeléctrico .....	11
<b>Figura 7-1:</b>	La banda ISM.....	11
<b>Figura 8-1:</b>	Bandas de frecuencia ISM.....	12
<b>Figura 9-1:</b>	Antena como dispositivo de transición.....	13
<b>Figura 10-1:</b>	Regiones de Campo de una Antena .....	14
<b>Figura 11-1:</b>	Diagrama de radiación de una antena Yagi direccional.....	15
<b>Figura 12-1:</b>	Perdidas en una Antena y sus terminales.....	17
<b>Figura 13-1:</b>	Antena en transmisión y su circuito equivalente.....	18
<b>Figura 14-1:</b>	Propagación del campo eléctrico .....	19
<b>Figura 15-1:</b>	Polarizaciones: (a) lineal vertical, (b) circular y (c) elíptica. ....	19
<b>Figura 16-1:</b>	Antena: (a) Dipolo, (b) Lazo y (c) Hélice.....	20
<b>Figura 17-1:</b>	Antena de apertura y Antena microstrip .....	20
<b>Figura 18-1:</b>	Reflector parabólico y Arreglo de antenas.....	21
<b>Figura 19-1:</b>	Parche Microstrip .....	21
<b>Figura 20-1:</b>	Estructura de una línea microstrip .....	22
<b>Figura 21-1:</b>	Geometría equivalente de una línea microstrip.....	23
<b>Figura 22-1:</b>	Geometrías para parches microstrip .....	24
<b>Figura 23-1:</b>	Fuentes para cosechamiento de energía .....	27
<b>Figura 24-1:</b>	Sistema de cosecha de energía de RF .....	28
<b>Figura 25-1:</b>	Diagrama de bloques de una rectenna .....	29
<b>Figura 26-1:</b>	Red de acoplamiento de impedancias .....	30
<b>Figura 27-1:</b>	Redes tipo L, T y pi.....	30
<b>Figura 28-1:</b>	Rectificador media onda.....	31
<b>Figura 29-1:</b>	Rectificador onda completa tipo puente .....	31
<b>Figura 30-1:</b>	Rectificador onda completa de punto medio.....	32
<b>Figura 31-1:</b>	Filtro pasabanda .....	32
<b>Figura 32-1:</b>	Contribuciones por etapas al rendimiento del sistema .....	33
<b>Figura 1-2:</b>	Narda SRM 3006.....	35
<b>Figura 2-2:</b>	Antena de campo E (27 MHz a 3GHz).....	35

<b>Figura 3-2:</b>	Software SRM-3006 Tools.....	36
<b>Figura 4-2:</b>	Canales Wi-Fi en el estándar 802.11b .....	40
<b>Figura 5-2:</b>	Diagrama de Bloques del dispositivo .....	41
<b>Figura 6-2:</b>	Metodología de diseño de la antena parche microstrip. ....	43
<b>Figura 7-2:</b>	Dimensiones de la antena parche microstrip .....	44
<b>Figura 8-2:</b>	Posicionamiento de la antena parche .....	47
<b>Figura 9-2:</b>	Asignación del sustrato dieléctrico .....	48
<b>Figura 10-2:</b>	Asignación de variables.....	48
<b>Figura 11-2:</b>	Estructura del diseño .....	49
<b>Figura 12-2:</b>	Definición del puerto.....	49
<b>Figura 13-2:</b>	Límites de radiación .....	50
<b>Figura 14-2:</b>	Configuración de solución (a) y Barrido de Frecuencia (b).....	50
<b>Figura 15-2:</b>	Circuito Multiplicador-Rectificador .....	51
<b>Figura 16-2:</b>	Curva característica V-I del diodo HSMS-2850 .....	52
<b>Figura 17-2:</b>	Diodos HSMS-2850 .....	53
<b>Figura 18-2:</b>	Capacitores muRata modelo GQM2195C2E101JB12D .....	54
<b>Figura 19-2:</b>	Simulación del Circuito Multiplicador-Rectificador.....	54
<b>Figura 20-2:</b>	Herramienta Tuning para selección de capacitores .....	55
<b>Figura 21-2:</b>	Circuito Multiplicador-Rectificador con capacitor de 1 pF .....	55
<b>Figura 22-2:</b>	Circuito Multiplicador-Rectificador con capacitor de 100 pF .....	56
<b>Figura 23-2:</b>	Circuito Multiplicador-Rectificado, capacitor muRata de 100 pF .....	57
<b>Figura 24-2:</b>	Circuito Multiplicador-Rectificador, capacitor muRata.....	57
<b>Figura 25-2:</b>	Circuito equivalente del diodo Schottky HSMS-2850.....	58
<b>Figura 26-2:</b>	Circuito Multiplicador-Rectificador, circuito equivalente del diodo .....	59
<b>Figura 27-2:</b>	Impedancia del circuito multiplicador-rectificador a 2.45 GHz.....	59
<b>Figura 28-2:</b>	Módulo Smith Chart.....	60
<b>Figura 29-2:</b>	Simulación de la red de acoplamiento con Smith Chart .....	60
<b>Figura 30-2:</b>	Circuito rectificador multiplicador y capacitor para almacenar energía .....	61
<b>Figura 31-2:</b>	Diseño de la red de acoplamiento incluyendo etapa de almacenamiento .....	62
<b>Figura 32-2:</b>	(a) Diseño del circuito incluido Smith Chart (b) Diseño de la red de acoplamiento.....	63
<b>Figura 33-2:</b>	LineCalc ADS .....	63
<b>Figura 34-2:</b>	Red de acoplamiento en dimensiones físicas .....	64
<b>Figura 35-2:</b>	Optimización de dimensiones físicas de la red de acoplamiento .....	64
<b>Figura 36-2:</b>	Diseño del circuito final .....	65
<b>Figura 37-2:</b>	(a) Parámetro $S_{11}$ , (b) Impedancia de entrada del dispositivo diseñado .....	65
<b>Figura 38-2:</b>	Conversión de RF a DC con $P_{in} = -10$ dBm y $R_L = 100$ K $\Omega$ .....	66

<b>Figura 39-2:</b>	Esquemático final del circuito rectificador .....	69
<b>Figura 40-2:</b>	Layout final del rectificador .....	70
<b>Figura 41-2:</b>	Configuración para la simulación EM .....	70
<b>Figura 42-2:</b>	Generación del símbolo del layout .....	71
<b>Figura 43-2:</b>	Co-simulación del circuito rectificador .....	71
<b>Figura 44-2:</b>	Exportación de los diseños en formato .dxf .....	73
<b>Figura 45-2:</b>	Diseño de la antena y rectificador en AUTOCAD .....	73
<b>Figura 46-2:</b>	Corte de la placa en CNC .....	74
<b>Figura 47-2:</b>	Proceso de grabado en la placa de FR-4 para el Rectificador .....	74
<b>Figura 48-2:</b>	Antena parche microstrip y Circuito Rectificador implementados .....	74
<b>Figura 49-2:</b>	Escenario para medición de la antena parche microstrip .....	76
<b>Figura 50-2:</b>	Escenario para medición del circuito rectificador .....	76
<b>Figura 1-3:</b>	Gráficas de intensidad de campo en primer punto .....	78
<b>Figura 2-3:</b>	Parámetro $S_{11}$ .....	81
<b>Figura 3-3:</b>	Relación de onda estacionaria .....	82
<b>Figura 4-3:</b>	Patrón de radiación en 3D .....	82
<b>Figura 5-3:</b>	Patrón de radiación $\phi = 0$ (plano xz) .....	83
<b>Figura 6-3:</b>	Patrón de radiación $\phi = 90$ (plano yz) .....	83
<b>Figura 7-3:</b>	Ganancia de la antena .....	83
<b>Figura 8-3:</b>	(a) Parámetro $S_{11}$ , (b) Impedancia de entrada del dispositivo diseñado .....	84
<b>Figura 9-3:</b>	Conversión de RF a DC con $P_{in} = -10$ dBm y $R_L = 10$ K $\Omega$ .....	85
<b>Figura 10-3:</b>	Análisis espectral en la entrada y salida del circuito rectificador .....	86
<b>Figura 11-3:</b>	Dispositivo para el cosechamiento de energía RF .....	87
<b>Figura 12-3:</b>	Nivel de potencia recibido por la antena en 2.45 GHz .....	88
<b>Figura 13-3:</b>	Mediciones de la antena con el VNA .....	89
<b>Figura 14-3:</b>	Pérdidas de retorno de la antena medido con VNA .....	90
<b>Figura 15-3:</b>	VSWR antena medido con VNA .....	91
<b>Figura 16-3:</b>	Impedancia de la antena vista en carta Smith medido con VNA .....	91
<b>Figura 17-3:</b>	Medición del circuito rectificador en el VNA .....	92
<b>Figura 18-3:</b>	Pérdidas de retorno ( $S_{11}$ ) circuito rectificador medido con VNA .....	93
<b>Figura 19-3:</b>	VSWR circuito rectificador medido con VNA .....	94
<b>Figura 20-3:</b>	Impedancia circuito rectificador vista en carta Smith medido con VNA .....	94
<b>Figura 21-3:</b>	Circuito Rectificador conectado al generador de señales .....	95
<b>Figura 22-3:</b>	Potencia de entrada $P_{RF}$ vs Voltaje a la salida $V_{DC}$ circuito rectificador .....	97
<b>Figura 23-3:</b>	Señal a la salida del circuito rectificador vista en osciloscopio .....	98
<b>Figura 24-3:</b>	Circuito Rectificador con diodo LED .....	99
<b>Figura 25-3:</b>	Antena y generador de señales como transmisor .....	100

<b>Figura 26-3:</b>	Mediciones con osciloscopio señal recibida router WiFi.....	102
<b>Figura 27-3:</b>	Cosechamiento de energía router sin tráfico.....	102
<b>Figura 28-3:</b>	Cosechamiento de energía con dispositivo conectado al router .....	103
<b>Figura 29-3:</b>	Voltaje a la salida del dispositivo usando modem WiFi como fuente.....	103
<b>Figura 30-3:</b>	Cosechamiento de energía router WiFi con un LED como carga .....	104
<b>Figura 31-3:</b>	$S_{11}$ simulado y medido antena parche microstrip .....	105
<b>Figura 32-3:</b>	$S_{11}$ simulado y medido circuito rectificador .....	106
<b>Figura 33-3:</b>	Voltaje a la salida del circuito rectificador simulado vs medido $f_o=2.45$ GHz. 106	
<b>Figura 34-3:</b>	Cosechamiento de energía RF (Antena y Generador de señales como Tx).....	107



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-2:</b> $V_{out}$ (V) vs $P_{in}$ (dBm): a) $R_L= 10\text{ K}\Omega$ , b) $R_L= 30\text{ K}\Omega$ , c) $R_L= 50\text{ K}\Omega$ , d) $R_L= 100\text{ K}\Omega$ .....	67
<b>Gráfico 2-2:</b> Eficiencia de conversión de RF a DC (Eficiencia (%) vs $P_{in}$ (dBm) .....	68
<b>Gráfico 1-3:</b> (a) $V_{out}$ (V) vs $P_{in}$ (dBm) y (b) eficiencia de conversión de RF a DC.....	85

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** MEDICIONES DE INTENSIDAD DE CAMPO CON NARDA SRM 3006

**ANEXO B:** MEDICIONES DE LA ANTENA PARCHE MICROSTRIP

**ANEXO C:** MEDICIONES DEL CIRCUITO RECTIFICADOR

**ANEXO D:** MEDICIONES DEL DISPOSITIVO PARA COSECHAMIENTO DE ENERGÍA  
RF

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Continua
EM	Electromagnético
GHz	Giga Hertzios
RF	Radio Frecuencia
MW	Microondas
UHF	Frecuencia ultra alta
SHF	Frecuencia super alta
EHF	Frecuencia extremadamente alta
PCB	Placa de circuito impreso
LPF	Filtro pasabajo
ISM	Bandas de radio industriales, científicas y médicas
WLAN	Redes de área local inalámbrica
Wi-Fi	Wireless Fidelity
VSWR	Relación de onda estacionario (ROE)
BW	Ancho de banda
WSN	Redes de sensores inalámbricos
IoT	Internet de las cosas
Z	Impedancia

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realizó el diseño e implementación de un dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia en la banda Industrial, Científica y Médica (ISM). Se llevó a cabo una campaña de medición de intensidad de campo empleando el medidor de radiación NARDA SRM 3006, se determinó que la mayor oportunidad para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia (RF) se encuentra en la banda ISM de 2.4 GHz, centrándose en la tecnología WiFi, se seleccionó como frecuencia central 2.45 GHz. El dispositivo se implementó en material FR4 de permitividad dieléctrica 4.4 y grosor 1.6 mm. Se diseñó una antena parche microstrip alimentada por línea de transmisión y acoplada mediante inserción, en la etapa de rectificación se usó una red de acoplamiento, un circuito rectificador y una etapa de almacenamiento de energía, se hizo uso del método de balance de armónicos y momento electromagnético, como elemento rectificador se seleccionó los diodos Schottky HSMS-2850. Se realizó las mediciones en el laboratorio, el ancho de banda de la antena de 55.9 MHz, pérdidas de retorno de -24.2 dB y potencia recibida de -58 dBm a 10 cm del transmisor con potencia de -10 dBm, el voltaje en continua medido a la salida del circuito rectificador para diferentes potencias de RF en 0 dBm 113.3 mV, 10 dBm 443.8 mV y 20 dBm 1282 mV, se cosechó la energía de RF de un router WiFi, a 10 cm un voltaje 510.6 mV, la señal rectificada se visualizó en el osciloscopio y se verificó el funcionamiento encendiendo un diodo led. Se concluye que el dispositivo logra convertir las ondas de radiofrecuencia a corriente continua cosechando energía proveniente de ondas de RF. Se recomienda integrar la antena y el circuito rectificador en una misma placa para evitar pérdidas de energía.

**Palabras clave:** <COSECHAMIENTO DE ENERGÍA> <ENERGÍA DE RADIOFRECUENCIA> <BANDA INDUSTRIAL, CIENTÍFICA Y MÉDICA (ISM)> <RECTIFICADOR> <DIODO SCHOTTKY> <ANTENAS>.



Firmado electrónicamente por:  
**HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA**

0058-DBRA-UPT-2022  
2022-01-14

## SUMMARY

In the present degree work, the design and implementation of a device for the harvesting of radio frequency energy in the Industrial, Scientific and Medical (ISM) band was carried out. A field intensity measurement campaign was carried out using the NARDA SRM 3006 radiation meter, it was determined that the greatest opportunity for harvesting radio frequency (RF) energy is in the 2.4 GHz ISM band, focusing on the Wi-Fi technology, 2.45 GHz was selected as the central frequency. The device was implemented in FR4 material with a dielectric permittivity of 4.4 and a thickness of 1.6 mm. A microstrip patch antenna was designed fed by transmission line and coupled by insertion, in the stage of rectification used a coupling network, a rectifier circuit and a stage of energy storage, the method of harmonic balance and electromagnetic moment was used, as a rectifying element the Schottky HSMS-2850 diodes were selected. It was made the measurements in the laboratory, the antenna bandwidth of 55.9 MHz, return loss of -24.2 dB and -58 dBm received power at 10 cm from transmitter with power of -10 dBm, the DC voltage measured at the output of the rectifier circuit for different powers RF energy at 0 dBm 113.3 mV, 10 dBm 443.8 mV and 20 dBm 1282 mV, the RF energy was harvested of a Wi-Fi router, at 10 cm a voltage of 510.6 mV, the rectified signal was displayed on the oscilloscope and the operation was verified by lighting a led diode. It is concluded that the device achieves convert radio frequency waves to direct current by harvesting energy from RF waves. It is recommended to integrate the antenna and the rectifier circuit on the same board to avoid energy losses.

**Keywords:** <HARVESTING ENERGY> <ENERGY FROM RADIO FREQUENCY> <INDUSTRIAL, SCIENTIFIC AND MEDICAL (ISM) BAND> <RECTIFIER> <SCHOTTKY DIODE> <ANTENNAS>.



Firmado electrónicamente por:  
**WILSON GONZALO**  
**ROJAS YUMISACA**

## INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo el ser humano ha tenido la necesidad de hacer uso de diferentes fuentes de energía para poder llevar a cabo sus actividades, existen diferentes fuentes de energía como la energía solar, eólica, térmica entre otras, que han sido aprovechadas para producir energía eléctrica, es aquí donde surge el concepto de energy harvesting o cosechamiento de energía, el cual consiste en aprovechar diferentes fuentes de energía provenientes del ambiente y captar parte de esta energía para ser almacenada o utilizada directamente para alimentar diferentes tipos de dispositivos.

El estudio de nuevos métodos que permitan hacer uso de energías renovables es de suma importancia para la sostenibilidad de nuestro planeta debido a su rápido crecimiento y sobreexplotación de recursos. La rápida expansión de las redes inalámbricas, dispositivos del internet de las cosas, la electrónica de consumo de baja potencia y las redes de sensores han hecho que el uso de baterías incremente, acarreando serios problemas a futuro, debido a que estas cuentan con un tiempo de vida útil.

En la actualidad el uso de redes inalámbricas es cada vez mayor, por tal razón la radiación electromagnética presente en el ambiente también lo es, junto con el incremento en la ocupación del espectro electromagnético, las diferentes tecnologías inalámbricas emiten una cierta cantidad de energía electromagnética al ambiente, pero parte esta energía no es empleada en su totalidad, es por este motivo que toma importancia el concepto de RF energy harvesting o cosechamiento de energía de radiofrecuencia.

Las fuentes de energía de radiofrecuencia presentes en el ambiente son provenientes de diferentes tecnologías comúnmente usadas, las cuales operan en un determinado rango de frecuencias, entre estas tecnologías se pueden encontrar la radio y la televisión, la telefonía móvil como GSM, UMTS y LTE, las bandas de radio industriales, científicas y médicas conocidas como ISM, entre ellas el Wi-Fi (Srinivasu et al., 2019).

Al hablar sobre el cosechamiento de energía de radiofrecuencia es necesario mencionar el concepto de las rectenas o antenas rectificadoras que son empleadas en los sistemas de cosechamiento de energía de radiofrecuencia, se las conoce como rectenas ya que están conformadas por una etapa de captación, cuyas funciones las realiza la antena y una de rectificación que se encarga de la conversión de la energía de radiofrecuencia presente en el medio a corriente continua, la cual será empleada para alimentar un dispositivo final que tengan las características de bajo consumo de potencia (Martínez, A. 2014, p.1).

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Qué tan importante es el estudio y desarrollo de dispositivos para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia en la banda ISM para la actualidad y en futuras aplicaciones?

## **SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

- ¿Qué factores se deben tomar en cuenta en el diseño del dispositivo para obtener el mejor rendimiento en el cosechamiento de energía de radiofrecuencia en la banda ISM?
- ¿Cuáles son las limitaciones que presentan los dispositivos para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia en la banda ISM?
- ¿Por qué se debe considerar el diseño y uso de dispositivos para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia en la banda ISM?
- ¿Qué ventajas brinda el uso de dispositivos para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia en la banda ISM dentro del campo de los sensores inalámbricos?

## **JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

El empleo de dispositivos para el cosechamiento de energía del ambiente no es nuevo, el uso de la energía solar correspondiente a la luz visible en el espectro electromagnético ha sido ampliamente usado en este campo, con la aparición de nuevas tecnologías y el constante uso de las bandas de radiofrecuencia, la atención se ha centrado dentro de esta parte del espectro electromagnético, debido al amplio uso que se la da actualmente (Srinivasu, citado en Martínez, M. et al., 2019).

El uso de las tecnologías inalámbricas ha incrementado notablemente y por ende el incremento de la radiación electromagnética de señales presentes en el ambiente, las cuales son provenientes de diferentes fuentes como la difusión de radio y televisión, telefonía móvil, WiFi, Bluetooth, entre otras tecnologías, siendo de esta forma posible captar parte de la energía generada por estas tecnologías a través del diseño de un dispositivo que capte la energía de RF para ser posteriormente empleada para alimentar otros dispositivos especialmente los de poco consumo. Para poder captar la energía de radiofrecuencia presente en el ambiente es necesario contar con una antena y un rectificador, que son dos de los componentes básicos de este tipo de dispositivos, la antena se encarga de capturar la energía de RF y el rectificador se encarga de convertir la energía de RF a corriente continua.

## **JUSTIFICACIÓN APLICATIVA**

La cosecha de energía inalámbrica de radiofrecuencia a pesar de ser una tecnología no tan explotada, pero con grandes prestaciones a futuro, tiende a ser un tema de importancia en la actualidad debido a la necesidad de contar con formas alternativas para poder alimentar dispositivos de baja potencia. Dado el crecimiento continuo de los dispositivos del internet de las cosas, la electrónica de consumo de baja potencia y las redes de sensores (WSN), es necesario contar con estudios referentes a las formas alternativas de alimentar estos dispositivos.

La razón por la que se propone este proyecto surge como una propuesta alternativa a las fuentes de alimentación empleadas comúnmente en la actualidad como lo son las baterías las cuales, en un futuro, debido a la cantidad de dispositivos que necesitarán una fuente de alimentación como estas, pueda llegar a ser un grave problema con respecto a temas de contaminación y desperdicio de energía.

Por este motivo se pretende diseñar un dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia dentro de la banda ISM, para esto se propone realizar ciertos estudios previos para definir los parámetros de diseño, en primer lugar, se realizará una campaña de medición de potencia en el laboratorio de la FIE con el fin de analizar los datos de ocupación/utilización de la banda ISM y determinar a qué banda de frecuencia se podrá diseñar el dispositivo para conseguir un máximo rendimiento.

Posteriormente se llevará a cabo un análisis de los datos recogidos definiendo la banda de frecuencia a la que se diseñará el dispositivo, junto con los parámetros de diseño que se empleará para la simulación electromagnética mediante software y posterior implementación del dispositivo junto con las pruebas correspondientes para verificar su funcionamiento.



## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar un dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia en la banda ISM.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar el estado del arte acerca del cosechamiento de energía en radiofrecuencia.
- Determinar y analizar los niveles de potencia recibidos de las tecnologías que trabajan en la banda ISM para seleccionar la frecuencia de trabajo más adecuada.
- Establecer los parámetros de diseño del dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia.
- Diseñar, simular e implementar el dispositivo.
- Verificar el funcionamiento del dispositivo.

# CAPÍTULO I

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1. Campos eléctricos y magnéticos

Las bases del electromagnetismo parten de estudios en temas de electricidad y magnetismo realizados por Ampere, Faraday y junto con varios estudios más que permitieron a Maxwell dar una explicación tratándolos como uno solo (Vega, 2015, p. 242).

#### 1.1.1. Campo Eléctrico

Se produce por las fuerzas generadas por la interacción de cargas eléctricas, esta fuerza se describe mediante la ecuación 1-1 y actúan de acuerdo al signo de las mismas, si son de signo diferente se generan fuerzas de atracción y si son iguales estas se repelen, se puede medir en voltios metros (V/M) o newtons por culombios (N/C) (Osorio, 2007, p.4).

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (1-1)$$

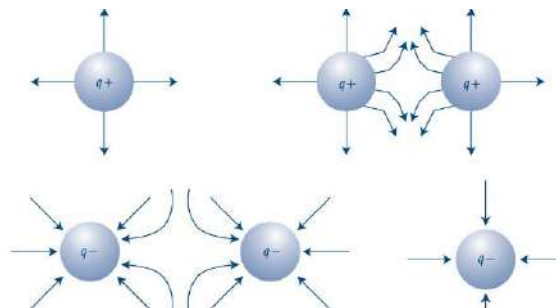
Donde:

$\vec{F}$  = fuerza (newtons).

$q$  = carga eléctrica (coulombs).

$\vec{E}$  = campo eléctrico (N / C).

Mediante estudios experimentales Faraday logró explicar el comportamiento entre cargas (ver figura 1-1) concluyendo que las fuerzas salen de las cargas con signo + (positivo) y entran en las de signo - (negativo) (Vega, 2015, pp. 19-20).



**Figura 1-1:** Representación gráfica del campo eléctrico

Fuente: Vega, 2015, p.20

### 1.1.2. Campo Magnético

Se produce cuando las cargas que están en movimiento dan como resultado fuerzas magnéticas (ver figura 2-1), al igual que el campo eléctrico su intensidad disminuye si se aleja de la fuente y comúnmente se lo representa mediante la inducción magnética  $\vec{B}$  como muestra la ecuación 2-1 (Osorio, 2007, p.4).

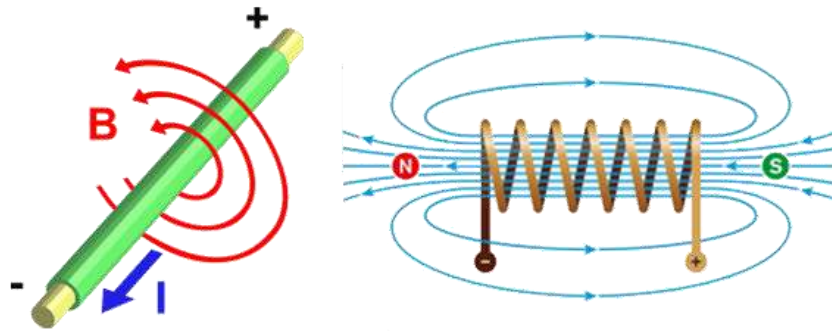
$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2-1)$$

Donde:

$\vec{B}$  = flujo magnético.

$\mu$  = permeabilidad magnética.

$\vec{H}$  = campo magnético.



**Figura 2-1:** Campos Magnéticos

Fuente: <https://www.goudsmitmagnets.com/fr/knowledge-base/about-magnetism.html>

### 1.2. Ondas Electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son oscilaciones o vibraciones de los campos eléctricos y magnéticos conocidos como campos electromagnéticos, este tipo de ondas son capaces de propagarse a través del vacío y pueden viajar a la velocidad de luz, siendo muy ampliamente estudiadas en el campo de las telecomunicaciones (Moreno, 2016, p.19). Este tipo de ondas depende de su frecuencia y longitud de onda como lo muestra la ecuación 3-1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3-1)$$

Donde c es la velocidad a la que se propaga la luz en el espacio libre la cual es aproximadamente  $3 \cdot 10^8$  m/s.

### 1.2.1. Ecuaciones de Maxwell

James Clerk Maxwell en 1864 presentó su trabajo, en el cual se agrupó los estudios referentes a los campos eléctricos y magnéticos por medio de la deducción de ecuaciones matemáticas de estudios previos realizados por Faraday y otros estudios relacionados a la electricidad y el magnetismo, mediante estas ecuaciones Maxwell estableció los fundamentos para el estudio de cualquier fenómeno electromagnético y de esta forma la base de la teoría electromagnética (Castaño, 2008, pp. 8-9).

La figura 3-1 muestra las ecuaciones que dedujo James Clerk Maxwell de forma diferencial e integral, las cuales parten de la ley experimental del magnetismo y la electricidad, en donde se encuentran las leyes de Coulomb, Gauss, Biot-Savart, Ampere y Faraday (Pérez, 2004, p.1).

	<i>Diferencial</i>	<i>Integral</i>
Ley de GaussM	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$
Ley de Gauss E	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_{libre}$	$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q_{libre\ encerrada}$
Ley de Faraday	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_{C(S)} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$
Ley de Ampère-Maxwell	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_{C(S)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{conduc} + \frac{d}{dt} \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{A}$

**Figura 3-1:** Ecuaciones de Maxwell

Fuente: Pérez, 2004, p.1.

Donde:

$\vec{E}$  : vector intensidad de campo eléctrico.

$\vec{D}$  : vector desplazamiento eléctrico.

$\vec{B}$  : vector inducción magnética.

$\vec{H}$  : vector campo magnético.

$\vec{J}$  : vector densidad de corriente.

$\rho_{libre}$  : densidad volumétrica de carga libre.

$I_{conduc}$ : corriente de conducción.

#### *1.2.1.1. Ley de Gauss para campos magnéticos*

Esta ley demuestra de forma matemática que no existen cargas magnéticas o también llamados monopolos magnéticos es por esta razón que las líneas de campo magnético se cierran en sí mismo (Ruz, 2012, p.78).

#### *1.2.1.2. Ley de Gauss para campos eléctricos*

Esta ley parte de la ley de Coulomb y la ley de Gauss, de forma diferencial describe la forma en la que las líneas de campo convergen sobre una carga positiva y divergen de una positiva, explicando el comportamiento de que las cargas diferentes se atraen y cargas iguales se repelen (Pérez, 2004, p.1).

#### *1.2.1.3. Ley de Faraday*

Esta ley es posterior a la ley de Ampere, y mediante esta se establece que la variación en el tiempo de un campo magnético da lugar a un campo eléctrico (Pérez, 2004, p.1).

#### *1.2.1.4. Ley de Ampere-Maxwell*

Parte de la ley de Ampere y a partir de ella se explica que si se aplica una corriente a través de un material conductor esta genera un campo magnético alrededor de este, describiendo el efecto de las corrientes magnéticas o de los campos magnéticos variables (Vega, 2015, p. 242-243).

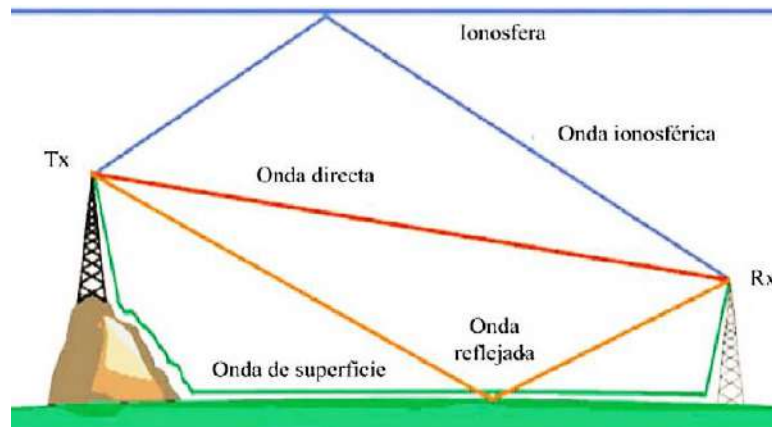
### ***1.2.2. Propagación de ondas electromagnéticas***

Cada banda de frecuencia del espectro electromagnético posee un comportamiento diferente al momento de ser transmitido por el medio designado para su propagación, esto depende de una serie de factores como la atenuación debido a la frecuencia, el clima presente durante la propagación, los obstáculos, las características atmosféricas entre otros que se deben considerar especialmente en las comunicaciones inalámbricas (Ordoñez, 2012, p. 19).

La forma en la que se propagan las ondas electromagnéticas en el medio de transmisión se ven influenciadas directa o parcialmente según su frecuencia y el medio de transmisión empleado junto con su entorno, provocando algunos fenómenos como la reflexión, difracción, absorción y dispersión de la onda entre los más comunes (Huidobro y Ordóñez, 2014: p. 175).

### 1.2.3. Tipos de ondas electromagnéticas

Existen diferentes tipos de ondas o conocidos también como modos de propagación, las cuales dependen principalmente de la frecuencia y del medio de transmisión (Huidobro y Ordóñez, 2014: p. 178). Los tipos de ondas electromagnéticas se pueden observar en la figura 4.1.



**Figura 4-1:** Tipos de ondas electromagnéticas

Fuente: Huidobro y Ordóñez, 2014, p.178.

Las ondas de superficie dependen de las propiedades que posea el suelo, son empleadas en frecuencias menores a los 30 MHz, es estable y posee grandes alcances. Las ondas ionosféricas emplean las reflexiones en la ionosfera para propagarse, en frecuencias entre los 3 y 30 MHz, posee grandes alcances, pero poca estabilidad de la señal. La onda espacial hace uso de la troposfera y es usada en frecuencias mayores a los 30 MHz, se divide en onda directa, reflejada y multitrayecto. La onda de dispersión troposférica hace uso de los cambios en la troposfera, posee pérdidas muy elevadas (Huidobro y Ordóñez, 2014: p. 178).

### 1.2.4. Tipos de radiaciones

En la actualidad debido al constante desarrollo de tecnologías, las fuentes de campo electromagnético usadas para distintos fines como medicina, comunicaciones, industria entre otras también han aumentado, es por esta razón que se clasifican en dos tipos de acuerdo con la longitud de onda y cantidad de energía que emitan (Guerrero y Pérez, 2006).

#### 1.2.4.1. Radiaciones ionizantes

Trabajan en frecuencias muy altas, las cuales debido a su elevada frecuencia y energía pueden ocasionar alteraciones tanto a nivel físico como molecular, entre algunas de ellas se encuentran las de tipo cósmicas, los conocidos rayos X usados en el campo médico entre otros como se ve en la figura 5-1 (Huidrobo y Ordoñez, 2014, p.555).

#### 1.2.4.2. Radiaciones no ionizantes

No provocan alteraciones en la materia ya que no poseen energía suficiente para hacerlo, se conocen dos grupos: los campos de tipo electromagnéticos donde se puede apreciar los producidos por líneas eléctricas, las radiocomunicaciones como radio, televisión, comunicaciones móviles y las radiaciones ópticas, un efecto producido por este tipo de radiaciones es el calor y un claro ejemplo son los hornos microondas (Huidrobo y Ordoñez, 2014, p.555).



**Figura 5-1:** Radiaciones no ionizantes y ionizante

Fuente: Huidrobo y Ordoñez, 2014, p. 556.

### 1.3. El espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico corresponde a un segmento del espectro electromagnético, empleado en la transmisión de ondas electromagnéticas que no necesitan un medio guiado, a este tipo de comunicaciones se las conoce como comunicaciones inalámbricas o radiocomunicaciones, muy ampliamente usadas en las telecomunicaciones (Ordoñez, 2012, p. 18). La figura 6-1 muestra las diferentes bandas de frecuencias en las que se divide el espectro radioeléctrico.

Núm. de la banda	Símbolos (en inglés)	Nombre (en inglés)	Rango de frecuencias	Subdivisión métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
4	VLF	Very low frequency	3 a 30 kHz	Ondas Miriamétricas	B.Mam
5	LF	Low frequency	30 a 300 kHz	Ondas Kilométricas	B.Km
6	MF	Medium frequency	300 a 3 000 kHz	Ondas Hectométricas	B.hm
7	HF	High frequency	3 a 30 MHz	Ondas Decamétricas	B.dam
8	VHF	Very high frequency	30 a 300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	Ultra high frequency	300 a 3,000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	Super high frequency	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	Extremely high frequency	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12			300 a 3,000 GHz	Ondas decimilimétricas	B.dmm

**Figura 6-1:** Espectro radioeléctrico

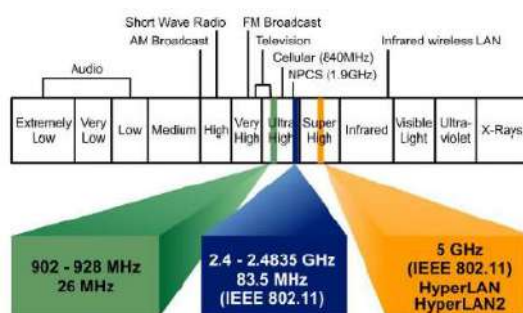
**Fuente:** Llanos, 2013, p.15.

### 1.3.1. Las microondas

Se definen en los 300 MHz y 300 GHz correspondientes a las bandas UHF, SHF y EHF (ver figura 6-1) con longitudes de onda de  $\lambda = 1 m$  y  $\lambda = 1 mm$ , su nombre viene dado debido a que, a frecuencias altas,  $\lambda$  es mas pequeña llegando al orden de los milímetros (Siljeström, 2015, p.7).

### 1.3.2. La Banda ISM

ISM del inglés Industrial, Scientific and Medical, son bandas de frecuencias libres empleadas como su nombre lo dice en aplicaciones científicas, industriales y médicas (ver figura 7-1), muy ampliamente usadas en distintas tecnologías que hacen uso de la energía de radiofrecuencia RF (Prieto, 2019, p. 1).



**Figura 7-1:** La banda ISM

**Fuente:** Prieto, 2019, p. 1.

Las bandas que se consideran como ISM se encuentran desde los 6.78 KHz hasta los 245 GHz en forma dispersa y se definen por la UIT-R en los reglamentos de radiocomunicaciones número 5.138, 5.150 y 5.280 (D'mello et al, 2018, p.35).



Las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz empleada por WiFi son muy estudiadas en el campo del cosechamiento de energía de radiofrecuencia por su disponibilidad y por los niveles de potencia con lo que se podría trabajar (Prieto, 2019, p. 1).

### 1.3.2.1. Distribución de bandas en ISM

Las bandas de frecuencia establecidas por la ITU-R como ISM (ver figura 8-1) que forman parte del espectro radioeléctrico y pueden ser empleadas sin licencia con la condición de cumplir las normativas establecidas por los reglamentos de radiocomunicaciones para esta banda, entre las bandas más empleadas se tiene las bandas de 2.4 GHz, 5 GHz y algunas por debajo del 1 GHz (D'mello et al, 2018, p.35).

ISM Bands: <u>RR</u>		
6 765-6 795 kHz	(centre frequency 6 780 kHz)	FN 5.138
13 553-13 567 kHz	(centre frequency 13 560 kHz)*	FN 5.150
26 957-27 283 kHz	(centre frequency 27 120 kHz)	FN 5.150
40.66-40.70 MHz	(centre frequency 40.68 MHz)	FN 5.150
433.05-434.79 MHz	(centre frequency 433.92 MHz)in Region1**	FN 5.138
902-928 MHz	(centre frequency 915 MHz) in Region 2	FN 5.150
2 400-2 500 MHz	(centre frequency 2 450 MHz)	FN 5.150
5 725-5 875 MHz	(centre frequency 5 800 MHz)	FN 5.150
24-24.25 GHz	(centre frequency 24.125 GHz)	FN 5.150
61-61.5 GHz	(centre frequency 61.25 GHz)	FN 5.138
122-123 GHz	(centre frequency 122.5 GHz)	FN 5.138
244-246 GHz	(centre frequency 245 GHz)	FN 5.138

**Figura 8-1:** Bandas de frecuencia ISM

**Fuente:** Mazar, 2014, p. 2.

### 1.3.2.2. Tecnologías que trabajan en las bandas ISM

En la actualidad existe un gran número de tecnologías que hacen uso de las bandas ISM como parte de su funcionamiento (ver tabla 1-1), en especial tecnologías inalámbricas, como Bluetooth, WiFi, Zigbee, estándares como IEEE 802.15.4. Estas bandas son empleadas para comunicaciones de corto alcance y de baja potencia, entre algunos ejemplos se tiene los teléfonos inalámbricos, dispositivos Bluetooth, NFC y redes inalámbricas como WiFi (D'mello et al, 2018, p.35).

**Tabla 1-1:** Tecnologías que usan la banda ISM

Tecnologías	Frecuencia
Horno microondas	2.45 GHz
Redes de sensores inalámbricos	915 MHz y 2.45 GHz
LAN y teléfonos inalámbricos	915 MHz, 2.45 GHz y 5.8 GHz
Aplicaciones de identificación por RF (RFID)	13.56 MHz
Dispositivos de radio control	2.4 GHz

Fuente: D'mello et al, 2018, p.35.

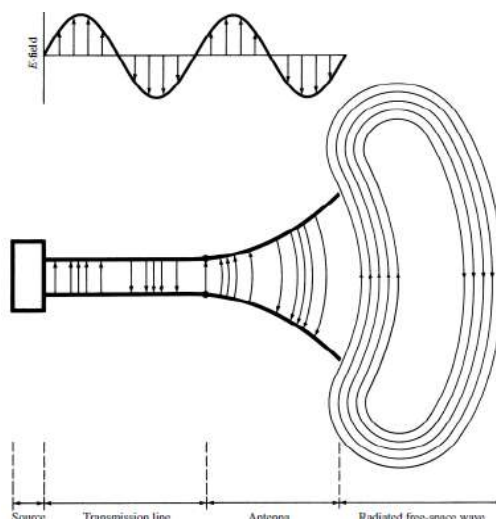
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 1.4. Fundamentos de las antenas

Es necesario conocer ciertos conceptos básicos referentes a las antenas para poder comprender a profundidad su funcionamiento e importancia dentro de las telecomunicaciones, a continuación se describe una serie de conceptos que todo estudiante debe comprender con respecto a las antenas.

#### 1.4.1. Definición de antena

Es una estructura que emite o captura ondas del tipo electromagnéticas, actúa como un medio de paso al espacio libre como se muestra en la figura 9-1 y permite establecer una comunicación sin hacer uso de conexiones físicas (Balanis, 2005, p.1).



**Figura 9-1:** Antena como dispositivo de transición

Fuente: Balanis, 2005, p.1.

### 1.4.2. Parámetros de las antenas

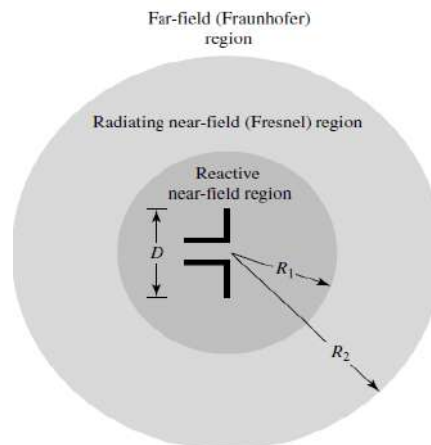
Para poder evaluar el funcionamiento de una antena es necesario que se definan ciertos parámetros para poder comprobar que cumpla con los requisitos necesarios tanto de forma independiente como dentro de un sistema de comunicación. A continuación, se da a conocer algunos parámetros que se deben considerar en el diseño de las antenas.

#### 1.4.2.1. Regiones de Campo

Se conoce como región de campo al espacio que rodea una antena y comúnmente se divide en tres regiones en las cuales se pueden observar marcadas diferencias de acuerdo a cada límite de la región (Balanis, 2005, p.34).

Como se muestra en la figura 10-1 se definen tres regiones que rodean a la antena, entre estas regiones están:

- Campo cercano reactivo.
- Campo cercano radiante (Fresnel).
- Campo lejano (Fraunhofer).



**Figura 10-1:** Regiones de Campo de una Antena

Fuente: Balanis, 2005, p.34.

Los límites de estas regiones vienen dados por las ecuaciones 4-1 y 5-1, la ecuación 4-1 es usada para calcular la región de campo cercano y la ecuación 5-1 para la región de Fresnel.

$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (4-1)$$

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5-1)$$

Donde:

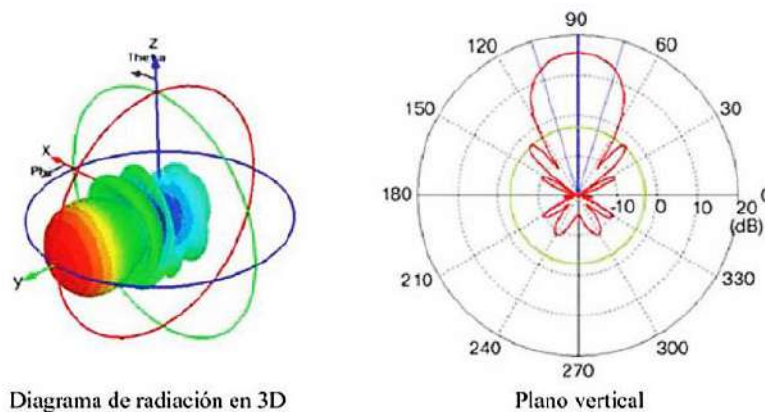
D = Dimensión máxima de la antena.

$\lambda$  = Longitud de onda.

#### 1.4.2.2. Patrón de radiación

El patrón de radiación es una forma de representar las propiedades de radiación mediante un gráfico en dos o tres dimensiones en función de su dirección angular, por lo general es determinado en el campo lejano y muestra la magnitud del campo eléctrico o magnético (Balanis, 2005, p.27).

En estos tipos de gráficos se determina la magnitud con la que una antena radia su energía y se puede determinar un lóbulo primario que indica el lugar donde la radiación es mayor y lóbulos laterales, secundarios y posteriores de menor intensidad como se muestra el patrón de radiación de una antena Yagi direccional en la figura 11-1 (Huidobro y Ordóñez, 2014: p. 114).



**Figura 11-1:** Diagrama de radiación de una antena Yagi direccional

Fuente: Huidobro y Ordóñez, 2014, p.116.

#### 1.4.2.3. Densidad de Potencia Radiada

Como sabemos una onda electromagnética necesita de un determinado nivel de energía para poder llevar la información de un lugar a otro, esta cantidad de energía se mide a partir del vector de Poynting instantáneo, de esta forma la densidad de potencia radiada se define como la cantidad de potencia que posee una señal por unidad de superficie en una dirección específica, dada por la ecuación 6-1 (Balanis, 2005, p. 38).

$$\vec{W} = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \quad (6-1)$$

Donde:

$\vec{E}$  = campo eléctrico en  $\left(\frac{V}{m}\right)$

$\vec{H}^*$  = campo magnético en  $\left(\frac{A}{m}\right)$

#### 1.4.2.4. Intensidad de radiación

Las antenas tienen la propiedad de concentrar su energía en una dirección específica, es por esta razón que es de importancia conocer esta cantidad de energía para poder caracterizarla, se mide en campo lejano y es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido (ver ecuación 7-1) (Balanis, 2005, p. 40).

$$U = r^2 W_{rad} \quad (7-1)$$

Donde:

$U$  es la intensidad de radiación (W/ unidad de ángulo sólido)

$W_{rad}$  es la densidad de radiación (W/m<sup>2</sup>)

#### 1.4.2.5. Directividad

Es la razón entre la intensidad que se radia en una dirección con respecto a la que una antena ideal emitiría bajo las mismas condiciones, la cual emite su energía en todos los sentidos y de forma matemática se la representa como la potencia que emite en su totalidad dividida para  $4\pi$ , de donde parte la ecuación 8-1 mostrada a continuación (Balanis, 2005, p. 44).

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (8-1)$$

Donde:

$D$  = Directividad (adimensional)

$U$  = Intensidad de radiación (W/unidad de ángulo sólido)

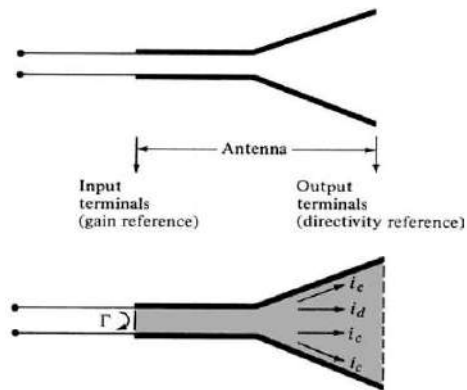
$U_0$  = Intensidad de radiación de una fuente ideal (W/unidad de ángulo sólido)

$P_{rad}$  = Potencia con que se radia

#### 1.4.2.6. Eficiencia

La eficiencia relaciona las pérdidas que se pueden producir en el terminal de entrada a la antena (ver figura 12-1), comúnmente por reflexiones que se producen al unirse a una línea de transmisión desacoplada, con las pérdidas internas (conductor y dieléctrico). Se calcula

relacionando la potencia radiada con la entregada y su valor está comprendido entre 0 y 1 (Balanis, 2005, p. 64).



**Figura 12-1:** Pérdidas en una Antena y sus terminales

**Fuente:** Balanis, 2005, p.65.

#### 1.4.2.7. Ganancia

La ganancia y la directividad están relacionadas pero su diferencia se basa en que la ganancia hace uso de la potencia entregada, considerando que no toda la potencia que se entrega a la antena es radiada ya que parte de esta se disipa. Se puede definir como la razón entre la energía que se radia en una dirección con respecto a la que una antena ideal emitiría considerando su potencia aceptada o entregada (Anguera y Pérez, 2008, pp. 43-44). La ganancia de una antena se expresa como la ecuación 9-1.

$$G = 4\pi \frac{\text{intensidad de radiacion}}{\text{potencia total de entrada (aceptada)}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (9-1)$$

#### 1.4.2.8. Impedancia de entrada

Es la razón que existe entre tensión y corriente en la entrada de la antena como se ilustra en la figura 13-1, formada por una parte real y una imaginaria, se representa como la ecuación 10-1 (Anguera y Pérez, 2008, pp. 30-32).

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (10-1)$$

Donde:

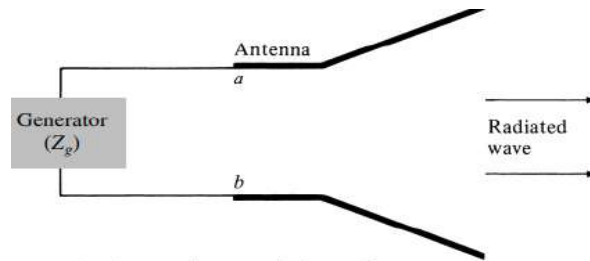
$Z_A$  = Impedancia de la antena

$R_A$  = Resistencia de la antena

$X_A$  = Reactancia de la antena

La parte resistiva  $R_A$  esta formada por la resistencia empleada para representar la potencia que se emite o radia y la empleada para indicar las pérdidas que se producen como indica la ecuación 11-1 (Balanis, 2005, pp. 80-82).

$$R_A = R_r + R_L \quad (11-1)$$



**Figura 13-1:** Antena en transmisión y su circuito equivalente

Fuente: Balanis, 2005, p. 95.

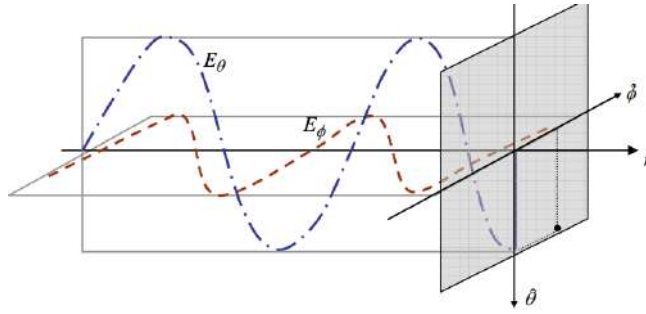
#### 1.4.2.9. Ancho de Banda

Tomando en cuenta la impedancia se define como el conjunto de frecuencias en la que la antena está adaptada es decir trabaja correctamente según las características tomadas en cuenta para su diseño, se la representa en forma de porcentaje (ecuación 12-1) y para su cálculo es necesario tener definido una frecuencia central, una máxima y una mínima (Anguera y Pérez, 2008, pp. 65-66).

$$BW (\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100 \quad (12-1)$$

#### 1.4.2.10. Polarización

Es la figura que traza el campo eléctrico emitido por la antena en un momento específico (ver figura 14-1), es determinado por la dirección que tome el vector usado para indicar el campo eléctrico, visto desde el plano en que se propaga y se estudia tres tipos de polarizaciones (ver figura 15-1) pueden ser lineales, circulares o elípticas, estas dos últimas pueden rotar de forma horaria o antihoraria de acuerdo con la forma en que gire el campo (Ferrando y Valero, 2005a).

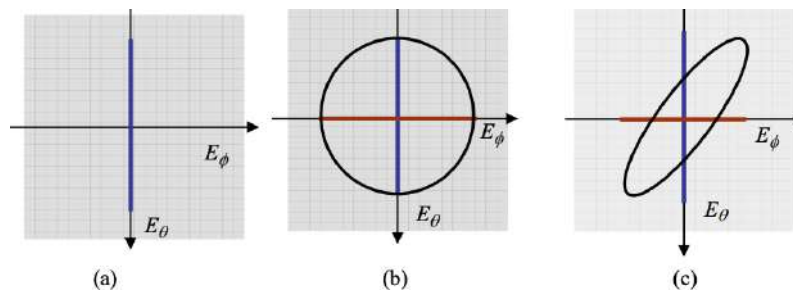


**Figura 14-1:** Propagación del campo eléctrico

Fuente: Murillo, 2007, p.57.

$$\vec{E} = E_{\theta} \hat{\theta} + E_{\phi} \hat{\phi} = E_{\theta} \hat{\theta} + k E_{\theta} e^{j\alpha} \hat{\phi} \quad (13-1)$$

Los tipos de polarizaciones parten del estudio de las ondas planas (ecuación 13-1), es lineal cuando se da en un solo eje, circular cuando  $k=1$  y el desfase  $\pm\pi/2$  y elíptica en otros casos (Murillo, 2007, p.57).



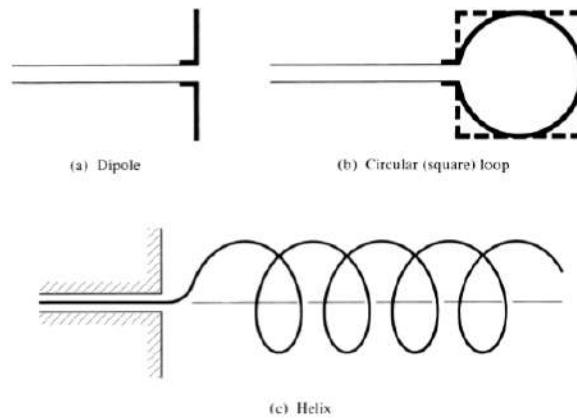
**Figura 15-1:** Polarizaciones: (a) lineal vertical, (b) circular y (c) elíptica.

Fuente: Murillo, 2007, p.57.

#### 1.4.2.11. Tipos de Antenas

Existen diferentes tipos de antenas que cumplen ciertas características específicas de acuerdo con el tipo de aplicación que se dé a estas, uno de los tipos más comunes de antenas son las de alambre, pueden ser lineales o curvas (ver figura 16-1) entre ellas están los dipolos, lazos y hélices que son comúnmente empleadas en la vida diaria como automóviles, barcos, edificios entre otros (Balanis, 2005, p. 4).

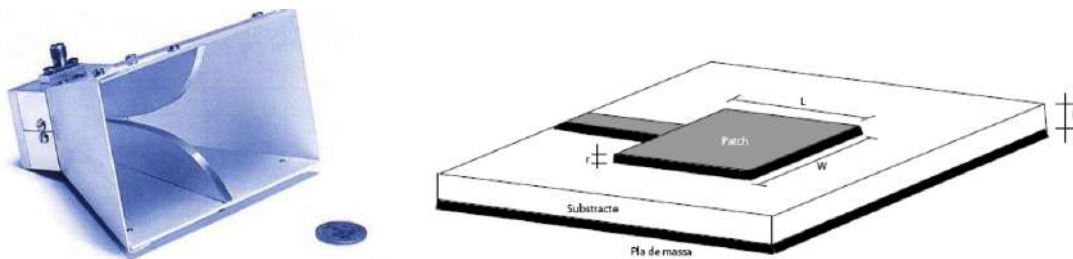




**Figura 16-1:** Antena: (a) Dipolo, (b) Lazo y (c) Hélice

**Fuente:** Balanis, 2005, p. 4.

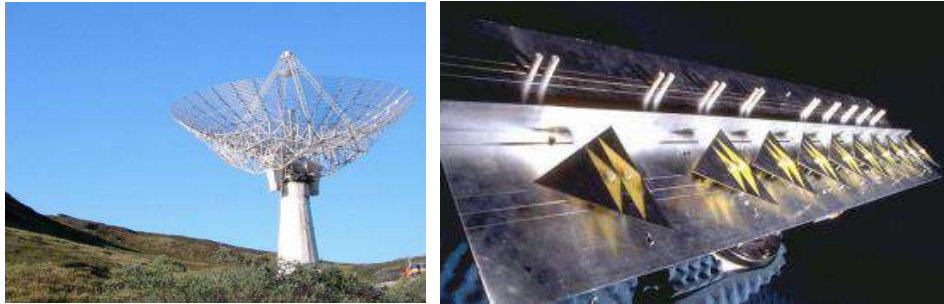
Entre otros tipos de antenas ampliamente estudiadas se encuentran las antenas de apertura, que son empleadas en aplicaciones espaciales, estas pueden ser bocinas, guías de ondas, ranuras entre otras. Las antenas microstrip son parches metálicos por lo general impresos sobre un sustrato dieléctrico con plano de tierra, muy empleadas actualmente debido a sus múltiples prestaciones usadas en varias áreas como los teléfonos móviles, satélites, naves espaciales, ambas se muestran en la figura 17-1 (Balanis, 2005, pp. 5-6).



**Figura 17-1:** Antena de apertura y Antena microstrip

**Fuente:** Anguera y Pérez, 2008.

Las antenas reflectoras entre ellas las de esquina y parabólicas usadas para comunicaciones microondas, rastreo satelital y radioastronomía, emplean diversas configuraciones y por último las matrices o arreglos de antenas que no es más que un conjunto de elementos usados para alcanzar ciertos parámetros de radiación que con un solo elemento no se puede lograr, ambas se ilustran en la figura 18-1 (Balanis, 2005, pp. 4-6).



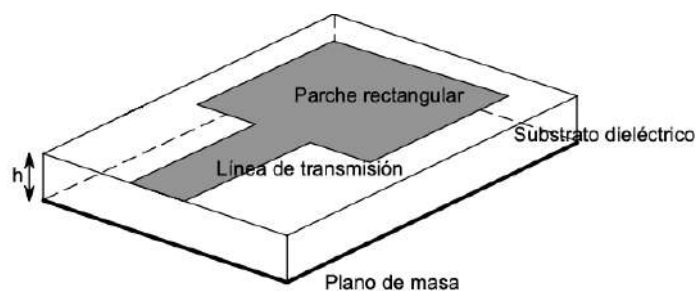
**Figura 18-1:** Reflector parabólico y Arreglo de antenas

Fuente: Anguera y Pérez, 2008.

### 1.5. Tecnología Microstrip

Esta tecnología lleva varios años en uso, sus primeros usos datan de 1950, pero toma importancia a partir de 1970 cuando se comienza a hacer uso en varias aplicaciones, especialmente en aplicaciones espaciales, son antenas impresas o parches que se fabrican haciendo uso de líneas de transmisión (ver figura 19-1) sobre un material conocido como sustrato dieléctrico (Ferrando y Valero, 2005b).

Según Balanis (2005) las antenas que emplean la tecnología microstrip están formadas por un parche metálico impreso en un sustrato que contiene un plano de tierra, pueden adoptar diferentes geometrías las más sencillas y conocidas son de tipo rectangular o circular, por lo general estas antenas son empleadas debido a que brindan ciertas características atractivas como: su bajo perfil, en donde se pueden fácilmente adaptar sobre cualquier tipo de superficie y junto con otras características como su patrón de radiación, frecuencias con las que se puede trabajar, tipos de polarización a los que se puede diseñar entre otros.



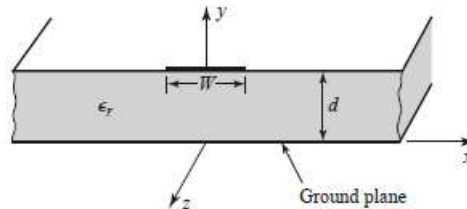
**Figura 19-1:** Parche Microstrip

Fuente: Ferrando y Valero, 2005.

El sustrato empleado para la tecnología microstrip posee un grosor entre  $0,003\lambda$  y  $0,05\lambda$  con constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) entre 2 y 12 (Ferrando y Valero, 2005).

### 1.5.1. Líneas Microstrip

De acuerdo con Pozar (2012, p. 147) son líneas de transmisión con un ancho  $W$  que son impresas sobre un substrato dieléctrico con un grosor  $d$  que se conecta a un plano de tierra y una permitividad relativa  $\epsilon_r$  (ver figura 20-1).



**Figura 20-1:** Estructura de una línea microstrip

Fuente: Pozar, 2012, p. 147.

Para el análisis de las líneas microstrip debido a que el substrato dieléctrico es muy delgado en términos eléctricos ( $d \ll \lambda$ ) se realizan aproximaciones para estudiarlas considerando que los campos son similares a los generados en DC con el fin de obtener aproximaciones que permitan analizarlas de forma más simple, entre ellas las mostradas en la ecuación 14-1 velocidad de fase y 15-1 constante de propagación (Pozar, 2012, p. 147).

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (14-1)$$

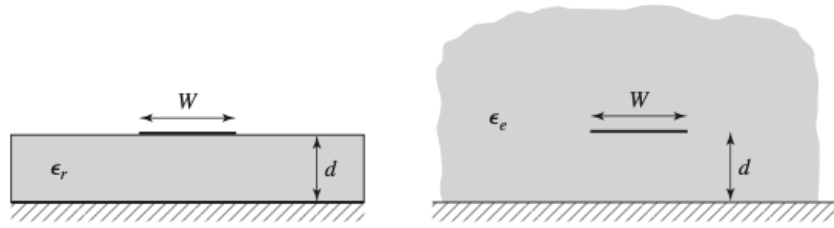
$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (15-1)$$

Donde  $\epsilon_e$  es la constante dieléctrica efectiva y viene dada por la relación  $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$  (Pozar, 2012, p. 148).

#### 1.5.1.1. Constante dieléctrica efectiva

La  $\epsilon_e$  se puede expresar mediante la ecuación 16-1, de acuerdo con Pozar (2012, p. 148) se la puede interpretar como una constante que permite reemplazar al aire y sus regiones dieléctricas como una forma equivalente (ver figura 21-1).

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 d/W}} \quad (16-1)$$



**Figura 21-1:** Geometría equivalente de una línea microstrip

Fuente: Pozar, 2012, p. 148.

### 1.5.1.2. Impedancia

Al tener las dimensiones de la línea microstrip se puede calcular las impedancias características mediante la ecuación 17-1.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left( \frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & \text{para } W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln (W/d + 1.444)]} & \text{para } W/d \geq 1 \end{cases} \quad (17-1)$$

Y si se desea encontrar la relación W/d se puede calcular haciendo uso de la impedancia característica y la constante dieléctrica (ver ecuación 18-1) (Pozar, 2012, p. 148).

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{para } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{para } W/d > 2 \end{cases} \quad (18-1)$$

Donde:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (19-1)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (20-1)$$

### 1.5.2. Antenas Microstrip

Son antenas conocidas como parche o impresas que emplean la teoría de las líneas de transmisión y resonadores para su diseño se conforman de un material o substrato dieléctrico el cual está formado por dos placas metálicas separadas por un dieléctrico cuya cara superior es usada para la impresión de la antena y la inferior usada como plano de tierra, cuyas dimensiones determinarán el comportamiento de la antena al momento de emitir o radiar la energía (Ferrando y Valero, 2005).

#### 1.5.2.1. Características

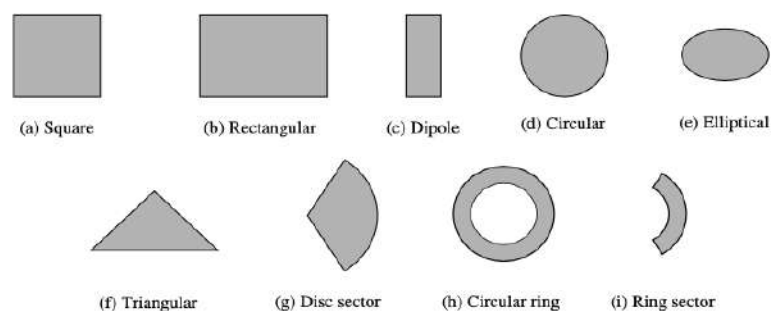
De acuerdo con Balanis (2005, p. 812), las antenas microstrip deben cumplir con las siguientes características básicas:

- Un grosor del parche ( $t$ ) pequeño mucho menor que  $\lambda_0$  (longitud de onda en espacio libre).
- Un grosor del material dieléctrico ( $h$ ) considerado entre  $0,003\lambda_0$  y  $0,05\lambda_0$ .
- Una constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) entre 2.2 y 12.

Los substratos gruesos con  $\epsilon_r$  alrededor de  $0,003\lambda_0$  son considerados en los casos donde se requiera de un buen rendimiento como una mayor eficiencia y ancho de banda, pero depende del tipo de aplicación o características específicas de radiación que deba cumplir, cuyas decisiones se encuentran en las manos del diseñador (Balanis, 2005, p. 812).

#### 1.5.2.2. Geometrías de una antena microstrip

Los parches de este tipo de antenas pueden tomar varias geometrías o figuras (ver figura 22-1) entre algunas de ellas cuadrados, rectángulos, dipolos, circulares, en forma de anillo entre otras figuras y sus combinaciones, pero entre las más usadas se encuentran las figuras cuadas, rectangulares y circulares debido a que su diseño y análisis es mucho más fácil, además de prestar algunas características de radiación interesantes por su tamaño, costo reducido y uso en una serie de aplicaciones (Balanis, 2005, p. 812).



**Figura 22-1:** Geometrías para parches microstrip

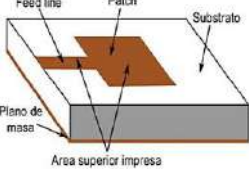
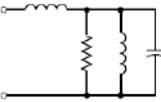
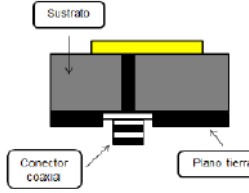
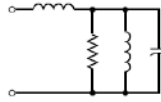
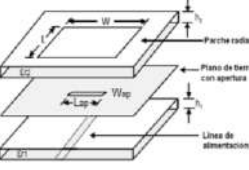
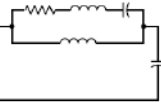
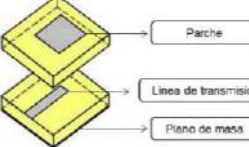
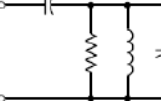
Fuente: Balanis, 2012, p. 813.

Los elementos radiantes o parches que conforman a este tipo de antenas pueden tomar una gran variedad de formas o figuras, algunas de uso común y otras combinaciones que no son tan empleadas, su elección se realizara según los objetivos que se busquen obtener con la antena microstrip (Ferrando y Valero, 2005b).

### 1.5.2.3. Tipos de alimentación

Existen varias maneras de alimentar una antena microstrip las cuales se resumen en la tabla 2-1, junto con una ilustración y su circuito equivalente para poder comprender su funcionamiento.

**Tabla 2-1:** Tipos de Alimentación Microstrip

Tipo de Alimentación	Descripción	Ilustración	Circuito equivalente
Línea Microstrip	Es una línea de transmisión tipo microstrip cuyo ancho es menor que el del parche, es fácil de diseñar e implementar y es una de las formas de alimentación más comunes usadas en antenas microstrip.		
Sonda Coaxial	Fácil de implementar, su diseño es más complejo que el de las líneas microstrip, la alimentación se lleva a cabo por medio del conductor interno del cable coaxial que va conectado al parche y el conductor externo conectado al plano de tierra.		
Acoplamiento de Apertura	Formado por dos substratos, uno superior y uno inferior, en el plano inferior se encuentra una línea de transmisión cuya energía se acopla con el parche de radicación por medio de una abertura en el plano intermedio		
Acoplamiento de proximidad	Consiste en juntar dos substratos dieléctricos, superponer el superior conformado por el parche y el inferior por una línea microstrip, para acoplarlos por proximidad.		

**Fuente:** (Balanis, 2012, pp. 813-815) (Cerquera y Blanco, 2020, pp. 43-46).

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

De los tipos de alimentación mencionados anteriormente, el acoplamiento de proximidad es el tipo de alimentación que mayor ancho de banda permite, además de poseer bajos niveles de radiación de espurias (Balanis, 2005, p. 815).

#### 1.5.2.4. Aplicaciones de antenas microstrip

Las antenas microstrip son empleadas en la actualidad en una gran variedad de campos debido a una serie de características que llaman la atención al momento de emplearlas, principalmente por ser de tamaño reducido, peso ligero y fácil adaptabilidad a diferentes superficies, entre algunas de las aplicaciones están las que se muestra en la tabla 3-1.

**Tabla 3-1:** Áreas de aplicación de las antenas microstrip

<b>Comunicaciones móviles y satelitales</b>	En las comunicaciones móviles es necesario contar con antenas que sean pequeñas, adaptables a diferentes superficies y de bajo costo, con respecto a las comunicaciones satelitales es necesario contar con antenas polarizadas circularmente las cuales se puede conseguir con antenas microstrip.
<b>Sistema de posicionamiento global (GPS)</b>	Usadas en aviones, automóviles, barcos entre otros, por lo general son polarizadas circularmente y fabricadas con substratos de alta permitividad.
<b>Identificación por radiofrecuencia (RFID)</b>	Son empleadas en diferentes campos como las relacionadas a la industria, transporte y actúan como etiquetas que responden ante una onda de radio.
<b>Aplicaciones de Radar</b>	Las antenas de microstrip son empleadas en este campo debido a que son livianas y de bajo perfil, las cuales se adaptan fácilmente a este tipo de sistemas.
<b>Aplicaciones de rectennas</b>	Muy empleadas dentro de este campo, usadas en la etapa de captación de la señal en donde es necesario contar con una antena capaz de captar la mayor cantidad de energía de RF.
<b>Telemedicina</b>	Usadas en dispositivos de área corporal, donde el tamaño de la antena es de suma importancia.

**Fuente:** Indrasen y Tripathi, 2011.

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

## 1.6. Sistemas de cosecha de energía RF

Es un proceso recolección de energía mediante el cual se busca capturar parte de la energía que se encuentra en el ambiente de origen natural o artificial, entre algunas de las energías más comunes se puede mencionar a la energía solar, térmica, eólica entre otras (ver figura 23-1), incluso las ondas empleadas para radiofrecuencia las cuales se estudiarán a lo largo de este trabajo.



**Figura 23-1:** Fuentes para cosechamiento de energía

Fuente: Pandey, 2020.

La cantidad de energía disponible de diferentes fuentes para el cosechamiento de energía se muestran en la tabla 4-1.

**Tabla 4-1:** Comparación entre las fuentes alternativas de energía

Fuente	Densidad de Potencia	Tipo
Solar	Interiores: 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Exteriores: 10 $\text{mW}/\text{cm}^2$	Fotovoltaica
Térmica	Humana: 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Industrial: 1-10 $\text{mW}/\text{cm}^2$	Termoeléctrica
RF	GSM: 0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ WiFi: 1 $\text{mW}/\text{cm}^2$	Radiofrecuencia

Fuente: Tran et al, 2017: pp.1-2.

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

La importancia de hacer uso de estos sistemas de cosechamiento de energía en la actualidad y en un futuro según Siljeström (2015, pp. 13-14) se sustenta en la capacidad que estos sistemas tienen



para energizar otros dispositivos usando energías que por lo general no son empleadas, permitiendo hacer uso de dispositivos autónomos con respecto a su fuente de energía.

La creciente expansión de redes inalámbricas y el uso de diferentes tecnologías hacen que el cosechamiento energía de RF sea cada día más importante, estaciones base celulares y puntos de acceso WiFi son algunas de las tecnologías con mayor crecimiento que puede ser empleadas como fuentes de energía para este tipo de dispositivos (Khoury, 2013, p. 1).

### 1.6.1. Definición

Proviene del término en inglés “RF energy harvesting” o en español denominado cosechamiento de energía de radiofrecuencia son sistemas formados por una serie de etapas que tiene como objetivo captar la energía proveniente de ondas de radiofrecuencia presentes en el ambiente, las cuales proceden de diferentes fuentes de energía.

Es un sistema que emplea la potencia de RF emitida por diferentes fuentes de energía provenientes de emisiones de radio, televisión, tecnologías para comunicaciones móviles como GSM, UMTS, LTE entre otros servicios que pueden ser empleados debido a su alta disponibilidad. Estos sistemas deben ser diseñados de forma precisa ya que uno de los inconvenientes es que la energía de RF disponible en el ambiente es muy pequeña y cualquier falla en el diseño puede reducir la eficiencia del mismo (Moreno et al, 2016: p. 56).

De acuerdo con Prieto (2019, p.2) los sistemas para recolección de energía de RF hacen uso de una antena para captar la energía y una etapa de rectificación (ver figura 24-1) para poder pasar de una señal en AC, proveniente de las ondas electromagnéticas a una señal en DC, debido que la mayoría de dispositivos se alimentan con señales continuas.



**Figura 24-1:** Sistema de cosecha de energía de RF

Fuente: Mezquita, 2015.

### 1.6.2. Las Rectennas

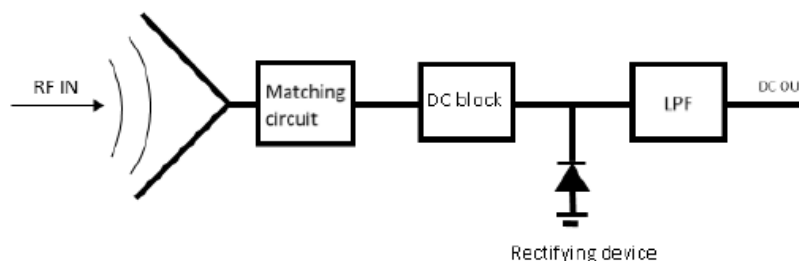
Tomada del inglés de “rectifying antenna” o en español antena rectificadora como su nombre lo dice es una antena que junto con una etapa de rectificación tiene la función de convertir las señales de radiofrecuencia AC en DC (Cerquera y Blanco, 2020, p. 33).

Según Cañas (2015, p. 22) una rectenna es un dispositivo de tipo no lineal, debido a que en su estructura se hace uso de un diodo, este dispositivo está compuesto por una serie de etapas, comenzando por la antena receptora, la adaptación de impedancias seguido de una etapa de bloqueo de componentes DC, y finalmente la etapa de conversión de RF a DC y una etapa de almacenamiento de energía.

En el diseño de las rectennas es muy común hacer uso de la tecnología microstrip debido a su facilidad de fabricación al emplear placas de circuito impreso (PCB), que no es más que un material conocido como substrato dieléctrico que posee una placa de metal a ambos lados separados por un dieléctrico (Cerquera y Blanco, 2020, p. 33).

### 1.6.2.1. Funcionamiento de una rectenna

La antena receptora capta la energía de radiofrecuencia y la envía hacia la etapa de rectificación de la señal, en el medio de estas etapas se encuentra un circuito de adaptación de impedancias necesario para acoplar ambas estructuras, posterior se encuentra la etapa empleada para evitar el regreso de la señal DC luego de su conversión, dicha conversión se la realiza por medio del diodo Shottky. Al rectificar la señal es necesario tomar en cuenta que este proceso de conversión genera junto con la señal DC otros componentes conocidos como armónicos, los cuales dentro de este sistema es necesario eliminarlos, por esta razón se incluye un filtro paso bajo (ver figura 25-1) (Cañas, 2015, p.18).



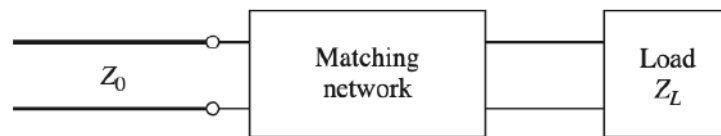
**Figura 25-1:** Diagrama de bloques de una rectenna

Fuente: Cañas, 2015, p.23.

### 1.6.3. Red de adaptación

También conocido como sintonización o adaptación de impedancias (ver figura 26-1), muy importante en el diseño de dispositivos microstrip, es empleada para poder transferir la máxima potencia, acoplando una línea con impedancia  $Z_0$  con una carga con impedancia  $Z_L$  (Pozar, 2012, p. 229).

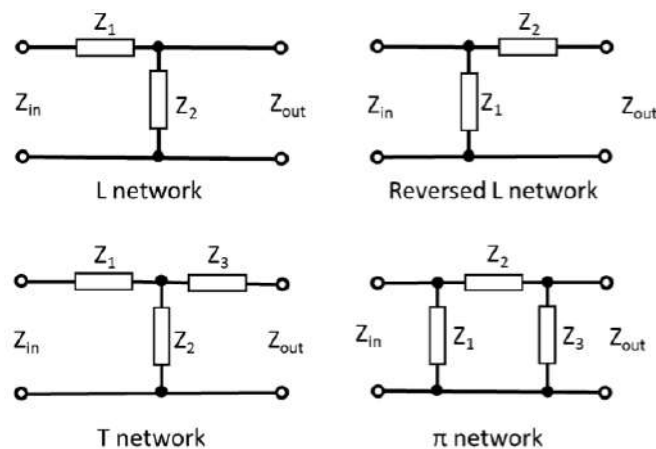
Es una red que permite adaptar la impedancia entre la fuente y la carga para asegurarse que la transferencia de energía entre fuente y carga sea la máxima, en los sistemas de cosechamiento de energía de RF se considera como fuente a la antena receptora, como carga a la etapa de rectificación o multiplicación de voltaje, estas redes de adaptación permiten evitar que se refleje o se pierda la energía durante la transmisión, existen varias formas de implementarlas pero comúnmente se definen 3 tipos de redes: la red tipo L, tipo T y tipo  $\pi$  (Tran et al., 2017).



**Figura 26-1:** Red de acoplamiento de impedancias

Fuente: Pozar, 2012, p.229.

Existen varias formas para acoplar impedancias en este caso se estudia las redes tipo L, T y  $\pi$  mostradas en la figura 27-1. La red tipo L es muy simple y ampliamente usado mantiene un mismo factor de calidad (Q), a diferencia de las redes tipo T y  $\pi$  las cuales no mantienen un mismo valor de (Q) (Tran et al., 2017).



**Figura 27-1:** Redes tipo L, T y pi

Fuente: Tran et al., 2017.

#### 1.6.4. Etapa Rectificadora

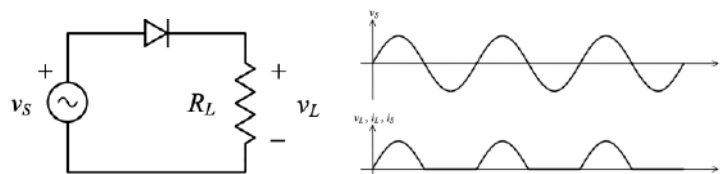
Se los puede definir como un dispositivo que permite la conversión de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC), en cuya estructura se hace uso de diodos los cuales permite la rectificación de la señal, existen diferentes circuitos rectificadores los cuales se tratarán posteriormente (Siljeström, 2015, p.7).

Una de las etapas más importantes en los sistemas de cosecha de energía, corresponde a la etapa de rectificación, la cual tiene como objetivo convertir la señal proveniente de la fuente de RF de tipo AC a una señal continua DC, uno de los elementos rectificadores comúnmente empleados en esta etapa corresponde a los diodos Schottky, siendo uno de los semiconductores de más baja tensión y capacitancia, los cuales se estudiarán más ampliamente en temas posteriores (Prieto, 2015, p.3).

#### 1.6.4.1. Tipos de rectificadores

Hay varios rectificadores que actúan de forma diferente y son empleados en aplicaciones específicas, es necesario tener claro cada tipo y poder comprender sus diferencias a fin de poder alcanzar los objetivos deseados. De acuerdo con Siljeström (2015, p.41) se pueden encontrar dos grupos de rectificadores, los de media onda y de onda completa, estos últimos pueden ser tipo puente o de punto medio.

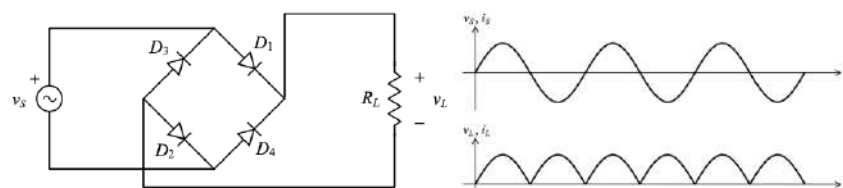
El de media onda es un tipo de circuito empleado para eliminar parte de la señal que entra ya sea la parte positiva (diodo polarizado en directa) o negativa de la señal (diodo polarizado en inversa), en la figura 28-1 se muestra el circuito y su comportamiento al rectificar la señal entrante (Siljeström, 2015, p. 42).



**Figura 28-1:** Rectificador media onda

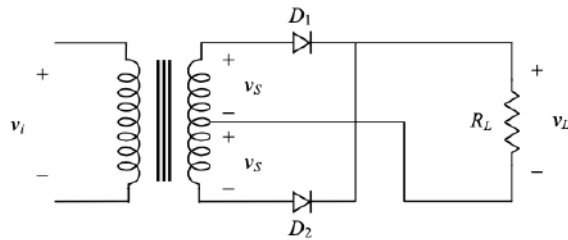
Fuente: Miyara, 2002.

Los de onda completa son los más comunes, su funcionamiento consiste en pasar la parte negativa de la señal a positiva y viceversa, obteniendo una señal DC similar a la de una batería (Siljeström, 2015, p. 42). Como se mencionó existen dos tipos los cuales se muestran en las figuras 29-1 y 30-1, estos dan una solución a los inconvenientes que tienen los de media onda, aprovechando la totalidad de la onda entrante junto con todos sus semiciclos tanto positivos como negativos (Miyara, 2002).



**Figura 29-1:** Rectificador onda completa tipo puente

Fuente: Miyara, 2002.

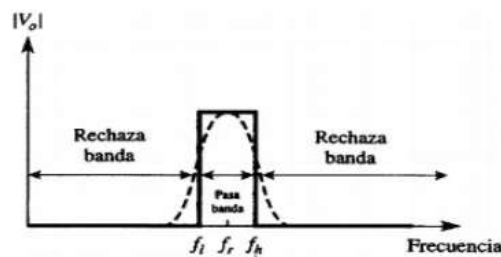


**Figura 30-1:** Rectificador onda completa de punto medio

Fuente: Miyara, 2002.

### 1.6.5. Etapa de filtrado

Debido a que en la etapa de rectificación se hace uso de un diodo, que es un componente no lineal este puede introducir componentes no deseados a su salida, es por esta razón que se considera una etapa de filtrado (Siljeström, 2015, p. 49). En los sistemas de cosechamiento de energía de RF es común hacer uso de filtros tipo pasabanda (figura 31-1), este filtro permite elegir un determinado rango de frecuencias, impidiendo el paso de otras no deseadas (Cerquera y Blanco, 2020, p. 49).



**Figura 31-1:** Filtro pasabanda

Fuente: Cerquera y Blanco, 2020, p. 49.

### 1.6.6. Primeros experimentos y su evolución

La historia del cosechamiento de energía de RF parte a finales de 1950 en donde se puso a prueba un sistema que captura las ondas electromagnéticas por parte de William C. Brown, el cual inventó y patentó, el termino rectenna, demostrando su funcionamiento alimentando un helicóptero a escala (Martínez, A. 2014, pp 6-7).

En el año de 1973 Peter Glaser patentó el sistema SPS (Solar Power Satellite), la idea de este proyecto consiste en hacer uso de satélites geoestacionarios como una planta de energía, los cuales por medio de paneles solares captarían la energía solar y la convertirían en microondas para posteriormente ser enviadas a la tierra, en donde se contaría con una estación terrena que captaría estas ondas y las convertiría en energía utilizable (Cañas, 2015, p.22).

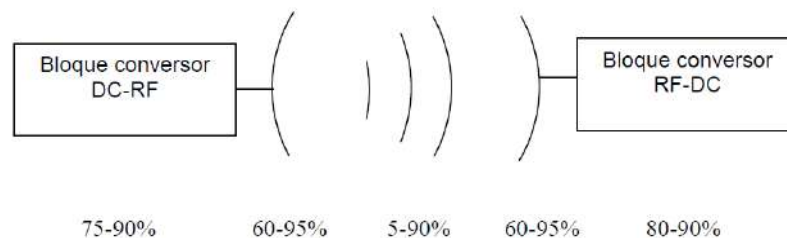
Con la idea patentada por Glaser, en 1997 la NASA propuso la idea de un proyecto llamado Torre Solar, cuya idea consiste en desplegar una estructura que contiene una serie de paneles solares en forma de hilera, los cuales se conectan a una antena encargada de transmitir la energía en forma

de ondas microondas operando a la frecuencia de 5.8 GHz, hacia una serie de antenas ubicadas en la tierra para capturar y convertirla en energía utilizable, se piensa que este proyecto se pondrá en marcha para el año 2030 (Martínez, A. 2014, p 6).

### 1.6.7. Limitaciones del cosechamiento de energía RF

Son varias las limitaciones existentes en los sistemas de cosechamiento de energía RF y por lo general estas limitaciones se miden según el rendimiento del sistema. Este rendimiento según Cañas (2015, pp. 19-20) se puede determinar de acuerdo a los aportes de cada una de las partes que conforman al sistema (ver figura 32-1) entre ellas:

- En la parte del transmisor la conversión DC a RF con un valor de eficiencia entre 75% y 90% donde se debe considerar algunos efectos como el calor, el cual puede provocar una reducción de hasta el 20%.
- Con respecto a la antena usada para transmitir o recibir, dependerá de sus parámetros empleados para su fabricación, del tipo de antena y tecnología empleada, la eficiencia de las antenas trasmisoras y receptoras se las puede considerar dentro del rango de los 60% a 95%.
- Considerando las pérdidas que se producen al momento de transmitir la señal ya se por factores como las condiciones del clima o el entorno por el que se propaga y su aporte al sistema está entre 5% y 90%.
- La etapa de rectificación para convertir la energía de RF a DC ubicado en la parte del receptor se implementa típicamente empleando un diodo Schottky y su eficiencia es del 80% al 90% pero puede cambiar de acuerdo a la cantidad de potencia RF que entre al sistema, afectando su eficiencia de conversión, por lo general esta etapa se ve limitada por la carga y potencia de la señal RF de entrada.



**Figura 32-1:** Contribuciones por etapas al rendimiento del sistema

Fuente: Cañas, 2015, p. 20.

### ***1.6.8. Aplicaciones de la cosecha de energía de RF***

La cosecha de energía de RF a pesar de no ser empleada de forma comercial, actualmente se encuentra bajo estudio debido al gran potencial que tiene dentro de algunas aplicaciones, una de ellas entre las más importantes se encuentran las redes de sensores inalámbricas (WSN) y dispositivos IoT (Cañas, 2015, p.18).

Algunas de las aplicaciones en las que se puede hacer uso del cosechamiento de energía de RF se muestra a continuación:

- Sistemas y dispositivos de bajo consumo de potencia eléctrica.
- Sensores remotos y sistemas embebidos.
- Redes de sensores inalámbricos (WSNs).
- Internet de las Cosas (IoT).

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO METODOLÓGICO**

A lo largo de este capítulo se detalla los procedimientos empleados para el diseño e implementación del dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia, partiendo con las mediciones de intensidad de campo para la selección de la frecuencia, el diseño y la simulación de las diferentes etapas que lo conforman, su fabricación y los escenarios empleados para su medición.

#### **2.1. Mediciones de intensidad de campo en las bandas ISM**

Para poder determinar la banda de frecuencia en la que se pueda captar la mayor parte de energía de radiofrecuencia se realizó una campaña de medición en las bandas ISM dentro de las instalaciones de la Facultad Informática y Electrónica, haciendo uso del medidor de radiación NARDA SRM 3006 (ver figura 1-2), con el fin de determinar y analizar la oportunidad de cosechar la energía de radiofrecuencia disponible en el ambiente y así determinar la frecuencia de operación del dispositivo para el cosechamiento de energía RF.

### 2.1.1. Descripción del equipo NARDA SRM 3006

El equipo NARDA SRM 3006 de la empresa Narda Safety Test Solutions es un equipo empleado para la medición de radiación de campos electromagnéticos de hasta 6 GHz, combina las características que posee un analizador de espectro junto con las de un equipo de medición de banda ancha, permite realizar mediciones de canales y servicios de forma individual, entre ellas radio analógica o digital, radio celular e inalámbricas como WLAN o WiMax, el equipo es capaz de mostrar los resultados en medidas de intensidad de campo, densidad de potencia o en forma de porcentaje (NARDA STS, 2014).



**Figura 1-2:** Narda SRM 3006

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

El equipo con el que cuenta el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica posee una antena de campo E de tres ejes isotrópica (ver figura 2-2), la cual puede realizar mediciones desde los 27 MHz a los 3 GHz, permitiendo realizar las mediciones de las bandas ISM consideradas dentro de este rango de frecuencias.



**Figura 2-2:** Antena de campo E (27 MHz a 3GHz)

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.



### 2.1.1.1. Software para computadora SRM-3006 Tools

El equipo NARDA SRM 3006 cuenta con un software para ordenador que se puede descargar desde el sitio web del equipo, el cual permite descargar los datos de las mediciones y las capturas de pantalla almacenadas en el dispositivo y transferirlos al PC (ver figura 3-2), para poder procesarla o analizarlas posteriormente. Este software además de permitir transferir los datos almacenados permite establecer las configuraciones de rutinas de medición, características de cables, antenas, servicios y opciones para actualizar el software del dispositivo (NARDA STS, 2014).



**Figura 3-2:** Software SRM-3006 Tools

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.1.2. Mediciones de Intensidad de campo eléctrico

Para determinar la banda de frecuencia en la que el dispositivo trabaja se procedió a realizar una serie de mediciones en las diferentes bandas de frecuencia ISM establecidas por la ITU-R en la recomendación SM.1056-1 donde se muestra la distribución de bandas no licenciadas para uso industrial, científico y médico.

#### 2.1.2.1. Bandas de frecuencia ISM medidas

Las bandas de frecuencias ISM se encuentran de forma dispersa desde los 6.78 MHz a los 245 GHz definidas en el Reglamento de Radiocomunicación según la UIT-R en 5.138, 5.150 y 5.280, el uso de estas bandas viene dada por regiones y puede cambiar de acuerdo con las regulaciones propias de cada país. Por lo general dentro de estas bandas se encuentran sistemas de comunicaciones de baja potencia y corto alcance entre ellos se puede observar teléfonos inalámbricos, dispositivos Bluetooth, redes inalámbricas y otras tecnologías como NFC (D'mello et al, 2018, p.36).

Las bandas ISM en las que el equipo NARDA SRM 3006 y la antena de campo E de tres ejes (27 MHz a los 3 GHz) es capaz de tomar mediciones, son las mostradas en la tabla 1-2, aclarando que

la banda de 433.92 MHz no es empleada en nuestro país por pertenecer a la Región 1, por lo que no se la analiza posteriormente.

**Tabla 1-2:** Bandas ISM que pueden ser medidas con el equipo disponible

<b>Banda de frecuencias (MHz)</b>	<b>Frecuencia Central (MHz)</b>	<b>Uso de Frecuencias</b>
26.957 – 27.283	27.120	Global
40.66 – 40.70	40.68	Global
433.05 – 434.79	433.92	Región 1
902 – 928	915	Región 2
2400 – 2500	2450	Global

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

#### 2.1.2.2. Tecnologías que operan en la banda ISM

Existe un gran número de tecnologías que operan en las bandas ISM siendo las bandas más comunes la ISM de 900 MHz, la banda de 2.4 GHz y la de 5.8 GHz, algunos ejemplos de tecnologías que operan en estas bandas, se encuentran las redes de área personal inalámbricas como Bluetooth que funciona en la banda ISM de 2.4 GHz, redes de sensores inalámbricos, WLAN, teléfonos inalámbricos que se pueden encontrar en las bandas 915 MHz y 2,450 GHz y otras como RFID en la banda más común de los 13,56 MHz (D'mello et al, 2018, p.36).

Algunas de las características importantes a considerar de las bandas ISM más comunes, se muestran en forma de resumen en la tabla 2-2.

**Tabla 2-2:** Bandas ISM más comunes

<b>Banda de Frecuencia</b>	<b>Rango de Frecuencia</b>	<b>Ancho de Banda</b>	<b>Máxima Potencia</b>
ISM-900	902 – 928 MHz	26 MHz	1 Watt
ISM-2.4	2400 – 2483.5 MHz	83.5 MHz	1 Watt
ISM-5.8	5.725 – 5.850 GHz	125 MHz	1 Watt

**Fuente:** D'mello et al, 2018, p.38.





**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.1.2.3. Puntos de medición

Para evaluar la intensidad de campo recibido en diferentes lugares de la Facultad de Informática y Electrónica se realizaron las mediciones en once diferentes puntos, con el fin de observar los resultados de forma en que se pueda considerar las diferentes variaciones de intensidad de campo según la ubicación y el entorno que lo rodea, en las diferentes bandas ISM mencionadas anteriormente.

Los once puntos en donde se realizaron las diferentes mediciones de intensidad de campo se pueden observar en la siguiente tabla (ver tabla 3-2), para hacer referencia a la ubicación en donde se tomó las mediciones.

**Tabla 3-2:** Ubicación de los puntos de medición

Puntos de Medición			
# 1	# 2	# 3	# 4
			
# 5	# 6	# 7	# 8
			
# 9	# 10	# 11	
			

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Como se puede observar se han seleccionado distintos puntos o ubicaciones para tomar las mediciones con el fin de analizar las variaciones de intensidad de campo que se pueden producir debido a la ubicación y condiciones del entorno, los puntos de número uno al cuatro corresponden al laboratorio de microondas, el punto cinco y seis corresponde a mediciones realizadas en el segundo piso del edificio de la FIE, de forma similar del siete al ocho para el primer piso, nueve al diez a la planta baja y una última medición tomada en el pasillo junto a la sala de profesores, correspondiente a la medición número once.

### **2.1.3. Frecuencia de diseño**

Para determinar la frecuencia de diseño del dispositivo, se hizo uso de los datos obtenidos de las mediciones de intensidad de campo realizadas dentro de las instalaciones de la Facultad de Informática y Electrónica para determinar la banda de frecuencia en la que se pueda captar la mayor cantidad de energía electromagnética, los resultados de las mediciones se muestran en la sección 3.1. Evidenciando que la banda ISM de 2.4 GHz es la que mayor intensidad de campo se encuentra disponible para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia.

#### **2.1.3.1. La Banda ISM 2.4 GHz**

Al ser una de las bandas ISM más comunes, se decidió centrar el estudio en la banda ISM de 2.4 GHz la cual posee un ancho de banda de 83.5 MHz, desde los 2.4 GHz hasta los 2.4835 GHz, (la frecuencia superior puede variar debido a las regulaciones de cada país) algunas de las tecnologías que se pueden encontrar en esta banda están las redes 802.11b/g/n, bluetooth, teléfonos inalámbricos, entre las más empleadas y otras como cámaras de monitoreo, hornos microondas y Wi-Max (D'mello et al, 2018, p.37).

#### **2.1.3.2. Wi-Fi**

Es una tecnología inalámbrica perteneciente a las redes WLAN (redes de área local inalámbricas), definida bajo el protocolo IEEE.802.11x donde se detallan varios estándares para la conexión de diferentes dispositivos, a la red de forma inalámbrica. Su nombre fue dado por la agencia Interbrand y viene de Wireless Fidelity (Hernández, 2008).

De acuerdo con Hernández (2008) dentro de la infraestructura de Wi-Fi se debe considerar los siguientes conceptos básicos relacionados a esta tecnología:

- **Hot spot:** se denomina hot spot a las zonas donde se encuentran Access Point que permiten el acceso a la red por medio de la tecnología Wi-Fi.
- **Access point (AP):** son los encargados de permitir difundir el servicio, actúa como un puente entre Ethernet (red cableada) y Wi-Fi (red inalámbrica)
- **Cientes Wi-Fi:** son todos aquellos equipos que cuenta con un módulo Wi-Fi, como portátiles, dispositivos móviles, computadoras de escritorio entre otros.

Los estándares de la IEEE 802.11 con mayor importancia en la actualidad son los estándares 802.11a, 802.11b, 802.11g y el 802.11n (ver tabla 4-2).

**Tabla 4-2:** Protocolos Wi-Fi

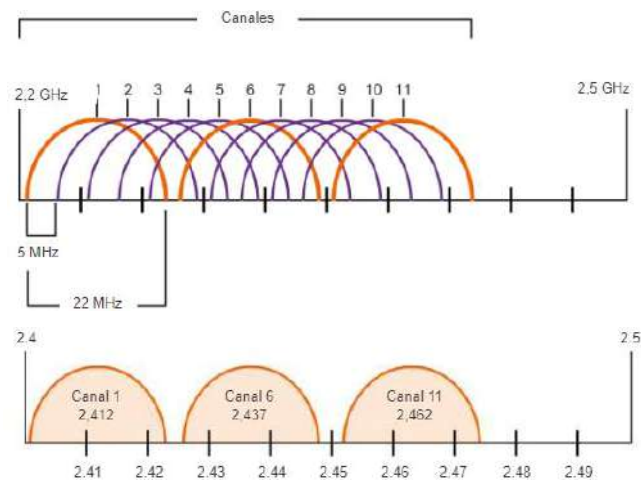
Características	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Frecuencia de operación	5.7 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 / 5 GHz
Ancho de banda del canal	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 /40 MHz
Radio de cobertura	35 m	38m	38m	75m
Nivel de uso	Bajo	Alto	Alto	Alto

Fuente: Sendra et al, 2011, p. 211.

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.1.3.3. Canales de Wi-Fi

Los estándares 802.11 b/g/n operan en 2.4 GHz mientras que los estándares 802.11 a/n operan en 5 GHz, se emplean 11 canales para Norteamérica y Sudamérica, en Europa y Asia/Pacífico a excepción de algunos países (Japón y Taiwán hasta 14 canales) hacen uso de 13 canales (ver figura 4-2). Se considera un ancho de banda por canal de 22 MHz, separados entre canal por 5 MHz los cuales se superponen en canales vecinos que pueden provocar interferencias, por esta razón se hace uso de los canales 1, 6 y 11 que son canales no superpuestos (ITESA, sin fecha).



**Figura 4-2:** Canales Wi-Fi en el estándar 802.11b

Fuente: Itesa.edu.mx, sin fecha.

### 2.1.3.4. Selección de la banda de frecuencia

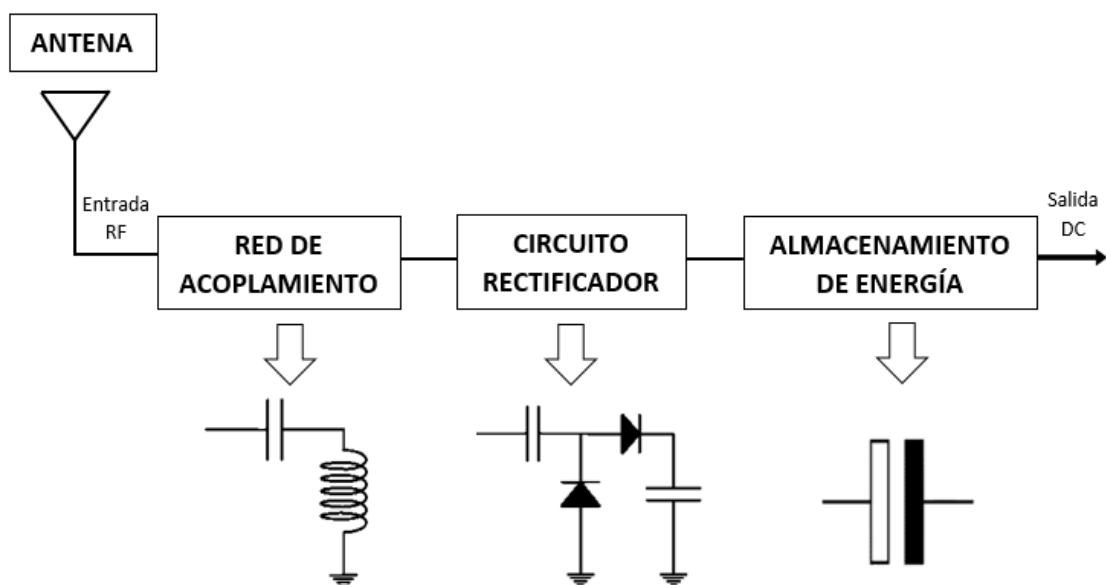
Mediante el estudio de las mediciones de intensidad de campo realizadas en la banda ISM, se concluye que la banda de frecuencias en la que más energía se puede captar para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia es la banda ISM de 2.4 GHz, la cual fue medida desde los 2.4 GHz a los 2.5 GHz, determinando que una de las tecnologías más predominante dentro de esta banda

es Wi-Fi, al observar los resultados de las mediciones mostradas en la tabla 3-3, se puede identificar que los canales de Wi-Fi que por lo general son empleados se encuentran entre el canal 1, 6 y 11.

De esta forma para el diseño del dispositivo se ha seleccionado la frecuencia de 2.45 GHz, que es común en los dispositivos de cosechamiento de energía de radiofrecuencia enfocados a captar la energía proveniente de Wi-Fi, ya que en esta frecuencia se puede aprovechar la energía empleada en los canales 1, 6 y 11, además de los canales que pueden estar solapados.

## 2.2. Diseño y simulación del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF

En esta sección se describe cada una de las etapas empleadas para el diseño del dispositivo para el cosechamiento de energía de radio frecuencia (ver figura 5-2), operando en la banda ISM de 2.4 – 2.4835 GHz con frecuencia central de 2.45 GHz, seleccionada mediante el estudio de intensidad de campo realizado, para este proyecto se hace uso de un software profesional de simulación electromagnética dedicado a la simulación de antenas microstrip y de forma similar para la red de acoplamiento, el circuito rectificador y la etapa de almacenamiento de energía, se hace uso de un software dedicado al diseño de circuitos para electrónica de alta frecuencia.



**Figura 5-2:** Diagrama de Bloques del dispositivo

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

La antena se encarga de recibir la energía de radiofrecuencia, la red de acoplamiento permite transferir la máxima cantidad de potencia entre la antena y el circuito rectificador, el cual permite convertir la señal AC captada por la antena en DC para posteriormente ser almacenada y entregada a una carga o un dispositivo de bajo consumo de energía.

### 2.2.1. Antena parche microstrip

Para proceder con el diseño de la etapa de captación de RF, se diseñó una antena parche microstrip a 2.45 GHz, alimentada mediante una línea microstrip con inserción, la cual permite acoplar la impedancia del parche con la línea microstrip, siendo empleada para posteriormente colocar un conector SMA de 50  $\Omega$ . Para la simulación de la antena se hizo uso de un software profesional de simulación, que permite modelar este tipo de antenas de forma sencilla además de permitir determinar y estudiar el comportamiento de diferentes estructuras para alta frecuencia.

#### 2.2.1.1. Selección del substrato

Es una de las primeras consideraciones a tomar en cuenta en el diseño de antenas microstrip ya que las ecuaciones de diseño dependen del substrato empleado para su fabricación. Los substratos dieléctricos se caracterizan por su constante dieléctrica que indica la capacidad que tiene un material a polarizarse ante un campo eléctrico y la tangente de pérdidas que muestra las pérdidas de energía electromagnética que tiene cierto material (Siljeström, 2015, p.7).

A forma de resumen Siljeström (2015, p.41), muestra la dependencia que tiene ciertos parámetros de diseño según el substrato dieléctrico que se seleccione, características como el ancho de banda, radiación, eficiencia se ven directamente relacionados de acuerdo con el substrato que se seleccione, como indica la tabla 5-2.

**Tabla 5-2:** Dependencia del substrato dieléctrico

Grosor del substrato (h)	Constante Dieléctrica ( $\epsilon$ )	Tangente de pérdidas ( $\tan(\delta)$ )
Ancho de banda	Ancho de banda	Ancho de banda
Integración con otros circuitos	Máxima radiación	Máxima radiación
Resonancia		

Fuente: Siljeström, 2015, p. 26

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Existe una gran variedad de substratos dieléctricos empleados en la fabricación de antenas microstrip, es importante comparar los diferentes materiales y reconocer sus diferencias con el fin de seleccionar el material que mayores prestaciones brinde, con el objetivo de capturar la mayor cantidad de energía de RF en la banda de frecuencia especificada. A continuación, se compara diferentes substratos dieléctricos empleados en la fabricación de antenas microstrip, como se muestra en la tabla 6-2.

**Tabla 6-2:** Substratos dieléctricos de bajo costo y baja pérdida

Material	$\epsilon_r$ (a 1GHz)	$\tan(\delta)$ (a 1GHz)	Fabricante
RO3003	3	0.0013	Rogers Corp
RO3006	6.15	0.0013	Rogers Corp
RO3010	10.2	0.0013	Rogers Corp
RO4003	3.38	0.0022	Rogers Corp
TLC-32	3.2	0.0030	Taconic Plastics
HT-2	4.3	0.0033	Hewlett-Packard
Polyguide	2.32	0.0005	Shawinigan Research
Epoxy/glass (FR4)	4.4	0.01	C.I.F

Fuente: Ramesh et al, 2001, p. 764

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

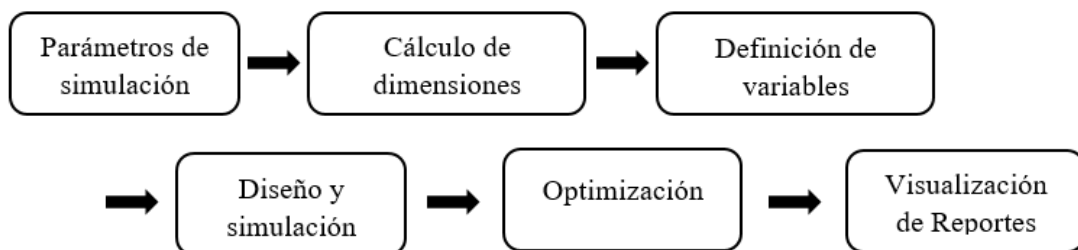
Luego de comparar los distintos substratos y considerando la disponibilidad de los diferentes materiales en el mercado, se ha seleccionado el material FR4 Epoxy Glass, cuyos parámetros para el diseño se muestra en la tabla 7-2.

**Tabla 7-2:** Parámetros del substrato

Parámetro del Substrato	Valor
Constante Dieléctrica $\epsilon_r$	4.4
Tangente de Pérdidas $\tan(\delta)$	0.02
Grosor del substrato h	1.6 mm
Grosor del conductor (cobre)	0.035 mm

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

En la figura 6-2 se muestra la metodología empleada en el diseño de la antena parche microstrip alimentada mediante una línea microstrip con inserción.



**Figura 6-2:** Metodología de diseño de la antena parche microstrip.

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



### 2.2.1.2. Parámetros de simulación

Es necesario definir los parámetros de simulación antes de proceder con los cálculos de las dimensiones de la antena parche microstrip, en estos parámetros se considera la frecuencia de operación y las características eléctricas del sustrato (ver tabla 8-2).

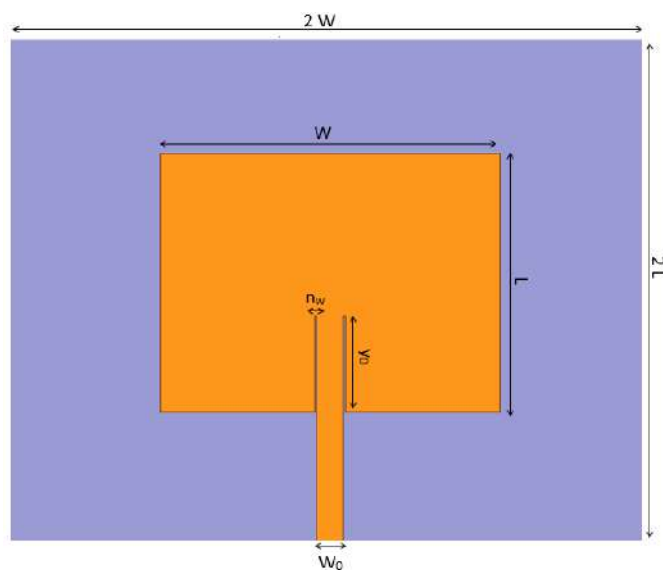
**Tabla 8-2:** Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Frecuencia de Operación	2.45 GHz
Constante Dieléctrica	4.4 (FR-4)
Grosor del Substrato	1.6 mm
Tangente de Pérdidas	0.02

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.2.1.3. Cálculo de dimensionamiento de la antena microstrip

Se detalla el procedimiento empleado para el diseño de la antena parche microstrip, para lo cual se hizo uso de un software matemático para calcular las diferentes dimensiones de la antena propuesta, siguiendo las ecuaciones 1-2, 2-2, 3-2 y 4-2 que permiten calcular sus dimensiones (ver figura 7-2).



**Figura 7-2:** Dimensiones de la antena parche microstrip

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Se calcula inicialmente la anchura del parche  $W$

$$W = \frac{v_o}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1-2)$$

Donde  $v_o$  es la velocidad de la luz,  $f_r$  es la frecuencia de resonancia y  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica.

Posterior se calcula la constante dieléctrica efectiva, considerando que  $\frac{W}{h} > 1$

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

$$\Delta L = h * 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3-2)$$

La longitud del parche se calcula como:

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (4-2)$$

Una vez encontrada las dimensiones del parche se procede a diseñar la línea de alimentación con impedancia característica de  $50 \Omega$ , para realizar este acoplamiento entre el parche y la línea de transmisión se hace uso del método de alimentación por inserción del cual se trata a más detalla a continuación.

#### 2.2.1.4. Alimentación de la antena

Para calcular las dimensiones de la línea microstrip y la inserción necesaria para acoplar la impedancia del parche con la línea microstrip, se hace uso de las ecuaciones 5-2, 6-2, 7-2 y 8-2.

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (5-2)$$

Si  $A \geq 1.52$

$$W_0 = h * \left( \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \right) \quad (6-2)$$

Si  $A < 1.52$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7-2)$$

$$W_0 = \frac{2h}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (8-2)$$

Para calcular la ubicación de la inserción  $y_0$  de la línea microstrip se emplean las ecuaciones 9-2, 10-2, 11-2, 12-2, 13-2.

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (9-2)$$

$$I_1 = \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta \, d\theta \quad (10-2)$$

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (11-2)$$

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

$$y_0 = \left( \frac{L}{\pi} \right) \sec(\sqrt{2Z_0(G_1 \pm G_{12})}) \quad (13-2)$$

Y finalmente para calcular el valor del ancho de la inserción  $n_w$  se utiliza la ecuación 14-2.

$$n_w = \frac{(3 \cdot 10^{11})(4.65 \cdot 10^{-12})}{\sqrt{2\epsilon_r f_r 1 \cdot 10^{-9}}} \quad (14-2)$$

### 2.2.1.5. Definición de Variables

Una vez obtenidas las dimensiones a partir de las ecuaciones, se procede a modelar la antena parche con la ayuda del software profesional de simulación, donde es necesario definir las variables correspondientes junto con sus dimensiones, se ingresa cada uno de los parámetros calculados y sus dimensiones correspondientes (ver tabla 9-2).

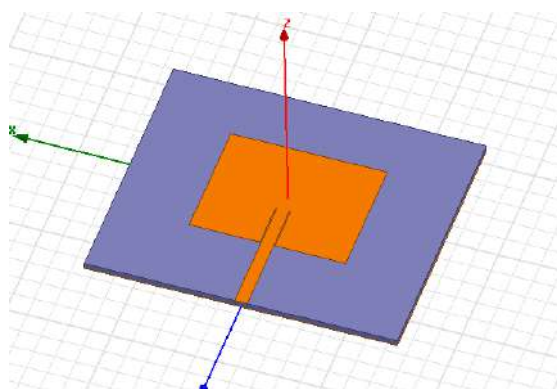
**Tabla 9-2:** Dimensiones de la antena

Parámetro	Dimensión por ecuaciones (mm)
W	37.26
L	28.8296
$W_0$	2.9836
$y_0$	10.6945
$n_w$	0.1993

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.2.1.6. Simulación de la Antena parche microstrip

Para la construcción del diseño de la antena se procede a crear un nuevo proyecto, en donde se puede comenzar el diseño desde cero, al ser un software en 3D es necesario definir el plano de tierra, el substrato dieléctrico y la estructura empleada como parche junto con el método de alimentación de la misma, como se observa en la figura 8-2 es necesario definir la posición de cada una de estas en los ejes x, y, z.

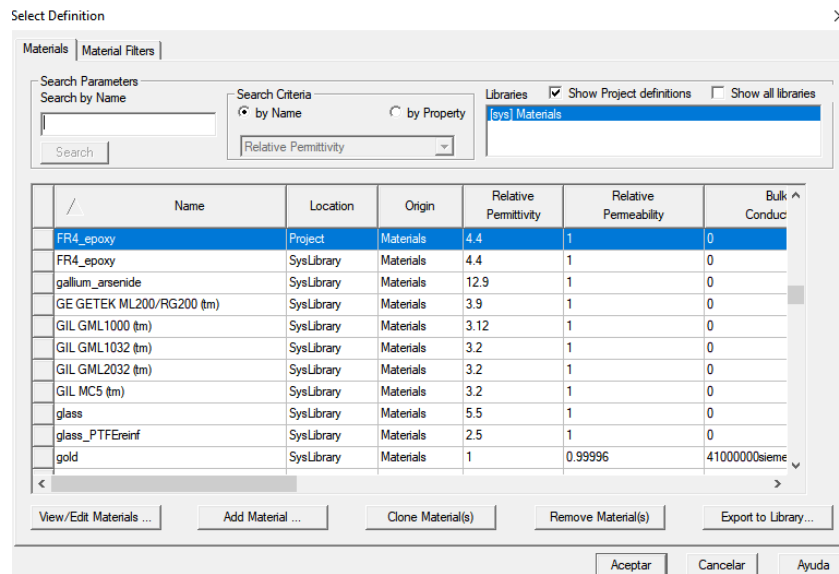


**Figura 8-2:** Posicionamiento de la antena parche

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

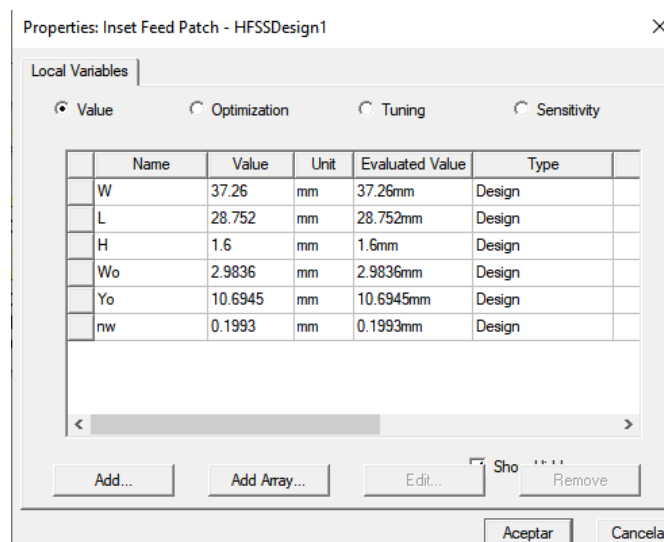
Para el diseño se comienza dibujando cada una de sus estructuras, con las herramientas de dibujo en este caso se hace uso de las figuras más comunes “draw box” y “draw rectangle” junto con su

posición y dimensiones a lo largo de los ejes, para ello se hizo uso de las variables definidas, mostradas en la figura 10-2, para el caso del plano de tierra y el parche se usa “draw rectangle” mientras que para el substrato se hace uso de “draw box” en donde se debe especificar el material empleado (ver figura 9-2)



**Figura 9-2:** Asignación del substrato dieléctrico

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

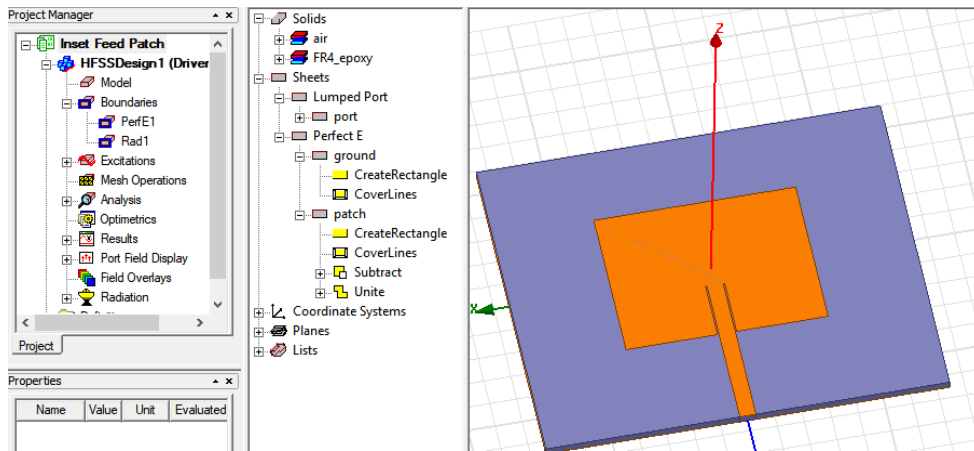


**Figura 10-2:** Asignación de variables

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Una vez creada la estructura del parche se continua con la línea de alimentación, para ello se ingresa dos rectángulos, uno para la línea de alimentación y otro para generar las inserciones en el parche, las cuales permitirán acoplar la línea de  $50 \Omega$  con la impedancia en el borde del parche, esta inserción se la posiciona a una longitud de  $y_0$  desde el borde del parche hacia su centro y un

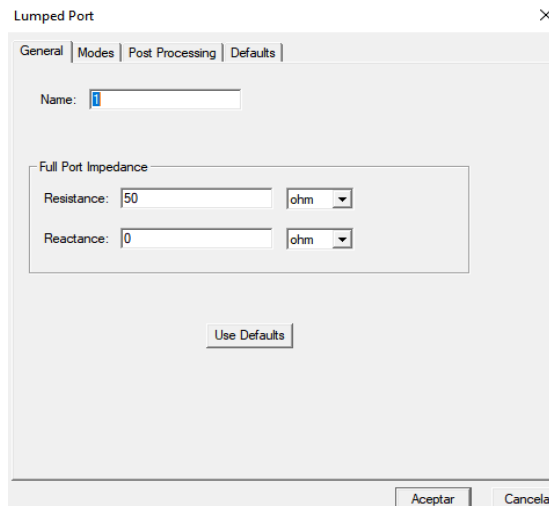
ancho de  $n_w$  simétrico a ambos lados de la línea de alimentación, todas estas figuras creadas se van asignando al proyecto (ver figura 11-2).



**Figura 11-2:** Estructura del diseño

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

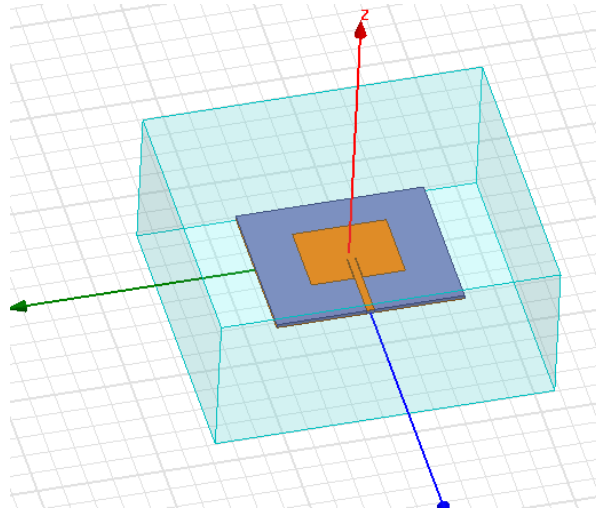
Finalmente se hace uso de la opción “unite” para generar una sola estructura, se asigna un puerto y se define la excitación del mismo, indicando su dirección a lo largo del eje yz (plano de tierra – conductor), el tipo de puerto empleado es “lumped port” (ver figura 12-2).



**Figura 12-2:** Definición del puerto

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

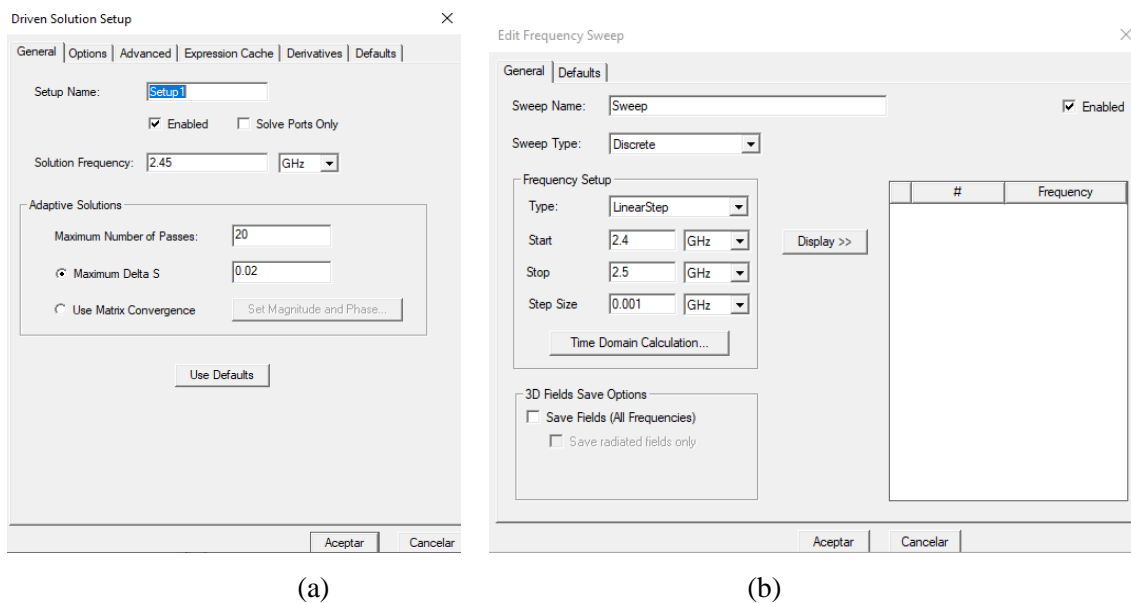
Una consideración importante es que se debe asignar tanto al plano de tierra como al parche su material, para ello se debe asignar un “boundarie” indicando que ambos son conductores, además se debe simular la estructura de aire para ello se crea una estructura que rodea la antena indicando sus límites de radiación (ver figura 13-2).



**Figura 13-2:** Límites de radiación

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Posterior al diseño se procede a configurar la solución en el parámetro análisis, donde se configura la frecuencia de operación y el grado de resolución de los resultados como se observa en la figura 14-2 (a), finalmente se configura el barrido de frecuencia, seleccionando el tipo de barrido, el rango de frecuencias y el número de pasos entre frecuencias mostradas en la figura 14-2 (b).



**Figura 14-2:** Configuración de solución (a) y Barrido de Frecuencia (b)

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.2.1.7. Optimización

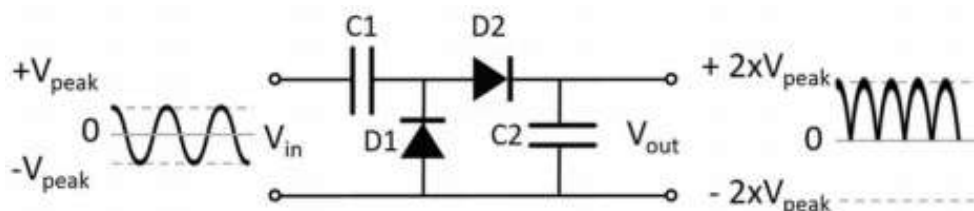
Al hacer uso de las dimensiones que fueron calculadas con las ecuaciones que se mostraron en la sección de dimensionamiento de la antena parche microstrip, posterior a la simulación se observó

que la respuesta en frecuencia se muestra desplazada, por lo que fue necesario optimizar las dimensiones de la antena, para ello se optimizó tanto la longitud del parche como el ancho de la inserción, con el fin de mejorar la respuesta en frecuencia y obtener los mejores resultados para su posterior implementación.

Para el proceso de optimización, se tomó como base las dimensiones calculadas, para a partir de ellas realizar pequeñas variaciones en el orden de los 0.01 mm, que permitieron hacer que la antena resuene a la frecuencia de 2.45 GHz, para alcanzar la respuesta deseada se redujo la longitud del parche alrededor de 0.06 mm y se aumentó la anchura de la inserción aproximadamente 0.08 mm.

### 2.2.2. Circuito Multiplicador-Rectificador

Ya diseñado el sistema de captación de RF, la siguiente etapa corresponde a la rectificación de la señal AC captada por la antena para convertirla en DC, para el diseño de esta etapa se elige el circuito multiplicador - rectificador de Villard, también conocido como Cockcroft-Walton, este circuito permite rectificar la señal y obtener una señal a la salida dos veces el voltaje pico de la señal que ingreso al circuito (ver figura 15-2), este circuito es muy empleado en los dispositivos para cosechamiento de energía, está formado por dos capacitores y dos diodos.



**Figura 15-2:** Circuito Multiplicador-Rectificador

Fuente: Calvo, 2020

El diodo  $D1$  entra en estado de conducción en el ciclo negativo de la señal, cargando el capacitor  $C1$ , mientras  $D2$  está abierto, en el ciclo positivo el diodo  $D2$  entra en conducción, cargando el capacitor  $C2$ ,  $D1$  se mantiene abierto y  $C1$  comienza a descargarse a través de  $D2$ , obteniendo de forma ideal dos veces el voltaje pico a la salida (Calvo, 2020, p. 44-45).

#### 2.2.2.1. Elementos del circuito multiplicador – rectificador

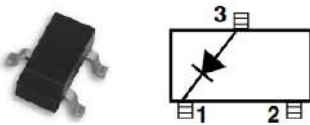
Los elementos que se deben considerar para el diseño del circuito multiplicador rectificador son los diodos y los capacitores, los cuales se describen a continuación:



- **El Diodo**

La selección de los diodos para el circuito multiplicador – rectificador es de suma importancia ya que estos determinaran la eficiencia de conversión RF a DC, es necesario elegir un diodo que opere a altas frecuencias, posea una baja tensión de umbral y un tiempo de conmutación rápido. Para este trabajo se ha seleccionado el diodo tipo Schottky modelo HSMS-2850 de Agilent Technologies (ver tabla 10-2), el cual posee un voltaje de activación de 250 mV con una corriente de 1 mA, muy empleado en aplicaciones de cosecha de energía de RF, además de contar con la librería dentro del software profesional de simulación empleado para la simulación del circuito rectificador, incluyendo todas sus características para una simulación más real.

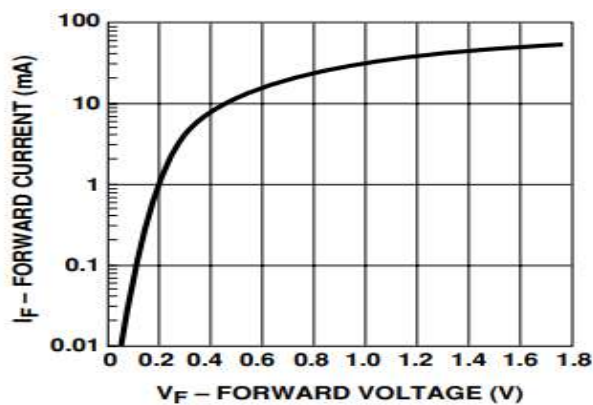
**Tabla 10-2:** Características del diodo Schottky

Diodo Schottky	Voltaje de activación ( $V_F$ )		Corriente de activación ( $I_F$ )	
	HSMS-2850 	150 mV	250 mV	0.1 mA

Fuente: <https://www.rf-microwave.com/en/agilent-technologies/hsms-2850/zero-bias-schottky-diode/hsms-2850/>

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Este tipo de diodo funciona de la misma manera que un diodo normal, pero se diferencia de otro tipo por su bajo voltaje de activación, que es imprescindible en aplicaciones en donde el consumo de energía limita el funcionamiento del dispositivo, además de ser capaz de operar en aplicaciones de radiofrecuencia, la curva característica del diodo V-I se muestra en la figura 16-2 y su aspecto físico se observa en la figura 17-2.



**Figura 16-2:** Curva característica V-I del diodo HSMS-2850

Fuente: [http://www.hp.woodshot.com/hprfhelp/4\\_downld/products/diodes/hsms2850.pdf](http://www.hp.woodshot.com/hprfhelp/4_downld/products/diodes/hsms2850.pdf)



**Figura 17-2:** Diodos HSMS-2850



Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

## - Los Capacitores

Para la selección de los capacitores es necesario hacer uso del software profesional de simulación para obtener un valor óptimo del capacitor, la selección del capacitor se puede observar en la sección del diseño del circuito. De forma común en este tipo de aplicaciones los capacitores están en el orden de los picofaradios, con la característica de que tenga una baja resistencia para evitar pérdida de energía y que sea fabricado para aplicaciones de radio frecuencia.

Las características de los capacitores seleccionados se muestran en la tabla 11-2 y su aspecto físico se puede observar en la figura 18-2.

**Tabla 11-2:** Características de los capacitores

Capacitor MLCC (Multilayer Ceramic Capacitors) <b>Fabricante:</b> muRata Electronics	Serie	Valor	Tipo	Tecnología	Dimensiones
<b>Modelo:</b> GQM2195C2E101JB12D 	GQM	100 pF	High Frequency / High Q	SMD (Surface Mount Device)	1.25 mm x 2 mm
<b>Modelo:</b> GQM2195C2A221JB12D 	GQM	220 pF	High Frequency / High Q	SMD (Surface Mount Device)	1.25 mm x 2 mm

Fuente: <https://www.mouser.com/ProductDetail/81-GQM2195C2E101JB2D>

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Se selecciona estos capacitores por tener una baja resistencia en serie equivalente (ESR) y por ser de tipo high Q que permiten minimizar las pérdidas de energía, estos son dos de los parámetros que se deben considerar en capacitores empleados en alta frecuencia.

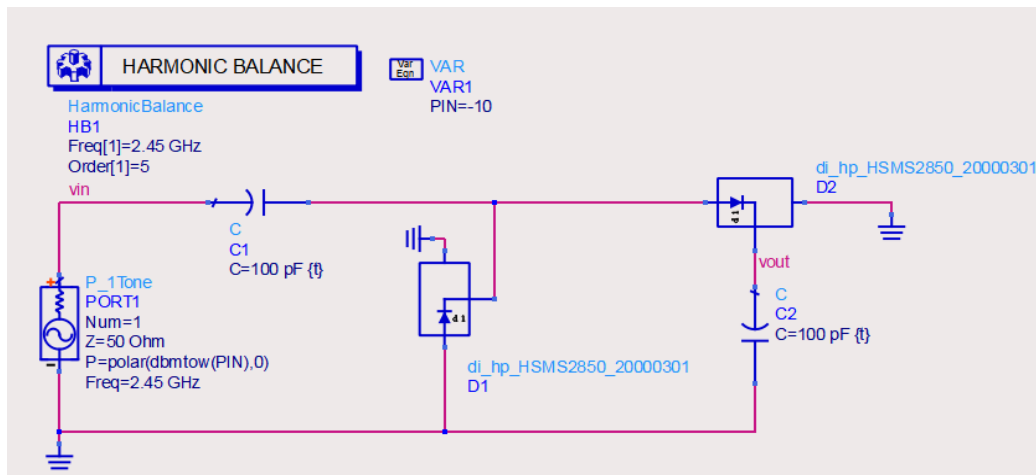


**Figura 18-2:** Capacitores muRata modelo GQM2195C2E101JB12D

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

#### 2.2.2.2. Diseño del circuito Multiplicador- Rectificador

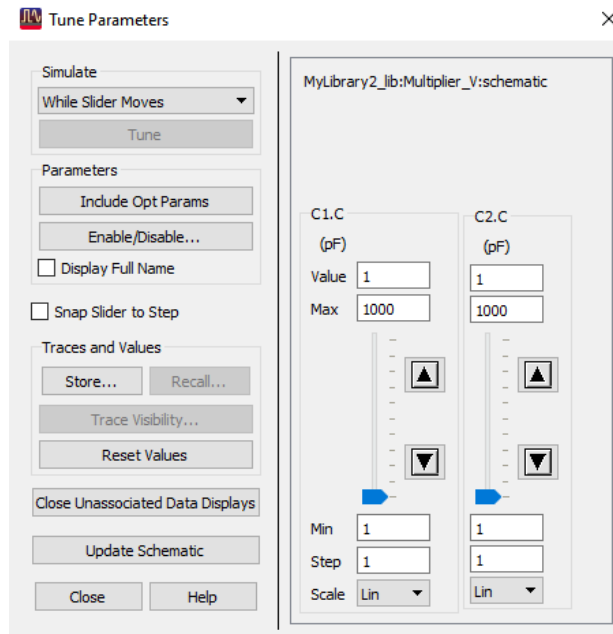
En la figura 19-2 se muestra el esquema del circuito multiplicador- rectificador diseñado, donde se hace uso del diodo Schottky HSMS-2850, cuyos parámetros de simulación se encuentran disponibles en el software mediante su librería para diodos de alta frecuencia, los capacitores empleados son tipo MLCCs de 100 pF y además se hace uso de una fuente de poder AC para simular la señal que la antena receptora pasará hacia el circuito rectificador, se la configura en la frecuencia de 2.45 GHz, con una impedancia de 50  $\Omega$  y un valor de potencia inicial de -10 dBm.



**Figura 19-2:** Simulación del Circuito Multiplicador-Rectificador

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

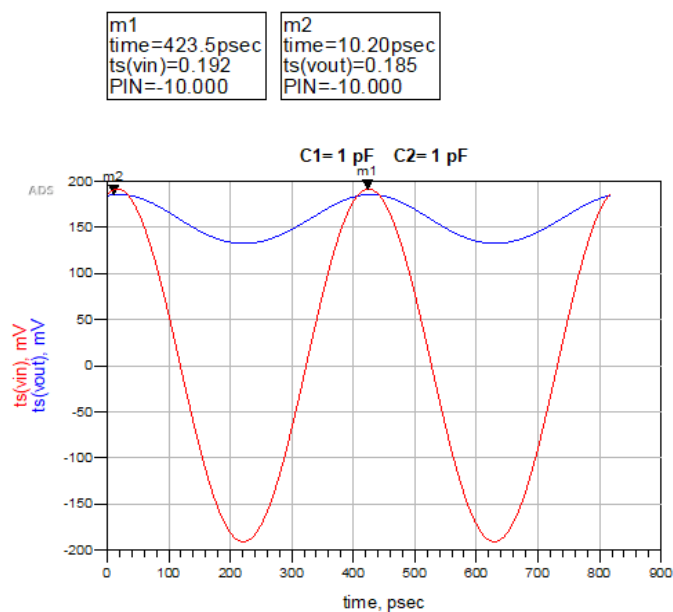
Para la selección del valor del capacitor se ha hecho uso de la herramienta Tuning para poder encontrar un valor adecuado, definiendo un rango de valores desde 1 pF hasta 1 nF, para comprobar la respuesta ante diferentes valores de capacitores (ver figura 20-2). En la simulación del circuito se incluye el módulo Harmonic Balance, el cual permite realizar un análisis de componentes no lineales como lo es en este caso los diodos, además de permitir capturar las mediciones de voltaje a la entrada y salida.



**Figura 20-2:** Herramienta Tuning para selección de capacitores

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Para mostrar los resultados obtenidos del circuito, se inició con un valor mínimo de 1 pF. En la figura 21-2 se puede observar que a la salida del circuito el voltaje  $V_{out}$  es menor que el aplicado en la entrada  $V_{in}$ , debido a que el valor de capacitor es muy pequeño.

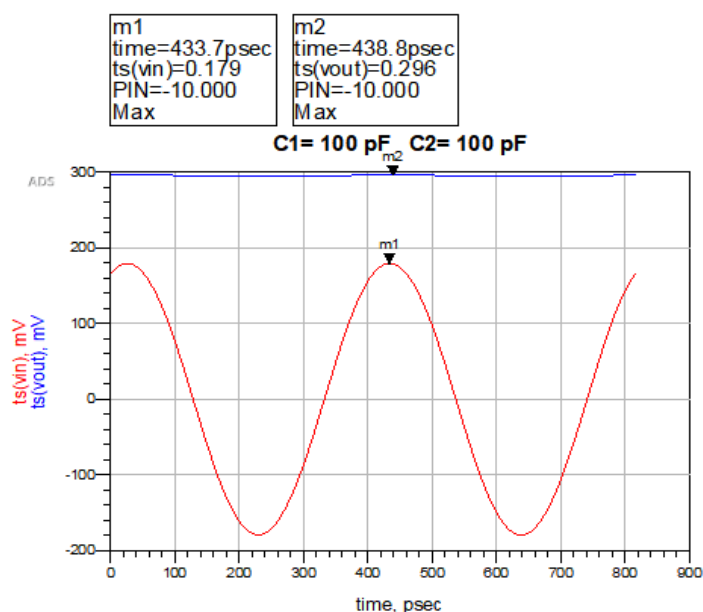


**Figura 21-2:** Circuito Multiplicador-Rectificador con capacitor de 1 pF

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

De esta forma se probó varios valores para los capacitores, en donde un valor de 100 pF resultó ser suficiente para que el circuito multiplicador - rectificador opere correctamente (ver figura 22-2), considerando la disponibilidad de un capacitor con este valor para ser adquirido.

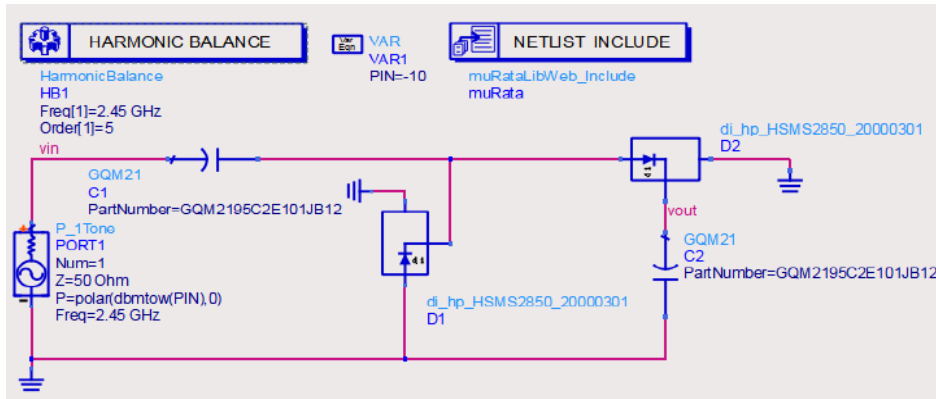
Empleando un valor de capacitor de 100 pF se puede observar que el valor de voltaje a la salida del circuito  $V_{out}$  es de 0.296 V, comparado con el voltaje a la entrada de  $V_{in}= 0.179$  V, idealmente el circuito multiplicador- rectificador debe tener una tensión a la salida de dos veces la tensión de entrada, como se observa no se logra alcanzar este resultado, debido a que no existe una red de acoplamiento que permita igualar las impedancias entre el generador y el circuito multiplicador-rectificador, para que se puede transferir la máxima cantidad de energía, siendo necesario una red de acoplamiento, la cual se muestra en la sección 2.2.2.3.



**Figura 22-2:** Circuito Multiplicador-Rectificador con capacitor de 100 pF

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

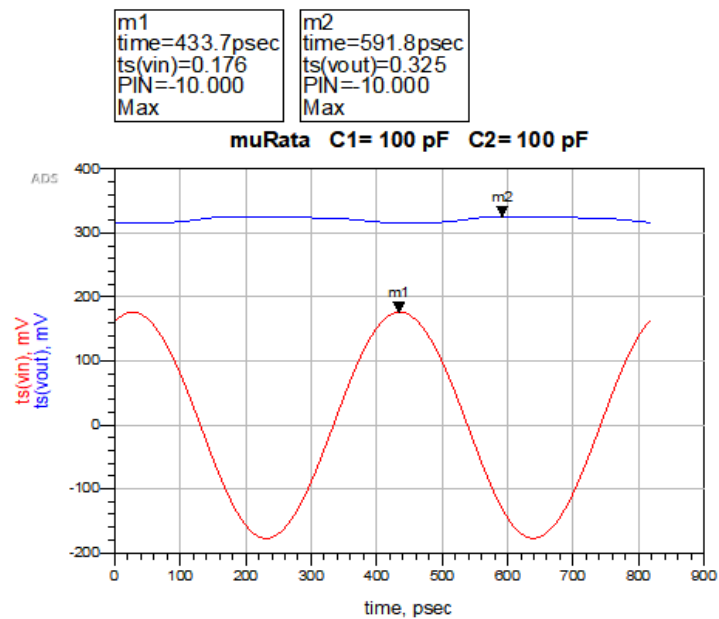
Para obtener un resultado más realista del circuito se añadió la librería de los capacitores seleccionados del fabricante muRata de la serie GQM21 (ver figura 23-2) empleados en aplicaciones de RF, con valores de resistencia muy bajos para evitar pérdidas de energía.



**Figura 23-2:** Circuito Multiplicador-Rectificado, capacitor muRata de 100 pF

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Haciendo uso de la librería para los capacitores seleccionados, se puede observar el comportamiento del circuito de forma más real, ya que se incluye todas las características del capacitor seleccionado como su temperatura de operación, voltaje nominal, frecuencia de operación entre otros, su respuesta se muestra en la figura 24-2.



**Figura 24-2:** Circuito Multiplicador-Rectificador, capacitor muRata de 100 pF

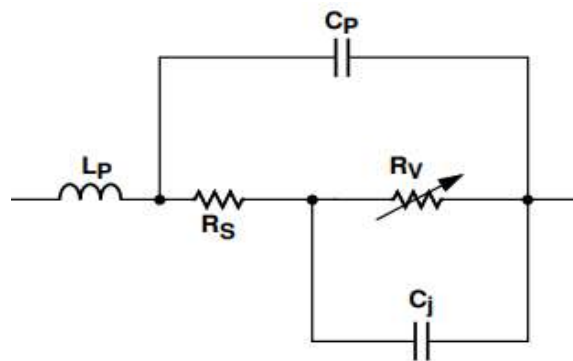
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.2.2.3. Red de Acoplamiento

La función que cumple la red de acoplamiento dentro del dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia, es asegurar la máxima transferencia de potencia desde la antena hacia el circuito multiplicador - rectificador, debido a que si no se acopla las impedancias entre la antena

y el circuito rectificador, la potencia que es capturada por la antena es reflejada al querer pasar hacia al circuito rectificador, perdiéndose una cantidad de energía considerable, afectando el rendimiento global del dispositivo.

La red de acoplamiento propuesta se diseña con el fin de acoplar la impedancia de salida de la antena de  $50 \Omega$  a la impedancia de entrada del circuito multiplicador - rectificador, para esto es necesario calcular la impedancia del circuito multiplicador – rectificador, en este caso se hace uso del circuito equivalente del diodo Schottky HSMS-2850 proporcionado por su datasheet para hallar la impedancia exacta del circuito (ver figura 25-2).



**Figura 25-2:** Circuito equivalente del diodo Schottky HSMS-2850

Fuente: [http://www.hp.woodshot.com/hprfhelp/4\\_downld/products/diodes/hsms2850.pdf](http://www.hp.woodshot.com/hprfhelp/4_downld/products/diodes/hsms2850.pdf)

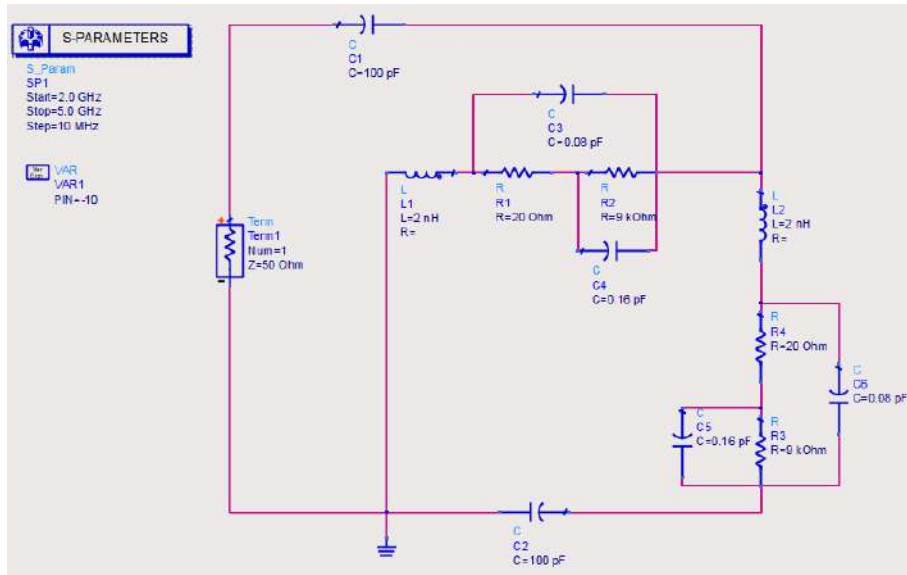
El circuito equivalente del diodo Schottky está conformado por cinco elementos cuyos valores se extraen del datasheet (ver tabla 12-2).

**Tabla 12-2:** Elementos del circuito equivalente del diodo HSMS-2850

Elemento	Valor
Capacitancia parásita ( $C_p$ )	0.08 pF
Inductancia parásita ( $L_p$ )	2 nH
Capacitancia de unión ( $C_j$ )	0.16 pF
Resistencia en serie ( $R_s$ )	20 $\Omega$
Resistencia de video ( $R_v$ )	9 K $\Omega$

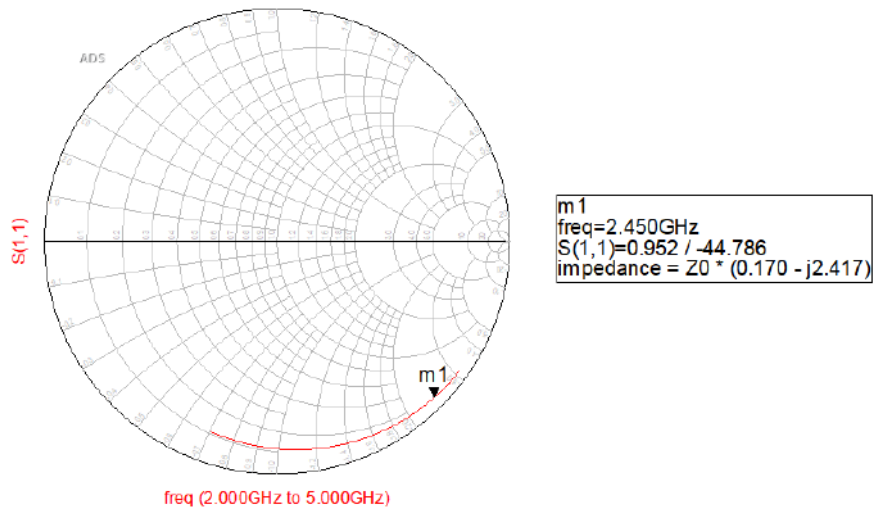
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Para determinar la impedancia de entrada del circuito multiplicador- rectificador, se reemplazó los diodos HSMS-2850 por el circuito equivalente proporcionado por el fabricante en su datasheet con los datos de la tabla 12-2, el circuito resultante se muestra en la figura 26-2, se hace uso del módulo S-Parameters que permite determinar los parámetros de dispersión y se incluye un terminal para indicar la impedancia a la que se requiere acoplar en este caso  $50 \Omega$ .



**Figura 26-2:** Circuito Multiplicador-Rectificador, circuito equivalente del diodo  
 Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Para determinar la impedancia se graficó el parámetro  $S_{11}$  en la carta Smith (ver figura 27-2), donde se puede observar la impedancia del circuito a los distintos valores de frecuencias configurados en el módulo S-Parameters, en este caso a la frecuencia de 2.45 GHz se observa un valor de impedancia normalizada de  $Z_0 \cdot (0.170 - j 2.417)$ , siendo  $Z_0 = 50 \Omega$  se tiene un valor de impedancia de entrada de  $Z_{in} = 8.509 - j 120.838$ .



**Figura 27-2:** Impedancia del circuito multiplicador-rectificador a 2.45 GHz  
 Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Una vez conocida el valor de impedancia a la entrada del circuito multiplicador - rectificador, se hace uso de la herramienta Smith Chart y su módulo (ver figura 28-2), para diseñar la red de acoplamiento se define la impedancia de la carga, correspondiente a la impedancia calculada  $Z_L$ .



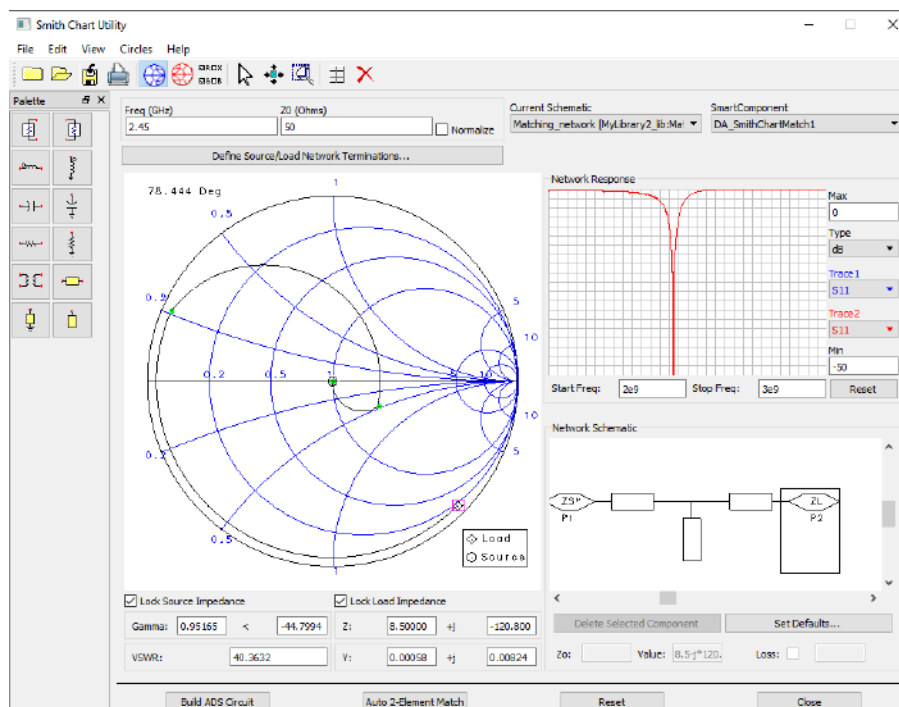
=  $8.509 - j 120.838 \Omega$  y la impedancia de la fuente, correspondiente a la impedancia a la salida de la antena  $Z_{source} = 50 \Omega$  (ver figura 29-2), para este diseño se emplea elementos distribuidos o secciones de líneas de transmisión, para la red de acoplamiento debido a su facilidad de implementación con tecnología microstrip.



**Figura 28-2:** Módulo Smith Chart

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Para el diseño de la red de acoplamiento el software cuenta con 3 componentes para elementos distribuidos: líneas de transmisión, open stubs y shorted stubs, en este caso se usa líneas de transmisión y open stubs, los cuales permiten acoplar la impedancia hasta llegar a los  $50 \Omega$ , como se observa la red de acoplamiento se ajusta a la frecuencia de resonancia, pero, el ancho de banda es muy reducido por lo cual se propone una nueva red de acoplamiento en la sección 2.2.2.4 en donde también se considera la implementación de la etapa de almacenamiento de energía.

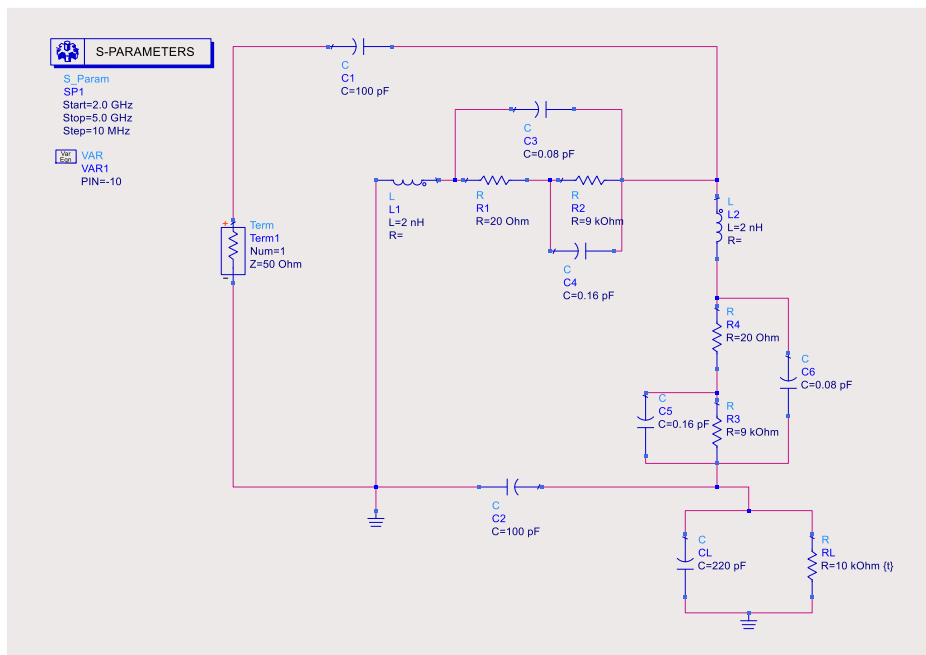


**Figura 29-2:** Simulación de la red de acoplamiento con Smith Chart

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

#### 2.2.2.4. Simulación del circuito multiplicador-rectificador

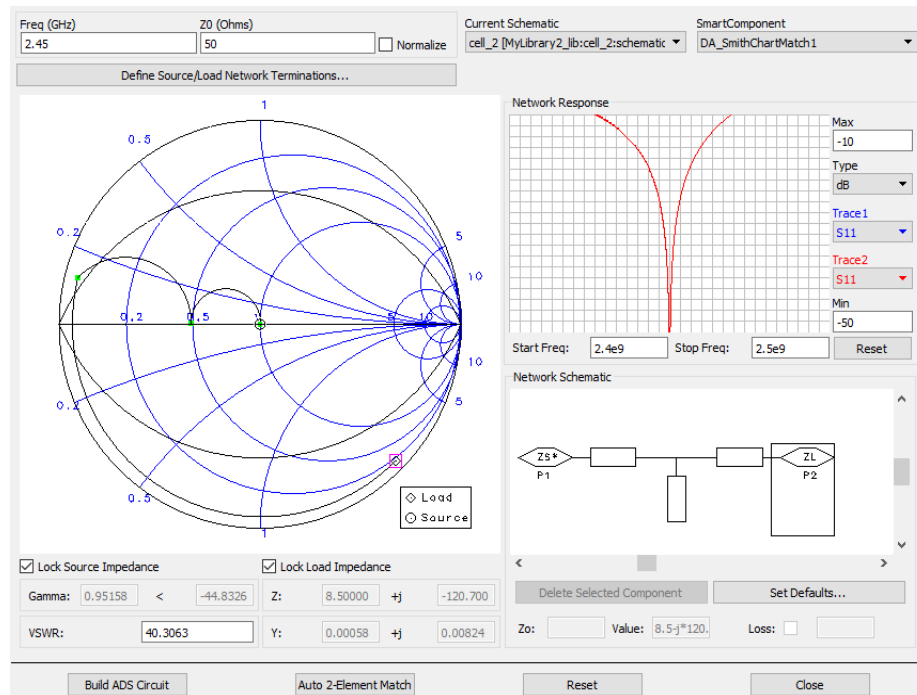
Para completar la simulación del circuito, es necesario agregar a la salida del circuito multiplicador-rectificador una etapa que permita almacenar la energía, esto se ha realizado introduciendo un capacitor  $C_L$  junto con una resistencia en paralelo  $R_L$ , para ello es necesario incluir el capacitor  $C_L$  y la resistencia  $R_L$  al circuito de la figura 30-2, para recalcular el valor de impedancia tanto del circuito multiplicador-rectificador como de la etapa de almacenamiento de energía y así determinar la red de acoplamiento que se usa en el circuito final (ver figura 31-2)



**Figura 30-2:** Circuito rectificador multiplicador y capacitor para almacenar energía

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

El nuevo valor de impedancia incluyendo la etapa de almacenamiento de energía es de  $Z_0 \cdot (0.1702 - j 2.4145)$ , siendo  $Z_0 = 50 \Omega$ , se tiene un valor de impedancia de entrada de  $Z_{in} = 8.5095 - j 120.7266$  (ver figura 31-2), el valor de  $C_L = 220$  pF y de  $R_L = 10$  kOhm, los cuales se determinando mediante la herramienta de Tuning, observando el comportamiento del circuito, la  $R_L$  permite que el capacitor  $C_L$  se descargue y el capacitor  $C_L$  permite suavizar la señal de salida, se puede notar que al incrementar el valor de  $R_L$  el voltaje a la salida incrementa.

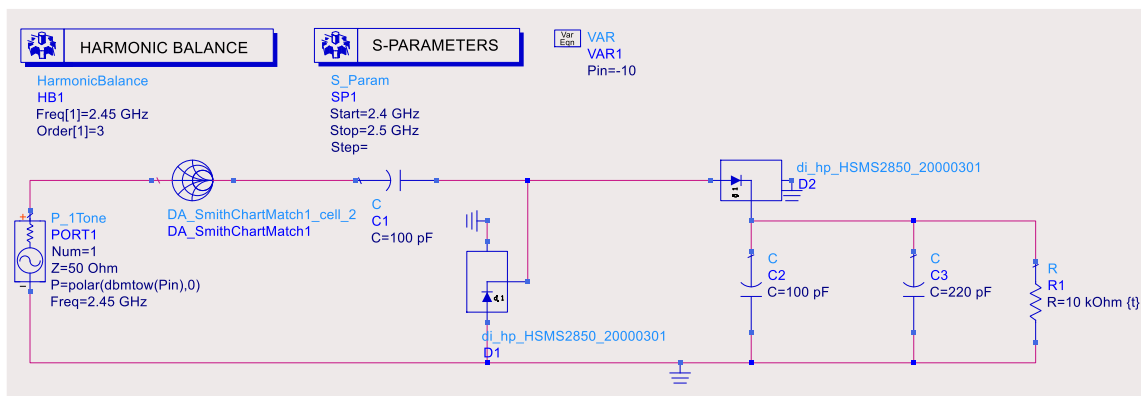


**Figura 31-2:** Diseño de la red de acoplamiento incluyendo etapa de almacenamiento

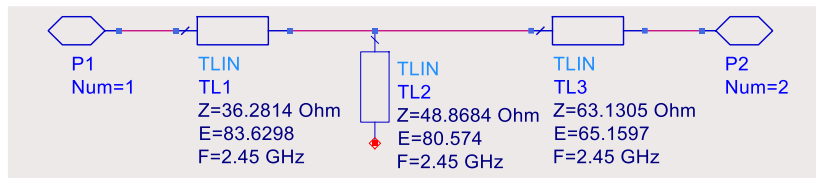
**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

Como se observa para adaptar la impedancia de la carga y de la fuente, se hizo uso de dos líneas de transmisión y un stub en circuito abierto, para conectar ambos puntos mostrados en la carta Smith, como se mencionó anteriormente se debe considerar que la red de acoplamiento mantenga un ancho de banda, para eso se hace uso de las curvas Q o factor de calidad, se ingresa las distintas secciones de líneas, manteniéndolas dentro de la curva Q, para desplazarse hasta llegar a los  $50 \Omega$ .

Una vez diseñada la red de acoplamiento en la herramienta Smith Chart se procedió a exportar el circuito a través del bloque Smith Chart, el cual posee en su interior el diseño de la red de acoplamiento (ver figura 32-2).



(a)



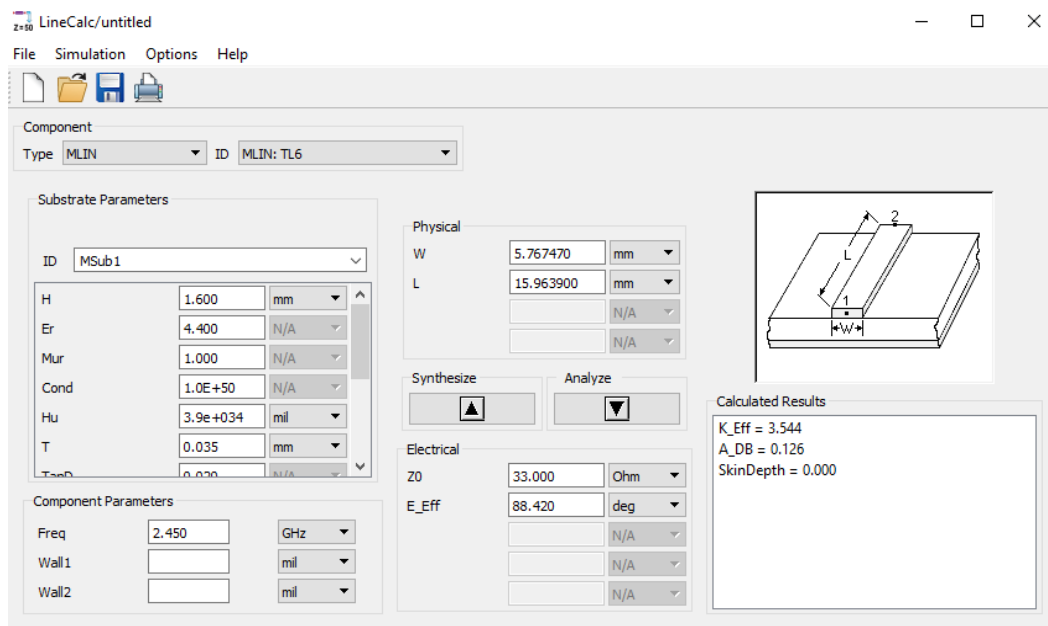
(b)

**Figura 32-2:** (a) Diseño del circuito incluido Smith Chart (b) Diseño de la red de acoplamiento

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

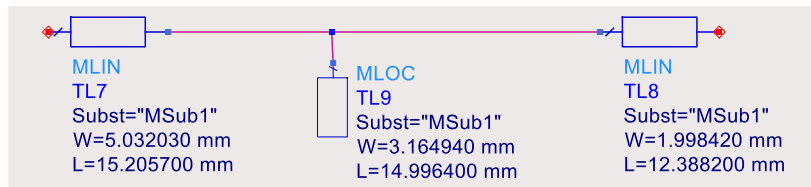
Como se observa los componentes vienen dados en su impedancia característica ( $Z_0$ ) y longitud eléctrica (E), de los cuales empleando la herramienta LineCalc se puede pasarlo a dimensiones físicas de ancho (W) y largo (L) para su posterior implementación.

Para pasar la red de acoplamiento obtenida a líneas de transmisión físicas se hizo uso de LineCalc (ver figura 33-2), ingresando los parámetros del sustrato a ser empleado, los cuales se discutieron en la sección 2.2.1.1, en la calculadora se ingresa los valores de impedancia característica y longitud eléctrica para luego sintetizarlo y obtener dimensiones físicas de líneas tipo microstrip con un ancho (W) y largo (L) (ver figura 34-2).



**Figura 33-2:** LineCalc ADS

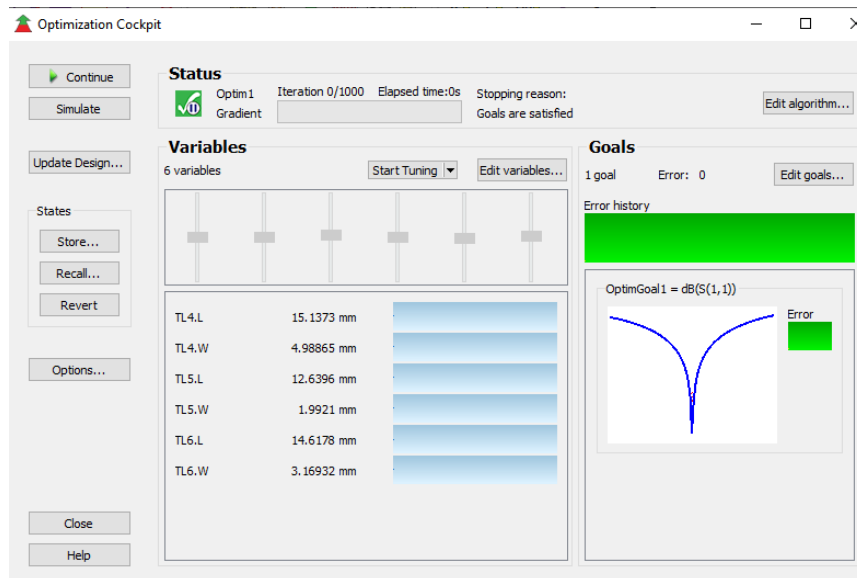
**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.



**Figura 34-2:** Red de acoplamiento en dimensiones físicas

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

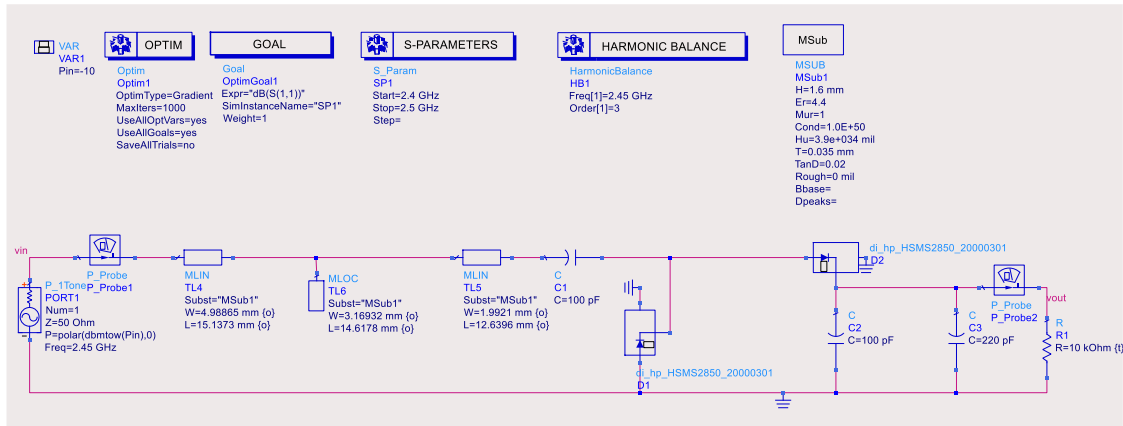
Cabe recalcar que las dimensiones mostradas en la figura 34-2, se obtuvieron previo a una optimización de las dimensiones, para tratar de obtener un mejor acoplamiento en la frecuencia de 2.45 GHz, para ello se hizo uso de Cockpit, donde se definen las variables a ser optimizadas (ver figura 35-2)



**Figura 35-2:** Optimización de dimensiones físicas de la red de acoplamiento

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

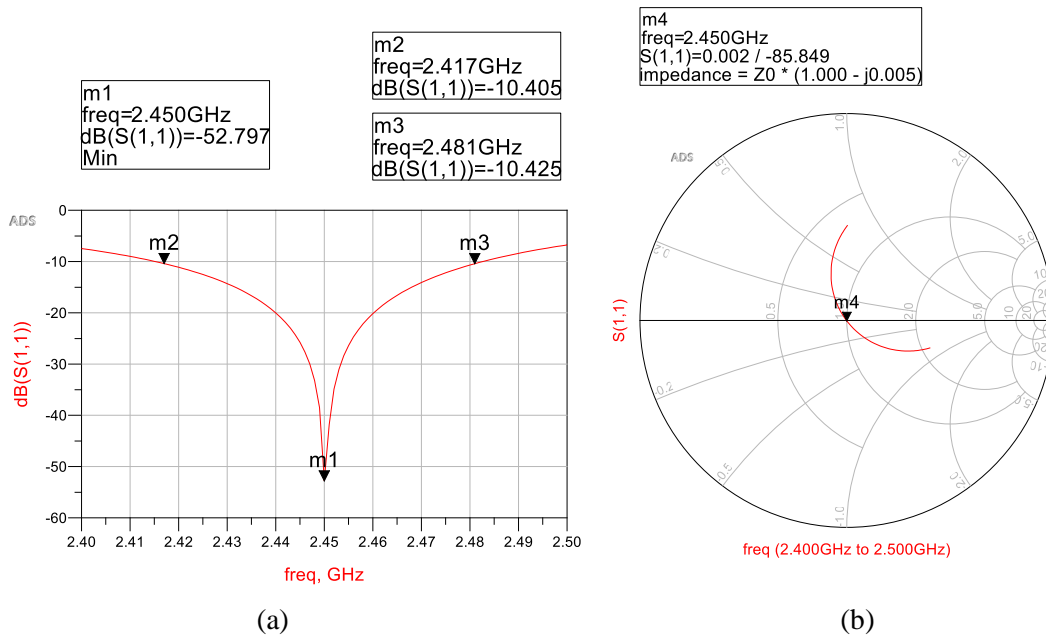
Finalmente se reemplazó el bloque de Smith Chart por la red de acoplamiento formada por líneas microstrip y un stub de circuito abierto como se muestra en la figura 36-2, obteniendo el circuito final para el dispositivo para el cosechamiento de energía de RF, se incluyó los componentes P\_Probe y los pines vin y vout para realizar las pruebas correspondientes del circuito.



**Figura 36-2:** Diseño del circuito final

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Una vez optimizadas las dimensiones de la red de acoplamiento, se puede observar que existe un buen acoplamiento entre la antena empleada para captar la energía de RF (fuente) y el circuito multiplicador-rectificador junto con la etapa de almacenamiento de energía (carga), para ello se muestra el parámetro  $S_{11}$  (ver figura 37-2 (a)), la impedancia del circuito (ver figura 37-2 (b)) y la respuesta del dispositivo al convertir la señal de RF a DC (ver figura 38-2).

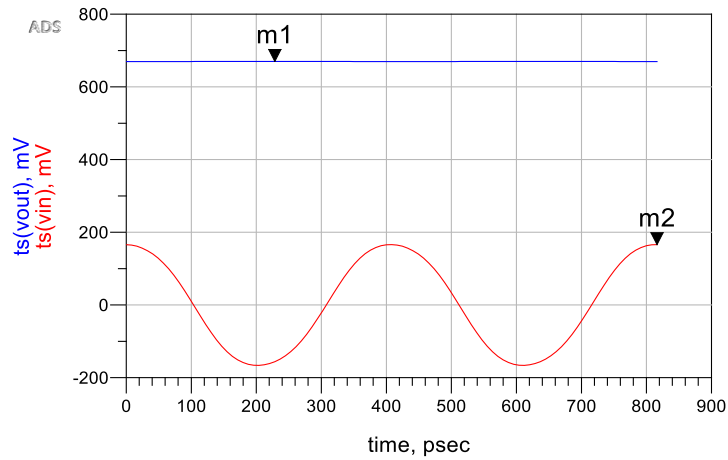


**Figura 37-2:** (a) Parámetro  $S_{11}$ , (b) Impedancia de entrada del dispositivo diseñado

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

m1  
time=228.6psec  
ts(vout)=0.670  
Max

m2  
time=816.3psec  
ts(vin)=0.166  
Max



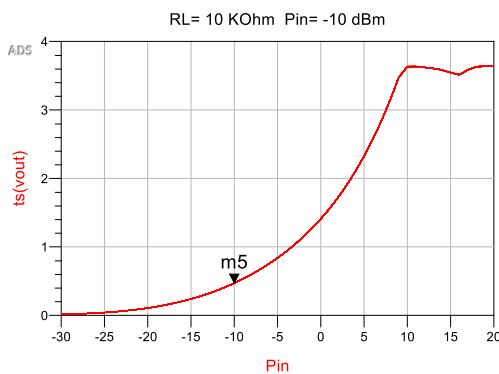
**Figura 38-2:** Conversión de RF a DC con  $P_{in} = -10 \text{ dBm}$  y  $R_L = 100 \text{ K}\Omega$

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

En el gráfico 1-2, se observa la salida de voltaje  $V_{out}$ , para diferentes valores de resistencia de carga, con una variación de potencia de entrada  $-30 \text{ dBm}$  a  $20 \text{ dBm}$  para cada uno de los casos, de esta forma se observa la variación de voltaje a la salida, de acuerdo al valor de resistencia de carga empleado.

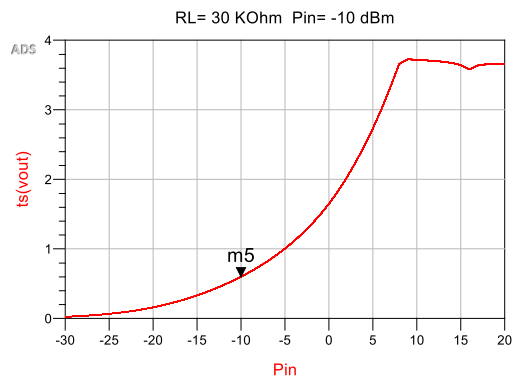
Se debe tomar en cuenta que se debe lograr obtener un valor de resistencia de carga óptimo en función de la eficiencia de conversión de RF a DC, para ello se realiza una simulación a diferentes valores de resistencia de carga.

m5  
indep(m5)=-10.000  
plot\_vs(ts(vout), Pin)=0.470  
time=816.3psec

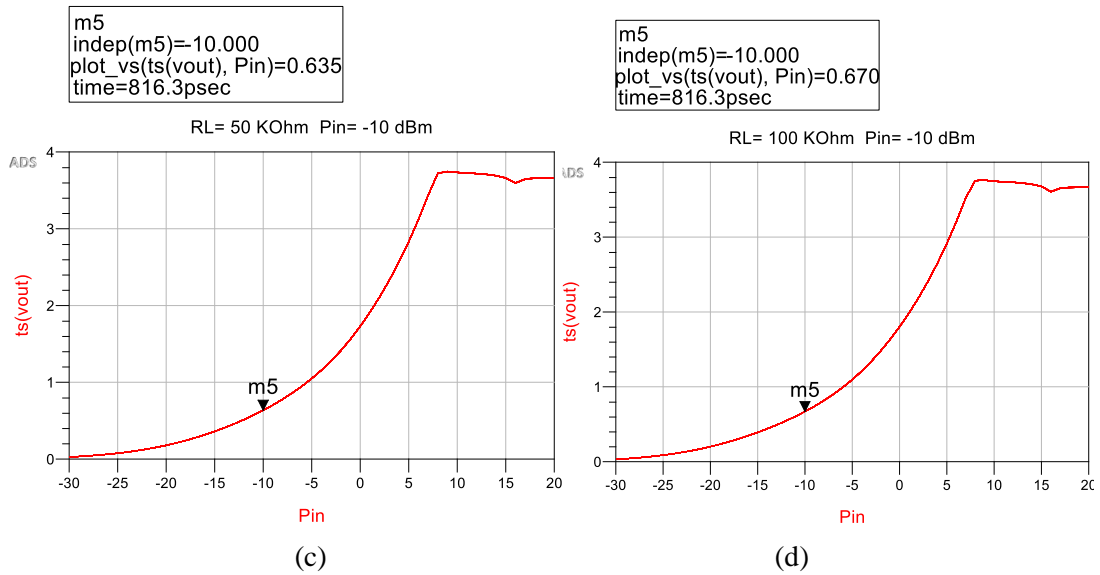


(a)

m5  
indep(m5)=-10.000  
plot\_vs(ts(vout), Pin)=0.599  
time=816.3psec



(b)



**Gráfico 1-2:**  $V_{out}(V)$  vs  $P_{in}(dBm)$ : a)  $R_L = 10\text{ K}\Omega$ , b)  $R_L = 30\text{ K}\Omega$ , c)  $R_L = 50\text{ K}\Omega$ , d)  $R_L = 100\text{ K}\Omega$

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

Para determinar la eficiencia de la etapa de rectificación se hace uso de la ecuación 15-2, en la cual se relaciona la potencia de salida DC ( $P_{DC}$ ), con la potencia de entrada RF ( $P_{IN}$ ), donde la potencia de RF es la potencia recibida por la antena y la potencia de DC es la potencia calculada a la salida, en los terminales de la resistencia de carga.

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida DC } (P_{DC})}{\text{Potencia de entrada RF } (P_{RF})} * 100 \quad (15-2)$$

Donde la potencia de salida ( $P_{DC}$ ) se puede calcular como:

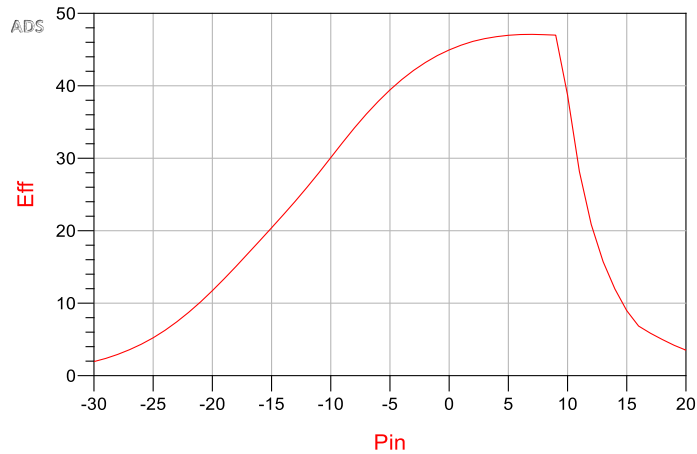
$$P_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{R_L} \quad (16-2)$$

$V_{DC}$  = Voltaje medido a la salida

$R_L$  = Resistencia de carga

Se evalúa la eficiencia de conversión de RF a DC (ver gráfico 2-2), en función de la potencia de entrada y a diferentes valores de resistencia para comprobar el comportamiento del circuito, se puede observar que, a niveles de potencia de RF a la entrada bajos, la eficiencia de conversión es baja y a medida que se incrementa la potencia la eficiencia crece hasta un valor pico para luego decrecer, dependiendo también de la resistencia de carga como se muestra en la ecuación (16-2)





**Gráfico 2-2:** Eficiencia de conversión de RF a DC (Eficiencia (%) vs Pin (dBm))

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

#### 2.2.2.5. Esquemático Final

Previo a la generación del layout final es necesario realizar una serie de consideraciones, que se deben añadir al circuito mostrado en la figura 36-2 las cuales se detallan a continuación:

- Se deben ingresar MTEEs en los lugares donde se juntan tres líneas de diferente anchura, MSTEPs en los lugares donde se juntan dos líneas con distinto ancho, esto con el fin de eliminar discontinuidades que alteren el comportamiento del circuito.
- Se añaden MGAP que permiten definir el espacio entre las líneas, para dejar el espacio suficiente para ubicar tanto los capacitores como los diodos Schottky según sus dimensiones.
- VIAGND para simular el efecto de las conexiones de tierra, y el diámetro del orificio que se realiza para poder conectar al plano de tierra.
- Se deben ingresar nuevas líneas que permitirán realizar las conexiones de los diferentes componentes, considerando su espacio y lugar donde se soldara cada uno de los mismos.

El esquemático final tomando en cuenta las consideraciones mencionadas se muestra en la figura 39-2 para posterior generar el layout.

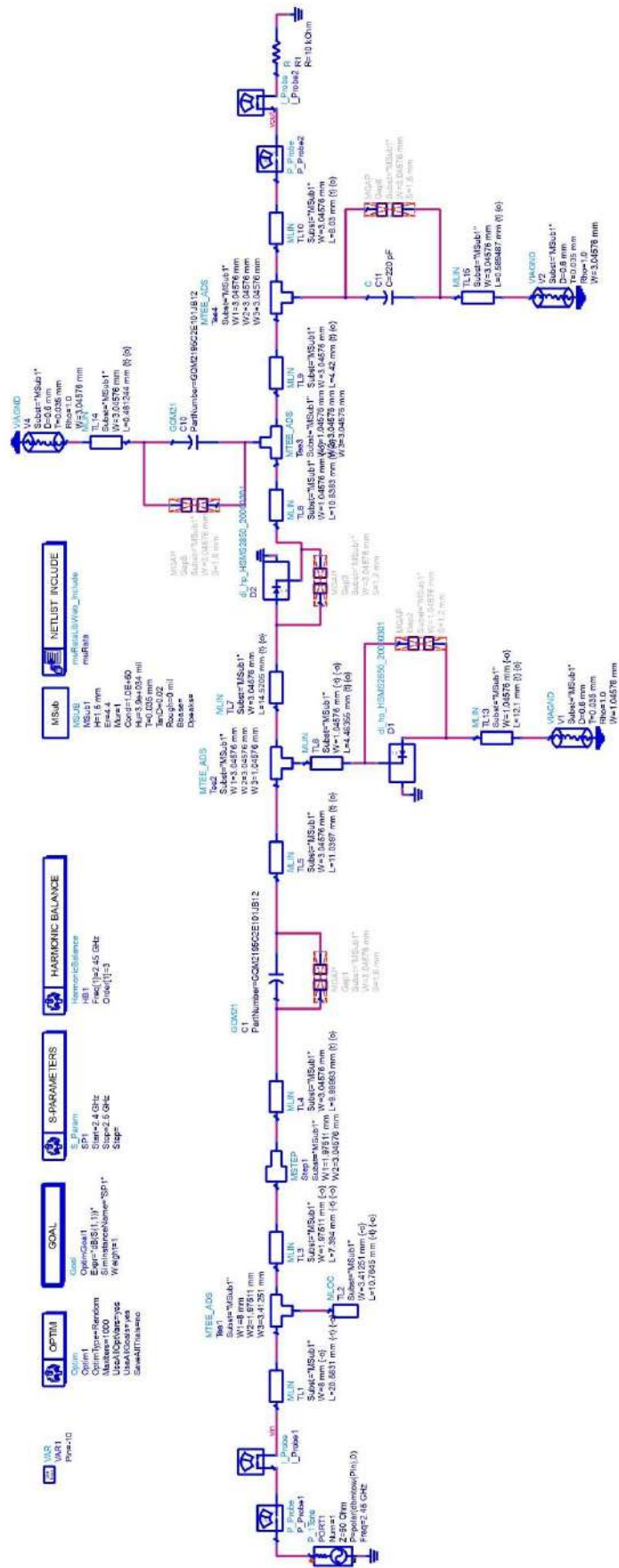
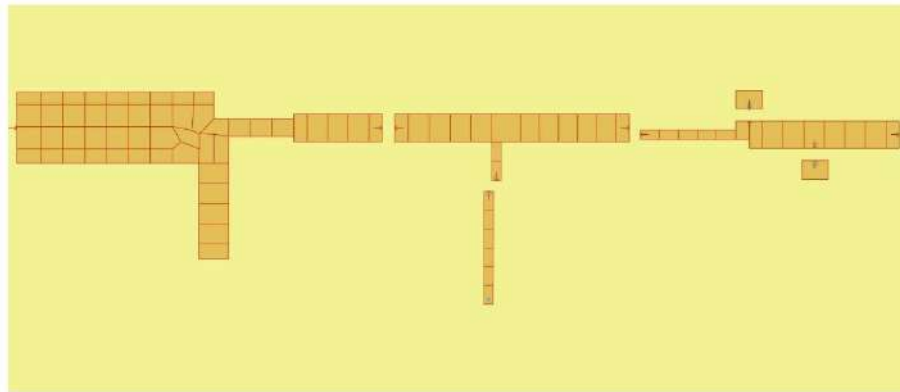


Figura 39-2: Esquemático final del circuito rectificador

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.2.2.6. Layout y Co-simulación

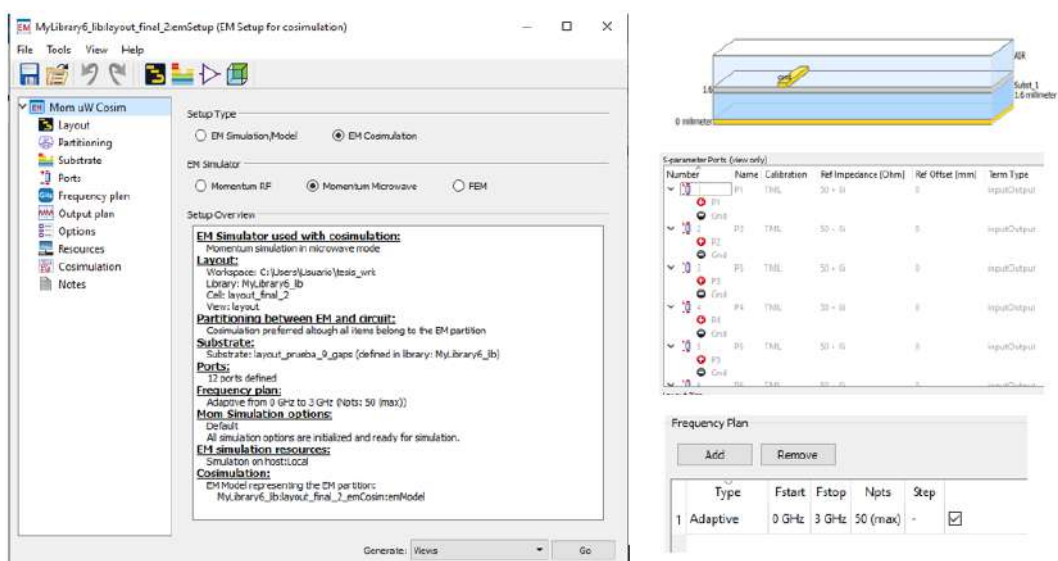
La figura 40-2 muestra el layout final del circuito rectificador, además como una forma para asegurar que el circuito esté funcionando correctamente ADS permite realizar una simulación electromagnética llamada “EM/Circuit Co-Simulation” en la cual se considera tanto el diseño del circuito como de los componentes electrónicos, en este caso los capacitores y los diodos Schottky.



**Figura 40-2:** Layout final del rectificador

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

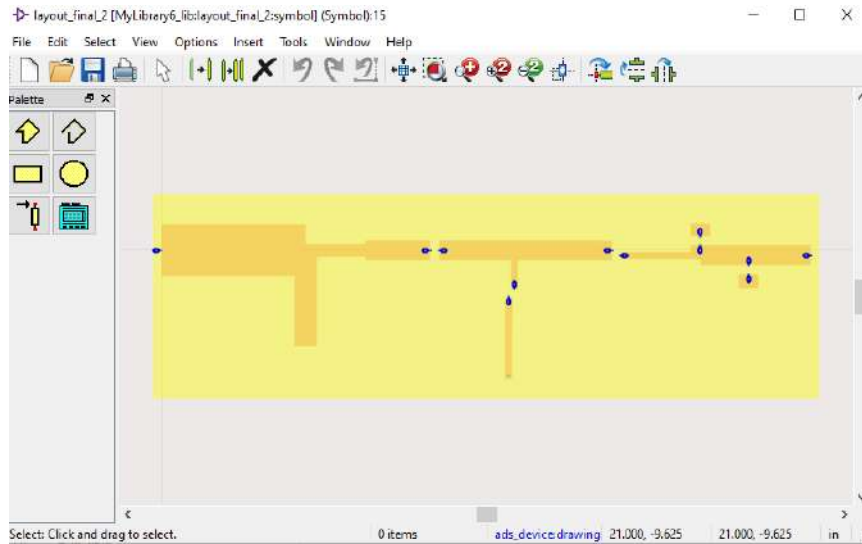
Una vez creado el layout se procedió a realizar la co-simulación del diseño, para ello es necesario definir los puertos en donde se coloca cada elemento, el sustrato empleado y el plan de frecuencia como muestra la figura 41-2, se selecciona el tipo de simulación Momentum Microwave que es empleado para este tipo de simulaciones donde se incluye elementos del circuito.



**Figura 41-2:** Configuración para la simulación EM

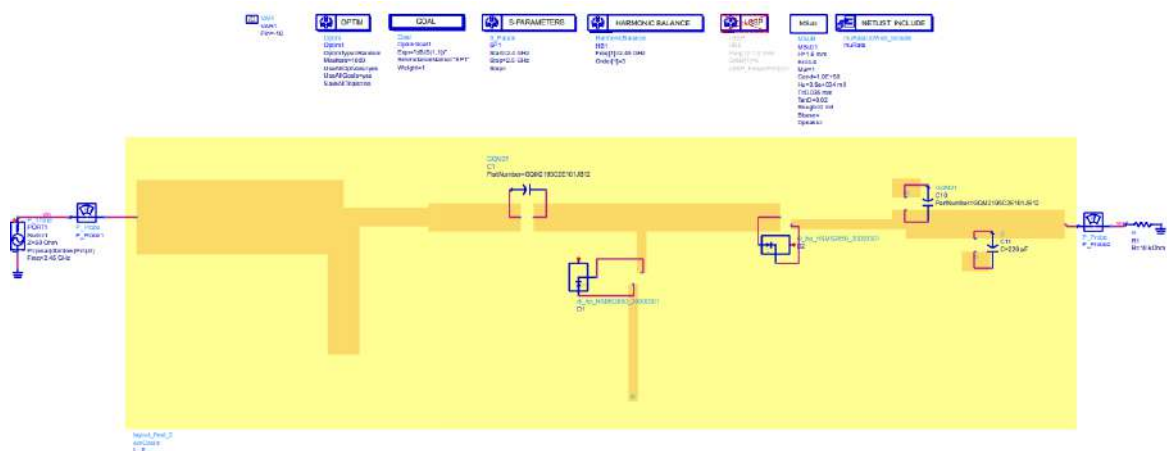
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Finalmente se procedió a generar el símbolo del circuito (ver figura 42-2), el cual es exportado a un nuevo esquemático en donde se colocan todos los componentes de simulación y los elementos del circuito de forma similar como se hizo para el esquemático, como se observa en la figura 43-2.



**Figura 42-2:** Generación del símbolo del layout

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



**Figura 43-2:** Co-simulación del circuito rectificador

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### **2.3. Fabricación del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF**

Una vez culminada la etapa de simulación tanto de la antena parche microstrip como del circuito rectificador, se procedió con la etapa de implementación para ello se describe los materiales y el procedimiento empleado para su fabricación, tomando en consideración que serán fabricadas dos antenas (empleadas como transmisor y receptor) y un circuito rectificador.

#### **2.3.1. *Materiales empleados***

Los materiales empleados para la fabricación de la antena parche microstrip y del circuito rectificador, se muestran a continuación:

Para la antena parche microstrip:

- Lamina de FR4 epoxy glass
- 1 conector SMA hembra
- 1 conector SMA macho
- Cautín
- Estaño

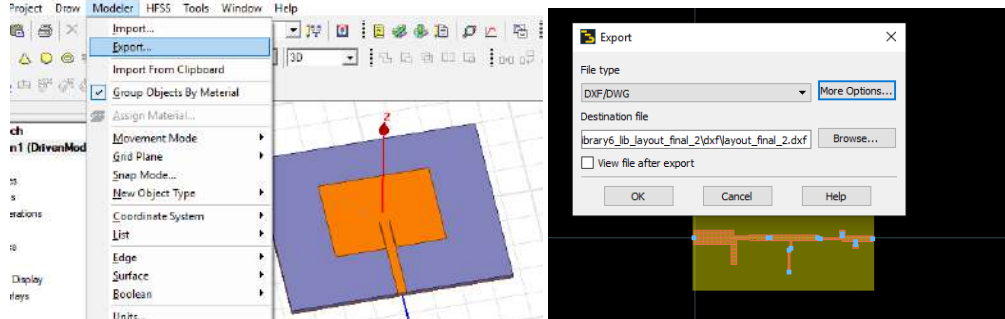
Para el circuito rectificador:

- Lamina de FR4 epoxy glass
- 1 conector SMA hembra
- 2 diodos Schottky HSMS-2850
- 2 capacitores MLCC 100 pF SMD
- 1 capacitor MLCC 220 pF SMD
- Taladro
- Broca 0.5 mm
- Cautín
- Estaño

#### **2.3.2. *Procedimiento de fabricación***

Para la fabricación de la antena parche microstrip y del circuito rectificador se hace uso del método de transferencia térmica para grabar los diseños en la placa de FR4 y una CNC para cortar la placa y realizar los orificios para conexiones a tierra, el procedimiento empleado se describe a continuación:

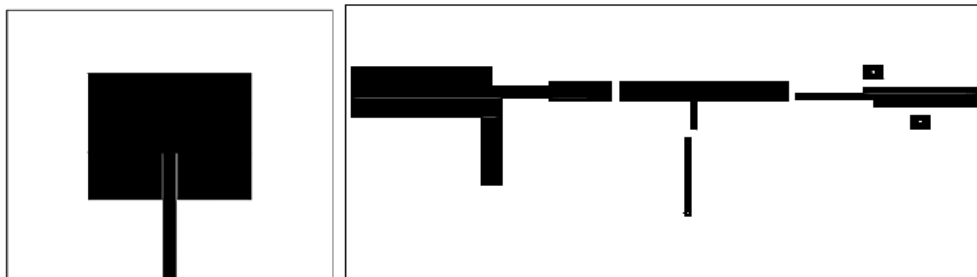
- El primer paso consiste en exportar los diseños, tanto del software empleado para la simulación de la antena como para el empleado para el circuito rectificador, ambos se exportan como archivo .dxf (ver figura 44-2).



**Figura 44-2:** Exportación de los diseños en formato .dxf

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

- Una vez se haya exportado los diseños, ambos archivos son abiertos en AUTOCAD para poder marcar el diseño que será grabado en la placa (ver figura 45-2), también es necesario verificar que se mantengan las dimensiones igual a las del software donde se diseñó, para ello se hace uso de la herramienta de medición en AUTOCAD para verificar que no exista problemas en la escala del diseño.



**Figura 45-2:** Diseño de la antena y rectificador en AUTOCAD

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

- Ambos archivos son guardados en formato .pdf para proceder a ser impreso en el papel de transferencia y posterior aplicar el proceso de transferencia térmica para el grabado en la placa (figura 47-2) también se hace uso del formato .dxf el cual es usado para cortar la placa y hacer los orificios donde están las conexiones a tierra con la ayuda de una CNC (figura 46-2).



**Figura 46-2:** Corte de la placa en CNC

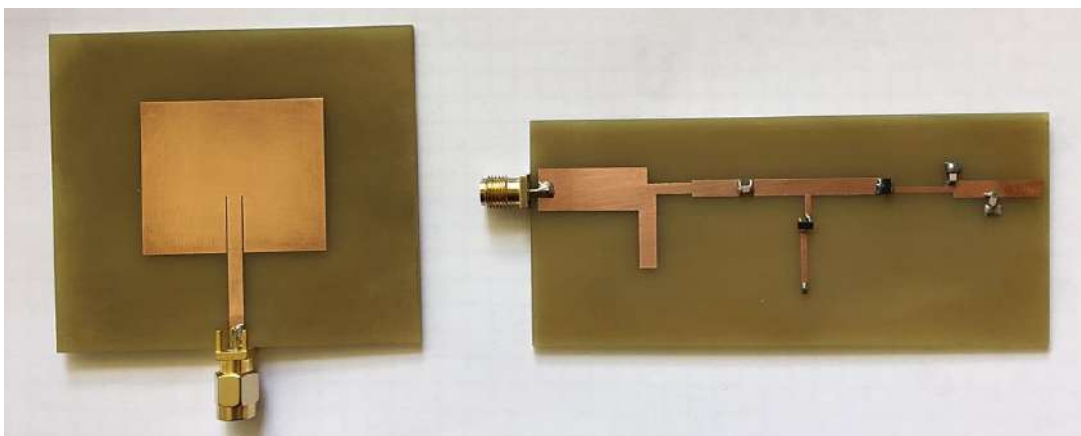
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



**Figura 47-2:** Proceso de grabado en la placa de FR-4 para el Rectificador

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

- Para el caso del rectificador antes de soldar los componentes se procede a realizar los orificios de 0.5 mm que permiten las conexiones a tierra, que también son especificados en la simulación.
- Una vez se tiene grabado los diseños tanto para la antena parche como para el circuito rectificador, se procede a soldar los conectores SMA de 50  $\Omega$  y los componentes del circuito rectificador (figura 48-2).



**Figura 48-2:** Antena parche microstrip y Circuito Rectificador implementados

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

## 2.4. Escenarios empleados para la medición del dispositivo

Para evaluar el funcionamiento del dispositivo es necesario, establecer los escenarios de medición, identificando los equipos necesarios y la forma como se realizará las mediciones.

### 2.4.1. Equipos de medición

#### - **Generador de señales**

Se emplea el generador de señales de RF / microondas marca ANRITSU modelo MG3692C, es un generador de señales de banda ancha, capaz de trabajar en las bandas de HF, VHF, UHF y cubre las frecuencias desde 0.1 Hz a 20 GHz, con una sola salida coaxial.

#### - **Analizador de Espectros**

Se hace uso del analizador de espectro de marca ANRITSU modelo MS2724C, es un analizador de espectros portátiles que tiene la capacidad de realizar mediciones desde los 9 KHz a 20 GHz, cuenta con una resolución de ancho de banda de 1 Hz a 10 MHz y es empleado para mostrar la potencia de la señal con respecto a un rango de frecuencias específico.

#### - **Analizador de redes vectoriales**

Se hace uso del analizador de redes vectoriales de Keysight modelo E5071C, con una cobertura de frecuencia desde los 9 KHz a 20 GHz, cuentas con dos puertos con potencia de salida de 10 dBm, es utilizado para caracterizar dispositivos y componentes empleados en sistemas de radiofrecuencia y microondas, comúnmente son empleados para medir los parámetros S, mediciones de reflexión y adaptación de impedancias por medio del gráfico de la carta de Smith.

### 2.4.2. Escenario para la evaluación de la antena parche microstrip

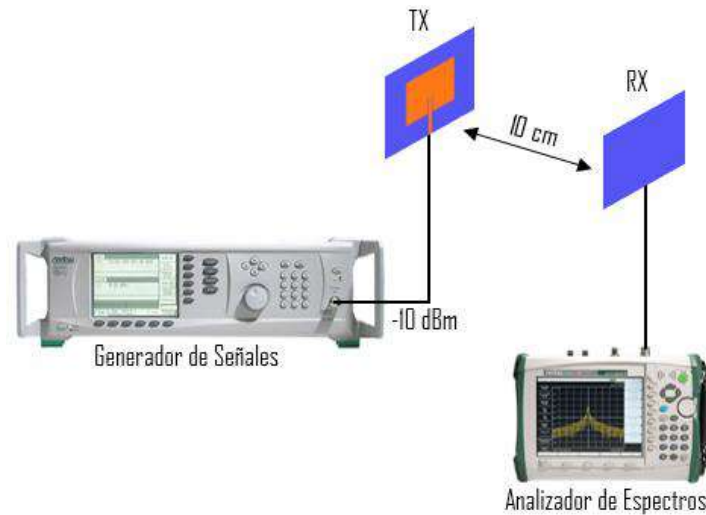
Para verificar el funcionamiento de la antena es necesario encontrar la distancia mínima entre la antena transmisora y receptora, para evaluarla en la región de campo lejano (Far Field), que se calcula con la ecuación 17-2, donde  $D$  es la distancia más larga de la antena.

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (17-2)$$

$$R = \frac{2(37.26 * 10^{-3})^2}{\left(\frac{3 * 10^8}{2.45 * 10^9}\right)} = 2.27 \text{ cm}$$



Se hizo uso del esquema mostrado en la figura 49-2, para medir el nivel de potencia recibo por la antena receptora, para ello se configura una potencia de -10 dBm en el generador de señales y se separa una distancia de 10 cm entre antenas (campo lejano), además se especifica en el analizador de espectros el rango de frecuencias (SPAN) y la frecuencia central.

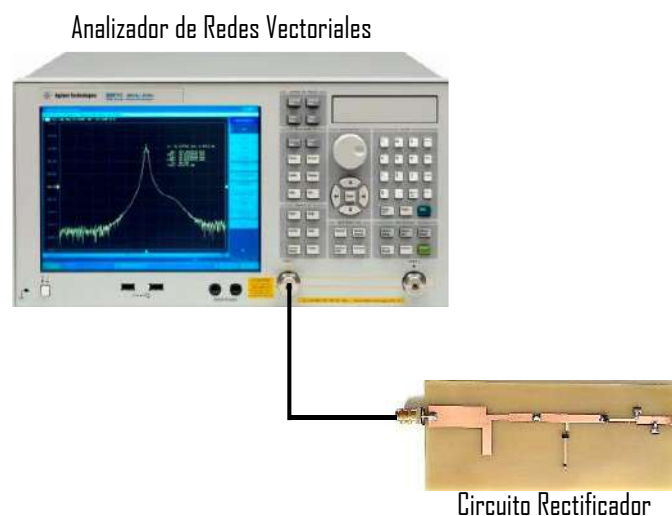


**Figura 49-2:** Escenario para medición de la antena parche microstrip

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 2.4.3. *Escenario para la evaluación del circuito rectificador*

Para las mediciones del circuito rectificador, se hace uso del esquema que se observa en la figura 50-2, donde se conecta el circuito rectificador al analizador de redes vectoriales para comparar las mediciones con los obtenidos en la simulación.



**Figura 50-2:** Escenario para medición del circuito rectificador

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

## CAPÍTULO III

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analiza los resultados obtenidos de las mediciones de intensidad campo, los resultados del proceso de diseño, simulación y fabricación, junto con las mediciones y pruebas de laboratorio para comprobar el funcionamiento del dispositivo.

Las distintas mediciones y pruebas realizadas al dispositivo para el cosechamiento de energía de RF, se realizaron en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH, donde se cuenta con los equipos necesarios, para verificar el funcionamiento de cada una de las partes que conformar el dispositivo para el cosechamiento de energía de RF.

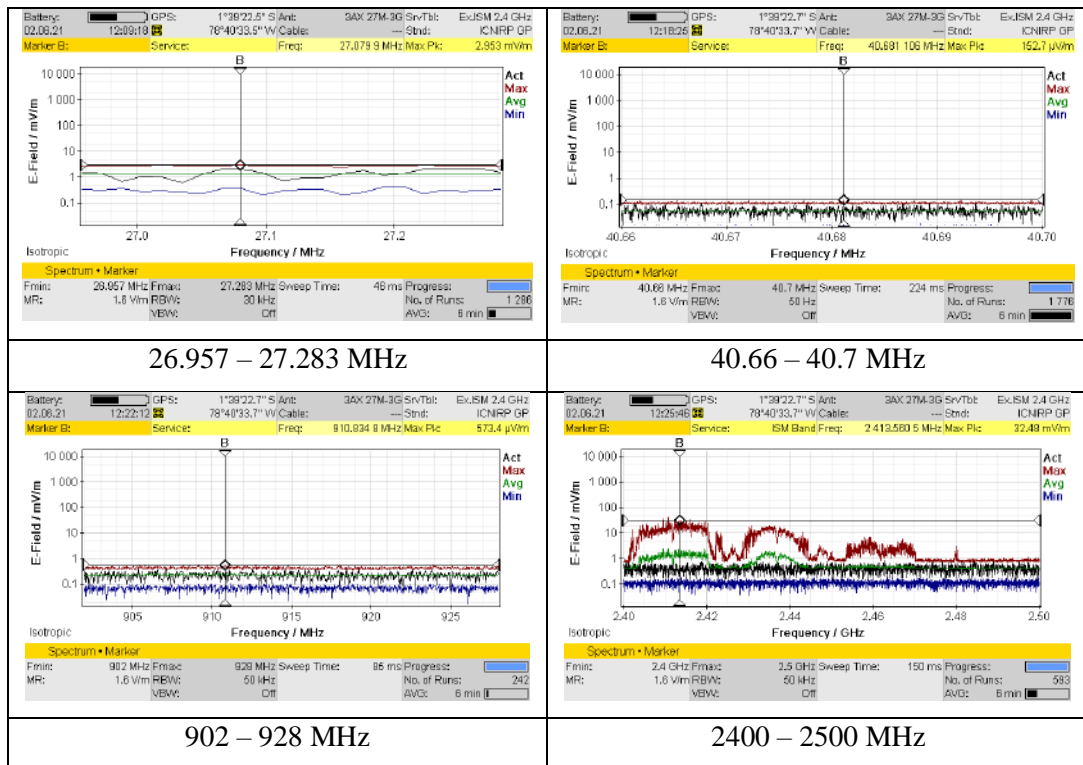
Es necesario comprobar el funcionamiento de la etapa de captación de RF, en este caso la antena parche microstrip y de la etapa de conversión de RF a DC correspondiente al circuito rectificador, también se comprueba el funcionamiento del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF al juntar la etapa de captación de RF y la de conversión RF a DC.

#### 3.1. Resultado de las mediciones de intensidad de campo en las bandas ISM

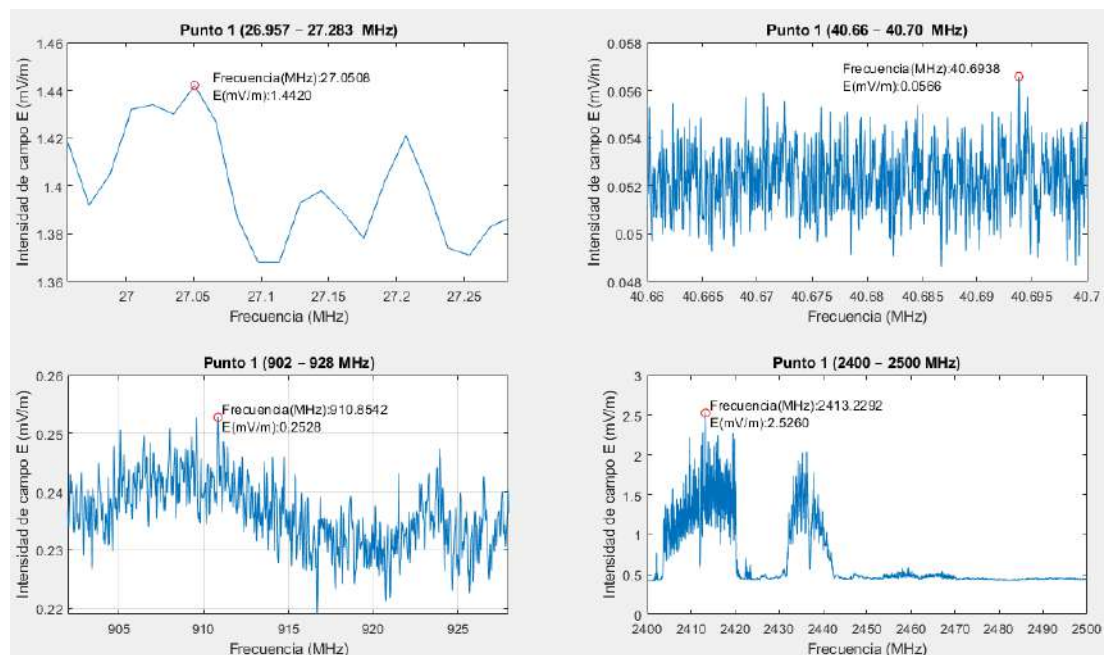
A continuación, se muestran los resultados de las mediciones que han sido obtenidas del equipo NARDA SRM 3006 en los diferentes puntos de medición, considerando las frecuencias en las que el equipo y la antena disponible en el laboratorio pueden operar, entre ellas la banda de 26.957 – 27.283 MHz, 40.66 – 40.70 MHz, la de 902 – 928 MHz y por último la banda de 2400 – 2500 MHz, las mediciones almacenadas en el equipo fueron extraídas por medio del software SRM-3006 Tools y posteriormente se las graficó con la ayuda de un software matemático.

A modo de ejemplo se muestra los resultados de las mediciones realizadas en el primer punto, las mediciones obtenidas directamente del equipo se muestran en la tabla 1-3 y las gráficas obtenidas al extraer los datos por medio del software SRM-3006 Tools se muestra en la figura 1-3.

**Tabla 1-3:** Mediciones de intensidad de campo en el primer punto



Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



**Figura 1-3:** Gráficas de intensidad de campo en primer punto

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Los resultados de las mediciones de intensidad de campo eléctrico ( $E$ ) en las bandas ISM, luego de procesar los datos extraídos del equipo con la ayuda del software matemático, se muestran en la tabla 2-3.

**Tabla 2-3:** Resultado de mediciones de intensidad de campo *E* en bandas ISM

# Punto de medición	Frecuencia (MHz)	Intensidad de campo <i>E</i> (mV/m)
1	27.0508	1.4420
	40.6938	0.0566
	910.8542	0.2528
	2413.2292	2.5260
2	27.0664	1.6480
	40.6856	0.0603
	910.3073	0.2444
	2436.3802	4.9350
3	27.1758	1.4290
	40.6756	0.0581
	909.6823	0.2583
	2438.8281	4.9700
4	27.0820	1.4290
	40.6846	0.0581
	902.2604	0.2540
	2452.5	9.4420
5	27.0351	1.4390
	40.6661	0.0564
	907.4427	0.2711
	2464.1146	2.8500
6	27.0351	1.3780
	40.6990	0.0538
	904.5521	0.2409
	2446.3542	4.1580
7	27.0976	1.4080
	40.6907	0.0558
	907.9375	0.2430
	2461.6667	3.7450
8	26.9726	1.4240
	40.6712	0.0546
	908.1719	0.2465
	2467.6302	2.7430
9	26.9570	1.4050
	40.6646	0.0570
	908.5365	0.2449
	2467.5781	9.2990
10	27.2226	1.4430
	40.6875	0.0563
	907.3385	0.2493
	2446.3542	4.6400
11	27.2539	1.4460
	40.6988	0.0566
	915.2552	0.2479
	2444.6354	3.8830

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 3.1.1. Mediciones en la banda ISM de 2.4 GHz

Del estudio de las mediciones realizadas en la banda ISM se extraen las mediciones correspondientes a la banda ISM de 2.4 GHz (ver tabla 3-3) con el fin de determinar las posibles tecnologías que se encuentren operando, por medio de los valores de frecuencia y su intensidad de campo eléctrico. Dentro de la banda ISM de 2.4 GHz se encuentran operando una gran cantidad de tecnologías, siendo la más común tanto en su uso como en disponibilidad, la tecnología Wi-Fi.

**Tabla 3-3:** Resultado de estudio de mediciones en la banda ISM de 2.4 GHz

# Punto de medición	Frecuencia (MHz)	Intensidad de campo $E$ (mV/m)
1	2413.2292	2.5260
2	2436.3802	4.9350
3	2438.8281	4.9700
4	2452.5000	9.4420
5	2464.1146	2.8500
6	2446.3542	4.1580
7	2461.6657	3.7450
8	2467.6302	2.7430
9	2467.5781	9.2990
10	2446.3542	4.6400
11	2444.6354	3.8830

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

## 3.2. Resultados del diseño, simulación y fabricación del dispositivo

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del diseño, simulación y fabricación, en donde se describe los resultados de cada una de las etapas que conforman el dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia. Se muestran diferentes reportes obtenidos por medio de la simulación con el fin de caracterizar al dispositivo y verificar su correcto funcionamiento.

### 3.2.1. Resultados de la etapa de diseño y simulación de la antena parche microstrip

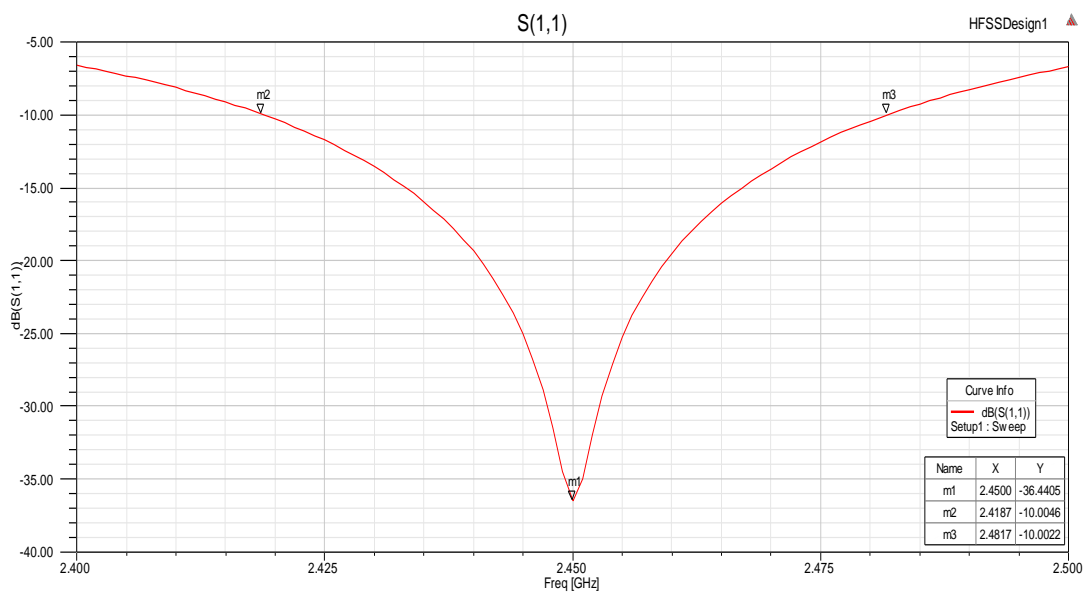
Las dimensiones finales de la antena parche microstrip implementada, que se obtuvieron luego del proceso de optimización se muestran en la tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Dimensiones de la antena optimizadas

Parámetro	Dimensiones optimizadas (mm)
W	37.26
L	28.765
W <sub>0</sub>	2.9836
y <sub>0</sub>	10.6945
n <sub>w</sub>	0.2793

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Uno de los primeros parámetros que se verificó corresponde al parámetro S<sub>11</sub> o también conocido como pérdidas de retorno, que indica la cantidad de potencia que es reflejada desde la antena, como se observa en la figura 2-3, la antena esta resonando en la frecuencia de 2.45 GHz y alcanza una pérdida de retorno de -36.44 dB, además se muestra por medio de los marcadores m2 y m3 el ancho de banda que posee la antena bajo los -10 dB, desde 2.4187 GHz hasta los 2.4817 GHz, obteniendo un ancho de banda de alrededor de 63 MHz.



**Figura 2-3:** Parámetro S<sub>11</sub>

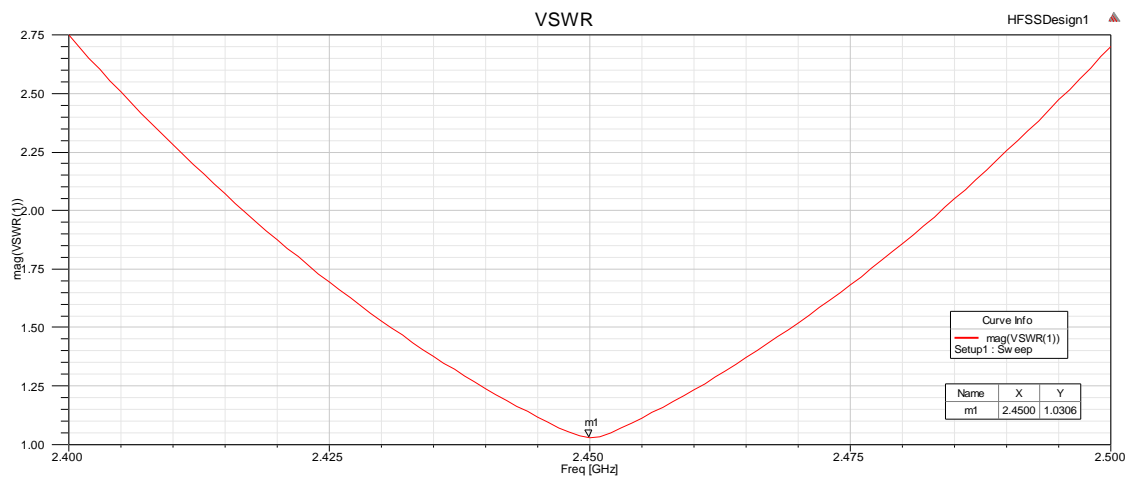
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Definidas las frecuencias, se calculó el ancho de banda por simulación haciendo uso de la ecuación 15-2

$$BW = f2 - f1 \quad (15-2)$$

$$BW = 2.4817 \text{ GHz} - 2.4187 \text{ GHz} = 63 \text{ MHz}$$

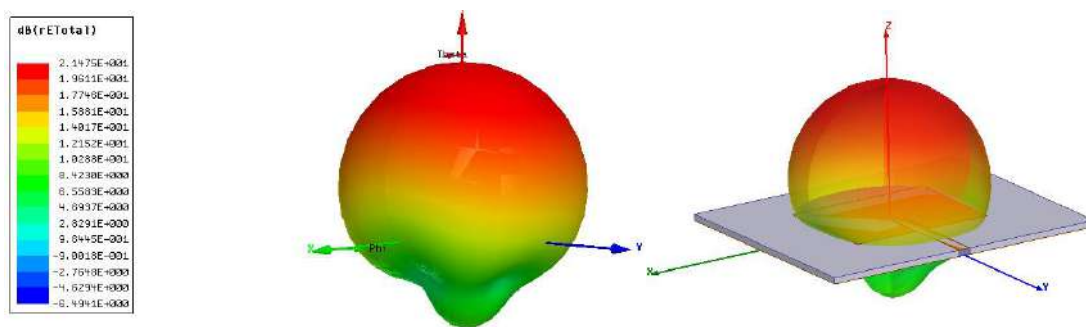
Otro de los parámetros que se analizó es la relación de onda estacionario (ROE o VSWR), que permite determinar numéricamente si existe o no un buen acoplamiento entre la antena y la línea de transmisión, como se observa en la figura 3-3 el VSWR es de 1.0306, lo cual indica que en la frecuencia de resonancia la antena tiene un buen acoplamiento y las pérdidas por desacoplamiento son mínimas, recordando que un valor de VSWR de 1 indica que la antena no refleja nada de energía.



**Figura 3-3:** Relación de onda estacionaria

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

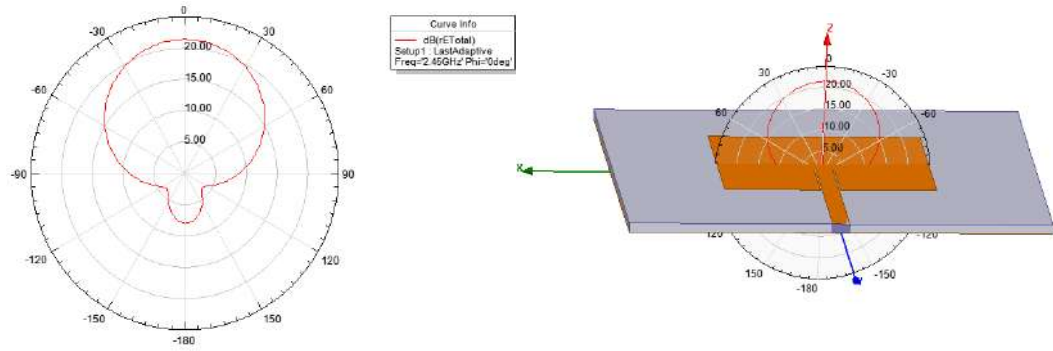
El patrón de radiación en tres dimensiones de la antena en función del campo eléctrico se muestra en la figura 4-3, permite determinar la variación de la potencia en una dirección determinada, es decir la forma en que irradia la antena.



**Figura 4-3:** Patrón de radiación en 3D

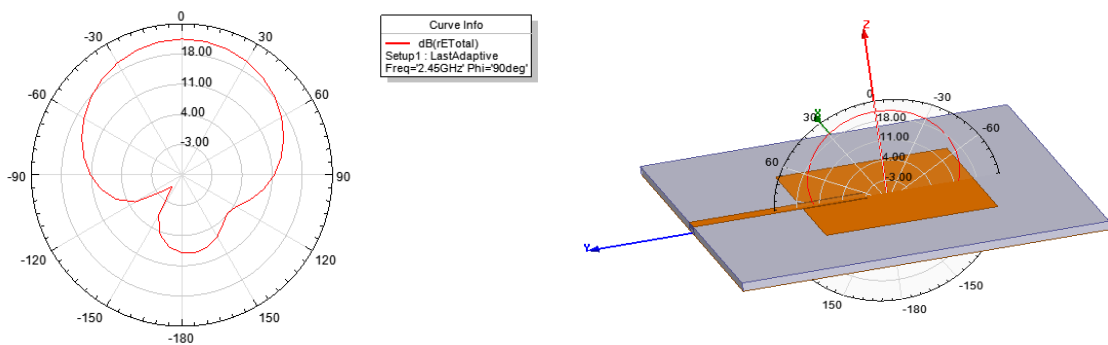
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

También se muestran los cortes del plano 3D, para  $\phi = 0$  (figura 5-3) y  $\phi = 90$  (figura 6-3) correspondientes al plano E y plano H que son perpendiculares entre sí y definen la dirección de máxima radiación, como se observa la dirección de máxima radiación se encuentra a lo largo del eje z.



**Figura 5-3:** Patrón de radiación  $\phi = 0$  (plano xz)

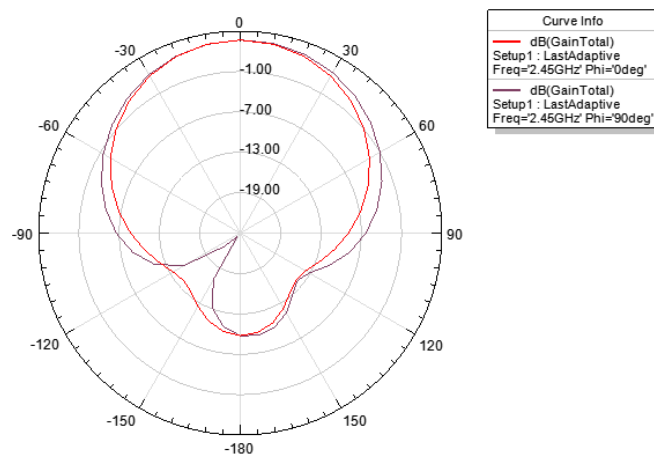
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



**Figura 6-3:** Patrón de radiación  $\phi = 90$  (plano yz)

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

La ganancia de la antena en la dirección de máxima radiación ( $\theta = 0$ ) como se observa en la figura 7-3 es de 3.6947 dB en los planos E y H.



**Figura 7-3:** Ganancia de la antena

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



En forma de resumen se muestra la tabla 5-3 con los resultados de los diferentes parámetros simulados.

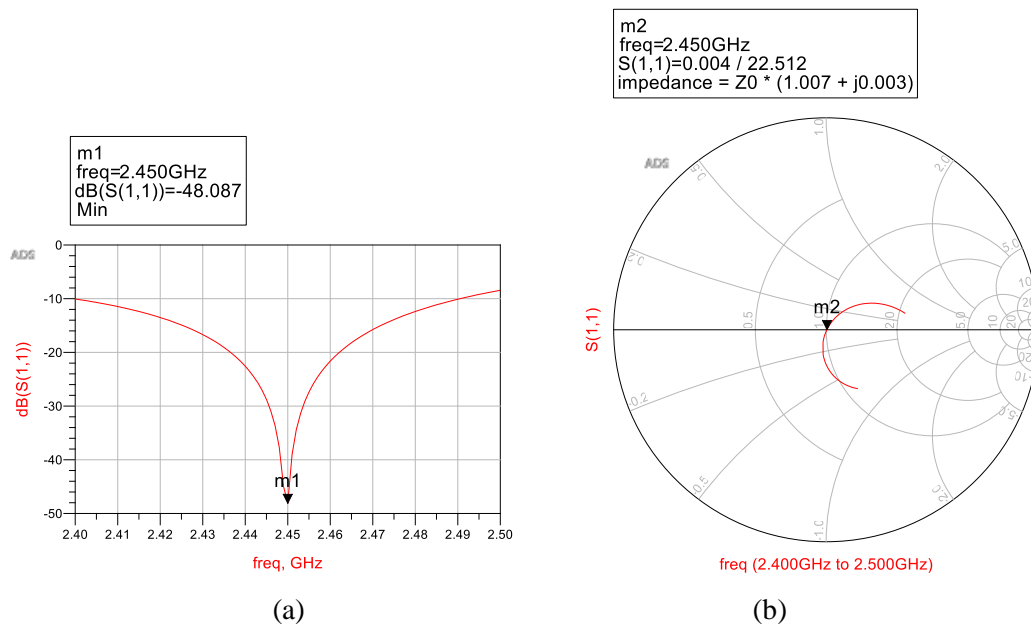
**Tabla 5-3:** Resultados de la simulación

Frecuencia: 2.45 GHz	
Parámetro	Valor
S11	-36.44 dB
VSWR	1.0306
Ganancia	3.6947 dB
Ancho de Banda	63 MHz

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 3.2.2. Resultados de la etapa de diseño y simulación del circuito rectificador

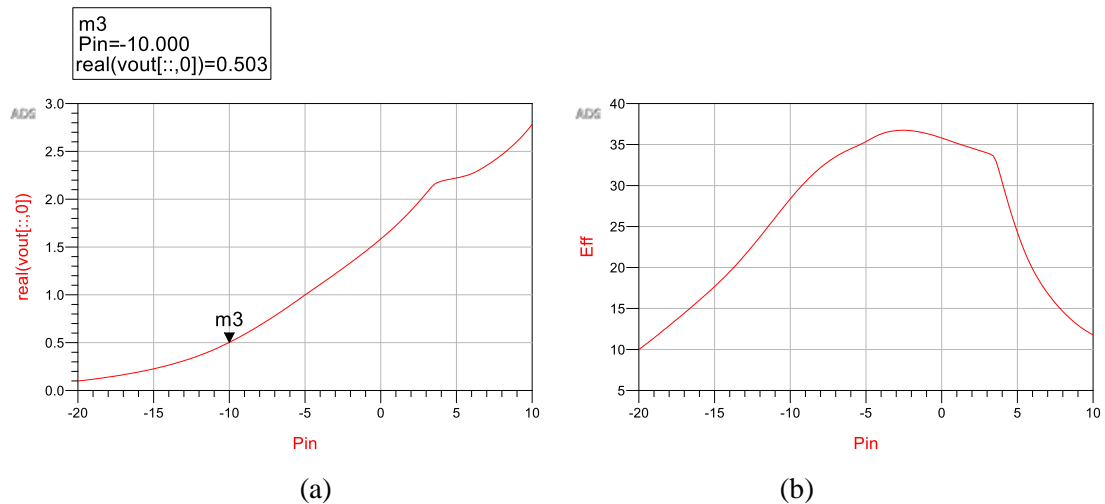
Los resultados obtenidos a partir de la co-simulación del circuito multiplicador rectificador se muestra en la figura 8-3, en donde se observa el parámetro  $S_{11}$  en (a) y la impedancia del circuito vista en la carta Smith en (b), como se observa el circuito se encuentra operando en la frecuencia de 2.45GHz, además de cubrir la mayor parte de la banda de 2.4 GHz.



**Figura 8-3:** (a) Parámetro  $S_{11}$ , (b) Impedancia de entrada del dispositivo diseñado

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

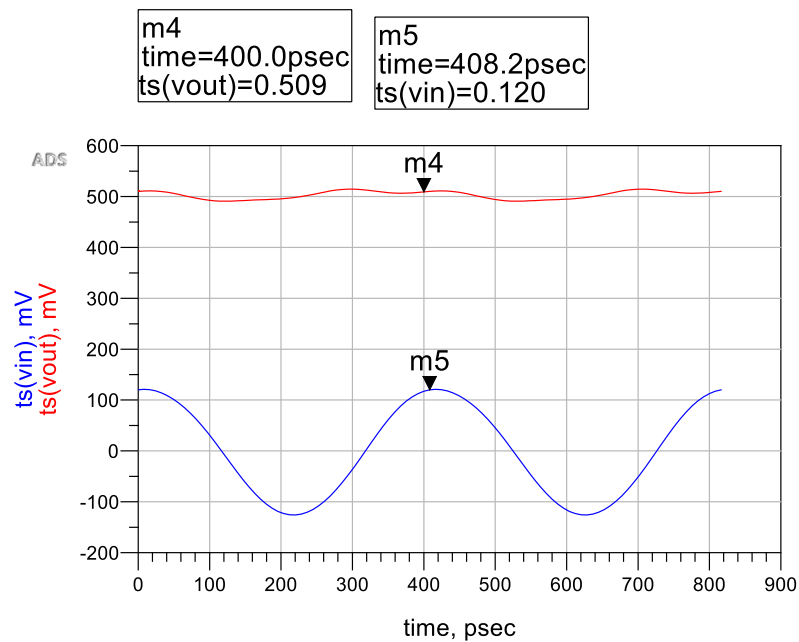
También se muestra en el gráfico 1-3 el voltaje de salida  $V_{out}$  en DC vs la potencia de entrada  $P_{in}$  en RF, en donde a una potencia de entrada de -10 dBm se obtiene un voltaje a la salida de 0.5 V y una eficiencia de alrededor del 27%.



**Gráfico 1-3:** (a)  $V_{out}$  (V) vs  $P_{in}$  (dBm) y (b) eficiencia de conversión de RF a DC

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

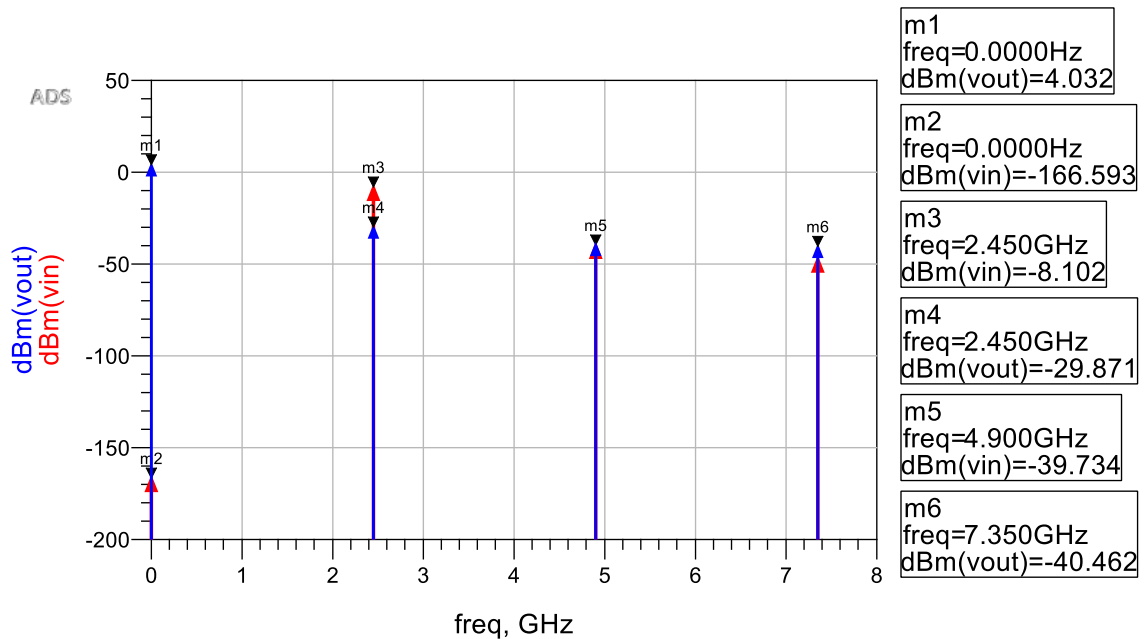
La rectificación de la señal vista en el dominio del tiempo se observa en la figura 9-3, donde al ingresar una señal de RF con un  $V_p = 0.120$  V la señal rectificada muestra un voltaje de salida en DC de 0.509 V.



**Figura 9-3:** Conversión de RF a DC con  $P_{in} = -10$  dBm y  $R_L = 10$  K $\Omega$

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Se realizó un análisis espectral con el fin de analizar las componentes espectrales en la salida del circuito rectificador, para comprobar que los niveles de las componentes de radiofrecuencia se encuentren atenuadas, especialmente la frecuencia fundamental 2.45 GHz y predomine únicamente la componente de DC, en la figura 10-3 se muestra el resultado del análisis espectral realizado con la ayuda del software de simulación profesional empleado.



**Figura 10-3:** Análisis espectral en la entrada y salida del circuito rectificador

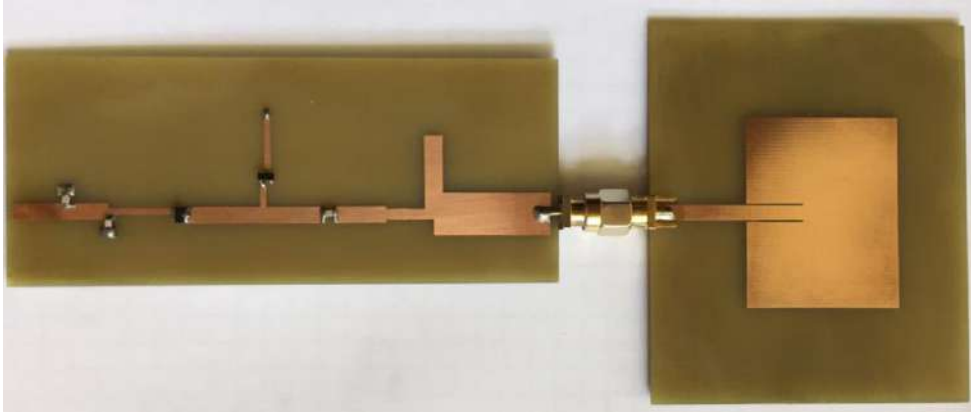
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

La línea azul indica el espectro a la salida del circuito rectificador y la línea roja indica el espectro a la entrada del circuito, el nivel de la señal en DC (0 Hz) mostrada con el marcador m1 muestra un valor de 4.032 dBm para una señal de entrada RF de 2.45 GHz con una potencia de -10 dBm, también se muestran las componentes espectrales producidas en las frecuencias armónicas de segundo y de tercer orden, debido a la no linealidad del diodo Schottky.

Se observa que la componente de RF a la salida en la frecuencia fundamental (2.45 GHz) es atenuada en 29.87 dBm, comprobando el aislamiento de RF que se consigue a la salida del circuito, mientras que las componentes generadas en los armónicos tanto a la entrada como a la salida del circuito se mantienen atenuadas.

### 3.2.3. Resultados de la etapa de fabricación del dispositivo

Posterior a la implementación de las dos etapas que conforman el dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia, el dispositivo final se muestra en la figura 11-3.



**Figura 11-3:** Dispositivo para el cosechamiento de energía RF

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

### 3.3. Mediciones y Pruebas del dispositivo para el cosechamiento de energía RF

A lo largo de esta sección se muestra las diferentes mediciones y pruebas realizadas al dispositivo, se realizaron las mediciones tanto a la antena parche microstrip como al circuito rectificador por separado para luego poner a prueba el dispositivo para el cosechamiento de energía de RF.

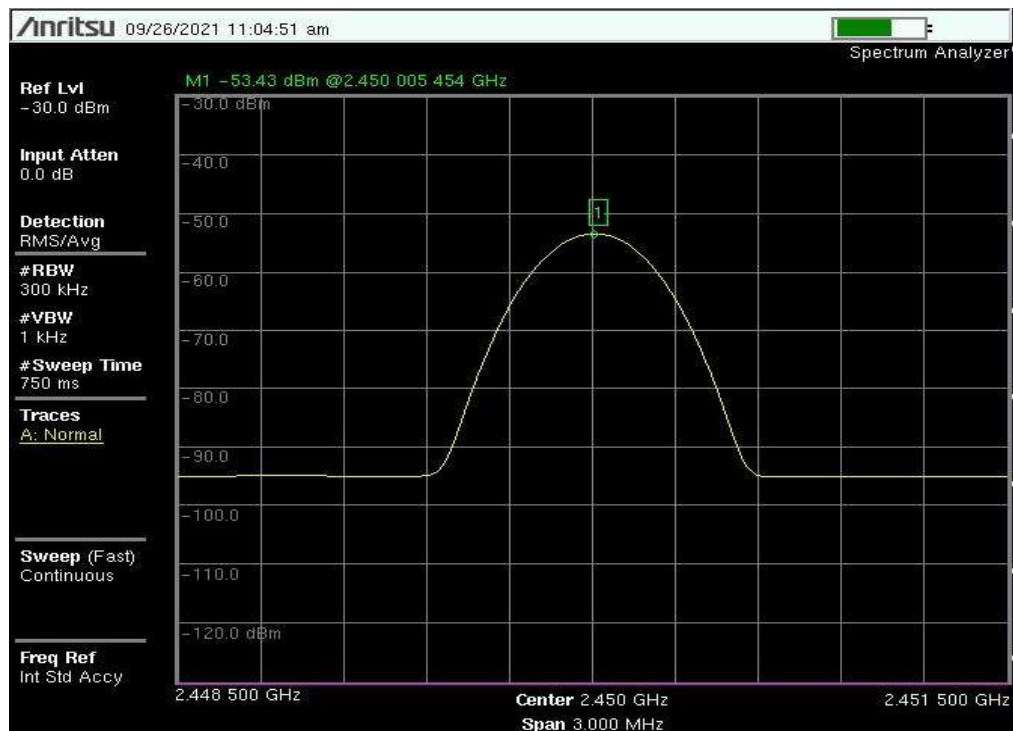
Una vez verificado el funcionamiento de cada una de las etapas del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF, se verificó el funcionamiento del dispositivo de forma completa. Se procedió a verificar el funcionamiento del dispositivo haciendo uso de dos escenarios:

- La antena propuesta junto con un generador de señales como transmisor.
- Router WiFi como fuente para cosechar la energía de RF.

#### 3.3.1. Mediciones de la antena parche microstrip

Los parámetros que se evaluaron una vez fabricada la antena parche microstrip son la potencia recibida en la dirección de máxima radiación, el parámetro  $S_{11}$ , la relación de onda estacionaria (ROE) y la impedancia por medio de la carta Smith con el fin de comparar las mediciones realizadas en el laboratorio con las obtenidos mediante la simulación.

Para medir el nivel de potencia recibida, se posicionó la antena transmisora (Tx) y receptora (Rx) a una distancia de 10 cm y se configuró una potencia de -10 dBm en el generador de señales. En la figura 12-3 se observa la potencia recibida, medida con el analizador de espectros en la frecuencia de 2.45 GHz (dirección de máxima radiación), dando un valor -53.43 dBm.



**Figura 12-3:** Nivel de potencia recibido por la antena en 2.45 GHz

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Debido a que es de interés conocer la potencia recibida por la antena dentro de la banda ISM 2.4 GHz (2.4 GHz a 2.4835 GHz), se realizó una medición de potencia para distintas frecuencias comprendidas dentro de este rango de frecuencias, considerando las frecuencias centrales de los distintos canales de WiFi, estas mediciones se pueden observar en la tabla 6-3.

**Tabla 6-3:** Niveles de potencia recibido en canales de WiFi

Frecuencia (GHz)	Potencia (dBm)
2.412	-58.05
2.417	-58.46
2.422	-59.11
2.427	-58.95
2.432	-59.17
2.437	-59.66
2.442	-60.08
2.447	-60.04
2.452	-58.73
2.457	-59.40
2.462	-58.96
2.467	-57.91
2.472	-58.53
2.484	-60.22

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Para tener una referencia con respecto a los niveles de potencia recibidos y categorizarla de acuerdo con la intensidad de señal recibida, se muestra la tabla 7-3.

**Tabla 7-3:** Referencia de niveles de potencia recibido

Potencia	Indicador de Referencia
-30 a -60 dBm	Excelente a Bueno para conectividad de datos
-60 a -75 dBm	Medio
-75 a -85 dBm	Bajo a muy bajo
Bajo los -85 dBm	Sin conexión

Fuente: Angulo et al, 2021, p. 4

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

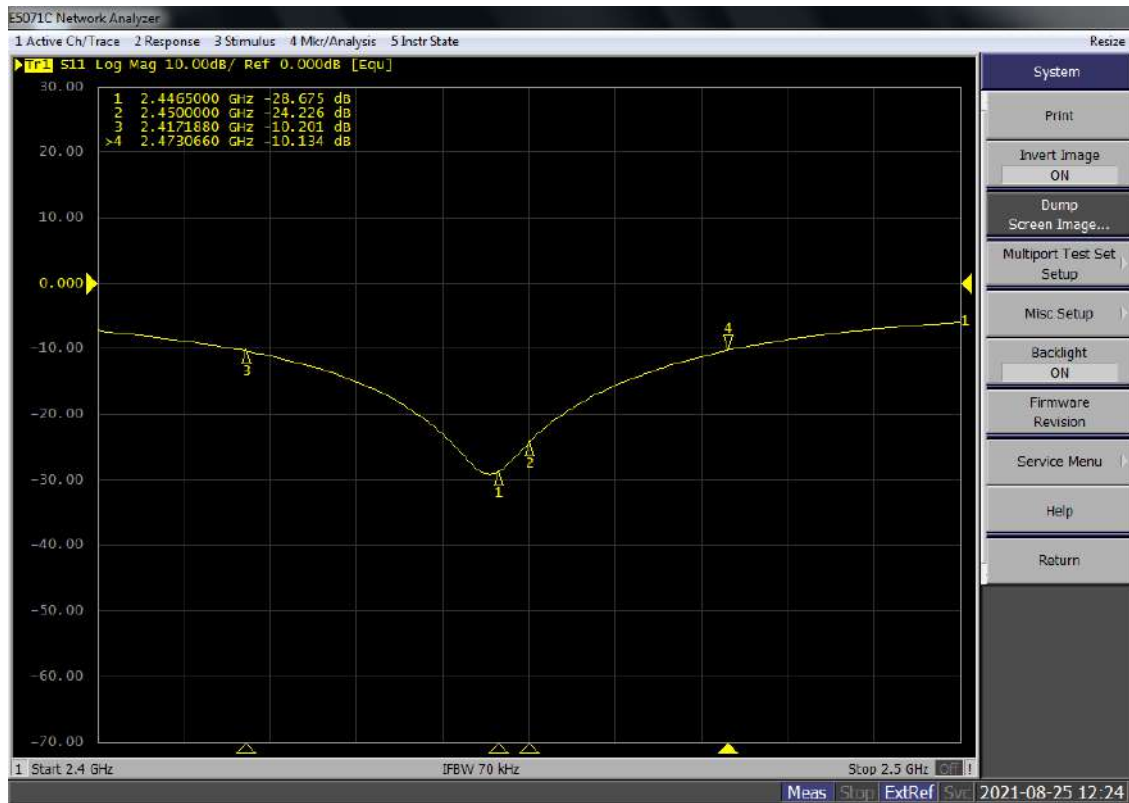
Además, se hizo uso del analizador de redes vectoriales (VNA) Keysight E5071C (ver figura 13-3) para verificar otros parámetros como las pérdidas de retorno, la relación de onda estacionaria y la impedancia.



**Figura 13-3:** Mediciones de la antena con el VNA

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

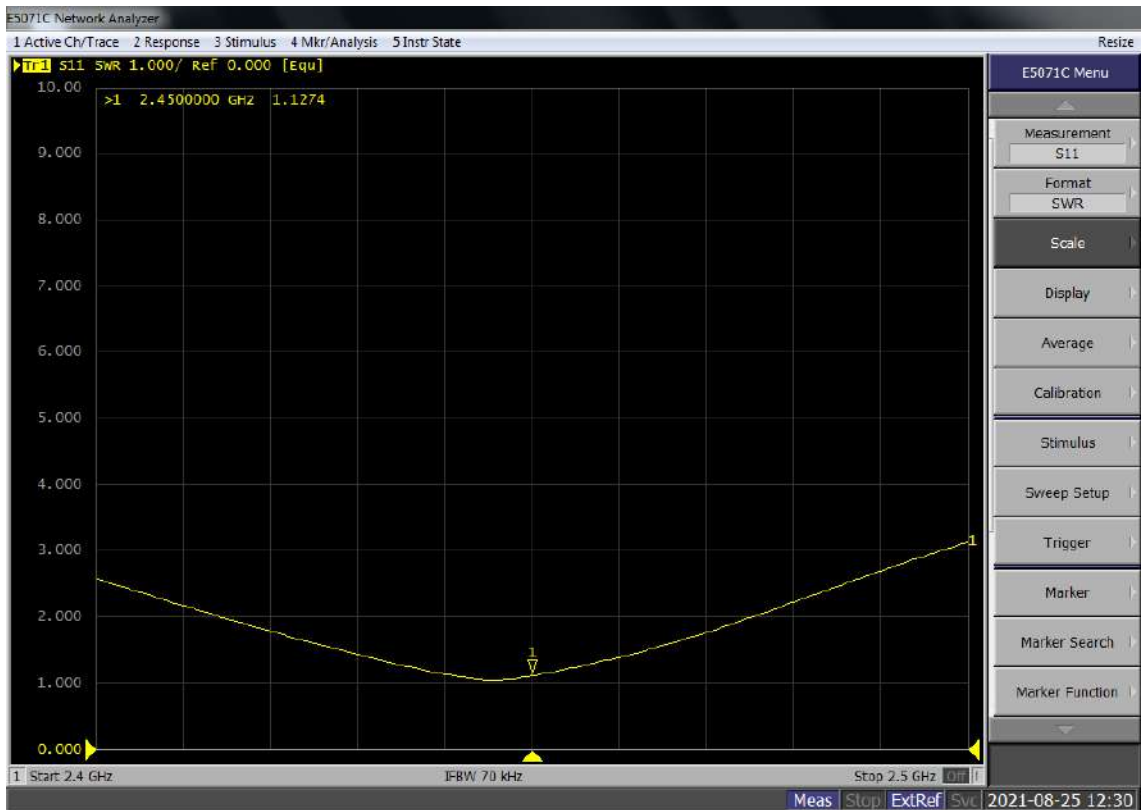
Mediante el analizador de redes vectoriales se comprobó las pérdidas de retorno o parámetro  $S_{11}$  de la antena, además por medio de esta gráfica también se verificó su ancho de banda, como se observa en la figura 14-3, la frecuencia de resonancia de la antena se ve desplazada a 2.446 GHz donde se tiene una pérdida de retorno de -28.675 dB y en la frecuencia de diseño de 2.45 GHz se tiene una pérdida de retorno de -24.226 dB. Por medio de los marcadores 3 y 4 se muestra el ancho de banda que posee la antena bajo los -10 dB, desde 2.4172 GHz hasta los 2.4731 GHz, obteniendo un ancho de banda de alrededor de 55.9 MHz.



**Figura 14-3:** Pérdidas de retorno de la antena medido con VNA

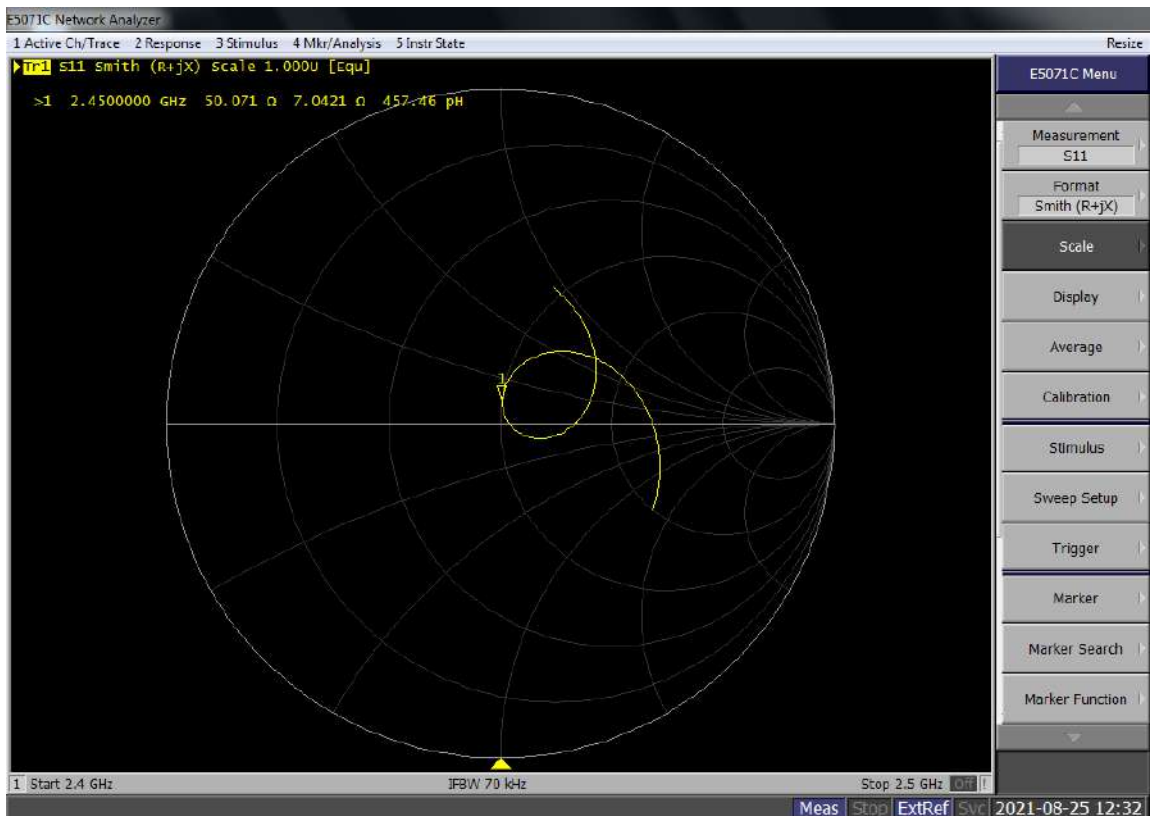
**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

Además del parámetro  $S_{11}$  también se verificó el VSWR (figura 15-3) y la impedancia de la antena (figura 16-3), como se observa el VSWR de la antena en 2.45 GHz es de 1.1274, lo cual indica que sus pérdidas por desacoplamiento son mínimas y en la frecuencia de resonancia la antena tiene un buen acoplamiento, de hecho, si se observa la figura 16-3 la antena tiene una impedancia de  $50 + 7.04 j$  que es próximo al valor ideal de  $50 + 0 j$ .



**Figura 15-3:** VSWR antena medido con VNA

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



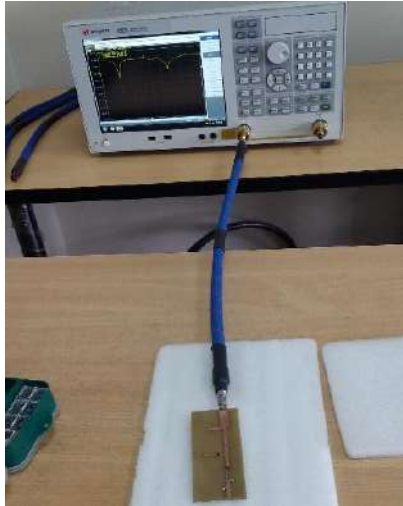
**Figura 16-3:** Impedancia de la antena vista en carta Smith medido con VNA

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



### 3.3.2. Mediciones del circuito rectificador

Se procedió a realizar las mediciones del circuito rectificador, haciendo uso del analizador de redes vectoriales, como se observa en la figura 17-3.

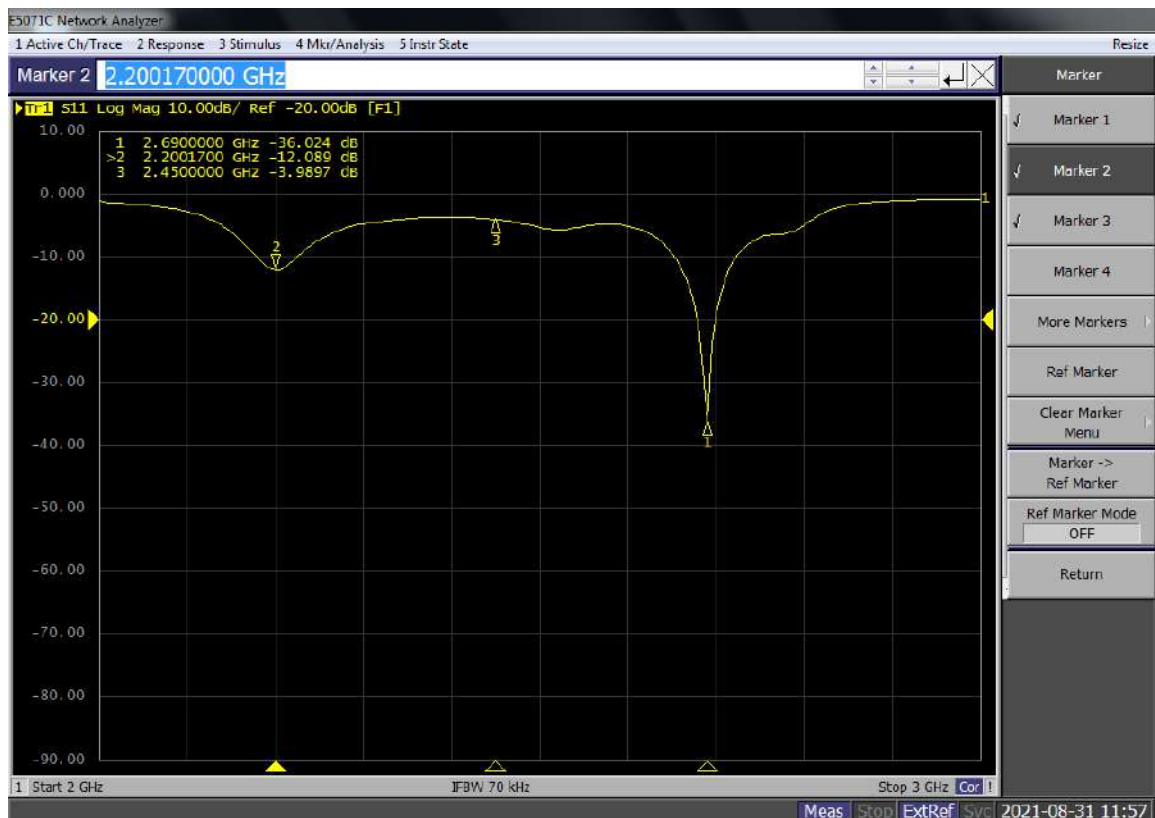


**Figura 17-3:** Medición del circuito rectificador en el VNA

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

Al tratarse de un dispositivo no lineal, la red de acoplamiento puede actuar de forma dinámica, porque la impedancia del circuito puede cambiar según el nivel de potencia y la frecuencia que se use, además de considerar el error que puede ser introducido en el proceso de fabricación y los valores de tolerancia de los componentes empleados como los capacitores.

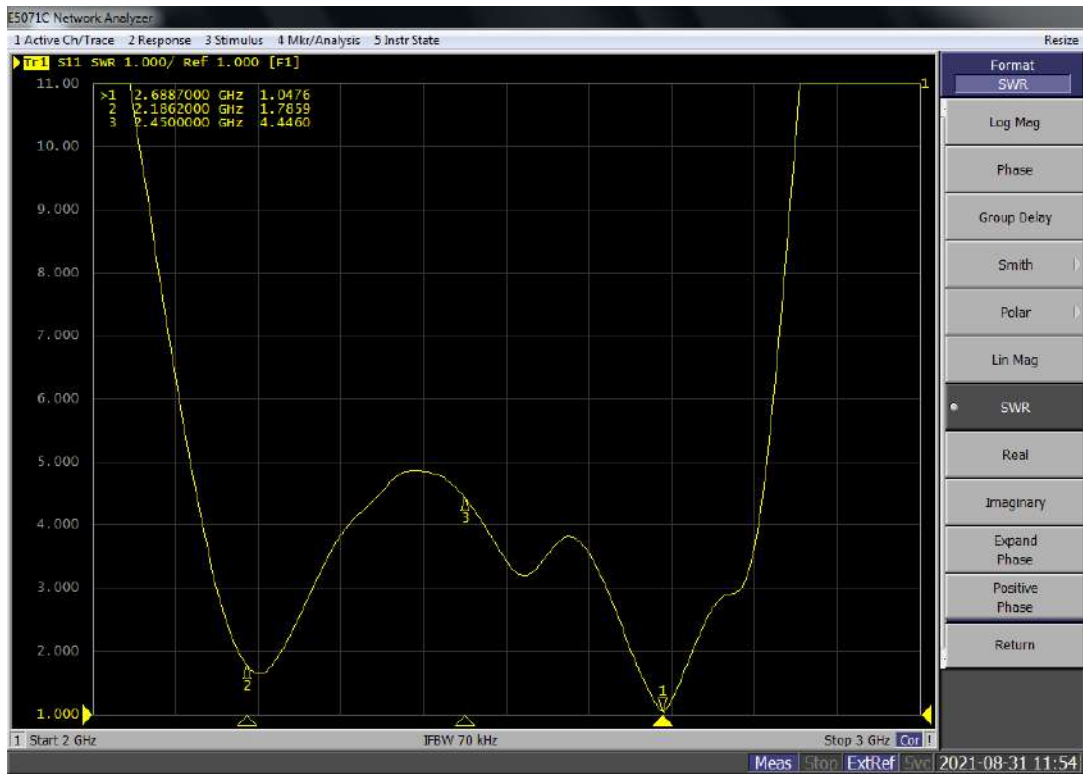
Los resultados obtenidos al medir el parámetro  $S_{11}$  del circuito rectificador con el analizador de redes vectoriales se muestra en la figura 18-3, donde se colocaron tres marcadores, el marcador uno muestra la frecuencia de 2.69 GHz con una pérdida de retorno de -36 dB, el segundo marcador muestra la frecuencia 2.2 GHz con una pérdida de retorno de -12.08 dB y a la frecuencia de 2.45 GHz una pérdida de retorno de -3.98 dB.



**Figura 18-3:** Pérdidas de retorno ( $S_{11}$ ) circuito rectificador medido con VNA

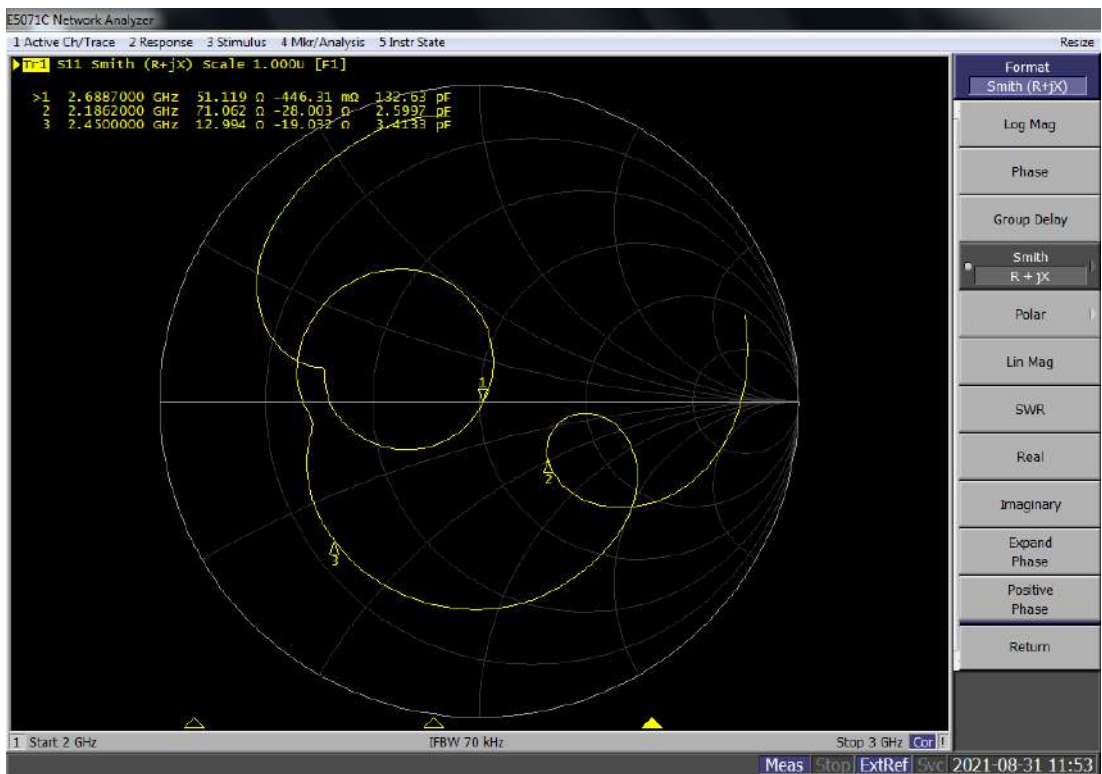
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

También se obtuvo las mediciones del VSWR (ver figura 19-3) y de la impedancia del circuito rectificador (ver figura 20-3), en la frecuencia de 2.68 el VSWR es de 1.04 y la impedancia es de  $51.1 - 0.446j$ , en la frecuencia de 2.18 el VSWR es de 1.78 y la impedancia es de  $71.06 - 28j$  y en la frecuencia de 2.45 GHz el VSWR es de 4.44 y la impedancia es de  $12.9 - 19.03j$ .



**Figura 19-3:** VSWR circuito rectificador medido con VNA

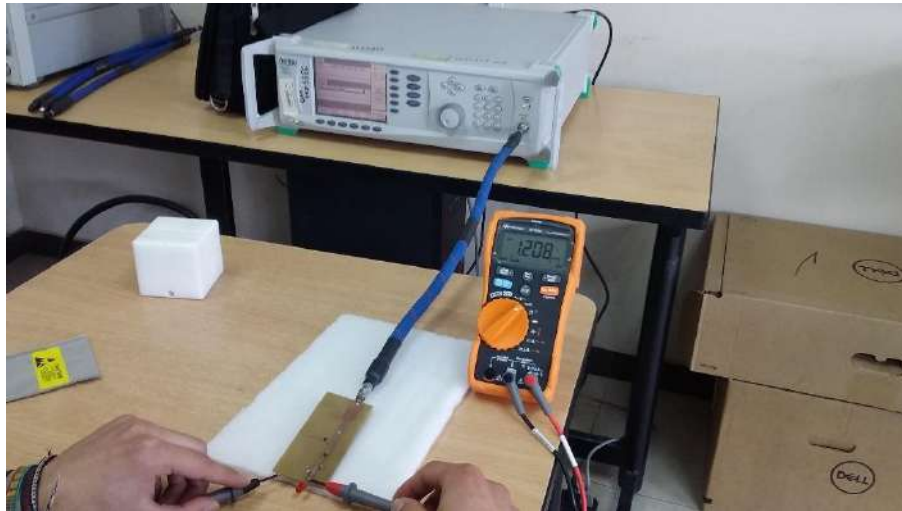
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



**Figura 20-3:** Impedancia circuito rectificador vista en carta Smith medido con VNA

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Para determinar el funcionamiento del circuito rectificador se midió los niveles de voltaje a la salida del circuito rectificador, haciendo uso del generador de señales, variando los niveles de potencia a la entrada (ver figura 21-3), para ello se toman mediciones en tres frecuencias de interés de acuerdo con las mediciones obtenidas con en el VNA, los resultados de estas mediciones se muestran en la tabla 8-3 para la frecuencia de 2.45 GHz, la tabla 9-3 para 2.69 GHz y la tabla 10-3 para 2.2 GHz



**Figura 21-3:** Circuito Rectificador conectado al generador de señales

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

**Tabla 8-3:** Voltaje a la salida del rectificador  $f_o = 2.45$  GHz

Potencia (dBm)	Voltaje (mv)
-20	1.6
-18	2.7
-16	4.5
-14	7.2
-12	10.8
-10	16.7
-8	26.3
-6	41.4
-4	58.0
-2	81.6
0	113.7
2	156.4
4	211.8
6	271.3
8	352.9
10	443.8
12	556.4
14	697
16	847
18	1055
20	1282

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

**Tabla 9-3:** Voltaje a la salida del rectificador  $f_0 = 2.69$  GHz

Potencia (dBm)	Voltaje (mv)
-20	0
-18	0
-16	0
-14	0.1
-12	0.4
-10	0.4
-8	0.5
-6	0.8
-4	1.3
-2	1.9
0	2.9
2	4.8
4	7.0
6	12.5
8	18.2
10	26.7
12	38.9
14	62.0
16	83.2
18	125.5
20	173.9

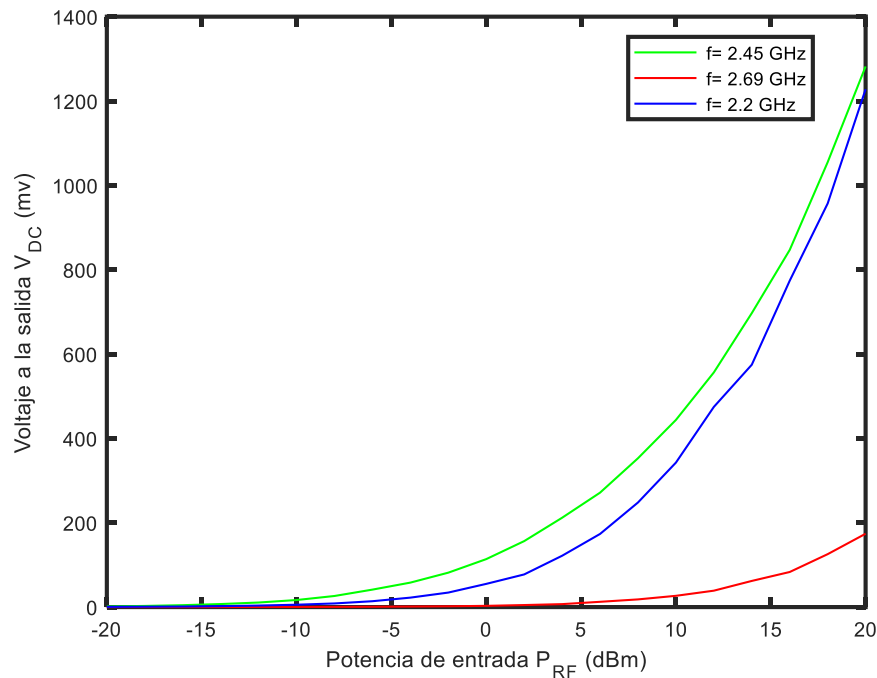
Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

**Tabla 10-3:** Voltaje a la salida del rectificador  $f_0 = 2.2$  GHz

Potencia (dBm)	Voltaje (mv)
-20	0.5
-18	0.9
-16	1.3
-14	2.2
-12	3.6
-10	5.6
-8	8.6
-6	13.9
-4	22.4
-2	34.4
0	55
2	77.4
4	121.7
6	173.4
8	248
10	342.6
12	474.7
14	574.7
16	774
18	957
20	1228

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

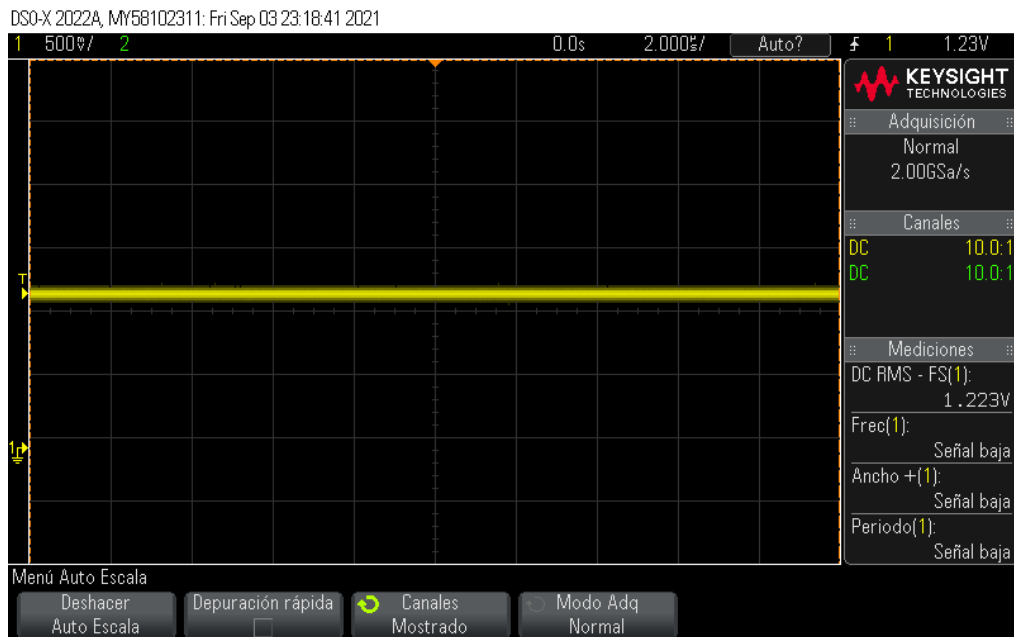
La figura 22-3, muestra de forma gráfica las mediciones mostradas en las tablas 4-3, 5-3 y 6-3, que corresponden a las mediciones del voltaje a la salida  $V_{DC}$  del circuito rectificador ante una variación de potencia de entrada  $P_{RF}$ , aplicada por el generador de señales.



**Figura 22-3:** Potencia de entrada  $P_{RF}$  vs Voltaje a la salida  $V_{DC}$  circuito rectificador  
**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

Como se observa a medida que se incrementa la potencia de RF a la entrada, los niveles de voltaje en DC a la salida incrementan, observando que a la frecuencia de 2.45 se logra alcanzar mayores niveles de voltaje comparado con las frecuencias de 2.2 GHz y 2.69 GHz en las que el circuito rectificador presenta un  $S_{11}$  por debajo de los -10 dB.

También se observó por medio del osciloscopio la salida del rectificador, para ver la rectificación de la señal, en este caso se aplicó una señal de RF (AC) con el generador de señales a la entrada del circuito rectificador con una potencia de alrededor de 20 dBm a la frecuencia de 2.45 GHz, la señal a la salida del circuito rectificador se observa en la figura 23-3.



**Figura 23-3:** Señal a la salida del circuito rectificador vista en osciloscopio

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

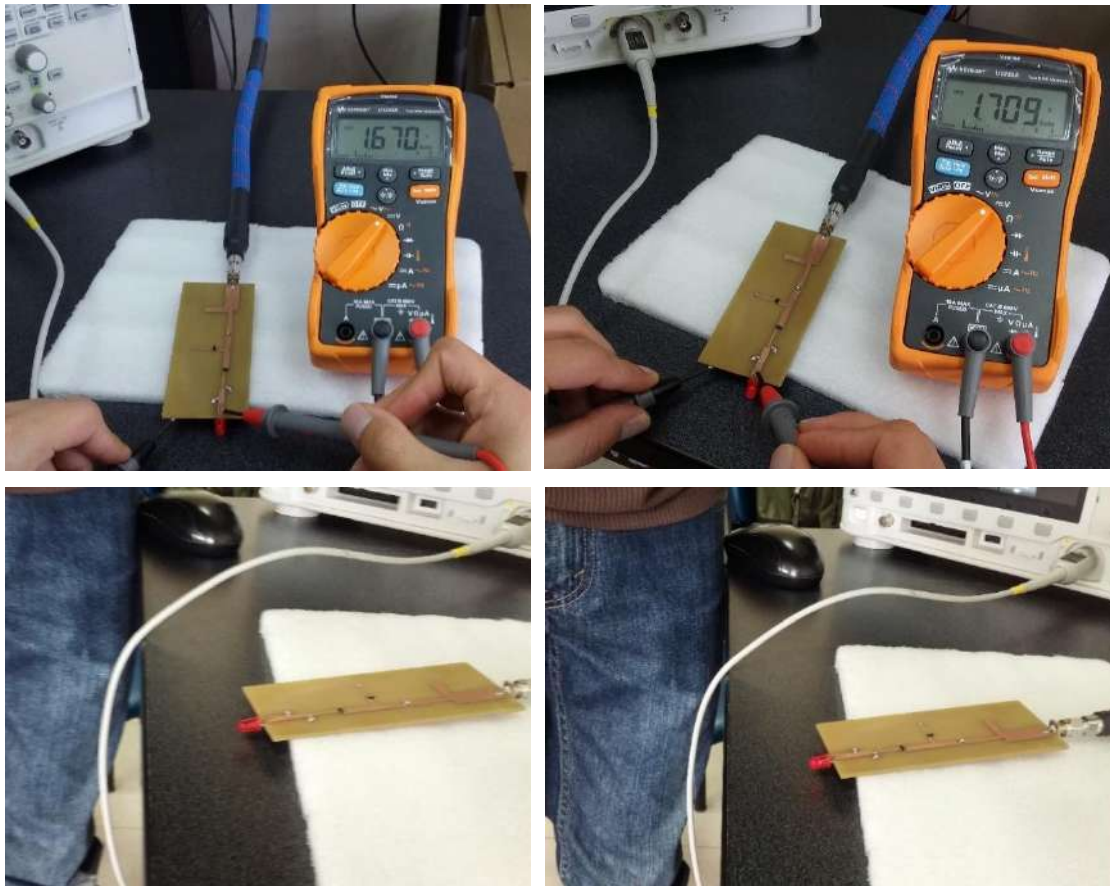
Para verificar el funcionamiento del rectificador se colocó un diodo led a su salida y se determinó los valores de potencia de entrada en los cuales el diodo led comienza a funcionar, en este caso se hizo uso de un diodo led de color rojo, el cual posee una tensión de umbral de 1.6 V, para ello se fue variando los valores de potencia a la entrada hasta conseguir un valor de tensión mayor o igual al 1.6 V como muestra la tabla 11-3.

**Tabla 11-3:** Potencia vs Voltaje para diodo led

$f_0 = 2.45 \text{ GHz}$	
Potencia (dBm)	Voltaje (V)
20	1.089
21	1.208
22	1.289
23	1.43
24	1.577
25	1.594
26	1.607
27	1.71

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Como se observa en la figura 24-3 para valores de tensión mayores a los 1.6 V el diodo led se enciende, esto se logró alimentando al circuito rectificador con alrededor de 25 dBm, donde el diodo LED comienza a funcionar y para valores de potencia mayores donde se observó que el voltaje incrementa y por ende el diodo brilla con más fuerza.



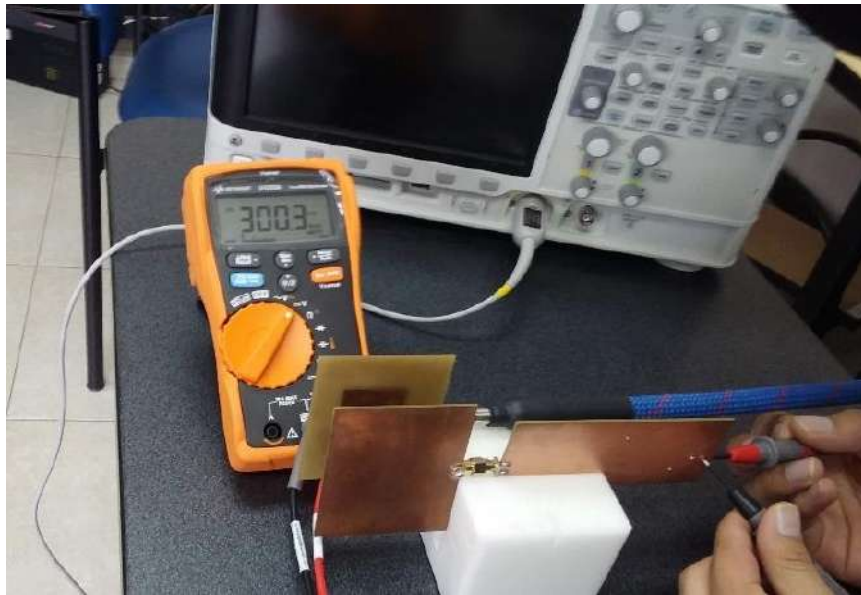
**Figura 24-3:** Circuito Rectificador con diodo LED

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 3.3.3. Prueba con antena y generador de señales como transmisor

Para comprobar el funcionamiento del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF, se hizo uso de la antena parche microstrip y del generador de señales como transmisor, el cual se configuró en la frecuencia de 2.45 GHz para diferentes valores de potencia, como se muestra en la tabla 12-3 donde se observa los valores de voltaje a la salida del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF para el caso mostrado en la figura 25-3.





**Figura 25-3:** Antena y generador de señales como transmisor

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

**Tabla 12-3:** Cosechamiento de energía (Antena y Generador de señales como Tx)

$f_0 = 2.45 \text{ GHz}$	
Potencia (dBm) Antena Tx	Voltaje (mv)
-20	0
-18	0
-16	0
-14	0.3
-12	0.5
-10	0.8
-8	1.3
-6	2.2
-4	3.0
-2	4.0
0	6.2
2	10.0
4	14.9
6	21.0
8	32.9
10	46.5
12	65.0
14	94.9
16	125.9
18	165.9
20	230.4
22	232.8
24	300.3
26	331.2
28	503.9
30	503.8

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

### 3.3.4. Prueba con router WiFi

Para verificar la capacidad del dispositivo para cosechar la energía de RF se hizo uso de un router WiFi modelo Huawei HG531, por motivos de estudio se verificó el canal en el que opera, el rango de frecuencias que hace uso para emitir y la potencia de salida (radio), que son las características más importantes a tener en consideración para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia.

El router WiFi en su configuración por defecto hace uso de las características mostradas en la tabla 13-3

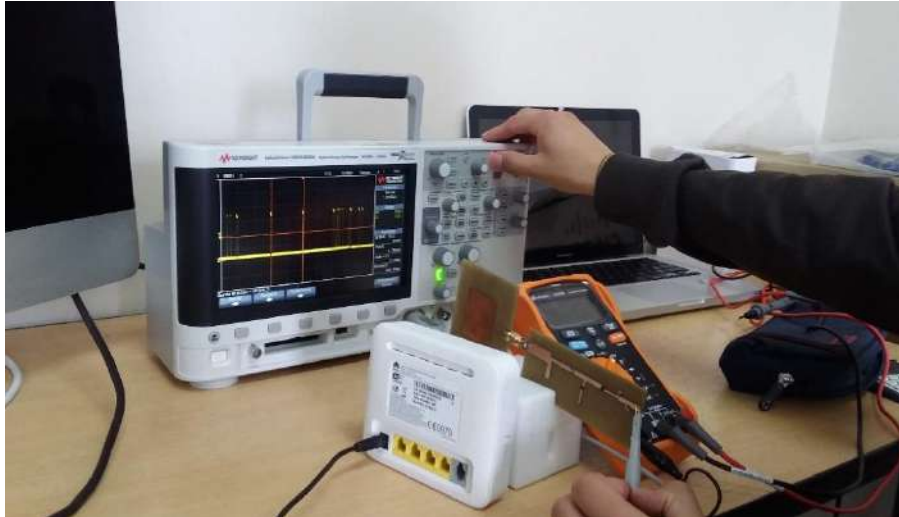
**Tabla 13-3:** Características de operación del router WiFi

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Canal WiFi	11
Frecuencia Central	2.462
Rango de Frecuencia	2.451 – 2.473
Potencia de transmisión de RF	20 dBm

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

Además, es necesario realizar un estudio del comportamiento de la señal WiFi, debido a que es una señal cuya potencia en las portadoras es dinámica y depende del uso que se dé a la red. Cualquier router o AP, envía periódicamente una señal conocida como “beacon”, que contiene información sobre la conexión y permite a los dispositivos reconocer características de la red, estas señales pueden ser enviadas cada 40 a 1000 ms, pero por defecto están configuradas en 100 ms (Angulo, et al., 2021).

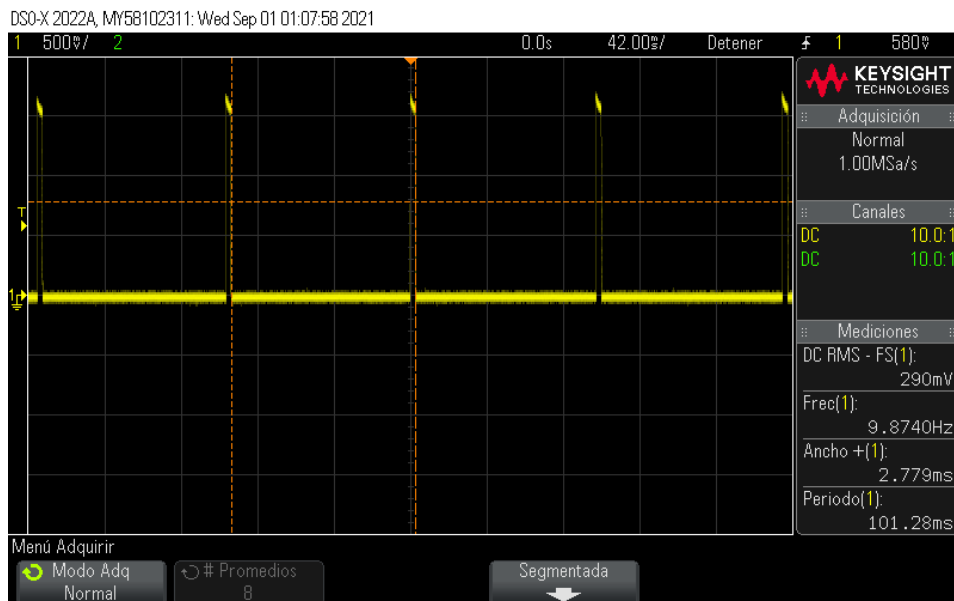
Se hace uso de un osciloscopio para poder observar la señal a la salida del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF, haciendo uso del router WiFi mencionado anteriormente como se muestra en la figura 26-3.



**Figura 26-3:** Mediciones con osciloscopio señal recibida router WiFi

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

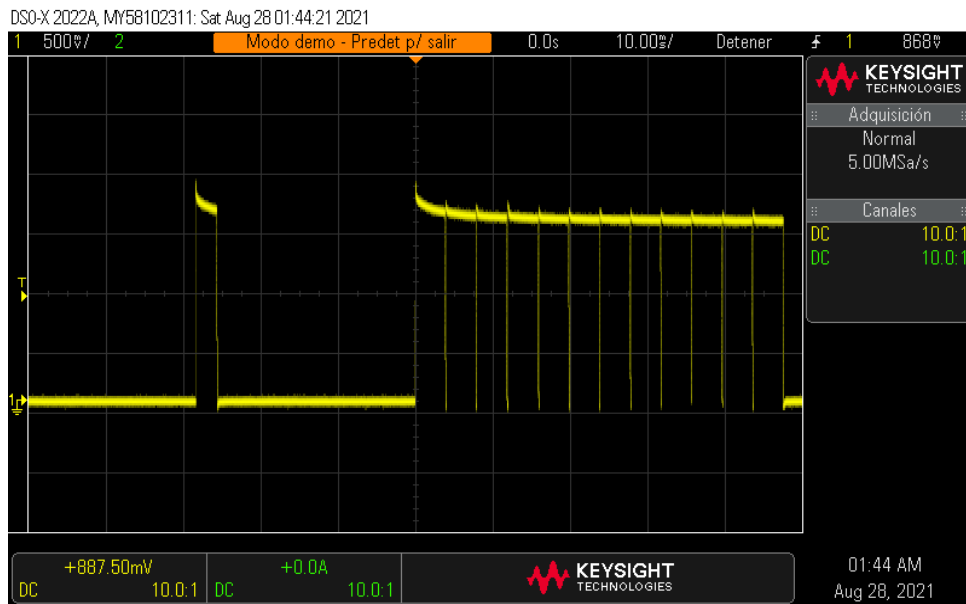
Como se observa al cosechar energía del router wifi, sin tener tráfico en la red (ningún dispositivo conectado) la única señal que es captura corresponde a los “beacon” que es la única señal que es enviada cada 100 ms, como se observa en la figura 27-3.



**Figura 27-3:** Cosechamiento de energía router sin tráfico

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

Como se ha mencionada, es necesario que la red se mantenga en uso para poder captar mayor cantidad de energía proveniente de las ondas de radio WiFi, esto debido al comportamiento dinámico que tiene, de esta forma la señal puede mantenerse constante al estar enviando mayor cantidad de paquetes como se observa en la figura 28-3, la cual muestra la salida del dispositivo de cosechamiento de energía RF, cuando un dispositivo está conectado al router WiFi.



**Figura 28-3:** Cosechamiento de energía con dispositivo conectado al router

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

Para medir el voltaje a la salida del dispositivo se hizo uso de un multímetro, el voltaje medido a la salida del dispositivo para el cosechamiento de energía de radio frecuencia es de 510.6 milivoltios o 0.51 voltios, medido a una distancia del modem WiFi de aproximadamente 10 cm para el caso mostrado en el osciloscopio de la figura 28-3, como se mencionó este voltaje varía dependiendo de la cantidad de paquetes que se envíen por la interfaz de radio del router WiFi, el voltaje medido en este caso se muestra en la figura 29-3.



**Figura 29-3:** Voltaje a la salida del dispositivo usando modem WiFi como fuente

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

La figura 30-3 muestra el funcionamiento del dispositivo para el cosechamiento de energía de RF, conectando un diodo led a su salida, como se muestra el diodo led se enciende, verificando que el dispositivo está cosechando la energía proveniente de las ondas de radio WiFi, cabe recalcar

que debido al comportamiento de la señal WiFi el diodo no mantiene un brillo constante debido a las variaciones de voltaje a su salida, como ya se observó es necesario que exista tráfico en la red para que el router WiFi envíe más paquetes por su interfaz de radio y de esta forma cosechar mayor energía.



**Figura 30-3:** Cosechamiento de energía router WiFi con un LED como carga

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

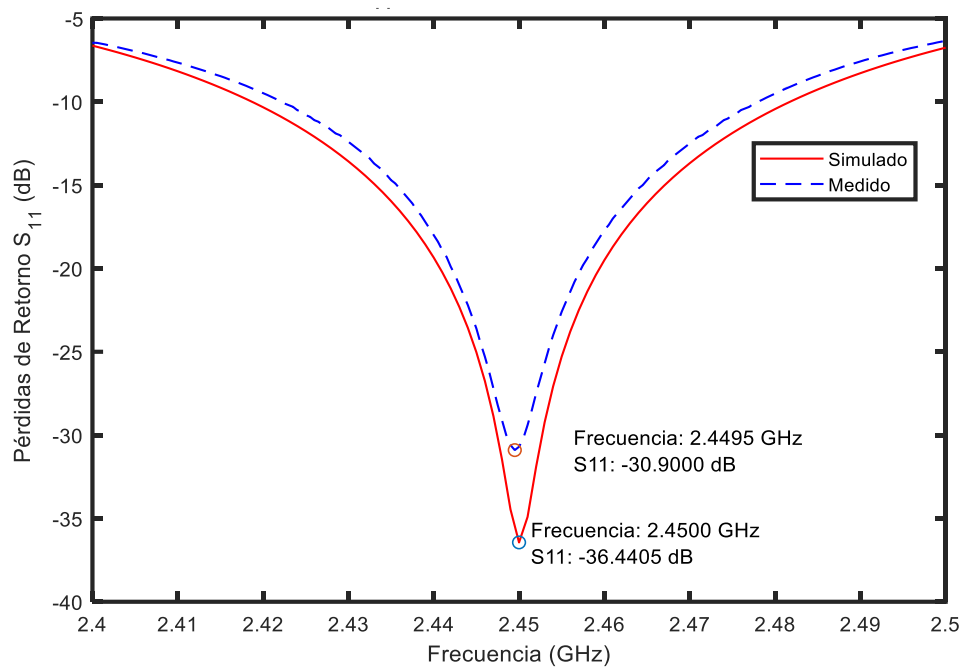
Como se observa el diodo led se enciende al posicionar la antena parche microstrip del dispositivo para el cosechamiento de energía lo más cerca posible a la antena del modem WiFi, ya que como se observó a una menor distancia la antena puede captar mayor energía de RF y por ende una mayor tensión a su salida.

### 3.4. Discusión de resultados

En esta sección se da a conocer un resumen de las mediciones y resultados que se han obtenido del dispositivo para el cosechamiento de energía de radiofrecuencia, haciendo una comparación entre los resultados obtenidos de la simulación y los obtenidos mediante los equipos de medición en el laboratorio.

En la figura 31-3 se muestra las pérdidas de retorno medidas y simuladas de la antena parche microstrip diseñada a la frecuencia de 2.45 GHz, como se observa las mediciones de la antena muestran resultados cercanos a los simulados, en la simulación se obtiene un  $S_{11}$  de -36.44 dB en 2.45 GHz, mientras que en la medida se obtiene un  $S_{11}$  -30.9 dB en 2.44 GHz y con respecto al

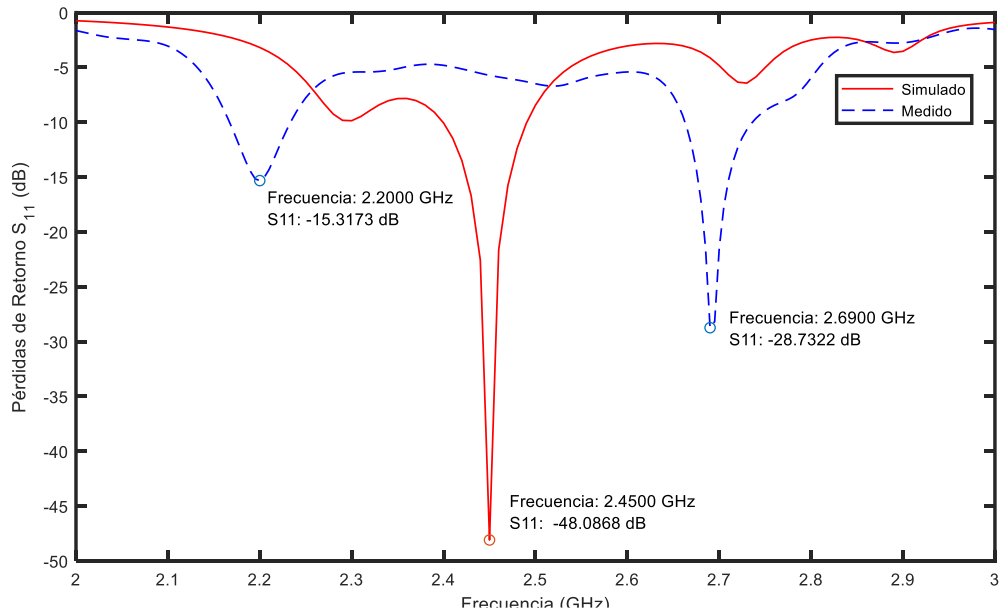
ancho de banda bajo los -10 dB, en la simulación se obtuvo un ancho de banda de 63 MHz, mientras que en la medida 55.9 MHz.



**Figura 31-3:**  $S_{11}$  simulado y medido antena parche microstrip

**Realizado por:** Santamaria, Jorge, 2021.

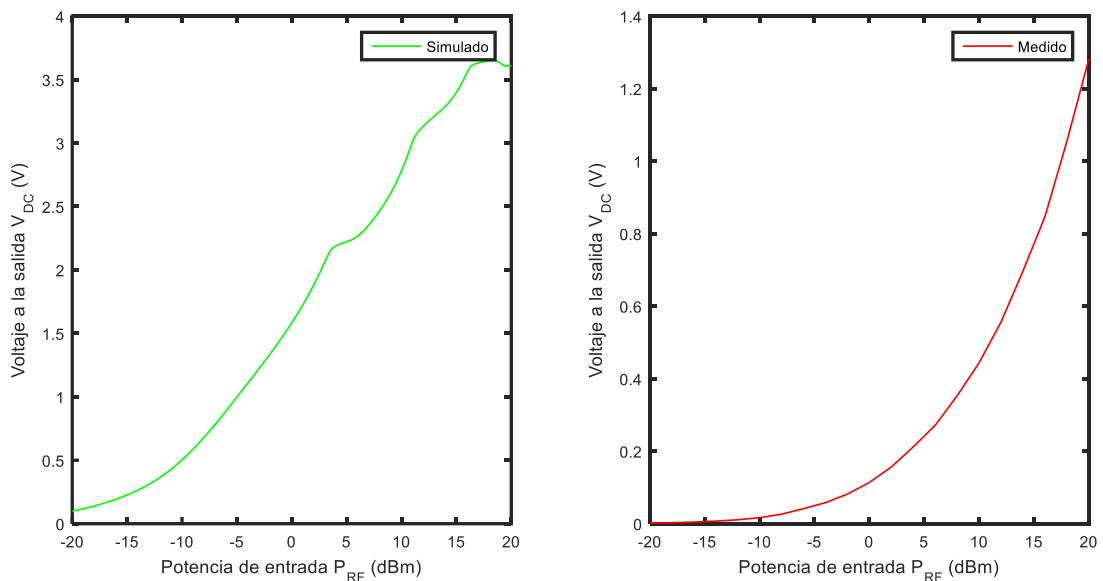
De forma similar también se compara el parámetro  $S_{11}$  simulado y medido para el circuito rectificador como se muestra en la figura 32-3, la simulación difiere en parte de las mediciones obtenidas en el laboratorio, esto se debe a factores de implementación y a las características no lineales de los diodos, en los resultados de las mediciones se obtiene un  $S_{11}$  de -15.3 dB y de -28.7 dB para 2.2 GHz y para 2.69 GHz correspondientemente, que varía con respecto a la simulación en la cual se acopla a 2.45 GHz.



**Figura 32-3:**  $S_{11}$  simulado y medido circuito rectificador

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

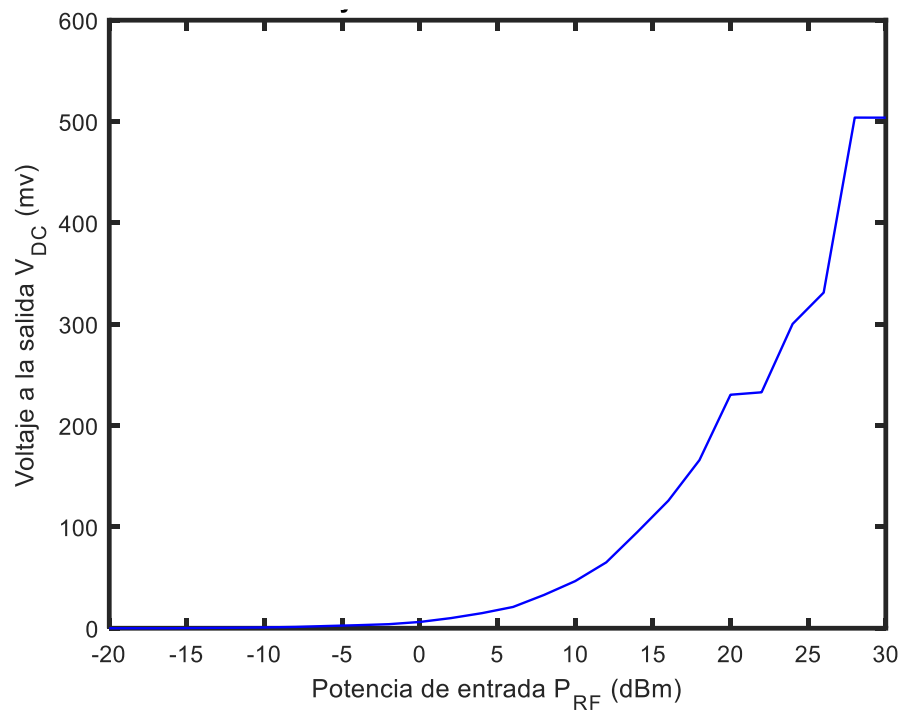
En la figura 33-3 se compara los valores voltaje a la salida del circuito rectificador obtenidos mediante la simulación con respecto a los medidos en el laboratorio, para la frecuencia de interés de 2.45 GHz, al comparar ambas gráficas se observa que en las mediciones de laboratorio el voltaje rectificado es menor al que se obtuvo idealmente en la simulación, esto debido a pérdidas que se pueden introducir debido al proceso de implementación y tolerancia de los componentes empleados en el caso de los capacitores y los diodos Schottky.



**Figura 33-3:** Voltaje a la salida del circuito rectificador simulado vs medido  $f_0=2.45$  GHz

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.

En la figura 34-3 se observa de forma gráfica las mediciones mostradas en la tabla 12-3, que corresponde a los niveles de voltaje obtenidos al emplear la antena parche microstrip y el generador de señales como transmisor y posicionarlos frente al dispositivo para el cosechamiento de energía de RF a una distancia de 5 cm, los niveles de voltaje medidos se encuentran en el orden de los milivoltios siendo el voltaje más alto alcanzado de 500 mv con una potencia configurada en el transmisor de 30 dBm.



**Figura 34-3:** Cosechamiento de energía RF (Antena y Generador de señales como Tx)

Realizado por: Santamaria, Jorge, 2021.



## CONCLUSIONES

Mediante las mediciones de intensidad de campo en la banda ISM, realizadas dentro de la facultad de Informática y Electrónica se puede concluir que la banda ISM de 2,4 GHz es la que presenta mayores niveles de intensidad de campo, por tal motivo se tiene una mejor oportunidad para el cosechamiento de energía de RF.

Se diseñó la antena parche microstrip y el circuito rectificador a 2.45 GHz, mediante las mediciones realizadas a la antena, se obtuvo una pérdida de retorno de -30.9 dB en 2.446 GHz, un VSWR en 2.45 GHz de 1.12 y un ancho de banda de alrededor de 56 MHz de esta forma se concluye que la antena está acoplada y las pérdidas de retorno son mínimas, pero debido al emplear un sustrato dieléctrico con tangente de pérdidas altas, la eficiencia de la antena se ve limitada la cual es de alrededor de 0.46 obtenida mediante simulación.

El diodo al ser un elemento no lineal durante el proceso de rectificación de la señal AC, se pueden producir armónicos que reduce la cantidad de DC a la salida del dispositivo, para su estudio se hizo uso del método de balance de armónicos donde el nivel de la señal en DC (0 Hz) obtenido mediante simulación es de 4.032 dBm para una señal de entrada RF de 2.45 GHz con una potencia de -10 dBm y se determinó que la componente de RF a la salida en la frecuencia fundamental (2.45 GHz) es atenuada en 29.87 dBm, consiguiendo rectificar la señal.

El voltaje en continua medido a la salida del circuito rectificador para diferentes valores de potencia configurados en el generador de señales de RF para 0 dBm se midió 113.3 mV, 10 dBm 443.8 mV y 20 dBm 1282 mV, además se cosechó la energía de radiofrecuencia generada por un router WiFi, a 10 cm se midió un voltaje 510.6 mV, la señal rectificada se visualizó en el osciloscopio y se verificó el funcionamiento encendiendo un diodo led con una tensión de umbral 1.6 V.

Las etapas fundamentales que conforman el dispositivo para el cosechamiento de energía de RF son la antena y el rectificador los cuales al juntarlas logran capturar parte de las ondas electromagnéticas del ambiente para luego convertirlas en corriente continua.

En comparación con otras fuentes de energía, las fuentes de radiofrecuencia no tienen limitaciones tanto en espacio como tiempo, entre ellas las comunicaciones móviles, la difusión de radio y televisión, redes WiFi entre otras tecnologías que son ampliamente empleadas.

## **RECOMENDACIONES**

Para casos reales en donde se desea aplicar el cosechamiento de energía de RF, se recomienda integrar tanto la antena como el rectificador en una misma PCB para evitar pérdidas en los conectores usados en la conexión antena-rectificador y para poder ser integrado en dispositivos de menor tamaño.

Se recomienda considerar otro tipo de antenas para la etapa de captación de energía de RF, como antenas omnidireccionales o arreglos de antenas debido a que tienen un mejor rendimiento que una sola antena parche microstrip, esto con el fin de captar la mayor parte de la energía proveniente de la fuente de RF.

Debido a que las señales emitidas por un router WiFi son de tipo discretas y muestran picos en forma de ráfagas de corta duración, la energía que es cosechada no es estable, es por esta razón que se recomienda considerar el uso de módulos que permitan gestionar la energía para posterior ser entregada un dispositivo de bajo consumo

Se recomienda para trabajos futuros relacionados al cosechamiento de energía de radiofrecuencia, emplear sustratos dieléctricos con tangente de pérdidas pequeñas, especialmente en la antena que se encarga de capturar la energía de RF, para de esta forma reducir las pérdidas producidas en el dieléctrico y mejorar la eficiencia de la antena.

## BIBLIOGRAFÍA

**Auguera, J. y Pérez, A.** Teoría de Antenas [en línea]. Barcelona-España: Lluís Vicent, 2008. [Consultado: 08 junio 2021]. Disponible en: [http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook\\_teoría\\_antenas.pdf](http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook_teoría_antenas.pdf)

**Angulo, F., Navarro, L., Quintero M. y Pardo, M.** “A Simple WiFi Harvester with a Switching-Based Power Management Scheme to Collect Energy from Ordinary Routers”. *Electronics*, [en línea], 2021, 10(10), pp. 4-10. [Consulta: 20 julio 2021]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/10/1191/htm>

**Balanis, C.** Antenna Theory Analysis and Desing. 3ª edición. New Jersey – Estados Unidos: John Wiley & sons, inc, 2005, pp. 811-814.

**Calvo, D.** *Estudio y desarrollo de un sistema de captación de energía RF en redes WSN*. [en línea] (tesis). Escuela Politécnica de Cataluña, Cataluña - España. 2020. pp. 3-11 [Consulta: 20 julio 2021]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/334245/memoria\\_CU153270\\_projecte.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/334245/memoria_CU153270_projecte.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**Cañas, R.** *Transferencia inalámbrica de energía*. [en línea] (tesis). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid - España. 2015. pp. 10-30 [Consulta: 21 julio 2021]. Disponible en: <https://oa.upm.es/38462/>

**Castaño, A.** *Unidad VII: Ondas Electromagnéticas* [en línea]. Argentina, 2008. [Consulta: 30 mayo 2021]. Disponible en: <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica3/170308/teo/teo7.pdf>

**Cerquera, B y Blanco, D.** *Diseño y simulación de una rectenna para cosechar energía electromagnética a 2.4 GHz* [en línea] (tesis). Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá-Colombia. 2020. p. 33 [Consulta: 13 junio 2021]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24502/2/Trabajo%20de%20Grado.pdf>

**D'mello, S.** “Study of Ism Band Technologies”. *IOSR Journal of Engineering* [en línea], 2018, 8, pp. 35-39. [Consulta: 26 mayo 2021]. ISSN 2278-8719. Disponible en: <http://iosrjen.org/Papers/Conf.ICIATE-2018/Volume-8/8-35-39.pdf>

**Ferrando, M. y Valero, A.** Introducción Parámetros de Antenas [en línea]. Valencia-España, 2005a. [Consultado: 12 junio 2021]. Disponible en: [http://www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Tema\\_1.PDF](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF)

**Ferrando, M. y Valero, A.** Introducción Parámetros de Antenas [en línea]. Valencia-España, 2005b. [Consultado: 12 junio 2021]. Disponible en: [http://www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Antenas\\_microstrip.pdf](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Antenas_microstrip.pdf)

**Guerrero, J. y Perez, J.** “Las radiaciones no ionizantes y su efecto sobre la salud humana”. *Rev Cub Med Mil* [en línea]. 2006, (Cuba) 35(3). [Consulta: 13 junio 2021]. ISSN 0138-6557. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0138-65572006000300008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0138-65572006000300008).

**Hernández, R.** *Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4 GHz y 5.8 GHz* [en línea] (tesis). Universidad de las Américas Puebla, Puebla-México. 2018. pp. 3-11. [Consulta: 16 julio 2021]. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/hernandez\\_a\\_r/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo1.pdf)

**Huidobro, J. y Ordóñez, J.** Comunicaciones por radio: tecnologías, redes y servicios de radiocomunicaciones: el espectro electromagnético [en línea]. Paracuellos de Jarama, Madrid: RA-MA Editorial, 2014. [Consulta: 02 junio 2021]. Disponible en: eLibro

**Indrasen, S. y Tripathi, D.** “Microstrip Patch Antenna and its Applications: a Survey”. *International Journal of Computer Technology and Applications* [en línea], 2011, 2(5), pp. 1595-1599. [Consulta: 13 junio 2021]. ISSN:2229-6093. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/232318276\\_Micro\\_strip\\_Patch\\_Antenna\\_and\\_its\\_Applications\\_a\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/232318276_Micro_strip_Patch_Antenna_and_its_Applications_a_Survey)

**ITESA NETACAD.** Operaciones de LAN inalámbrica Administración de canales [en línea]. Estado de Hidalgo - México, sin fecha. [Consulta: 16 julio 2021]. Disponible en: <https://www.itesa.edu.mx/netacad/scaling/course/module4/4.2.3.2/4.2.3.2.html>

**Koury, P.** *A Power Efficient Radio Frequency Energy Harvesting Circuit* [en línea] (tesis) (maestría). University of Ottawa, Ontario-Canada. 2013. pp. 1-30. [Consulta: 14 junio 2021]. Disponible en: [https://ruor.uottawa.ca/bitstream/10393/23627/3/Khoury\\_Philip\\_2013\\_thesis.pdf](https://ruor.uottawa.ca/bitstream/10393/23627/3/Khoury_Philip_2013_thesis.pdf)

**Llanos, A.** *Gestión del espectro radioeléctrico en Ecuador Nueva modalidad para radiodifusión y televisión abierta* [en línea] (tesis) (maestría). Universidad Andina Simón Bolívar, Ecuador. 2013. p. 14 [Consulta: 05 junio 2021]. Disponible en: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/3833/1/SM138-Llanos-Gestion.pdf>

**Martínez, M.** “Antena para cosecha de energía dentro y fuera de banda en radiofrecuencia de 2.4 GHz”. *Pistas Educativas* [en línea], 2019, (México) 41(134), pp. 445-458. [Consulta: 25 mayo 2021]. ISSN 2448-847X. Disponible en: <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/2057>

**Martínez Castillo, A.** *Antenas para aplicaciones de captación de energía en la banda UHF* [en línea] (tesis). Universidad politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones, Valencia, España. 2014. pp. 1-20. [Consulta: 29 mayo 2021]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/46578/MartinezCastillo\\_Alonso-1.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/46578/MartinezCastillo_Alonso-1.pdf?sequence=1)

**Mazar, H.** International, regional and national regulation of SRDs [en línea]. Geneva - Suiza, 2014. [Consulta: 11 julio 2021]. Disponible en: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/workshops/RWP1B-SRD-UWB-14/Presentations/International,%20regional%20and%20national%20regulation%20of%20SRDs.pdf>

**Mezquita, J.** Diseño de antenas compactas para aplicaciones de Energy Harvesting [en línea] (tesis). Universidad Politécnica de Valencia, Gandia-España. 2015. p. 18 [Consulta: 13 junio 2021]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/50917>

**Moreno Vera, C.** *Cosecha de energía por medio de señales de radiofrecuencia* [en línea] (tesis). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería mecánica y eléctrica, México. 2016. pp. 19-25. [Consulta: 29 mayo 2021]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/18591>

**Murillo, J.** Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación [en línea]. Sevilla-España, 2007. [Consulta: 12 junio 2021]. Disponible en: <https://personal.us.es/murillo/docente/radio/documentos/Temas1a5.pdf>

**NARDA STS.** *NARDASRM 3006 Selective Radiation Meter Datasheet* [en línea]. Chicago, 2014. [Consulta: 11 julio 2021]. Disponible en: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/NARDA-SRM-3006-Datasheet.pdf>

**Ordoñez, J.** “Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico”. *ACTA* [en línea], 2012, (España) 1(62), pp. 17-31. [Consulta: 02 junio 2021]. ISSN 1888-6051. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5738106>

**Osorio, H.** Apuntes para la asignatura “Teoría Electromagnética” [en línea]. Ecatepec de Morelos-México, 2007. [Consulta: 13 junio 2021]. Disponible en: [http://www.tese.edu.mx/documentos2004/5289\\_ZQFFNLL.pdf](http://www.tese.edu.mx/documentos2004/5289_ZQFFNLL.pdf)

**Pandey, A.** Energy harvesting and wireless power transfer antenna for IoT applications, 2020. [Consulta: 13 junio 2021]. Disponible en: <https://anilkrpandey.wordpress.com/2020/02/09/energy-harvesting-and-wireless-power-transfer-antenna-for-iot-applications/>

**Pozar, D.** *Microwave Engineering*. 4ª edición. New Jersey – Estados Unidos: John Wiley & sons, inc, 2011, pp. 95 -250

**Prieto, A.** *Diseño de un sistema de captación de energía de señales WiFi*. [en línea] (tesis). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid - España. 2019. pp. 1-20 [Consulta: 21 julio 2021]. Disponible en: <https://oa.upm.es/55784/>

**Ramesh, G.** *Microstrip Antenna Design Handbook*. Boston – Estados Unidos: Artech House, 2001. pp. 764-770

**Ruz, L. y Castro, D.** Teoría electromagnética para estudiantes de ingeniería [en línea]. Barranquilla-Colombia: Universidad del Norte, 2012. [Consulta: 29 mayo 2021]. Disponible en: eLibro

**Sendra, S., Garcia, M., Turro, C. y Lloret, J.** “WLAN IEEE 802.11 a/b/g/n indoor coverage and interference performance study”. *International Journal on Advances in Networks and Services* [en línea], 2011, 4(2), pp. 209-222. [Consulta: 13 julio 2021]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/228403430\\_WLAN\\_IEEE\\_80211\\_abgn\\_indoor\\_coverage\\_and\\_interference\\_performance\\_study](https://www.researchgate.net/publication/228403430_WLAN_IEEE_80211_abgn_indoor_coverage_and_interference_performance_study)

**Siljeström, P.** Diseño de una "rectenna" en la banda WiFi de 2.45GHz para aplicaciones de captación de energía electromagnética [en línea] (tesis). Universidad Politécnica de Cartagena, España. 2015. pp. 10-50. [Consulta: 13 junio 2021]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/5066/pfc6278.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**Srinivasu, G., Sharma, V. y Anveshkumar, N.** "A Survey of Conceptualization of RF Energy Harvesting". *Journal of Applied Science and Computations* [en línea], 2019, 6(2), pp. 791-800. [Consulta: 26 mayo 2021]. ISSN 1076-5131. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/331975718\\_A\\_Survey\\_on\\_Conceptualization\\_of\\_RF\\_Energy\\_Harvesting](https://www.researchgate.net/publication/331975718_A_Survey_on_Conceptualization_of_RF_Energy_Harvesting)

**Srinivasu, G., Sharma, V. y Anveshkumar, N.** "Study of Ism Band Technologies". *IOSR Journal of Engineering* [en línea], 2018, 8(2), pp. 35-39. [Consulta: 26 mayo 2021]. ISSN 2278-8719. Disponible en: <http://iosrjen.org/Papers/Conf.ICIATE-2018/Volume-8/8-35-39.pdf>

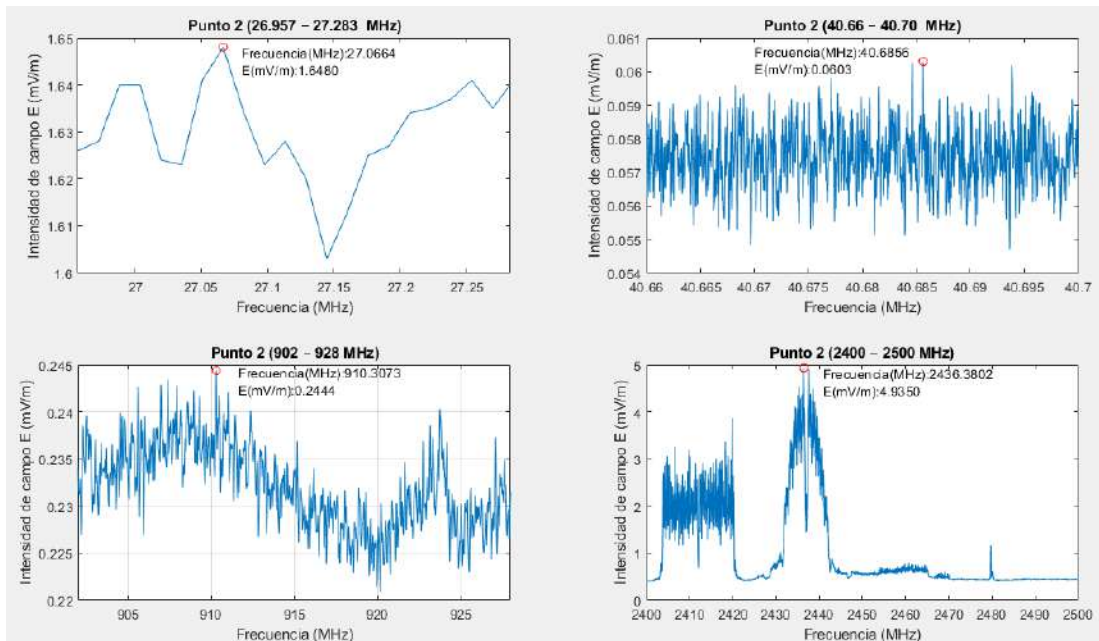
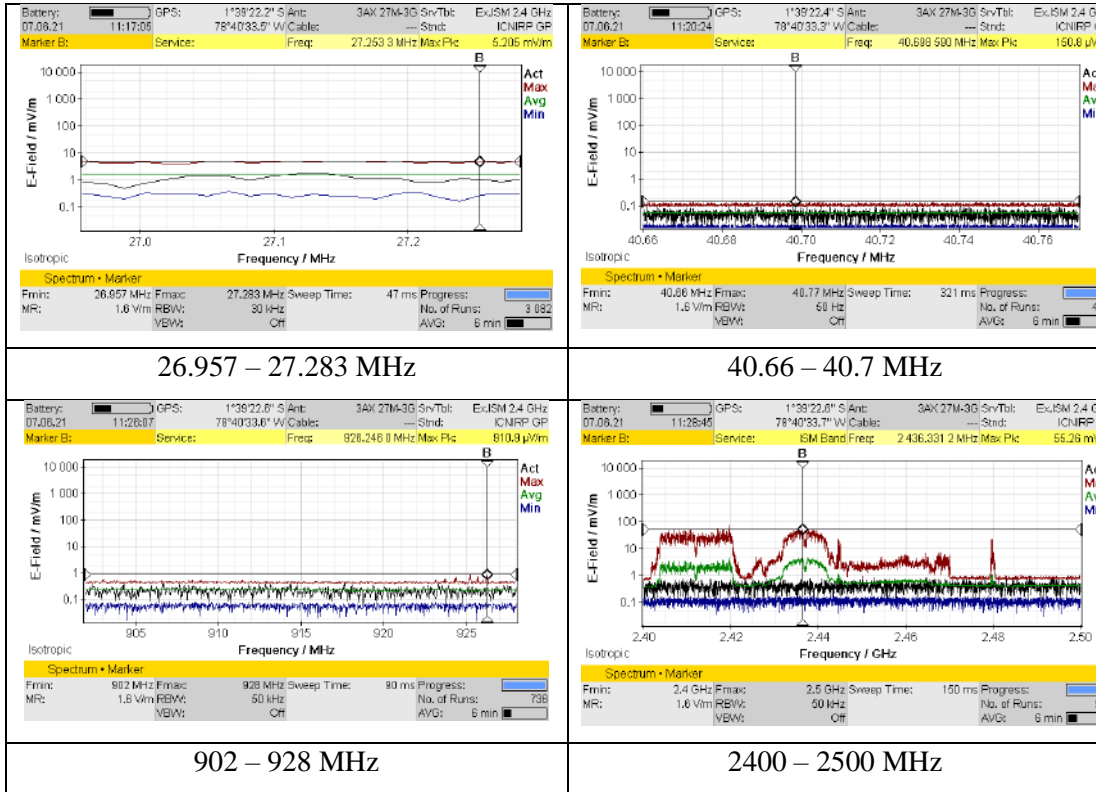
**Tran, L., Cha, H., y Park, W.** "RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications". *Micro and Nano Systems Letters* [en línea], 2017, 5(14), pp. 1-16. [Consulta: 13 julio 2021]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/314126417\\_RF\\_power\\_harvesting\\_a\\_review\\_on\\_designing\\_methodologies\\_and\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/314126417_RF_power_harvesting_a_review_on_designing_methodologies_and_applications)

**Vega Pérez, J. y Vega Pérez, S.** Electromagnetismo [en línea]. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2015. [Consulta: 29 mayo 2021]. Disponible en: eLibro

# ANEXOS

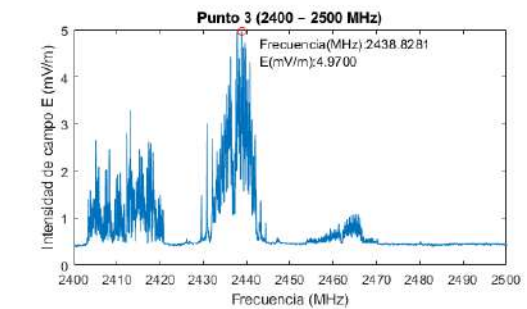
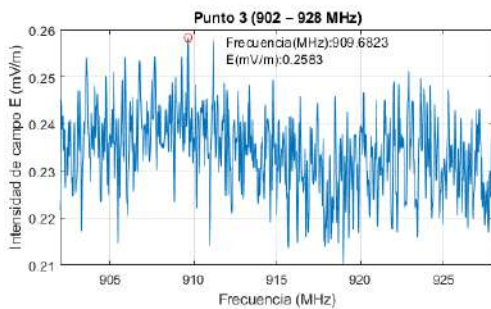
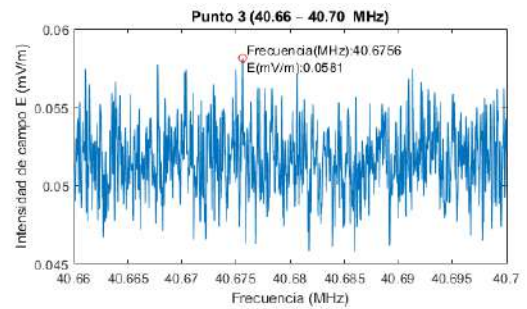
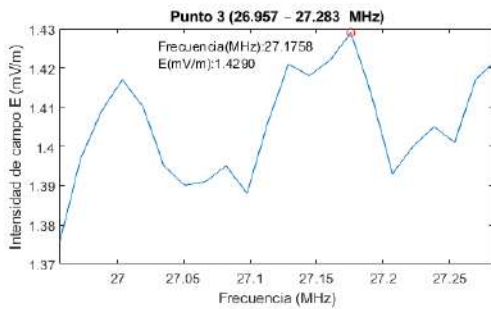
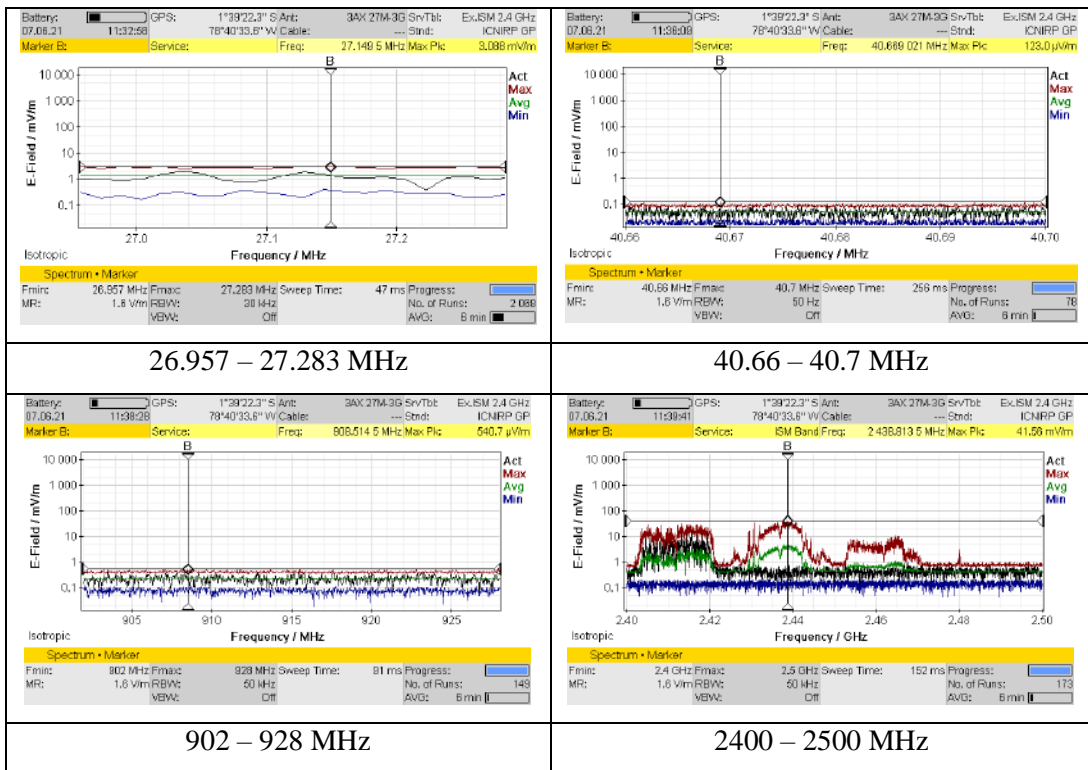
## ANEXO A: MEDICIONES DE INTENSIDAD DE CAMPO CON NARDA SRM 3006

### Mediciones punto # 2

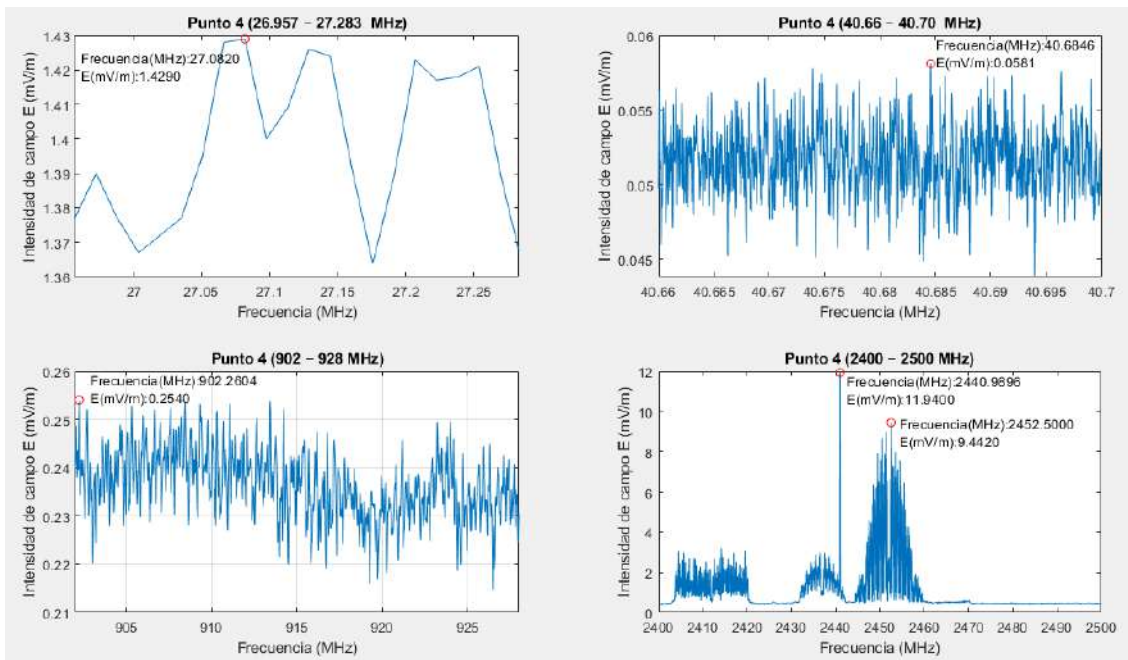
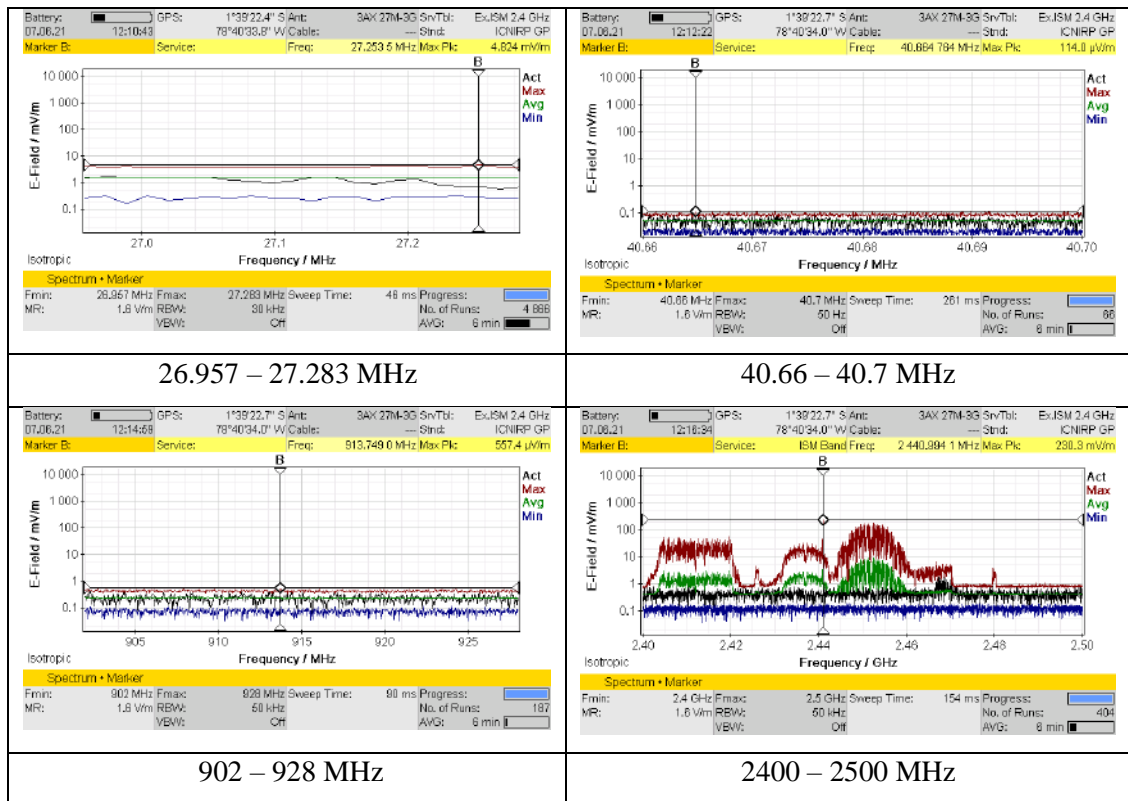




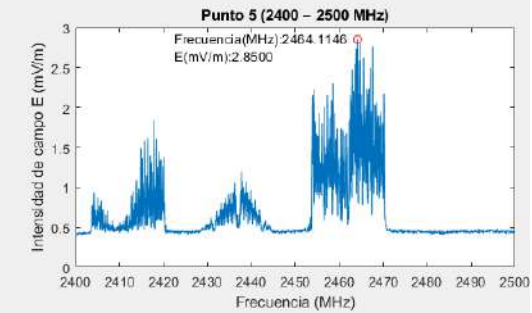
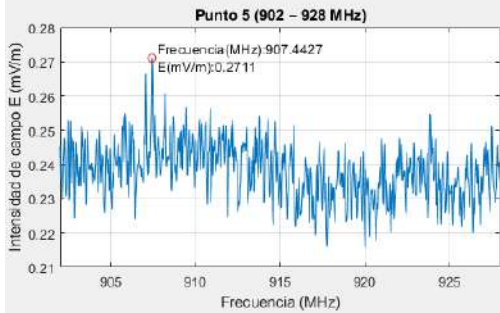
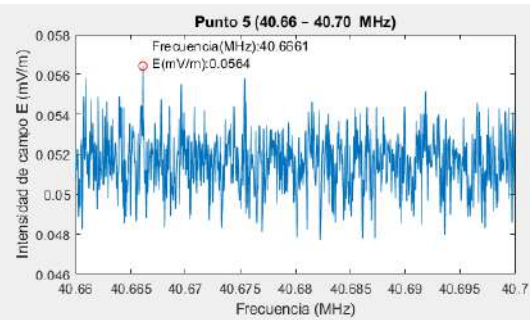
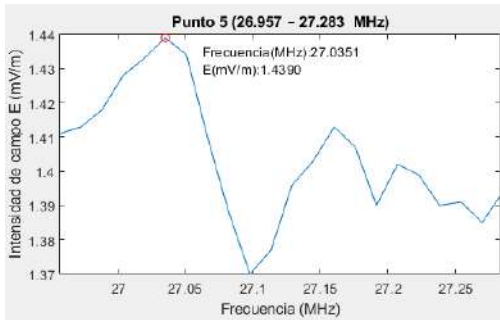
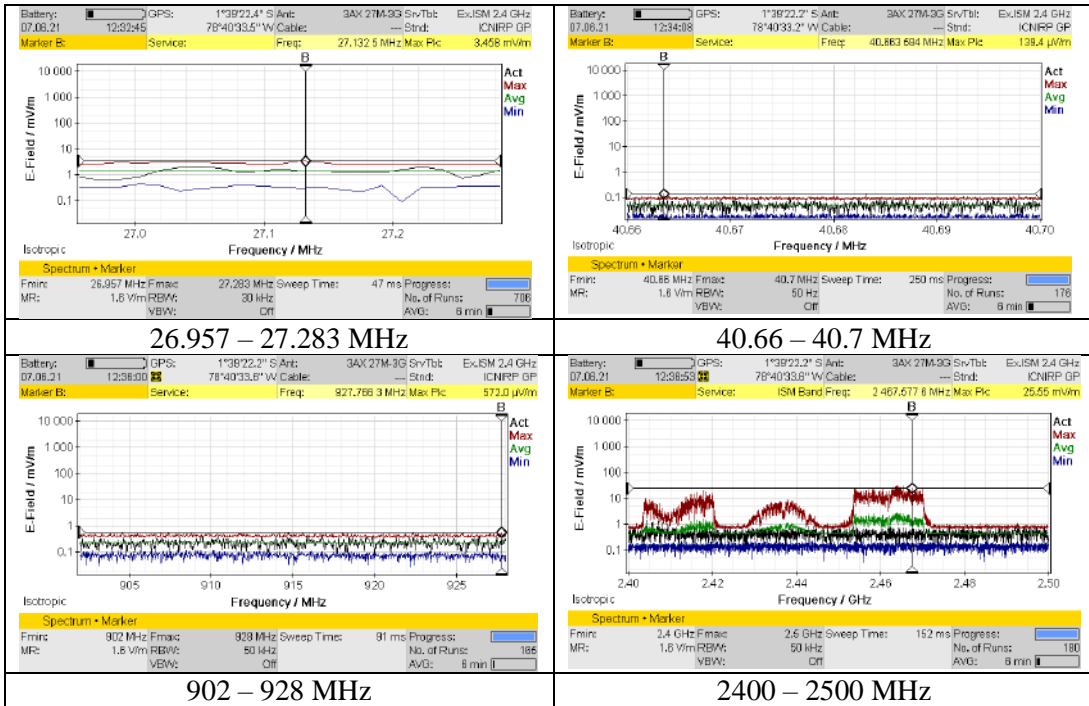
### Mediciones punto # 3



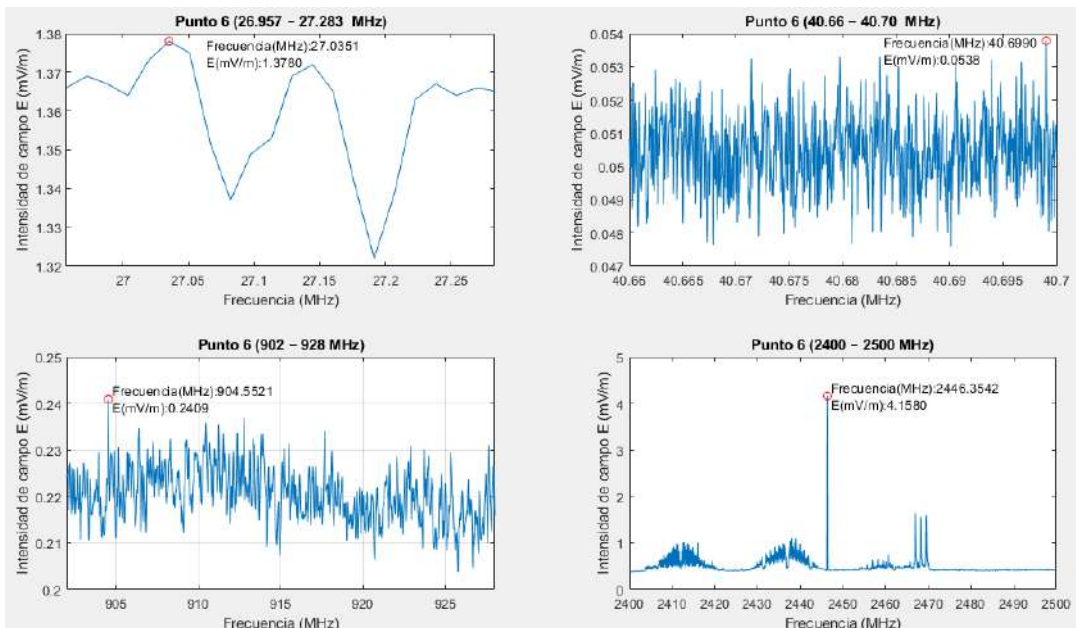
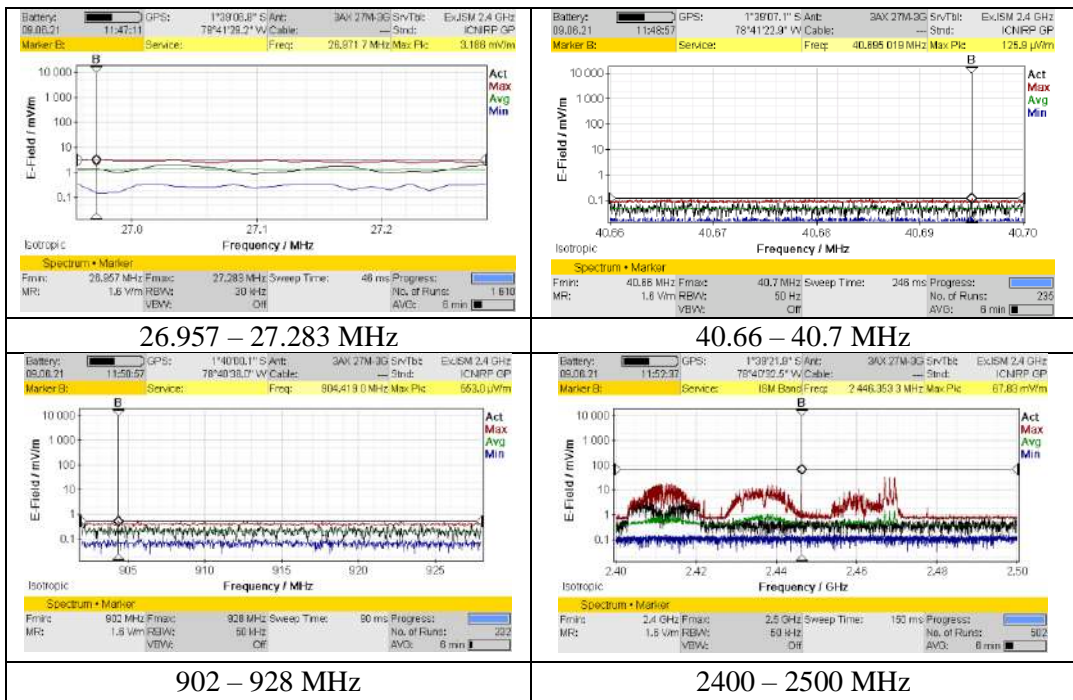
# Mediciones punto # 4



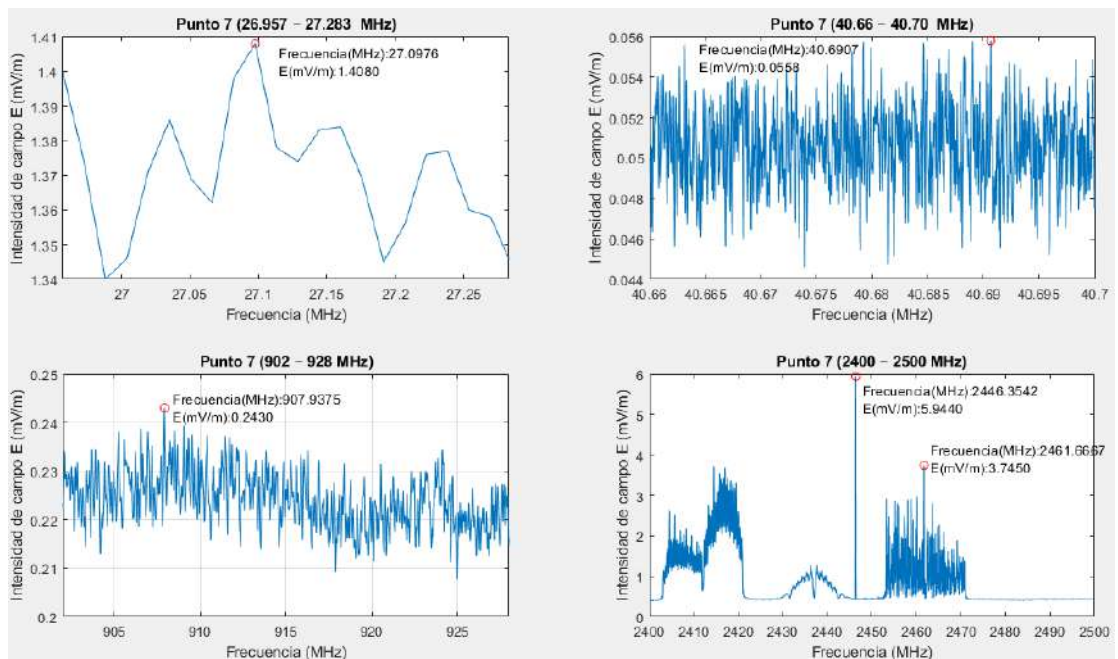
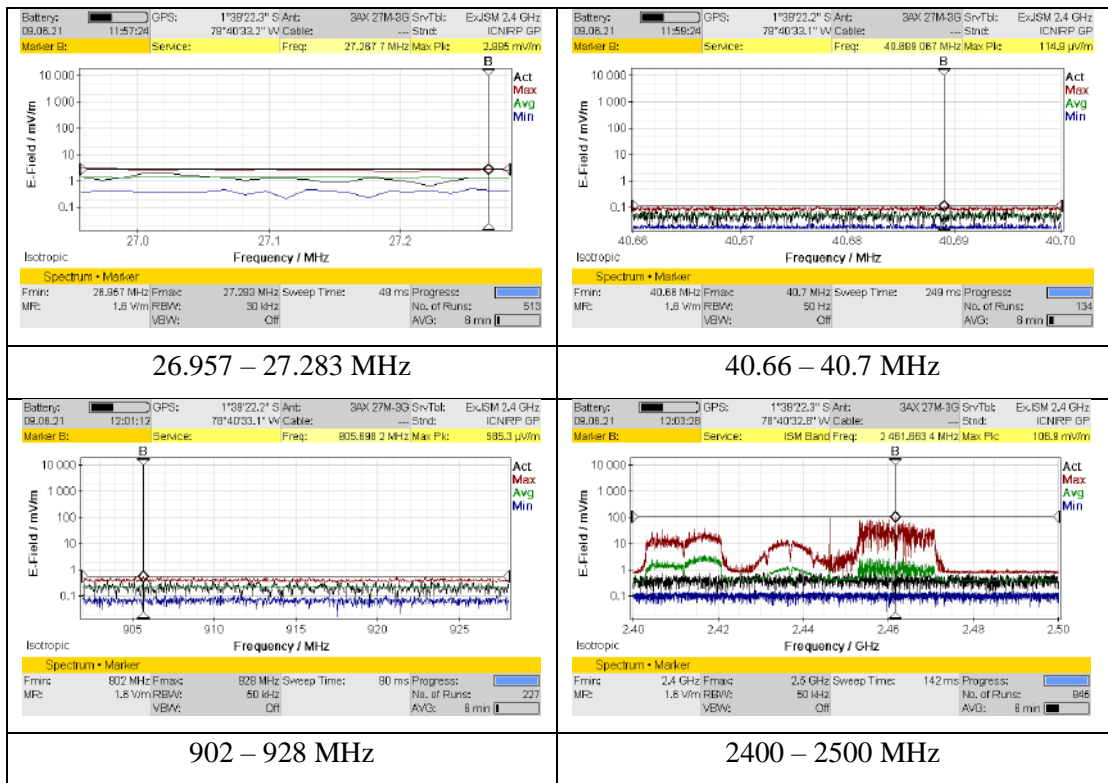
# Mediciones punto # 5



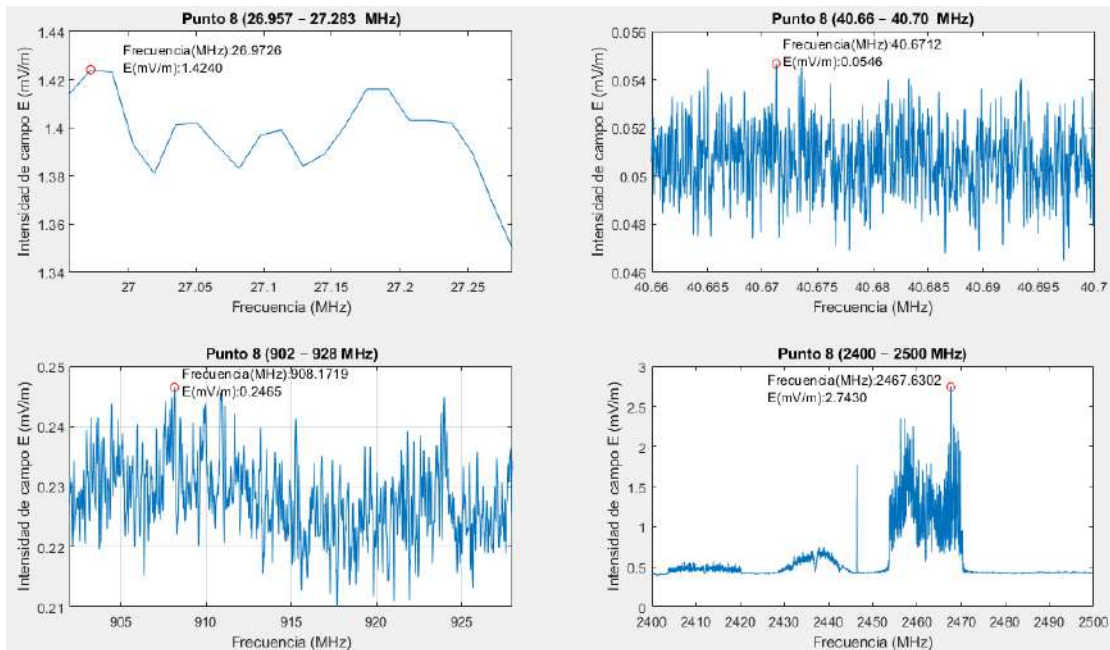
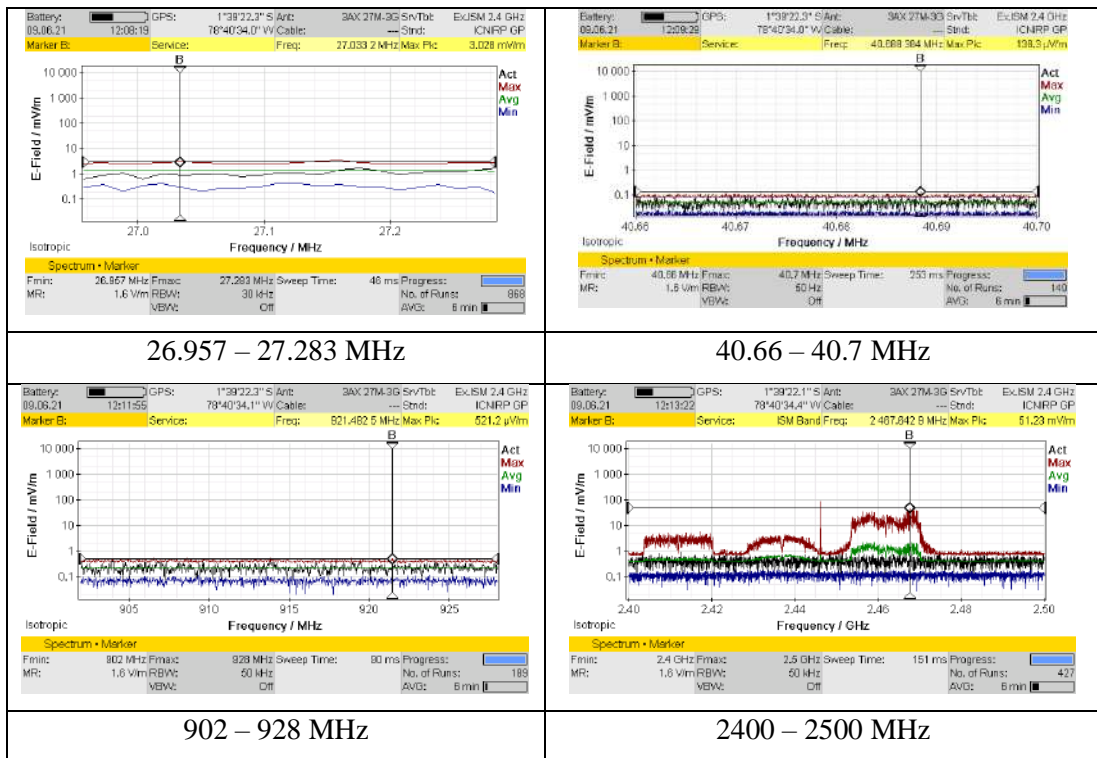
# Mediciones punto # 6



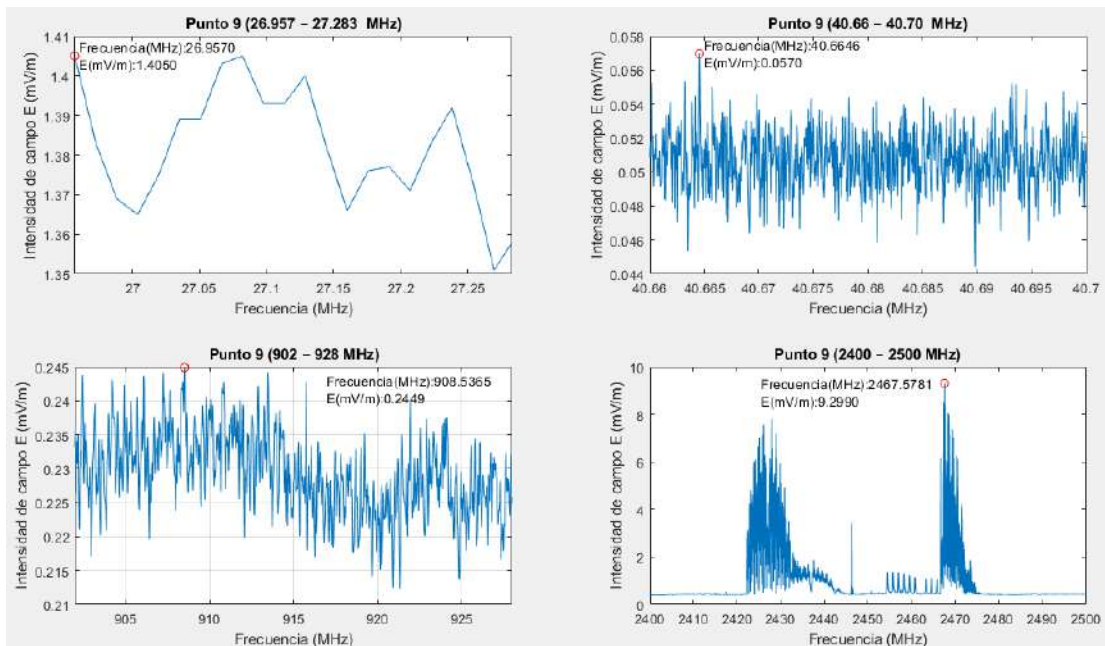
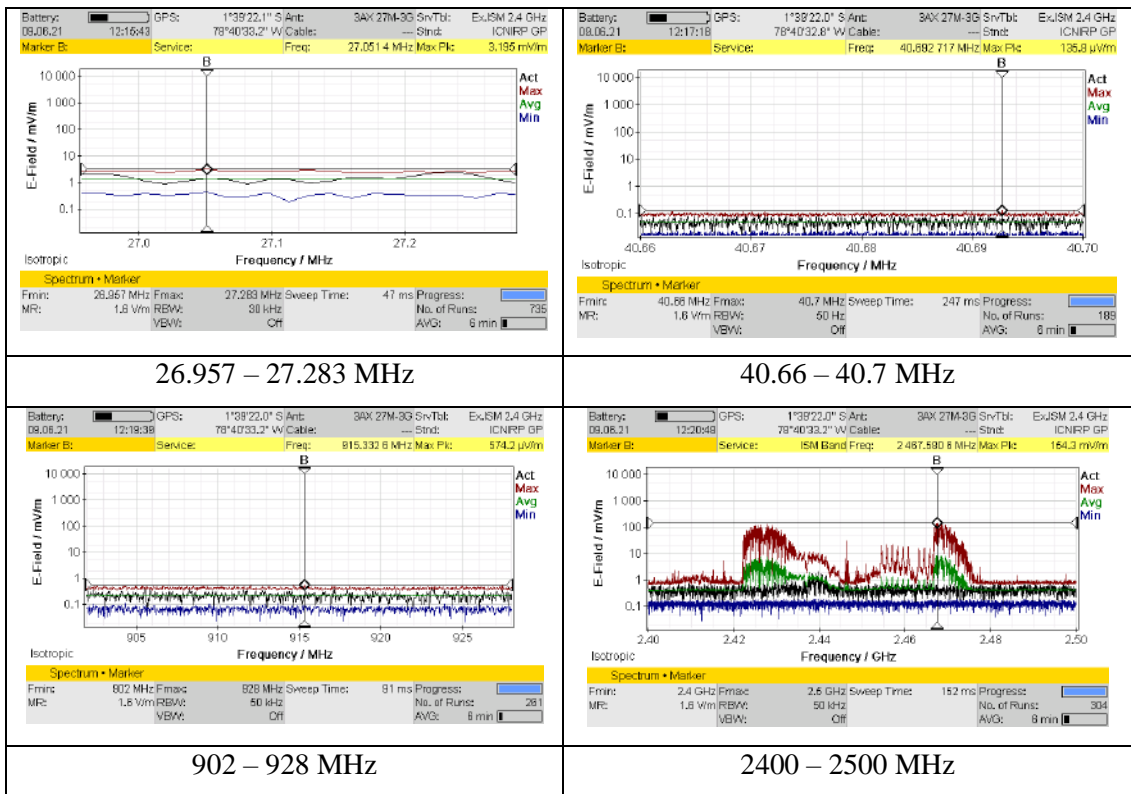
# Mediciones punto # 7



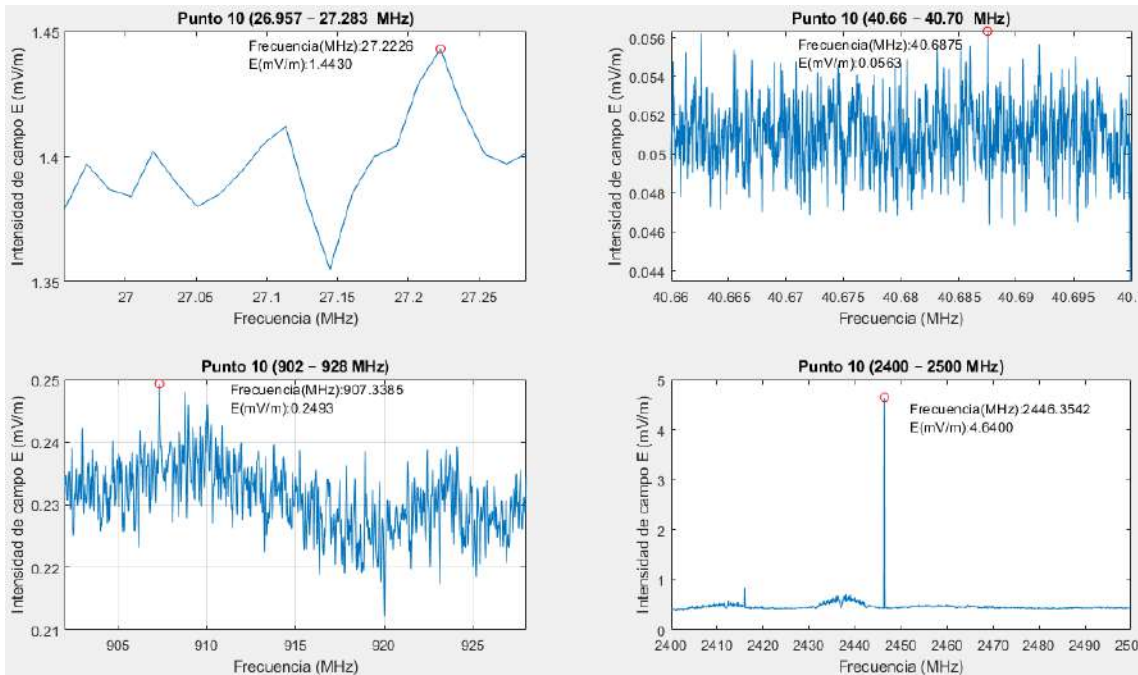
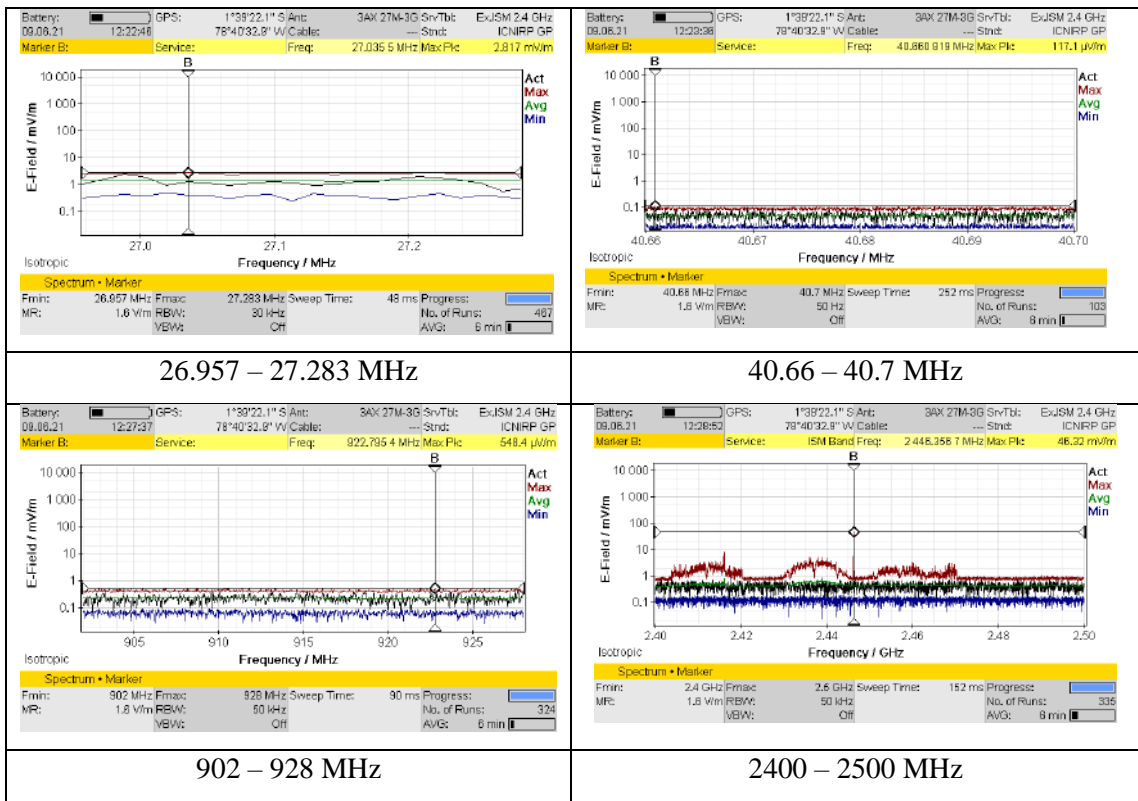
# Mediciones punto # 8



# Mediciones punto #9

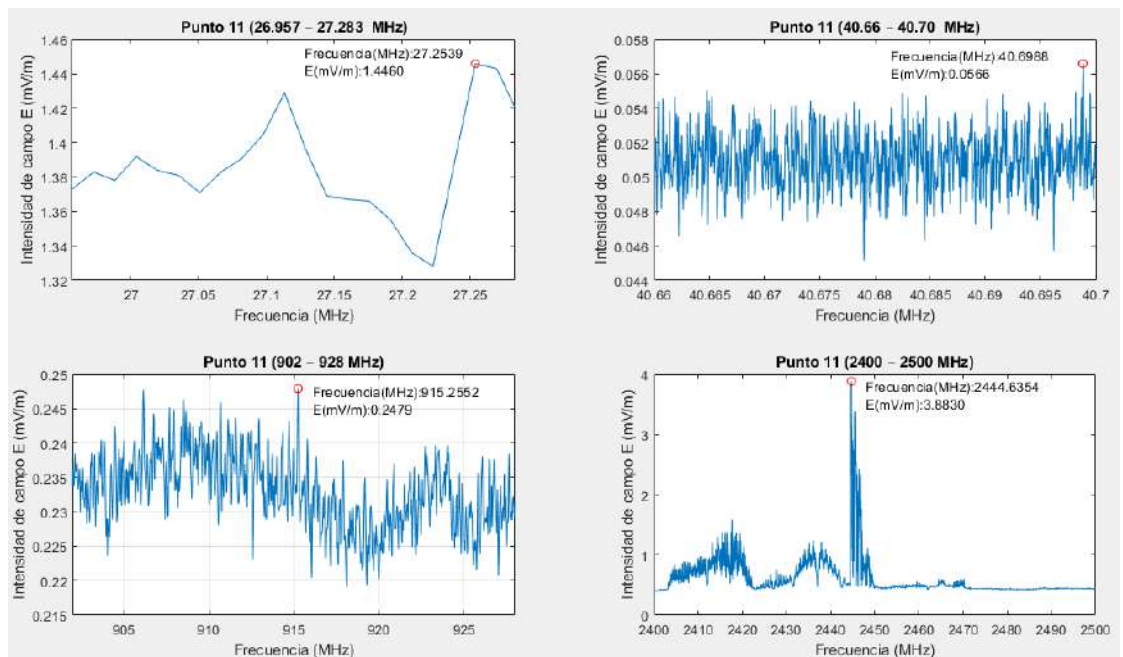
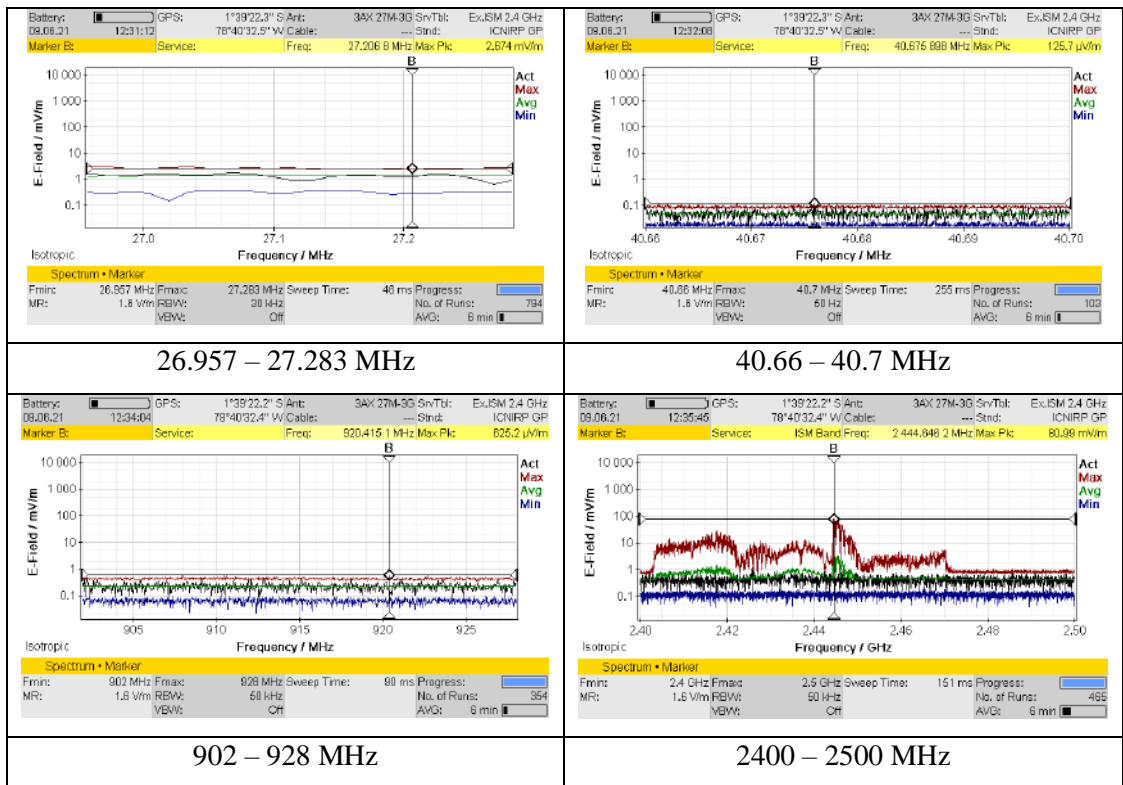


# Mediciones punto # 10





# Mediciones punto # 11



Equipo empleado en las mediciones NARDA SRM 3006



## ANEXO B: MEDICIONES DE LA ANTENA PARCHE MICROSTRIP



## ANEXO C: MEDICIONES DEL CIRCUITO RECTIFICADOR

Escenario de medición del circuito rectificador



Mediciones del voltaje a la salida del circuito rectificador para  $f_0 = 2.45$  GHz



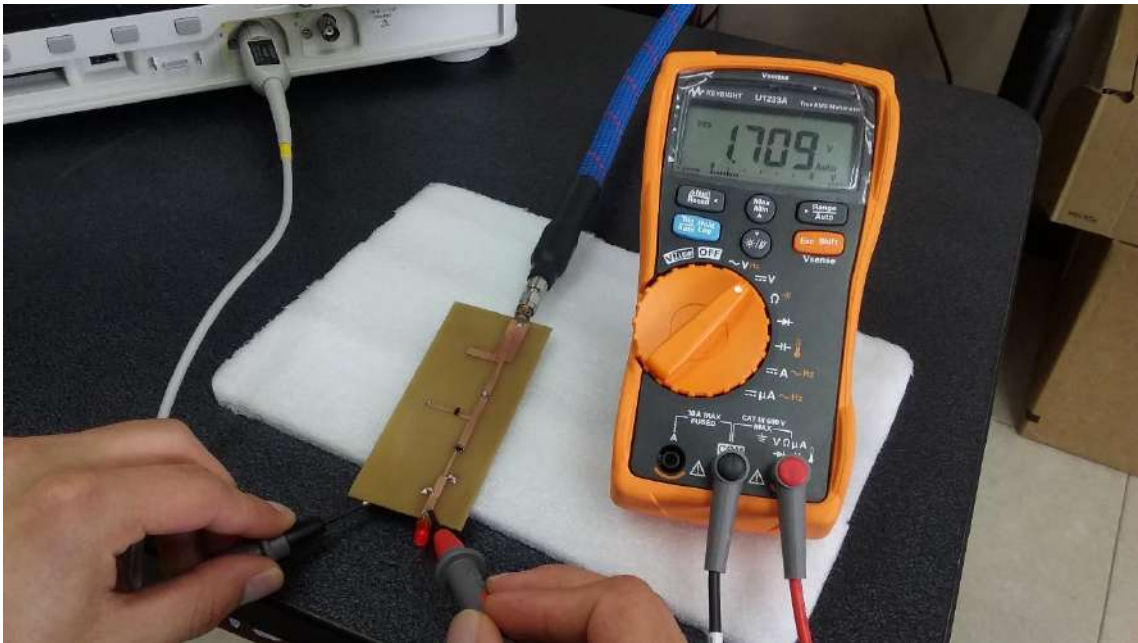
Mediciones del voltaje a la salida del circuito rectificador para  $f_0 = 2.69$  GHz



Mediciones del voltaje a la salida del circuito rectificador para  $f_0 = 2.2$  GHz

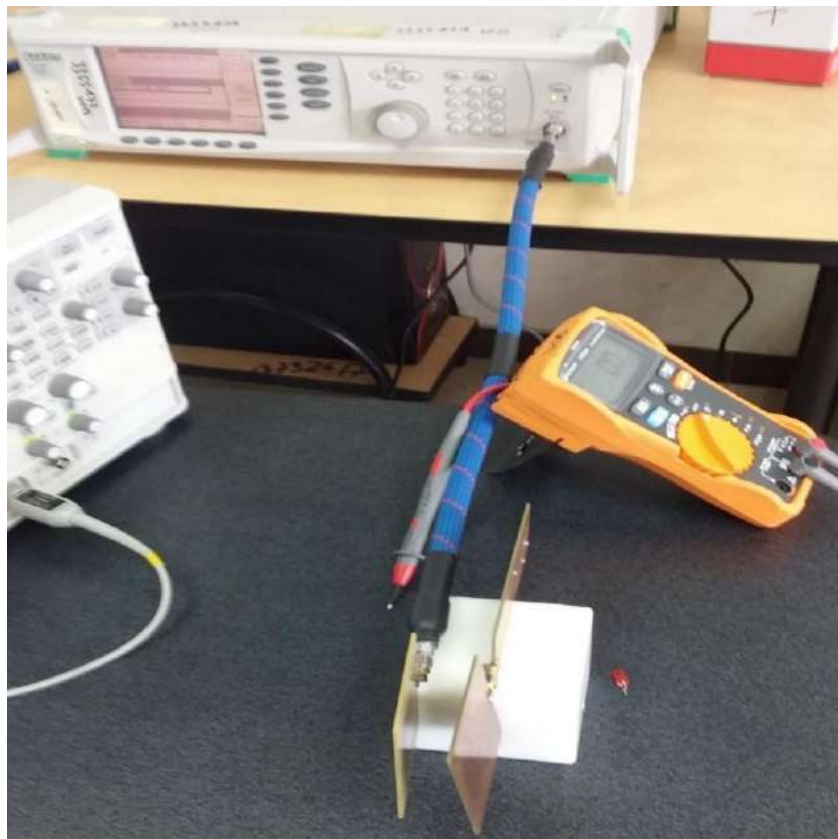


Diodo LED en el circuito rectificador



## ANEXO D: MEDICIONES DEL DISPOSITIVO PARA COSECHAMIENTO DE ENERGÍA RF

Primer escenario de medición: Antena y generador de señales como transmisor



Mediciones del cosechamiento de energía de RF (Antena y Generador de señales como Tx)



Segundo escenario de medición: Router WiFi



