



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA DE RF  
INALÁMBRICA APLICADO A DISPOSITIVOS IOT DE BAJA POTENCIA  
MEDIANTE LA RED 4G**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en Electrónica y  
Telecomunicaciones**

**Autor:**

Rodriguez Rodriguez Luis Boris

**Tutor:**

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro

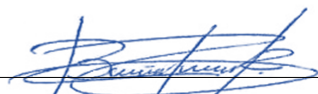
Riobamba, Ecuador. 2022

## DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, Luis Boris Rodriguez Rodriguez, con cédula de ciudadanía 030301976-4, autor del trabajo de investigación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA DE RF INALÁMBRICA APLICADO A DISPOSITIVOS IOT DE BAJA POTENCIA MEDIANTE LA RED 4G**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 10 de noviembre de 2022.

  
Luis Boris Rodriguez Rodriguez  
C.I: 0303019764

## DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA DE RF INALÁMBRICA APLICADO A DISPOSITIVOS IOT DE BAJA POTENCIA MEDIANTE LA RED 4G, presentado por Luis Boris Rodriguez Rodriguez, con cédula de identidad número 030301976-4, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar. De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a 10 de noviembre de 2022.

Leonardo Fabian Rentería Bustamante, PhD  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Luis Patricio Tello Oquendo, PhD  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Manuel Antonio Meneses Freire, PhD  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Daniel Antonio Santillán Haro, PhD  
**TUTOR**



## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA DE RF INALÁMBRICA APLICADO A DISPOSITIVOS IOT DE BAJA POTENCIA MEDIANTE LA RED 4G, presentado por Luis Boris Rodriguez Rodriguez, con cédula de identidad número 030301976-4, bajo la tutoría de PhD. Daniel Antonio Santillán Haro; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar. De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a 10 de noviembre de 2022.

PhD. Leonardo Fabian Rentería Bustamante

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



PhD. Luis Patricio Tello Oquendo

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



PhD. Manuel Antonio Meneses Freire

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**







Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO

*en movimiento*



UNACH-RGF-01-04-02.20  
VERSIÓN 02: 06-09-2021

# CERTIFICACIÓN

Que, **RODRIGUEZ RODRIGUEZ LUIS BORIS** con CC: **0303019764**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA DE RF INALÁMBRICA APLICADO A DISPOSITIVOS IOT DE BAJA POTENCIA MEDIANTE LA RED 4G**", cumple con el 1 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 24 de agosto de 2022

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro  
**TUTOR**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación está dedicado especialmente a mi familia por brindarme todo el apoyo, cariño, consejos e incesante motivación para nunca rendirme en el camino hacia la superación y así promover mi constitución profesional.

*Con mucho afecto, Boris*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme firmeza, salud y consuelo en la trayectoria de desarrollo profesional, por siempre guiarme en las dificultades, por permitirme gozar de una familia que me apoya incondicionalmente en todas mis decisiones y además brindan sus consejos y amor infinito.

A mis leales amigos, quienes conjuntamente compartimos momentos y anhelos en el campo educativo, por brindarme su amistad verdadera y apoyarme en los buenos y malos momentos, haciendo de este proceso educativo una gratificante experiencia.

Al PhD. Daniel Antonio Santillán Haro, por orientarme en la realización de mi tesis, por compartir su conocimiento y experticia que ha sido crucial para hacer realidad el trabajo de investigación y cumplir las metas trazadas.

A aquellos profesores que además de impartir una cátedra compartían sus conocimientos, tenían paciencia, transmitían valores y facilitaban el entendimiento académico con el fin de potencializar habilidades, gracias por incentivar la curiosidad y la innovación que permite tener éxito y prosperidad. Pues bien, el conocimiento nunca llega a su límite, estamos rodeados de un mar de ignorancia es por ello que constantemente debemos seguir formándonos profesionalmente.

*Con mucho afecto, Boris*

# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>1 Introducción</b> . . . . .	<b>15</b>
1.1 Planteamiento del Problema . . . . .	16
1.1.1 Problema y Justificación . . . . .	16
1.2 Objetivos . . . . .	17
1.2.1 Objetivo General . . . . .	17
1.2.2 Objetivos Específicos . . . . .	17
<b>CAPÍTULO 2</b> . . . . .	<b>18</b>
<b>2 Estado del arte</b> . . . . .	<b>18</b>
2.1 Antecedentes Investigativos . . . . .	18
2.2 Antenas . . . . .	19
2.2.1 Parámetros de una antena en transmisión . . . . .	20
2.2.2 Parámetros de una antena en recepción . . . . .	22
2.2.3 Antenas Microstrip . . . . .	22
2.3 Redes 4G . . . . .	23
2.4 Recolección de energía . . . . .	24
2.4.1 Recolección de energía por medio de Radiofrecuencia . . . . .	24
2.4.2 Fuentes de Explotación de Radiofrecuencia . . . . .	24
2.5 Adaptación de Impedancias . . . . .	25
2.5.1 Red de Adaptación L . . . . .	25
2.5.2 Red de Adaptación P ( $\pi$ ) . . . . .	25
2.6 Convertidor de RF a DC . . . . .	26
2.6.1 Diodos Rectificadores . . . . .	26
2.6.2 Multiplicador Rectificador . . . . .	26
<b>CAPÍTULO 3</b> . . . . .	<b>28</b>
<b>3 Metodología de la Investigación</b> . . . . .	<b>28</b>
3.1 Métodos, Tipos, Técnicas e Instrumentos de investigación . . . . .	28
3.1.1 Método de Investigación . . . . .	28
3.1.2 Tipo de Estudio . . . . .	28
3.1.3 Técnicas e Instrumentos . . . . .	28
3.2 Población y Muestra . . . . .	28
3.2.1 Población . . . . .	28
3.2.2 Muestra . . . . .	29
3.3 Fuentes de Información . . . . .	29
3.4 Operacionalización de Variables . . . . .	29
3.5 Procedimiento y Análisis . . . . .	30
3.5.1 Diseño del Sistema de Transmisión Inalámbrica . . . . .	30
3.5.2 Diseño del Circuito de Acoplamiento . . . . .	31
3.5.3 Diseño del Circuito Rectificador . . . . .	31
3.5.4 Carga . . . . .	32



<b>CAPÍTULO 4</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>4 Resultados y Discusión</b> . . . . .	<b>33</b>
4.1 Resultados del Sistema de Captación de Energía . . . . .	33
4.2 Resultados del Circuito de Acoplamiento . . . . .	35
4.3 Resultados del Circuito de Rectificación . . . . .	37
4.4 Resultados Pruebas de Carga . . . . .	39
4.5 Elaboración del Circuito Rectificador Propuesto . . . . .	40
4.6 Sistema de Recolección de Energía de Radiofrecuencia Propuesto	41
4.7 Resultados Pruebas de Campo . . . . .	41
<b>CAPÍTULO 5</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>5 Conclusiones y Recomendaciones</b> . . . . .	<b>46</b>
5.1 Conclusiones . . . . .	46
5.2 Recomendaciones . . . . .	47
Bibliografía . . . . .	<b>48</b>
Anexos . . . . .	<b>52</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Antena de parche rectangular . . . . .	22
2	Configuraciones de red tipo L . . . . .	25
3	Configuraciones de red tipo P ( $\pi$ ) . . . . .	25
4	Procedimiento de ejecución . . . . .	30
5	Agrupación de antenas 2x1 . . . . .	31
6	Acoplador de impedancia . . . . .	31
7	Circuito rectificador aplicado una carga $R_L$ . . . . .	32
8	Parámetros $S_{11}$ , agrupación 2x1 . . . . .	34
9	Patrón de radiación, agrupación 2x1 . . . . .	34
10	Impedancia $Z_{in}$ , aplicado el acoplador de impedancias . . . . .	35
11	Rendimiento del sistema de tipo rectenna, aplicado el acoplador de impedancias	36
12	Voltaje $V_{out}$ de tres etapas, aplicado el acoplador de impedancias . . . . .	36
13	Circuito doblador de voltaje de una etapa, PIN=-5dBm y C=100pF . . . . .	37
14	Circuito doblador de voltaje de tres etapas, PIN=-5dBm y C=100pF . . . . .	38
15	Implementación Circuito Rectificador . . . . .	40
16	Sistema de recolección de energía de radiofrecuencia propuesto . . . . .	41
17	Voltaje obtenido y nivel de potencia presente en el ambiente, sin presencia de fuentes de radiofrecuencia. . . . .	41
18	Curva Almacenamiento de voltaje, sin presencia de fuentes de radiofrecuencia.	42
19	Voltaje obtenido y nivel de potencia presente en el ambiente, con presencia de fuentes de radiofrecuencia. . . . .	42
20	Curva Almacenamiento de voltaje, con presencia de fuentes de radiofrecuencia.	43
21	Voltaje obtenido y localización del sistema, presencia directa de fuentes de radiofrecuencia . . . . .	43
22	Curva Almacenamiento de voltaje, con presencia directa de fuentes de radiofrecuencia. . . . .	44
23	Voltaje obtenido a través de diferentes marcas de router. . . . .	44
24	Curva Almacenamiento de voltaje, router doméstico frecuencia de 2.45 GHz.	45
25	Test Kruskal-Wallis. . . . .	45
26	Asignación de puerto de alimentación . . . . .	52
27	Antena RMPA . . . . .	53
28	Parámetros optimizados, parche rectangular simple . . . . .	53
29	Parche rectangular simple, aplicado ranuras . . . . .	54
30	Simulación coeficiente de reflexión. Efecto Ranuras . . . . .	54
31	Parche rectangular simple, con 3 ranuras . . . . .	54
32	Parche rectangular simple, aplicado DGS . . . . .	55
33	Simulación del Coeficiente de reflexión. Técnica DGS. . . . .	56
35	Medidas en TXline acoplador de impedancias . . . . .	57
36	Rendimiento diodo HSMS2850 aplicado PIN=-5dBm y C=1pF . . . . .	57
37	Impedancia de entrada, una etapa . . . . .	57

38	Circuito doblador de voltaje de una etapa, $P_{IN}=-5\text{dBm}$ y $C=1\text{pF}$ . . . . .	58
39	Placa PCB . . . . .	58

## ÍNDICE DE TABLAS

1	Características operativas y frecuencias de operación Redes 4G. . . . .	24
2	Fuentes de explotación de radiofrecuencia. . . . .	24
3	Características de diodos Schottky. . . . .	26
4	Operacionalización de variables . . . . .	29
5	Parámetros de evaluación del sistema de captación de energía . . . . .	33
6	Parámetros de rendimiento agrupación 2x1 . . . . .	34
7	Contraste de rendimiento $V_{out}$ con y sin acoplador de impedancia . . . . .	36
8	Contraste de rendimiento doblador de voltaje una etapa. . . . .	38
9	Contraste de rendimiento doblador de voltaje, tres etapas . . . . .	39
10	Contraste de rendimiento aplicado múltiples valores de carga . . . . .	39
11	Eficiencia de conversión . . . . .	40
12	Resultados de voltaje sin presencia directa de fuentes . . . . .	42
13	Resultados de voltaje con presencia de fuentes de RF. . . . .	43
14	Resultados de voltaje con presencia directa de fuentes de RF. . . . .	44
15	Resultados de voltaje a través de la frecuencia de 2.45 GHz. . . . .	45
16	Parámetros referenciales de substratos . . . . .	52
17	Contraste de resultados antena parche rectangular simple . . . . .	53
18	Dimensiones plano de tierra . . . . .	55
19	Dimensiones de la antena . . . . .	55
20	Contraste de rendimiento antena DGS . . . . .	56

## RESUMEN

En este trabajo investigativo se propone e implementa un sistema de recolección de energía de radiofrecuencia ambiental para el acondicionamiento energético de dispositivos IoT con requerimientos de baja densidad de potencia. La estructura del sistema de captación de energía opera dentro de la banda móvil B4 (1700-2100 MHz) con la frecuencia central de 2100 MHz. A través de una agrupación de antenas de parche microstrip de forma rectangular, y mediante el uso de la técnica de estructura de tierra defectuosa DGS, se propone una antena altamente eficiente en términos de ancho de banda y ganancia. La agrupación de antenas y la técnica DGS proporcionan un ancho de banda de 52.87 %, eficiencia de 94.49 %, ganancia de 5.835 dB y desplazamiento frecuencial de 3.757 a 2.113 GHz. El sistema de conversión de energía RF-DC se diseña sobre la base del diodo rectificador Schottky (HSMS2820) con topología circuital de tipo Villard de tres etapas. Según las simulaciones realizadas en el software Advanced Design System (ADS) se alcanza una eficiencia de conversión máxima del 17.48 % con una carga de 10 k $\Omega$  y voltaje de salida de 4.18 Voltios a una potencia de entrada de 10 dBm. El desempeño del sistema de recolección de energía en la captura práctica de datos refleja una tensión de salida de 808 mV en un intervalo de 30 minutos, y a una distancia referente entre la fuente y el dispositivo de aproximadamente 50 metros.

**Palabras clave:** Estructura de tierra defectuosa (DGS), agrupación de antenas, diodo Schottky, eficiencia de conversión.

## ABSTRACT

In this research work, an environmental radiofrequency energy harvesting system is proposed and implemented for the energy conditioning of IoT devices with low power density requirements. The structure of the energy collection system operates within the mobile band B4 (1700-2100 MHz) with a central frequency of 2100 MHz. A highly efficient antenna in terms of bandwidth and gain is proposed through a group of rectangular-shaped microstrip patch antennas and using the technique of faulty ground structure DGS. The antenna array and the DGS technique provide the following percentages, a bandwidth of 52.87%, efficiency of 94.49%, gain of 5,835 dB, and frequency shift of 3.757 to 2.113 GHz. The RF-DC energy conversion system is designed based on the Schottky rectifier diode (HSMS2820) with a three-stage Villard-type circuit topology. According to the Advanced Design System (ADS) software simulations, the maximum conversion efficiency of 17.48% is reached with a load of 10 k $\Omega$  and an output voltage of 4.18 Volts at an input power of 10 dBm. The performance of the energy harvesting system in the practical data capture reflects an output voltage of 808 mV in 30 minutes and at a reference distance between the source and the device of approximately 50 meters.

**keywords:** Defective Ground Structure (DGS), antenna array, Schottky diode, conversion efficiency.



Reviewed by:

Mgs. Lorena Solís Viteri

ENGLISH PROFESSOR

c.c. 0603356783



# Capítulo 1

## 1. Introducción

En la última década, el desarrollo de aparatos y sistemas electrónicos conectados a Internet tales como sensores, redes inteligentes, Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT) [1] se enmarcan como fundamento para la evolución de la sociedad. Sin embargo, es preciso resaltar que en múltiples ocasiones los sistemas electrónicos se encuentran conectados de manera guiada y geográficamente difíciles de alcanzar, por lo que el requerimiento de comunicación y suministro energético pueden significar el 90 % del costo total del sistema, reduciendo su productividad y aprovechamiento [2].

El interés por la explotación de energías de próxima generación (Energy Harvesting) ha incrementado e impuesto desafíos en términos de bajo consumo, términos de carga y reemplazo de suministros de energía basados en uso de baterías [3]. El uso de baterías involucran vida útil limitada y productos químicos que comprometen la integridad del dispositivo y del usuario. Por lo cual en [4],[5] se señala que la gestión de los procesos de carga, descarga y temperatura de operación generan envejecimiento prematuro de baterías propiciado así la sustitución continua de estas. La idea de sustitución de baterías enmarca a Nikola Tesla (1899), quien demostró la posibilidad de la transferencia inalámbrica de energía por medio de ondas de radio [6], logrando así mitigar la utilización de medios guiados para el suministro de energía eléctrica e impulsando técnicas de alimentación inalámbrica WPT (Wireless Powering Transfer) [7].

En este contexto el investigador W. C. Brown en 1964, consigue por primera vez la transferencia inalámbrica de energía, denominando al componente utilizado como rectenna o antena rectificadora [7]. Posteriormente el investigador C. Hannachi, define a las antenas como componentes de captación de energía electromagnética presente en el aire con capacidad de conversión de energía eléctrica a corriente continua mediante la utilización de bandas de frecuencia tales como frecuencias científicas y médicas (ISM) o sistemas de comunicación móvil [8].

Dentro de este marco, las energías inalámbricas han ocupado espacio en el desarrollo de técnicas y métodos de explotación de fuentes de radiofrecuencia. Las fuentes de radiofrecuencia mayormente empleadas son fuentes de explotación de campo lejano (FF-WPT) y fuentes de explotación de campo cercano (NF-WPT) [9], donde NF-WPT a diferencia de FF-WPT cubre extensiones del orden de centímetros con alcance máximo del orden de algunos metros. En consecuencia, NF-WPT presenta niveles de eficiencia superiores respecto a FF-WPT [10], ocasionando que NF-WPT lidere en el ámbito comercial y ante todo posibilite la eliminación de baterías a través de la alimentación de equipos como Powerharvest [11].

## **1.1. Planteamiento del Problema**

### **1.1.1. Problema y Justificación**

El desarrollo de nuevas generaciones de tecnologías proporciona vasto potencial para la divulgación de dispositivos físicos conectados a Internet, por tanto en [12] se expone que para el año 2030 es probable superar los 50 mil millones de dispositivos conectados mundialmente; en donde Europa, América y China imponen la revolución IoT [13]. Ahora bien, la incorporación de mayor número de dispositivos incurre en la necesidad de desarrollo e investigación de nuevas formas de obtención de energía con enfoque económico y ambiental.

En el caso de Europa, debido a una sinergia entre miembros COST Action IC1301, institutos de investigación, grupos de universidades y empresas ostentan como método de alimentación la recolección de energía presente en el entorno; aplicando tecnología de campo cercano, campo lejano y WPT; logrando de esta manera inducir soluciones energéticas en el ámbito médico, académico, automotriz, entre otros [14].

Con relación a la idea anterior, Ecuador exhibe omisión investigativa en temáticas de recolección de energía, puesto que por medio de la literatura se matiza que en el marco de 2018 - 2021 existe una investigación a nivel local desarrollada por docentes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y tres investigaciones a nivel nacional, representando así aplazamiento en el desarrollo científico y tecnológico. Si bien es cierto, Ecuador es un país en proceso de desarrollo, por lo que mediante el programa Ecuador Digital publicado por MINTEL promete la integración y masificación de la red 4G. Fundamentalmente la red 4G se encuentra al 60.7 % de cobertura, de modo que se estima predisponer de avances en el desarrollo de tecnologías como Big Data, industria 4.0, ciudades inteligentes, entre otros [12].

Por consiguiente, se promueve una investigación enfocada en la transición energética; principalmente en la mitigación del uso de baterías en dispositivos IoT, puesto que se percibe que las baterías dependen de fuentes de energía química (contaminante y no renovable), es decir, acarrear tiempo de vida útil limitada y reemplazo del producto que en circunstancias de múltiples dispositivos es una tarea que implica costos y tiempo [15]. Asimismo, se resalta la dificultad existente al momento de un recambio de baterías, pueden encontrarse en lugares de acceso exigente.

En atención al apartado anterior, mediante un sistema de Energy-Harvesting que consiste en la recolección y gestión de energía presente en el ambiente, es posible la aplicación de procedimientos de conversión de energía con objetividad de energizar dispositivos IoT de baja potencia que evidencien autonomía eléctrica y conservación del ambiente [16], [17].

La captación de energía renovable se ha convertido en una solución por dotar vida útil prolongada y ante todo no pretender sustitución, detallando de tal forma el diseño de una Rectenna con capacidad de operación en la Banda B4 (1700-2100 AWS). En virtud de lo descrito se pretende resolver interrogantes como, ¿cuál es el nivel de eficiencia requerido por el sistema de radiofrecuencia para energizar dispositivos IoT de baja potencia?, ¿qué influencia tiene el sistema de recolección de radiofrecuencia en los dispositivos IoT de baja potencia con relación a dimensiones?, ¿es posible un sistema compacto entre la antena y el circuito RF-DC?, ¿es viable que en Ecuador se logre incorporar como método de recolección de energía renovable los sistemas de radiofrecuencia?; todas las interrogantes tendrán razón de respuesta de manera conjunta con el desarrollo del sistema propuesto.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Diseñar un sistema de recolección de energía de radiofrecuencia inalámbrica aplicado a dispositivos IoT de baja potencia mediante la red 4G.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Identificar las formas radiantes de circuitos resonantes para una integración eficiente y compacta con los dispositivos IoT.
- Establecer los procedimientos de recolección de energía inalámbrica vinculado a redes 4G.
- Integrar de forma conjunta y óptima el circuito rectificador RF-DC con el circuito de captación de energía de radiofrecuencia.

# Capítulo 2

## 2. Estado del arte

### 2.1. Antecedentes Investigativos

A través de una inquisición en la literatura se indica que la implementación de antenas rectificadoras para la transmisión de energía inalámbrica no es una tecnología naciente, debido a incursiones realizadas en la década de los 60 por el investigador W.C. Brown, quien expresa que sus primeros experimentos fueron todo un logro con resultados del 50 % en razón de eficiencia y una potencia de salida DC equivalente a 4 W [18]; no obstante, debido a la época, aquellos experimentos acarrearán implicaciones en términos de tamaño y costo. En los últimos años, diversos científicos e investigadores han puesto en práctica una infinidad de teorías y estudios en bandas de radio ISM o bandas de sistemas de comunicaciones móviles, las cuales a causa de la pluralidad de generaciones disponibles han sido foco de investigaciones tanto internacionales como nacionales.

En el contexto de investigaciones internacionales llevadas a efecto en las bandas de radio ISM se enfatiza [19], donde se plantea el diseño de una rectenna de alta eficiencia que opera en la frecuencia central de 2.4 GHz y tiene como finalidad la eliminación de baterías para el correcto funcionamiento de aplicaciones remotas. Dentro de los mecanismos empleados se destaca una antena de tipo parche rectangular de microbanda con pérdidas de retorno de -13 dB y relación de onda estacionaria de voltaje de 1.57 V. En relación con el circuito rectificador emplea un diodo Schottky HSMS2860, como resultados exhibe eficiencia superior al 80 % a una potencia de entrada de 15 dBm, demostrando así factibilidad de uso en aplicaciones de sensores con requisitos de voltaje DC de 1.8 a 2.5 V.

Indistintamente de la frecuencia de operación [20] con respecto a [19] presentan una divergencia relevante en diseño, debido a una incorporación compacta, es decir, en el mismo sustrato se incorpora el sistema de captación radiofrecuencia y el circuito rectificador; diseño que ha permitido alcanzar dimensiones de 24.9 x 8.6 x 1.6 mm<sup>3</sup>. Entre los resultados obtenidos la antena presenta pérdidas de retorno de -25 dB y propiedades de radiación casi simétricas. En lo que respecta a conversión RF-DC, la rectenna a una potencia de entrada baja de -20 dBm obtiene una eficiencia de alrededor del 20 % con una presencia de carga de 4.7 K $\Omega$ .

Referente a las bandas de los sistemas de comunicaciones móviles, en [21] se expone el diseño de una rectenna monopolo en forma de estrella con amplio ancho de banda y operabilidad dentro de aplicaciones GSM. Para la obtención de un amplio ancho de banda (47.58 %)

combina un rombo y un cuadrado; como características de la antena, se destaca el coeficiente de reflexión que figura -30 dB y -15 dB a frecuencias de 900 MHz y 1227 MHz, respectivamente. El sistema de conversión de energía exhibe una configuración de duplicador de voltaje mediante el uso de diodos Schottky HSMS 2850, comprendiendo así un voltaje de salida de 2 V a una potencia de entrada de 0 dBm y una eficiencia de conversión del 61.7 % a 900 MHz.

Por otra parte, en [22] se expresa una antena de microbanda de puerto dual compacta con propiedades de funcionamiento en la banda LTE. Con relación al circuito rectificador, el diodo empleado para la conversión de energía corresponde al diodo Schottky HSMS2852, el cual permite alcanzar niveles de eficiencia del 45 % y 40 % a frecuencias de 1.73 y 2.53 GHz, respectivamente. Dentro de los niveles de salida de voltaje obtenido se tiene 1.1 y 0.5 V.

Seguidamente del compendio de la literatura con enfoque internacional mencionado en apartados anteriores, se comparece aportes investigativos de carácter nacional. A través de [23], se refleja el uso de la técnica de acoplamiento resonante magnético (NF-WPT) mediante el ajuste de dos antenas de rasgos equivalentes con una fuente de energía operable en el rango de frecuencias de 16 a 25 MHz. En cuanto al sistema de conversión empleado corresponde a un rectificador doblador de voltaje compuesto por diodos Schottky que juntamente con el sistema de captación de energía comprende un rendimiento del 31.41 % del voltaje transmitido a una distancia de 10 mm y 18.57 % a una distancia de 100 mm.

Asimismo, se enfatiza la investigación [24], quien da a conocer un sistema de captación de energía electromagnética a través del uso de tres antenas microstrip de parche circular con diferentes frecuencias de operación como son telefonía móvil a 1850 MHz, IMT a 1472.5 MHz y wifi a 2442 MHz. El circuito de rectificación empleado es la cascada de Villard, permitiendo así multiplicar la salida de voltaje en cada etapa y mejorar el rendimiento del sistema; obteniendo resultados de carga sobre un teléfono móvil de 1 h y 27 m. Cabe indicar que esta investigación subraya el aprovechamiento del espectro radioeléctrico y no considera la eliminación de baterías.

## **2.2. Antenas**

De conformidad con el IEEE, una antena es “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [25]. En otras palabras, la antena es la transformación entre un medio dirigido y el espacio libre.

## 2.2.1. Parámetros de una antena en transmisión

### Ancho de Banda

Se define como el margen frecuencial, en donde los parámetros de la antena denotan adaptabilidad con su relación de onda estacionaria, es decir, valores como ganancia, eficiencia, impedancia de entrada, patrón de radiación, polarización son valores aceptables y el parche radiador esta acoplado a la frecuencia de resonancia [26].

Matemáticamente el ancho de banda se calcula aplicando la ecuación:

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

Donde  $f_2$  y  $f_1$  representan la frecuencia superior e inferior y  $f_0$  la frecuencia central de operación.

En antenas microstrip, la manipulación y optimización del ancho de banda se realiza a través de las siguientes consideraciones:

- Emplear dieléctricos de mayor espesor ( $h \uparrow$ ).
- Emplear tamaños y formas diferentes de ranuras.
- Emplear acoplamientos de múltiples resonadores.
- Emplear la técnica de alimentación por proximidad [27].

### Directividad

El término directividad alude a la capacidad que tiene una antena de concentrar la potencia radiada en una dirección particular. La directividad es un marcador de rendimiento muy significativo, es decir, mientras mayor directividad, el haz de radiación es más afilado y la distribución uniforme de potencia radiada es menor [28].

En antenas microstrip, la manipulación y optimización de la directividad se realiza a través de las siguientes consideraciones:

- Emplear un substrato delgado ( $h \downarrow$ ) y de permitividad baja.
- Emplear una agrupación de antenas, cambia la dirección en función de la separación de los elementos radiantes.
- Prevenir las pérdidas por radiaciones laterales (ondas superficiales) [27].



## Ganancia

En [27], precisa la ganancia como la relación entre la directividad y la eficiencia de radiación de la antena. El término ganancia consigna las pérdidas o rendimiento de una antena, y esta definida por:

$$G = \eta * D \quad (2)$$

Donde  $\eta$  representa la eficiencia y D la directividad.

En antenas microstrip, la manipulación y optimización de la ganancia se realiza a través de las siguientes consideraciones:

- Emplear una agrupación de antenas.
- Emplear antenas omnidireccionales, presenta mayor relación delante hacia atrás (F/B).
- Emplear elementos parásitos, metamateriales, parches referenciales, planos de tierra de incrustación vertical, entre otros.

## Patrón de Radiación

El patrón de radiación o diagrama de radiación es la representación gráfica tridimensional de las propiedades de la antena mediante coordenadas espaciales. El patrón de radiación se puede representar en un plano cartesiano y en un plano polar de dos o tres dimensiones. Dentro de las propiedades del patrón de radiación se incluyen factores como intensidad de radiación, directividad, polarización y densidad de flujo de potencia [27].

## Polarización de la antena

La expresión polarización hace referencia a la orientación del campo eléctrico radiado en función del tiempo. En [29], se resalta la importancia de la polarización en los sistemas de radiocomunicaciones, debido a que la polarización de la antena receptora únicamente recepta potencia contenida en el mismo campo coincidente.

- **Polarización lineal**, tiene la capacidad de captar energías de radiofrecuencia de orientación horizontal o vertical.
- **Polarización circular**, tiene la capacidad de captar señales polarizadas tanto circulares como lineales.

## 2.2.2. Parámetros de una antena en recepción

### Área Efectiva

En [30], se define como la relación entre la potencia recibida y la densidad de potencia incidente en una antena. Existe una estrecha relación entre el área efectiva y la ganancia, por lo tanto el área efectiva se calcula aplicando la ecuación:

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad m^2 \quad (3)$$

Donde  $\lambda$  representa la longitud de onda y G la ganancia de la antena.

### Longitud Efectiva

La longitud efectiva de manera implícita está sujeta a la polarización de la onda, es por ello que en una antena de polarización lineal, la longitud efectiva se define como el vínculo entre la tensión inducida en circuito abierto y la intensidad de campo eléctrico en dirección de la polarización de la antena [30].

$$l_{ef}(\theta, \phi) = \frac{|V_{ca}|}{E_i} \quad (4)$$

La longitud efectiva, también variará proporcionalmente al diagrama de radiación del campo.

$$l_{ef}(\theta, \phi) = l_{ef} \sqrt{t(\theta, \phi)} \quad (5)$$

## 2.2.3. Antenas Microstrip

También identificadas como antenas de parche o microcinta, su tecnología se basa en un parche metálico radiador muy delgado sobre un substrato dieléctrico conectado a tierra. Las antenas de parche atribuyen múltiples ventajas como la operabilidad a frecuencias altas, adaptabilidad con circuitos electrónicos, reducidas dimensiones, fabricación sencilla y polivalente a requerimientos de frecuencia, impedancia, patrones de radiación, entre otros [31], [32].

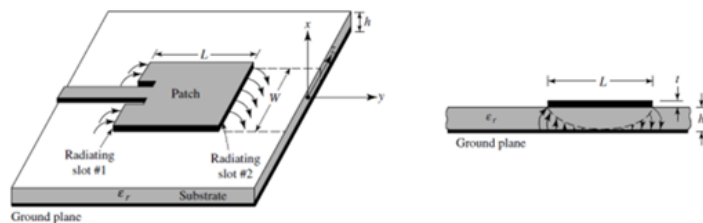


Figura 1: Antena de parche rectangular

### Ancho del parche

Modifica valores de impedancia de entrada, ancho de banda y eficiencia de radiación.

$$W = \frac{C}{2 * f_o} * \sqrt{\frac{2}{Er + 1}} \quad (6)$$

Donde  $W$  representa ancho del parche,  $C$  velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$ ),  $f_o$  frecuencia de operación y  $Er$  constante dieléctrica.

Largo del parche, define la frecuencia de resonancia. Teóricamente se alude que los campos estan encerrados en el parche; sin embargo, en la práctica se evidencia que una proporción de estos campos se encuentran fuera de las dimensiones físicas  $W \times L$ , suscitando al campo de fringe. El efecto de campo fringe se incluye mediante el valor de la constante dieléctrica efectiva  $E_{eff}$ , es decir, la constante dieléctrica  $Er$  a una frecuencia cero [33].

### Constante dieléctrica efectiva

$$E_{eff} = \frac{Er + 1}{2} + \frac{Er - 1}{2} * \sqrt{1 + 12 * \frac{0,1588}{1,186}} \quad (7)$$

### Extensión de longitud

$$\Delta L = (h)0,412 * \frac{(E_{eff} + 0,3)(\frac{W}{h} + 0,264)}{(E_{eff} - 0,258)(\frac{W}{h} + 0,8)} \quad (8)$$

### Longitud del elemento radiador

$$L = \frac{C}{2(f_o)(\sqrt{E_{eff}})} - 2(\Delta L) \quad (9)$$

Las dimensiones del sustrato y plano de tierra estan dadas por:

$$L_s = 6 * h + L \quad (10)$$

$$W_s = 6 * h + W \quad (11)$$

## 2.3. Redes 4G

Conocidas también como redes móviles de cuarta generación. La generación móvil 4G proporciona baja latencia, alta transmisión de datos (100 Mbps - 1Gbps), optimización de paquetes, propagación de radio adaptativa a la migración de redes HSPA a LTE, entre otras mejoras con respecto a generaciones anteriores [34]. Por medio de la Tabla 1 se observa las características operativas y bandas de frecuencia que ofrece la red 4G.

Tabla 1: Características operativas y frecuencias de operación Redes 4G [35].

REDES 4G				
CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS		FRECUENCIAS DE OPERACIÓN		
		Número de banda	Enlace Ascendente MHz	Enlace Descendente MHz
Estándar	3GPP, Release 8	1	1920-1980	2110-2170
Propagación	Tecnología MIMO	2	1850-1910	1930-1990
Movilidad	350km/h a 500km/h	3	1710-1785	1805-1880
Flexibilidad espectral	Time-Division Duplex (LTE-TDD) Frequency Division Duplex(LTE-FDD)	4	1710-1755	2110-2115
Cobertura	5km hasta 30km de radio con mínima degradación	5	824-849	869-894
Tecnologías de multiplexación / acceso	OFDM, MC-CDMA, CDMA	6	830-840	875-885
Ancho de Banda	5 - 40 MHz	7	2500-2570	2620-2690

## 2.4. Recolección de energía

### 2.4.1. Recolección de energía por medio de Radiofrecuencia

Debido al desarrollo en tecnologías de comunicación inalámbrica, la energía procedente de señales de radiofrecuencia como telefonía móvil, wifi, televisión, emisoras de radio, radio transmisores, entre otras; son fuentes de energía de radiofrecuencia de radiación continua baja, es decir, son fuentes apropiadas para sistemas de bajos requerimientos de energía [29], [36].

### 2.4.2. Fuentes de Explotación de Radiofrecuencia

Las fuentes de radiofrecuencia mayormente empleadas son fuentes de explotación de campo lejano (FF-WPT) y fuentes de explotación de campo cercano (NF-WPT) [9].

Tabla 2: Fuentes de explotación de radiofrecuencia [9].

Técnica de transferencia de energía inalámbrica	Región de campo	Propagación	Distancia Efectiva	Aplicaciones
Transferencia de energía de radiofrecuencia	Campo Lejano	Radioactiva	Depende de la distancia, frecuencia y la sensibilidad del recolector de energía (orden de metros y algunos kilómetros)	Sensores de red inalámbricos. Red corporal inalámbrica.
WPT basado en láser	Campo Lejano	Radioactiva	Orden de kilómetros.	Aplicaciones terrestres y basadas en el espacio
Acoplamiento Resonante Inductivo	Campo Cercano	Radioactiva	Orden de pocos milímetros a pocos centímetros.	Tarjetas RFID, carga de teléfonos celulares, tarjetas inteligentes sin contacto.
Acoplamiento Resonante Magnético	Campo Cercano	Radioactiva	Orden de pocos centímetros a pocos metros.	Carga de teléfonos celulares.

## 2.5. Adaptación de Impedancias

### 2.5.1. Red de Adaptación L

Dentro de la aplicabilidad de este tipo de red se encuentra la similaridad de valor óhmico en circuitos de transmisión y recepción de radiofrecuencia [37]. Así mismo, la red tipo L permite la coincidencia de diferentes etapas como la salida de un amplificador y la entrada de una etapa diferente, en la Figura 2 se observa las diferentes configuraciones.

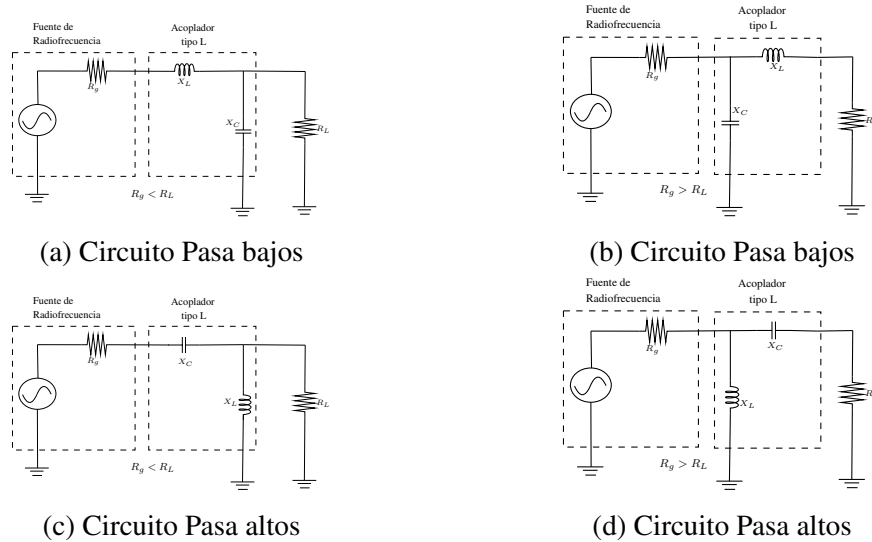


Figura 2: Configuraciones de red tipo L

### 2.5.2. Red de Adaptación P ( $\pi$ )

La red de adaptación  $\pi$  facilita la coincidencia de impedancias entre una fuente de alta impedancia frente a una carga de baja impedancia [38]. El diseño de redes tipo  $\pi$  es considerada como la combinación de dos redes tipo L sucesivas. Este tipo de red presenta dos configuraciones altamente usadas, en la Figura 3 se observa cada configuración.

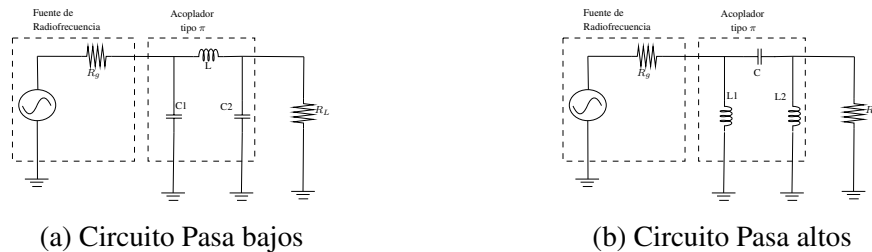


Figura 3: Configuraciones de red tipo P ( $\pi$ )

## 2.6. Convertidor de RF a DC

### 2.6.1. Diodos Rectificadores

Son los componentes electrónicos de rectificación más utilizados, debido a que su función es posibilitar el flujo de corriente en una sola dirección.

#### Diodo Schottky

También conocido como diodo de barrera superficial, es un diodo de unión metal-semiconductor que brinda prestaciones a aplicaciones que requieren altas frecuencias de operación y rápida conmutación. Los diodos Schottky resaltan por una reducida tensión de ruptura, entre 0.15 y 0.4 V, provocando menor pérdida de potencia [39]. En la Tabla 3, se evidencia múltiples características operativas de los diodos Schottky.

Tabla 3: Características de diodos Schottky [40].

Características de diodos					
Parámetros	Símbolo	Unidad	Tipo de diodo		
			HSMS2820	HSMS2850	SMS7630
Voltaje inverso pico máximo repetitivo	$V_{RRM}$	V	15	2	2
Temperatura de almacenamiento	$T_S$	$^{\circ}C$	-65 a +150	-65 a +150	-65 a +150
Temperatura de unión	$T_J$	$^{\circ}C$	150	150	175
Rango de temperatura ambiente de funcionamiento	$T_{amb}$	$^{\circ}C$	-65 a +125	-65 a +150	-65 a +150
Tensión directa	$V_F$	V	0.5 $I_F=10$ mA	0.150 $I_F=0.1$ mA	0.6 $I_F=0.1$ mA
Corriente de fuga	$I_R$	uA	100 $v_R=1$ V		100 $V_R=1$ V
Capacitancia	$C_{TOT}$	pF	1 $V_R=1$ V, F= 1 MHz	0.30 $V_R=0.15$ V, F= 1 MHz	0.3 $V_R=0.15$ V, F= 1 MHz

### 2.6.2. Multiplicador Rectificador

Tiene el potencial de brindar soluciones a la baja intensidad de señal recibida. Por medio de este tipo de circuitos es posible aumentar el voltaje al nivel requerido para una acertada operatividad de la carga. En sistemas de recolección de energía, el rendimiento depende de la eficiencia de conversión, sensibilidad del rectificador, elección del diodo, topología y tipo de multiplicador de tensión [29].



### **Circuito Villard**

Esta conformado por dos capacitores y dos diodos por etapa. La funcionalidad del circuito de Villard es semejante a un arreglo de baterías en cascada, dado que cada etapa esta conectada en serie [39].

El cálculo del valor de voltaje de salida  $V_{out}$  para  $n$  etapas se obtiene mediante la ecuación:

$$V_{out} = \frac{nV_i}{nR_i + R_L} \quad (12)$$

Donde  $n$  representa el número de etapas,  $V_i$  el voltaje de circuito abierto,  $R_i$  la resistencia interna de una etapa y  $R_L$  la carga.

### **Circuito Greinacher**

Básicamente modifica el multiplicador de tensión de Villard y lo convierte en un rectificador multiplicador de onda completa con potestad de brindar equilibrio a las corrientes de salida y proporcionar a la carga un voltaje constante [29], [41]. El voltaje de salida  $V_{out}$  del circuito esta dado por:

$$V_{out} = 2nV_p \quad (13)$$

Donde  $n$  representa el número de etapas y  $V_p$  la amplitud pico del voltaje de entrada.

### **Circuito Dickson**

Consta de dos diodos y dos capacitores por etapa. A diferencia del circuito Villard, Dickson presenta la configuración del capacitor en forma paralela para cada etapa, lo cual reduce la impedancia del circuito y permite que la adaptación de impedancia sea más simplificada [29]. El voltaje de salida  $V_{out}$  del circuito esta dado por:

$$V_{out} = n(V_p - V_f) \quad (14)$$

Donde  $n$  representa el número de etapas,  $V_p$  la amplitud pico del voltaje de entrada y  $V_f$  la caída de tensión directa en la unión del diodo.

# Capítulo 3

## 3. Metodología de la Investigación

### 3.1. Métodos, Tipos, Técnicas e Instrumentos de investigación

#### 3.1.1. Método de Investigación

Se pretende un registro bibliográfico y documental, encaminado en la recolección de información y simulación del sistema. En cuanto a los métodos a utilizar se usa una investigación deductiva, debido a que describe las diferentes fases de desarrollo del sistema; adicionalmente se emplea el método analítico que inicia con una distinción particular de la estructura del modelo.

#### 3.1.2. Tipo de Estudio

Se efectúa dos tipos de estudio: experimental y explicativo. Experimental por el diseño y práctica de un sistema de recolección de energía de radiofrecuencia, y a su vez explicativo por especificar y dar a conocer los procesos y resultados de la investigación.

#### 3.1.3. Técnicas e Instrumentos

Dentro de los instrumentos a utilizarse concierne software de diseño y simulación (CST Studio Suite, Advanced Design System), software de cálculo MATLAB, software de procesamiento de textos (TexMaker) y software de diseño electrónico (Proteus).

### 3.2. Población y Muestra

#### 3.2.1. Población

La población en estudio está definida por los datos recaudados del sistema de recolección de energía, considerando (N) mediciones de potencia electromagnética presente en el entorno y ante toda cobertura de red 4G disponible. Estas mediciones se llevan a cabo en diferentes localidades para afianzar los datos y variaciones existentes.

### 3.2.2. Muestra

La muestra se determina de forma no probabilística, es decir, se define en función de una limitación de potencia de recepción del producto desarrollado. De aquí se adquiere información necesaria para la valoración de rendimiento del sistema desarrollado.

### 3.3. Fuentes de Información

Como base de datos se describe fuentes electrónicas (ScienceDirect, IEEE, ResearchGate, Scopus, entre otras), revistas científicas (IEEE Power and Energy Society), documentos audiovisuales, conferencias y sociedades científicas con publicación dentro de los últimos 4 años.

### 3.4. Operacionalización de Variables

Todos los elementos empleados contribuyen para la ejecución del proyecto, por lo tanto se utiliza variables que se evidencian en la Tabla 4, mismas que se llevan a cabo para comprobar la hipótesis de que los sistemas de recolección de energía de radiofrecuencia tienen la capacidad de energizar dispositivos IoT sin la necesidad de recurrir a baterías.

Tabla 4: Operacionalización de variables

Variable	Abstracción	Indicadores	Técnicas e Instrumentos
<b>Independiente</b>			
Desempeño del sistema de recolección de energía de radiofrecuencia.	Combinación de una antena receptora y un circuito rectificador, con capacidad de convertir energía de radiofrecuencia en energía eléctrica de corriente continua.	Parámetros de la antena. (S11, ganancia, ancho de banda, entre otros.)	Software CST Studio
		Conjunto de datos.	Software MATLAB
		Circuito electrónico de RF (Voltaje).	Advanced Design System
Incidencia de los niveles de energía electromagnética presente en el ambiente.	Cantidad de energía almacenada en una región, la cual genera un campo electromagnético gracias a campos eléctricos y magnéticos.	Rangos de niveles de señal (dBm).	App NetMonitor

Variable	Abstracción	Indicadores	Técnicas e Instrumentos
<b>Dependiente</b>			
Los dispositivos IoT pueden ser energizados sin necesidad de baterías.	Conexión de la red de redes con objetos, los cuales facultan la compartición de información y disminución del esfuerzo humano.	Niveles de diferencia de potencial.	Multímetro
		Niveles de rectificación.	Osciloscopio

### 3.5. Procedimiento y Análisis

A través de la Figura 4 se indica una sucesión de procesos especificados en 4 etapas fundamentales e ineludibles que en su totalidad proporcionan un análisis organizado y primordialmente alcanzable con respecto a los objetivos formulados.

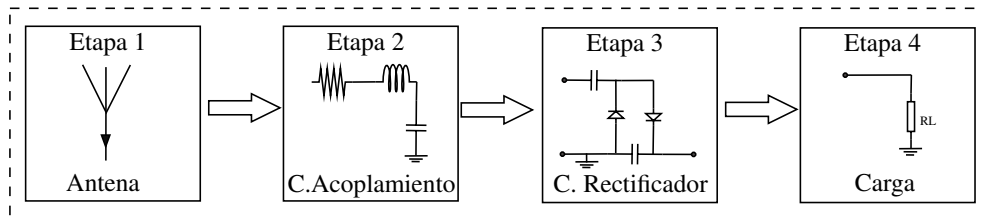


Figura 4: Procedimiento de ejecución

#### 3.5.1. Diseño del Sistema de Transmisión Inalámbrica

Para la recolección de energía de radiofrecuencia se integró el desarrollo de antenas microstrip mediante la manipulación de radiadores de geometría rectangular con características de operación dentro de la banda móvil B4 (1700-2100) MHz.

La fase inicial de diseño del sistema de transmisión inalámbrica es la fijación de un sustrato que proporcione el soporte eléctrico y mecánico. La elección del sustrato hace mención a parámetros como la constante dieléctrica  $\epsilon_r$ , tangente de pérdidas  $\delta$ , espesor del sustrato  $h$  y ante todo accesibilidad comercial. (Ver Anexo I).

##### Agrupación de antenas 2x1

El diseño del sistema de captación de energía se realiza sobre la base de [42], en donde se precisa una antena de tipo parche rectangular (RMPA). La aplicación de ranuras hace referencia a [43], donde se expresa las variaciones paramétricas de la antena en función del emplazamiento de la ranura. De igual manera, la definición del número de slots y plano DGS hace referencia a trabajos investigativos [44], [45].

La agrupación de antenas se establece mediante la unión de parches en paralelo a una distancia  $d$ , equivalente a  $\lambda/3$  entre los centros geométricos de la antena de parche. Con el diseño de arreglos se pretende incrementar el valor de la ganancia. En la Figura 5 se observa la agrupación de antenas y la manipulación del plano de tierra. (Ver Anexos VI-VIII).

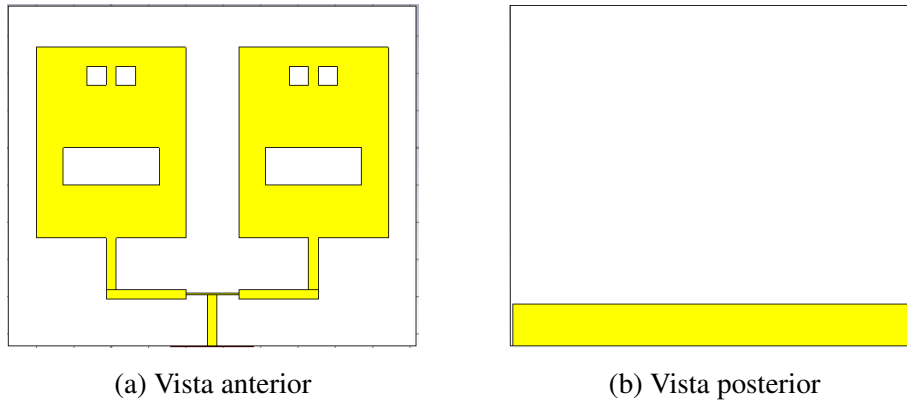


Figura 5: Agrupación de antenas 2x1

### 3.5.2. Diseño del Circuito de Acoplamiento

El diseño del circuito de acoplamiento se realiza mediante la configuración de red tipo L fundamentada en líneas microstrip dado que los componentes electrónicos disipan energía en forma de calor, generando pérdidas y decadencia del rendimiento [37], [46]. El acoplador de impedancias esta formado por stubs en circuito abierto y stubs en cortocircuito, donde el stub de cortocircuito se conecta al doblador de tensión, y el stub de circuito abierto se reorienta a través de la fuente de alimentación de la entrada; información adicional ver el Anexo X.

Dentro de los datos de partida se expone la impedancia de entrada de la fuente  $Z_{in} = 50 \Omega$ , impedancia de entrada del circuito doblador de tensión  $Z_{in} = (2.962 - j39.593)$ , frecuencia de operación  $f_o = 2.1 \text{ GHz}$  y características de la placa pcb FR4 Epoxy, detallado en la Tabla 16.

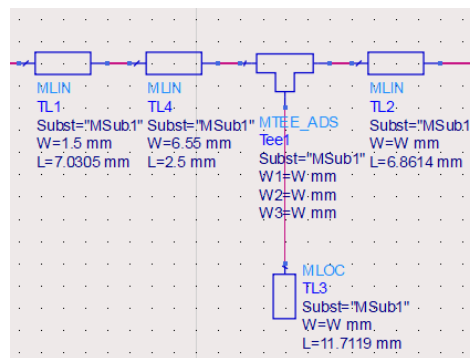


Figura 6: Acoplador de impedancia

### 3.5.3. Diseño del Circuito Rectificador

El diseño de esta etapa induce el análisis de componentes electrónicos, selección de topologías y fijación del número de etapas necesarias para la alimentación de la carga. La elaboración del sistema rectificador se fundamenta en [39], [47], [48].

Para el desarrollo y simulación del sistema rectificador se hace uso del software Advance Design System (ADS), mediante el cual se fija los componentes pasivos y activos necesarios. El componente activo a utilizarse es el diodo Schottky HSMS 2820. Se plantea incorporar un circuito de tres etapas, puesto que el circuito de Villard proyecta escalabilidad y simplicidad en la integración de  $n$  número de etapas.

### 3.5.4. Carga

Se contempla múltiples pruebas de carga  $R_L$ , en donde  $R_L$  esta sujeta a rangos desde  $100 \Omega$  hasta  $2 M\Omega$ . Se incorpora un condensador de derivación  $C7$  que minimiza la respuesta transitoria de la señal de salida  $V_{out}$ , y proporciona una señal casi unitaria. La determinación del condensador de derivación se realiza mediante la ecuación:

$$C_{Dc} = \frac{1}{2\pi R_L f_o} \quad (15)$$

En la Figura 7 se observa el sistema multiplicador rectificador aplicado todas las fases para la recolección de energía.

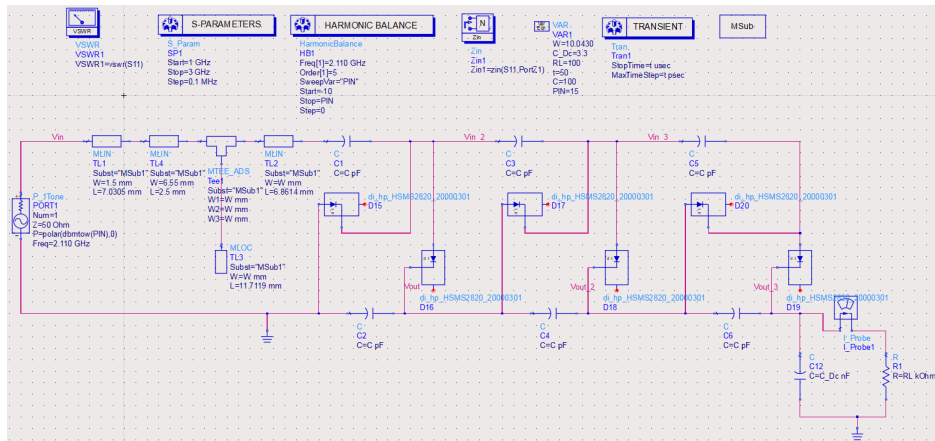


Figura 7: Circuito rectificador aplicado una carga  $R_L$

Se lleva a cabo evaluaciones de eficiencia de conversión del sistema mediante la ecuación:

$$n = \frac{P_{out}}{PIN} * 100 \% \quad (16)$$

Donde  $P_{out}$  representa la potencia DC de salida y PIN la potencia de entrada. Para la obtención de  $P_{out}$  se aplica la ecuación:

$$P_{out} = \frac{(V_{out} Dc)^2}{R_L} \quad (17)$$

Donde  $V_{out} Dc$  representa el voltaje DC de salida y  $R_L$  la resistencia de carga.

# Capítulo 4

## 4. Resultados y Discusión

Los resultados expuestos están orientados en función del apartado 3.5, en donde se da inicio con la etapa de diseño del sistema de captación de energía y se concluye con la etapa de pruebas de carga. El análisis de resultados en un inicio se expone de modo singular; sin embargo, al tratarse de un proceso secuencial, en la última etapa se refleja un resultado colectivo.

### 4.1. Resultados del Sistema de Captación de Energía

Dentro de este marco se analizará, comparará y deliberará los resultados obtenidos sobre el diseño propuesto en la sección 3.5.1. Los resultados de evaluación responden a la Tabla 5, mismos que serán expuestos por medio de ilustraciones gráficas y tablas de registro.

Tabla 5: Parámetros de evaluación del sistema de captación de energía

Parámetro de evaluación del sistema de captación de energía		Magnitud
Coefficiente de reflexión	$S_{11}$	$dB$
Impedancia de entrada	$Z_o$	$\Omega$
Relación de onda estacionaria de voltaje	$VSWR$	-----
Directividad, Ganancia	$D, G$	dBi, dB
Eficiencia	$\eta$	-----
Ancho de banda	$AB$	%
Factor físico, tamaño de la antena	$W * L$	mm

#### Agrupación de antenas 2x1

A través de la Figura 8 se observa que las pérdidas de retorno a la frecuencia de 2.113 GHz presenta un valor pico de -32.89 dB y un ancho de banda aproximado de 52.87 % de la frecuencia de operación, aportando así un incrementado de 0.80 % con respecto a la antena de parche rectangular simple aplicado DGS.

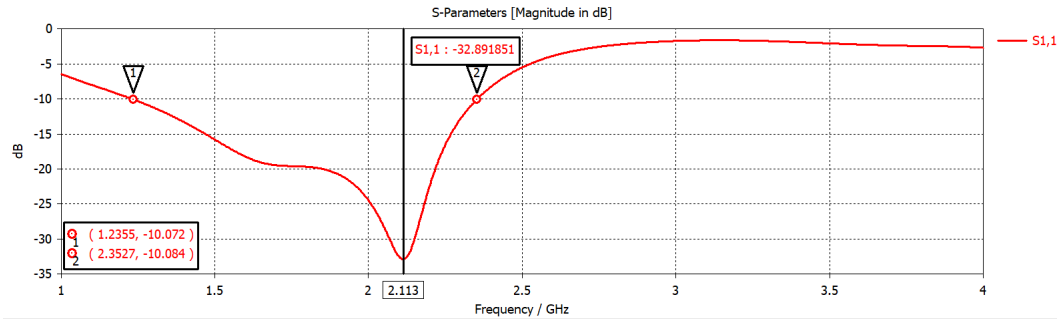


Figura 8: Parámetros  $S_{11}$ , agrupación 2x1

En lo que refiere a patrones de radiación, en la Figura 9 se observa un patrón de radiación omnidireccional para el plano superior e inferior de la antena; producto de la manipulación del plano de tierra. Se muestra un valor de ancho de haz principal de  $63^\circ$  para  $\Phi=90^\circ$ .

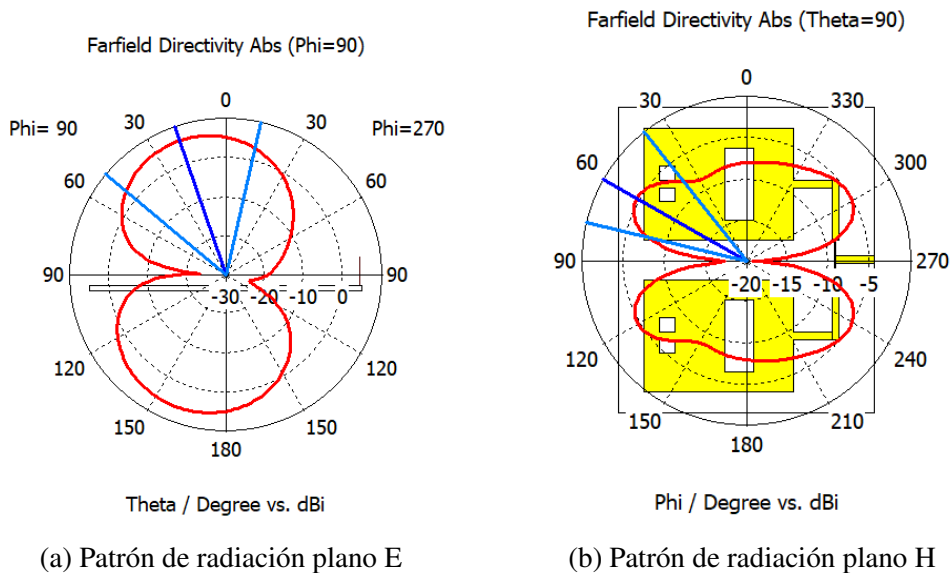


Figura 9: Patrón de radiación, agrupación 2x1

Por intermedio de la Tabla 6, se precisa todos los parámetros de evaluación.

Tabla 6: Parámetros de rendimiento agrupación 2x1

Rendimiento Agrupación 2x1			
Parámetros de evaluación	Valor	Parámetros de evaluación	Valor
Frecuencia	2.113 GHz	AB	52.87 %
$S(1,1)$	- 32.89 dB	Directividad	6.175 dBi
$Z(1,1)$	50.02 $\Omega$	Ganancia	5.835 dB
VSWR	1.04	Eficiencia	94.49 %
Dimensión	109.12x91.30 mm		



## Resumen

La agrupación de antenas cumple con el requerimiento de obtener una ganancia superior a 5 dB, conservando tanto el ancho de banda como la frecuencia de resonancia próxima a 2.1 GHz. Además, se señala que mientras los parámetros S11 sean inferiores a -20 dB y el VSWR no supere el valor numérico de 2; el valor de ganancia no experimenta cambios abruptos.

## 4.2. Resultados del Circuito de Acoplamiento

En la Figura 10 se observa el valor de impedancia de entrada que adquiere el sistema luego de incorporar el acoplador de impedancias. Se expresa una impedancia de entrada  $Z_{in} = (50.572, -j1.517) \Omega$ , y frecuencia de operación a 2.110 GHz, es decir, el circuito acoplador de impedancias es funcional y presenta valores circundantes a lo requerido.

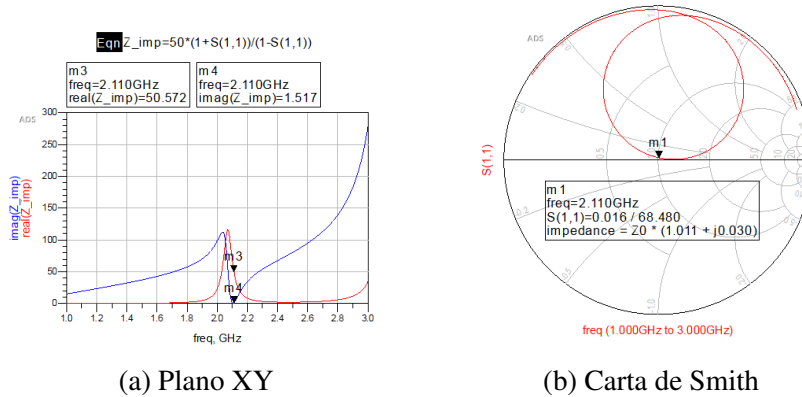
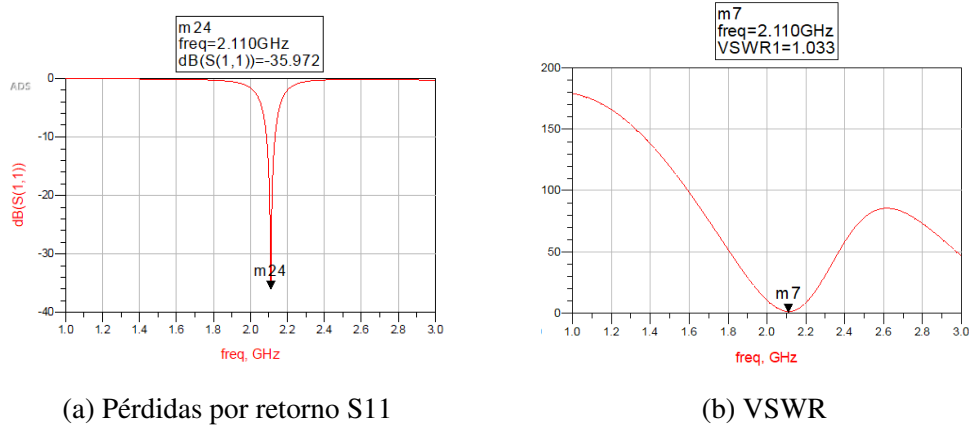


Figura 10: Impedancia  $Z_{in}$ , aplicado el acoplador de impedancias

A través de la Figura 11 apartado (a), se analiza los parámetros de pérdidas por retorno S11, obteniendo valores de -35.972 dB a una frecuencia de 2.110 GHz. En el apartado (b), se observa el valor de relación de onda estacionaria de voltaje  $VSWR=1.033$ .



(a) Pérdidas por retorno S11 (b) VSWR

Figura 11: Rendimiento del sistema de tipo rectenna, aplicado el acoplador de impedancias

En la Figura 12 se observa el valor de voltaje de cada una de las tres etapas implementadas, con una potencia de entrada PIN= -5dBm y valor  $V_{out3}=1.597$  V.

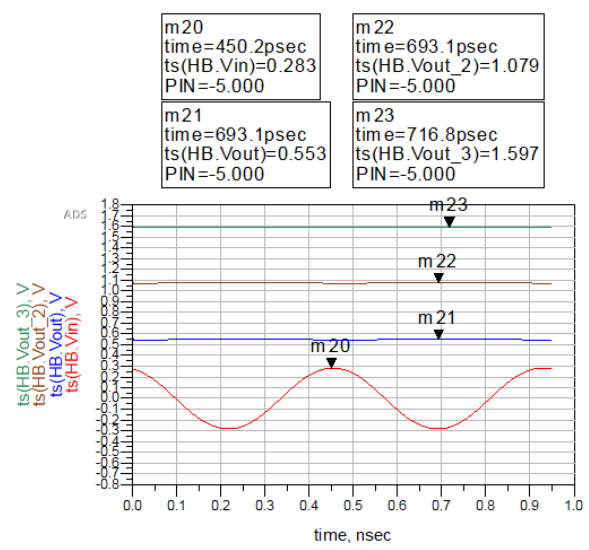


Figura 12: Voltaje  $V_{out}$  de tres etapas, aplicado el acoplador de impedancias

Tabla 7: Contraste de rendimiento  $V_{out}$  con y sin acoplador de impedancia

Contraste de rendimiento $V_{out}$					
PIN (dBm)	Número de Etapas	Sin acoplador		Con acoplador	
		$V_{in}$	$V_{out}$	$V_{in}$	$V_{out}$
-5	1	0.228 mV	0.406 mV	0.283 mV	0.553 mV
	2	0.144 mV	0.552 mV	0.518 mV	1.079 V
	3	0.104 mV	0.485 mV	1.047 V	1.597 V
0	1	0.422 mV	0.793 mV	0.520 mV	0.879 V
	2	0.273 mV	1.214 V	0.807 V	1.722 V
	3	0.196 mV	1.141 V	1.652 V	2.553 V

## Resumen

Concretizando los resultados puestos en manifiesto en la Figura 12 y la Tabla 7, se concluye que el circuito acoplador de impedancias proporciona óptima transferencia de energía, por lo que el sistema brinda operatividad a potencias de entrada  $PIN=-5$  dBm.

### 4.3. Resultados del Circuito de Rectificación

En esta sección se analiza, evalúa y delibera los resultados obtenidos sobre el diseño propuesto en la sección 3.5.3. Para la obtención de resultados se asigna parámetros iniciales estáticos de impedancia de entrada  $Z_{in}=50 \Omega$ , frecuencia de operación  $F=2.1$  GHz, y parámetros variables para la potencia de entrada  $PIN$ ,  $C1$  y  $C2$ . Se utiliza herramientas de análisis como Transient, Harmonic Balance y  $Z_{in}$ .

#### Resultados $PIN=-5$ dBm, $C1-C2=100$ pF

En la Figura 13 se observa los valores de voltaje obtenido, donde  $V_{in}$  tiene un valor de 0.228 mV y el voltaje  $V_{out}$  tiene un valor de 0.405 mV. Conforme con la teoría, el resultado de voltaje de salida es el doble de la entrada; sin embargo, en la práctica no se cumple debido a que el sistema presenta pérdidas.

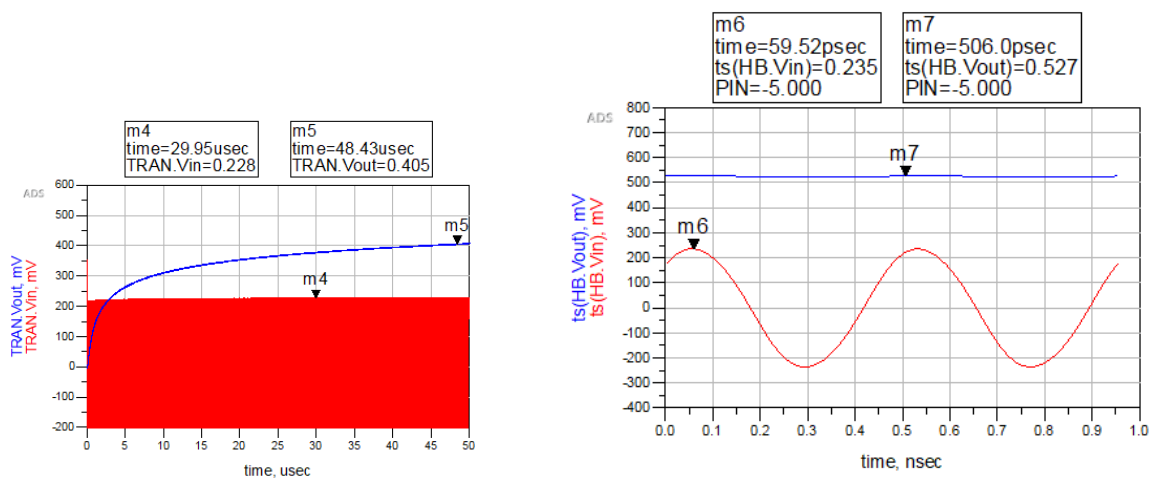


Figura 13: Circuito doblador de voltaje de una etapa,  $PIN=-5$ dBm y  $C=100$ pF

## Resumen

De acuerdo con los resultados se concluye que colocar un capacitor de valor alto mejora los tiempo de carga y descarga, por lo que el circuito doblador de voltaje mejora en rendimiento.

La utilización de un capacitor de valor pequeño y una potencia de entrada de  $-5$ dBm no es favorable para el circuito doblador de voltaje, es decir, existe rápida carga y descarga del capacitor. De igual manera se hace mención al diodo rectificador, debido a que al

reemplazar por el diodo HSMS2850 el rendimiento es mejor, en el Anexo III se observa dichos resultados.

### Contraste de rendimiento mediante la manipulación de PIN, C1-C2

A través de la Tabla 8 se evalúa la repercusión generada al manipular las variables PIN, C1 y C2. Dentro de los resultados obtenidos se subraya que el capacitor influye en la impedancia de entrada del circuito doblador, mientras que la PIN es irrelevante para la impedancia.

Tabla 8: Contraste de rendimiento doblador de voltaje una etapa.

Contraste de rendimiento doblador de voltaje una etapa					
Variables		$Z_{in}$ real ( $\Omega$ )	$Z_{in}$ imag	$V_{in}$ (mV)	$V_{out}$ (mV)
PIN (dBm)	C1-C2 (pF)				
-5	1	3.204	-j126.447	0.331	0.256
	47	2.962	-j40.645	0.231	0.372
	100	2.962	-j39.593	0.228	0.405
	150	2.963	-j39.282	0.223	0.313
0	1	3.204	-j126.447	0.558	0.495
	47	2.962	-j40.645	0.430	0.829
	100	2.962	-j39.593	0.422	0.793
	150	2.963	-j39.282	0.419	0.769

Asimismo, es necesario destacar que el diodo rectificador HSMS 2820 presenta limitaciones a potencias de entrada inferiores a -5dBm por lo que se atribuye mejor funcionamiento a potencias que sobrepasen 0 dBm.

### Circuito doblador de voltaje de tres etapas.

Como se observa en la Figura 14 el resultado de la simulación presenta un voltaje  $V_{in}$  de 0.104 mV y un voltaje  $V_{out3}$  de 0.488 mV, es decir, existe una diferencia significativa con respecto al circuito doblador de una etapa y no da cumplimiento al triple de voltaje de salida teórico.

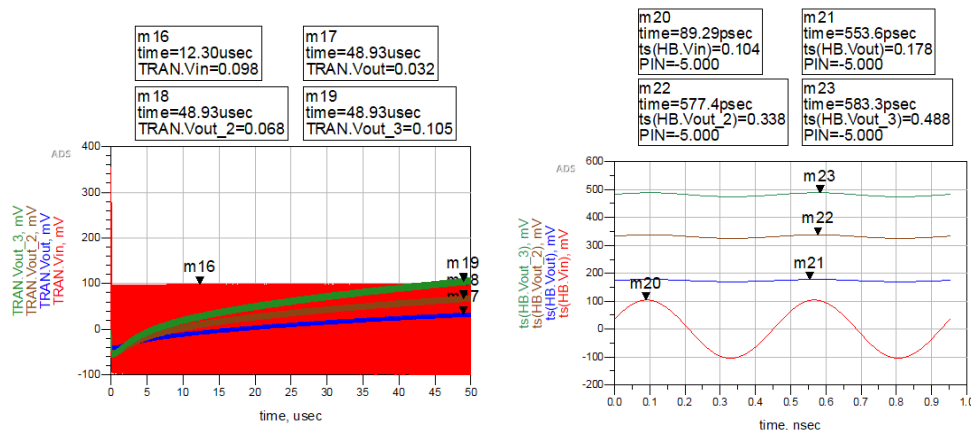


Figura 14: Circuito doblador de voltaje de tres etapas, PIN=-5dBm y C=100pF

Mediante la Tabla 9 se evidencia la variación de impedancia y valor de tensión para cada etapa. En donde, a mayor número de etapas el valor de impedancia es menor, y el valor de potencia de entrada  $V_{in}$  presenta considerable decremento, por lo que se establece como tres al valor  $n$  máximo de etapas.

Tabla 9: Contraste de rendimiento doblador de voltaje, tres etapas

Contraste de rendimiento doblador de voltaje de tres etapas						
Etapas	PIN (dBm)	C1-C2 (pF)	$Z_{in}$ real ( $\Omega$ )	$Z_{in}$ imag	$V_{in}$ (mV)	$V_{out}$ (mV)
1	-5	100	2.96	-j39.59	0.228	0.406
2			1.48	-j20.71	0.144	0.552
3			0.987	-j14.72	0.104	0.485
1	0	100	2.96	-j39.59	0.422	0.793
2			1.48	-j20.71	0.273	1214
3			0.98	-j14.72	0.196	1141

#### 4.4. Resultados Pruebas de Carga

En la Tabla 10 se exhibe los resultados obtenidos del sistema multiplicador rectificador sometido a múltiples valores de carga  $RL$  y potencia de entrada  $PIN$ . En función de los resultados y requerimientos de voltaje  $V_{out}$  para la alimentación de dispositivos IoT, se establece como carga ideal valores entre  $100\text{ k}\Omega$  y  $1\text{ M}\Omega$ , puesto que valores superiores a  $1\text{ M}\Omega$  aportan reducido incremento en  $V_{out}$ .

Tabla 10: Contraste de rendimiento aplicado múltiples valores de carga

Contraste de rendimiento aplicado múltiples valores de carga									
PIN (dBm)	Carga $\Omega$	Corriente (mA)	$V_{in}$ (mV)	$V_{out}$ (mV)	PIN(dBm)	Carga $\Omega$	Corriente (mA)	$V_{in}$ (mV)	$V_{out}$ (mV)
-5	100	0.0443	194	4.40	10	100	1.275	1332	128
	1k	0.0406	195	40.68		1k	0.9312	1347	931.2
	10k	0.0281	201	281.42		10k	0.4151	1449	4181
	100K	0.0077	226	779.75		100k	0.0525	1609	5260
	1M	0.0011	253	1130.00		1M	0.0054	1631	5474
	2M	0.0005	259	1190.00		2M	0.0027	1633	5520
	100	0.1977	392	19.78		15	100	2.9400	2402
1k	0.1778	394	177.7	1k	1.8208		2511	1821	
10k	0.1027	412	1027	10k	0.7098		2621	7098	
100K	0.0186	470	1864	100k	0.0819		2855	8197	
1M	0.00212	498	2128	1M	0.0084		2879	8427	
2M	0.00109	503	2185	2M	0.0042		2879	8476	
0	100	0.1977	392	19.78	15		100	2.9400	2402
1k	0.1778	394	177.7	1k		1.8208	2511	1821	
10k	0.1027	412	1027	10k		0.7098	2621	7098	
100K	0.0186	470	1864	100k		0.0819	2855	8197	
1M	0.00212	498	2128	1M		0.0084	2879	8427	
2M	0.00109	503	2185	2M		0.0042	2879	8476	

Asimismo, se realiza una valoración de los niveles de corriente, mismos que se encuentran en el orden de micro y miliamperios, esto en efecto de que una carga  $RL$  alta disminuye el flujo de corriente que atraviesa por ella.

En apartados anteriores se menciona que la carga ideal se encuentra en el rango de  $100\text{ k}\Omega$  y  $1\text{ M}\Omega$ ; sin embargo, si se realiza un análisis con relación a la eficiencia, el valor de carga  $R_L$

ideal corresponde a  $10\text{ k}\Omega$  por su alta eficiencia de conversión de  $17.48\%$  a una potencia de entrada  $PIN$  de  $10\text{ dBm}$ .

Tabla 11: Eficiencia de conversión

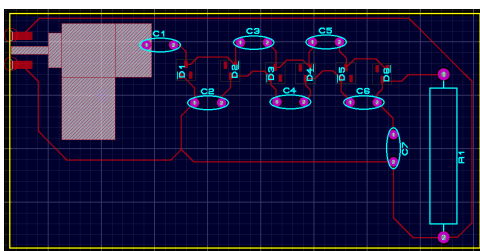
PIN dBm	Eficiencia %					
	100 $\Omega$	1 k $\Omega$	10 k $\Omega$	100 k $\Omega$	1 M $\Omega$	2 M $\Omega$
-5	0,06	0,52	2,51	1,92	0,40	0,22
0	0,39	3,16	10,55	3,47	0,45	0,24
10	1,64	8,67	17,48	2,77	0,30	0,15
15	2,73	10,49	15,93	2,12	0,22	0,11
20	3,72	12,05	13,41	1,61	0,17	0,08

### Resumen

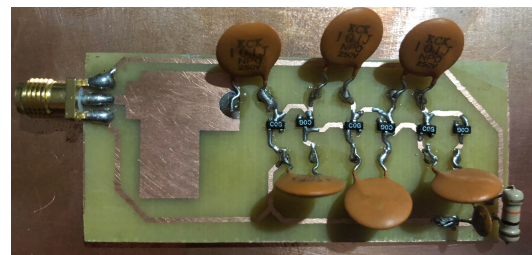
Se hace hincapié en la importancia de la carga  $R_L$ , debido a que la fijación de la carga es directamente proporcional al valor de voltaje  $V_{out}$ , es decir, mientras mayor es el valor de la carga, mayor es el valor de voltaje  $V_{out}$  obtenido. De igual forma, se relaciona la carga con la eficiencia de conversión, dado que si la carga  $R_L$  es muy alta, la eficiencia de conversión es menor, por lo tanto la selección de la carga  $R_L$  debe ser compensatoria tanto para el voltaje  $V_{out}$  como para la eficiencia  $\eta$ .

### 4.5. Elaboración del Circuito Rectificador Propuesto

El diseño de las pistas que interconecta los componentes tiene un ancho T30 que corresponde a  $0.762\text{ mm}$ . En la Figura 15 se observa el Layout del circuito diseñado versus la placa fabricada.



(a) Layout Proteus



(b) Circuito RF-DC propuesto

Figura 15: Implementación Circuito Rectificador

## 4.6. Sistema de Recolección de Energía de Radiofrecuencia Propuesto

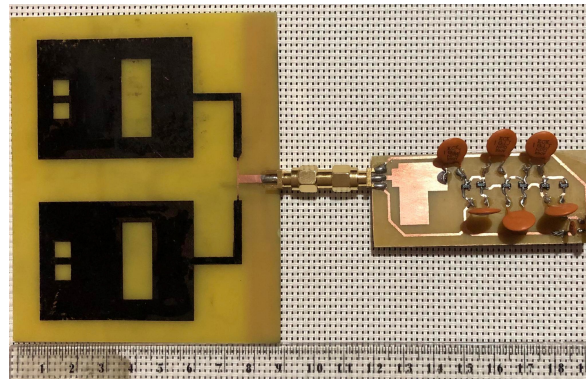


Figura 16: Sistema de recolección de energía de radiofrecuencia propuesto

## 4.7. Resultados Pruebas de Campo

La fijación de zonas de experimentación y pruebas del sistema se realiza sobre la base de [49],[50], donde se evidencia mapas de cobertura, número de radiobases, evolución de radiobases por operadora, entre otros. Dentro de los instrumentos para la ejecución de las pruebas de campo se emplea multímetro, router (TP-LINK, Nebula 3000), protoboard, capacitores.

### Prueba 1. Sin presencia directa de fuentes

Se realiza un test de funcionamiento del sistema en un ambiente sin presencia directa de fuentes de radiofrecuencia. A través de la Figura 17 y Tabla 12 se verifica el voltaje  $V_{out}$  obtenido y la calidad de señal presente en el ambiente. La frecuencia de operación corresponde a la banda B4 (1700-2100) MHz.

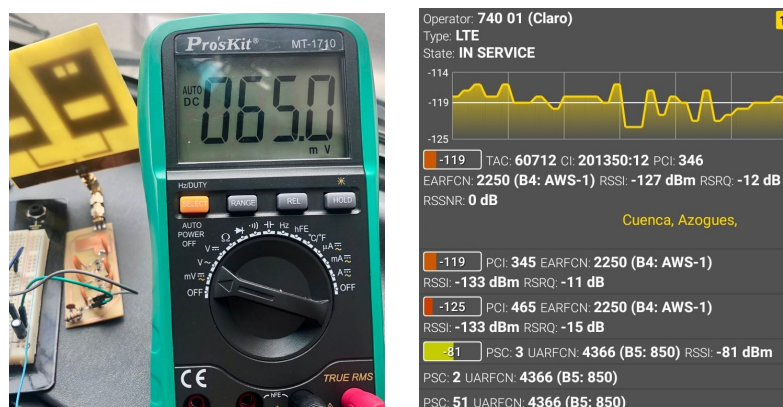


Figura 17: Voltaje obtenido y nivel de potencia presente en el ambiente, sin presencia de fuentes de radiofrecuencia.

Tabla 12: Resultados de voltaje sin presencia directa de fuentes

Ambiente	Almacenamiento Capacitor (uF)	Tiempo de carga (min)	Voltaje de salida (mV)
Calzada Calle Urbana	470	30	13.14
	220		21.22
	100		65.0

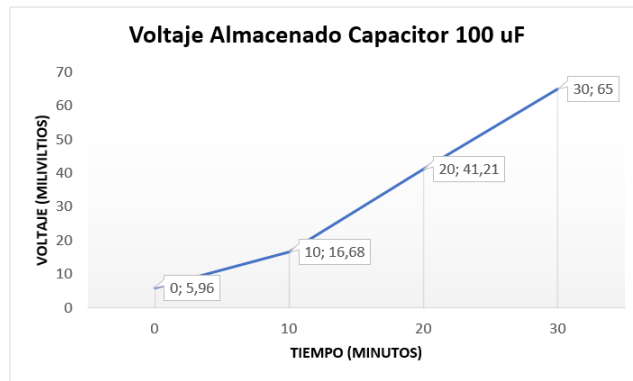


Figura 18: Curva Almacenamiento de voltaje, sin presencia de fuentes de radiofrecuencia.

### Prueba 2. Con presencia de fuentes de radiofrecuencia.

Se realiza un test de funcionamiento del sistema en un ambiente con presencia de fuentes de radiofrecuencia. A través de la Figura 19 y Tabla 13 se verifica el voltaje  $V_{out}$  obtenido y la calidad de señal presente en el ambiente. La frecuencia de operación corresponde a la banda B4 (1700-2100) MHz, y la distancia entre la fuente y el sistema de recolección de energía es aproximadamente 15 metros.

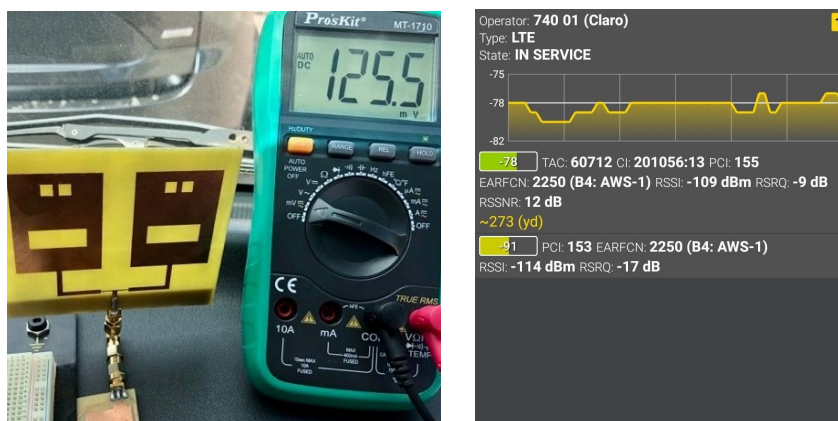


Figura 19: Voltaje obtenido y nivel de potencia presente en el ambiente, con presencia de fuentes de radiofrecuencia.



Tabla 13: Resultados de voltaje con presencia de fuentes de RF.

Ambiente	Almacenamiento Capacitor (uF)	Tiempo de carga (min)	Voltaje de salida (mV)
Calzada Calle Urbana Distancia aproximada 15 metros	470	30	23.75
	220		41.21
	100		125.5

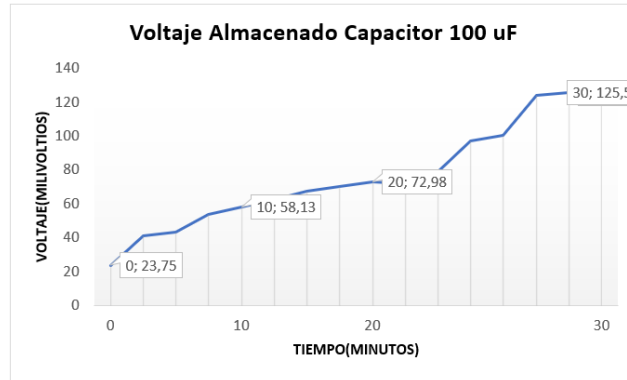


Figura 20: Curva Almacenamiento de voltaje, con presencia de fuentes de radiofrecuencia.

### Prueba 3. Con presencia directa de fuentes de radiofrecuencia.

Se realiza a una distancia aproximada de 50 metros con respecto a las fuentes de radiofrecuencia móvil (antenas sectoriales), y ubicación del sistema a una altitud aproximada de 15 metros. A través de la Figura 21 y Tabla 14 se verifica el voltaje  $V_{out}$  obtenido.



Figura 21: Voltaje obtenido y localización del sistema, presencia directa de fuentes de radiofrecuencia

Tabla 14: Resultados de voltaje con presencia directa de fuentes de RF.

Ambiente	Almacenamiento Capacitor (uF)	Tiempo de carga (min)	Voltaje de salida (mV)
Vista directa Distancia aproximada 50 metros	470	5	19.19
	220		47.8
	100		129.00
Altitud aproximada 15 metros	470	30	111.8
	220		532.00
	100		808.00

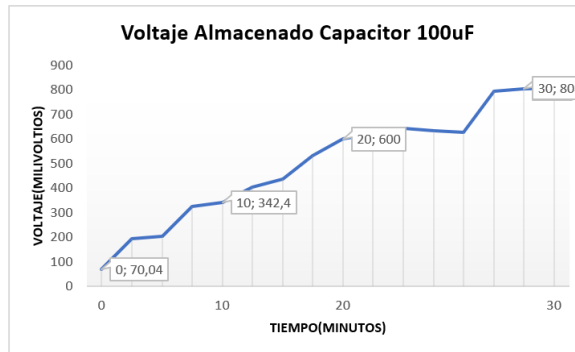
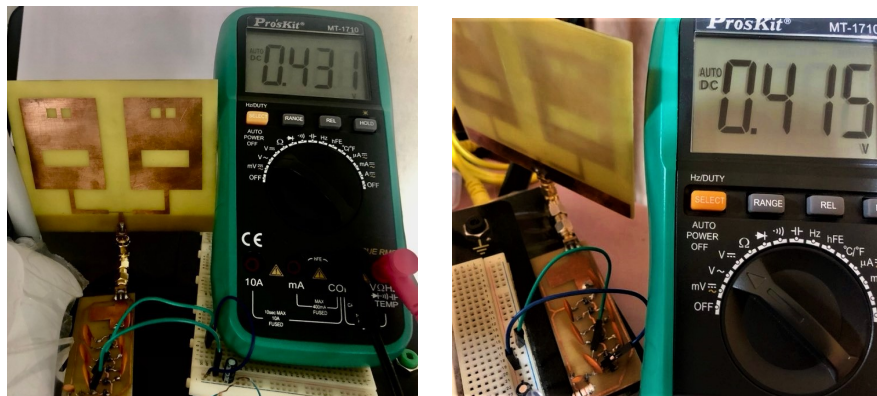


Figura 22: Curva Almacenamiento de voltaje, con presencia directa de fuentes de radiofrecuencia.

#### Prueba 4. Router doméstico, frecuencia de operación 2.45 GHz.

Debido al diseño de antena propuesto y la proximidad de frecuencias entre 2.1 GHz y 2.45 GHz, se realiza un test de funcionamiento del sistema recurriendo como fuente el router TP-LINK y Nebula 3000. A través de la Figura 23 y Tabla 15 se verifica el voltaje  $V_{out}$  obtenido.



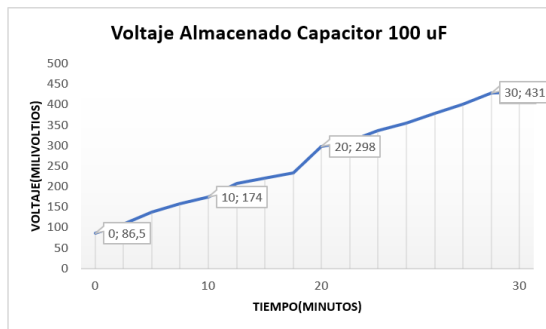
(a) Router TP-LINK

(b) Router Nebula 3000

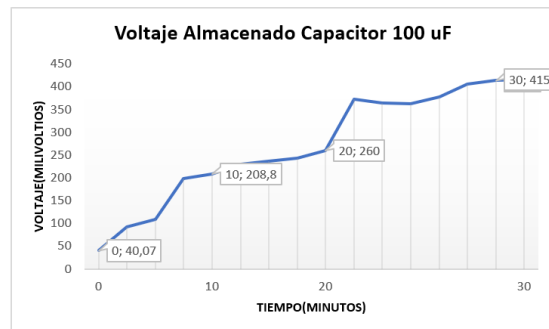
Figura 23: Voltaje obtenido a través de diferentes marcas de router.

Tabla 15: Resultados de voltaje a través de la frecuencia de 2.45 GHz.

Ambiente	Almacenamiento Capacitor (uF)	Tiempo de carga (min)	Voltaje de salida (mV)
Router TP-LINK	470	30	138.00
	220		305.00
	100		431.00
Router Nebula 3000	470	30	260.00
	220		364.00
	100		415.00



(a) Router TP-LINK



(b) Router Nebula 3000

Figura 24: Curva Almacenamiento de voltaje, router doméstico frecuencia de 2.45 GHz.

Conforme a los resultados de las pruebas de campo realizadas, se aplica una test no paramétrico para la comparación entre grupos. H de Kruskal-Wallis, con un valor del estadístico chi-cuadrado de 9.83, 4 grados de libertad y un p\_valor de 0.043; con esto se concluye que existe al menos un grupo (C) con diferencia significativa con respecto a las medianas a un nivel de confianza del 95 %. A través de la Figura 25 se observa la diferencia significativa existente entre grupos.

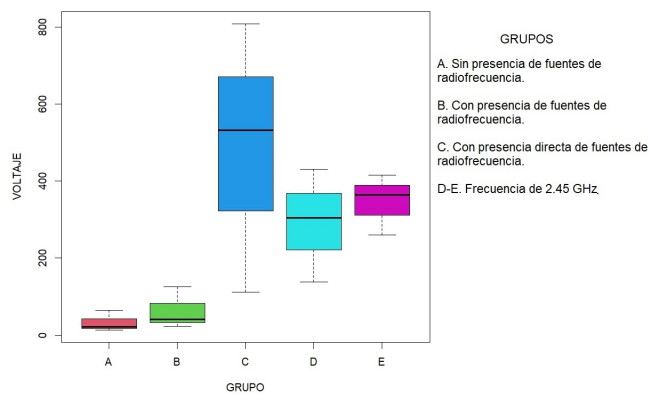


Figura 25: Test Kruskal-Wallis.

# Capítulo 5

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Haciendo mención al sistema de captación de energía de radiofrecuencia, se desprende que el sistema presenta mejoras potenciales al incorporar múltiples ranuras horizontales. Acontece además que, el uso de la técnica de estructura de tierra defectuosa DGS es oportuna respecto a desplazamiento frecuencial, debido a que no implica incremento físico del sistema de captación de energía, atribuye en la ampliación del ancho de banda y ciertamente permite alcanzar una eficiencia superior al 90 %.

Además, en lo que refiere a la etapa de emparejamiento de impedancias, se resalta la importancia que tiene esta etapa, debido a que permite la máxima transferencia de energía y posibilita mayor cantidad de energía incidente en la etapa rectificadora. Cabe indicar que para el diseño de la línea microstrip, se debe conocer la impedancia del sistema de recolección de energía y el sistema de conversión de energía RF-DC.

De acuerdo con las simulaciones efectuadas, las pruebas de campo realizadas y la literatura analizada sobre el comportamiento de diodos Schottky, se demuestra que el diodo HSMS 2820 presenta niveles deficientes de conversión, por lo tanto se concluye que es un diodo no idóneo para operar a la frecuencia de 2.1 GHz. Adicionalmente, se tiene que el diodo HSMS 2820 ofrece mayor eficiencia de conversión a potencias de entrada superiores a 0 dBm y frecuencias de operación superiores a 3.5 GHz.

El sistema de recolección de energía fue sometido a múltiples pruebas de carga, donde la fijación de la carga es directamente proporcional al valor de voltaje  $V_{out}$  obtenido. Paralelamente, hay que añadir que la carga se relaciona con la eficiencia de conversión. En consecuencia, la selección de la carga RL debe ser compensatoria tanto para el voltaje  $V_{out}$  como para la eficiencia  $\eta$ .

Los resultados de las pruebas de campo evidencian niveles de voltaje del orden de milivoltios, requerimientos de carga superior a 30 minutos para la adquisición cuantiosa de energía (808mV), y variabilidad de voltaje frente a diferentes ambientes. Por consiguiente, la alimentación directa de dispositivos IoT no es aplicable sobre todo cuando se deriva a dispositivos de funcionamiento continuo.

Considerando los resultados de las pruebas de campo , se concluye que el nivel de potencia presente en el ambiente, la utilización del diodo HSMS 2820, el número de etapas y componentes presentes en el sistema provocan apreciable consumo de la energía recaudada.

## **5.2. Recomendaciones**

Dentro del marco dimensional del sistema desarrollado, se propone incursionar en conceptos y técnicas de doblado de antenas (Folded Antenna), así también en la incorporación conjunta del sistema de captación y el sistema de conversión de energía; estas consideraciones fundamentarían un sistema conciso e indivisible.

Con relación a la puesta en marcha del sistema de rectificación RF-DC, se insiste en el hecho de que la asignación correcta de sus componentes capacitivos, diodos rectificadores, valor de la carga, topología y tipo de multiplicador de tensión garantizan el máximo rendimiento del sistema. En consecuencia, se prescribe afianzar la disponibilidad y accesibilidad comercial de los componentes a utilizar.

Para futuras investigaciones se recomienda implementar un sistema de recolección de energía con potencial de operación multifrecuencial, así la recolección de energía podrá ser mayor y el aprovechamiento del espectro radioeléctrico más amplio. Asimismo, se recomienda incursionar en métodos que permitan la conciliación entre la generación de energía y el consumo de energía, salvaguardando el rendimiento del sistema.

## Bibliografía

- [1] A. Okba, A. Takacs, H. Aubert, S. Charlot, and P.-F. Calmon, “Multiband rectenna for microwave applications,” *Comptes Rendus Physique*, vol. 18, no. 2, pp. 107–117, 2017.
- [2] Z. J. Chew, T. Ruan, and M. Zhu, “Energy Savvy Network Joining Strategies for Energy Harvesting Powered TSCH Nodes,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 2, pp. 1505–1514, 2020.
- [3] E. Vandelle, T.-P. Vuong, G. Ardila, S. Hemour, and K. Wu, “Modular and Reconfigurable Rectenna Unitcells with Beam-Forming Properties,” in *2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*. IEEE, 2019, pp. 109–112.
- [4] H. Pico, I. Pazmiño, and E. Ponce, “Analysis of the factors involved in the premature aging of lithium-ion batteries using a theoretical model validated in the laboratory.” *Revista Técnica Energía*, vol. 17, no. 2, 2021.
- [5] M. C. Acero and J. Esteve, “Energía ambiental (energy harvesting),” *Article, IMB-CNM, CSIC, Instituto de Microelectrónica de Barcelona, Barcelona*, 2012.
- [6] E. Donchev, J. S. Pang, P. M. Gammon, A. Centeno, F. Xie, P. K. Petrov, J. D. Breeze, M. P. Ryan, D. J. Riley, and N. M. Alford, “The rectenna device: From theory to practice (a review),” *MRS Energy & Sustainability*, vol. 1, 2014.
- [7] N. Tejjido Tojeiro *et al.*, “Rectificador Clase E a Diodo Schottky para alimentación inalámbrica,” 2017.
- [8] C. Hannachi, S. Boumaiza, and S. O. Tatu, “A highly sensitive broadband rectenna for low power millimeter-wave energy harvesting applications,” in *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [9] A. Costanzo and D. Masotti, “Energizing 5G: Near-and far-field wireless energy and data transfer as an enabling technology for the 5G IoT,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 18, no. 3, pp. 125–136, 2017.
- [10] S.-T. Khang, D.-J. Lee, I.-J. Hwang, T.-D. Yeo, and J.-W. Yu, “Microwave power transfer with optimal number of rectenna arrays for midrange applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 155–159, 2017.
- [11] Powercast, “Power over distance, RF Energy Harvesting & Wireless Power,” [En línea]. Disponible en: <https://www.powercastco.com/>, 2021.
- [12] MINTEL, “Libro Blanco de Territorios Digitales en Ecuador,” [En línea]. Disponible en: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/LBTD-actualizado-14-01-2020.pdf>, 2020.

- [13] H. Jaidka, N. Sharma, and R. Singh, "Evolution of IoT to IIoT: Applications & challenges," in *Proceedings of the international conference on innovative computing & communications (ICICC)*, 2020.
- [14] C. A. I. Team, "Europe and the future for WPT: European contributions to wireless power transfer technology," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 56–87, 2017.
- [15] E. A. Z. Ochoa, F. López, and G. Goéz, "Antenas monopolo de doble banda para captación de energía de radiofrecuencia del medio ambiente," *MASKAY*, vol. 12, no. 1, pp. 10–15, 2022.
- [16] D. Calvo Zavala, "Estudio y desarrollo de un sistema de captación de energía RF en redes WSN," B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.
- [17] M. Imran, L. U. Khan, I. Yaqoob, E. Ahmed, M. A. Qureshi, and A. Ahmed, "Energy harvesting in 5G networks: Taxonomy, requirements, challenges, and future directions," *arXiv preprint arXiv:1910.00785*, 2019.
- [18] R. Lavín, M. de las Nieves *et al.*, "Diseño de topologías rectificadoras e inversoras clase E basadas en tecnologías GaN HEMT y E-pHEMT para aplicaciones de transmisión inalámbrica y reciclado de energía," 2017.
- [19] P. Thosar and R. Mathur, "Design and Development of High Efficiency Rectenna for RF Harvesting," *Materials Today: Proceedings*, vol. 29, pp. 278–285, 2020.
- [20] M. Koohestani, J. Tissier, and M. Latrach, "A miniaturized printed rectenna for wireless RF energy harvesting around 2.45 GHz," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 127, p. 153478, 2020.
- [21] V. Singh, V. S. Pandey, and V. Shrivastava, "A Wideband Star-Shaped Rectenna for RF Energy Harvesting in GSM Band," in *Advances in Electromechanical Technologies*. Springer, 2021, pp. 163–173.
- [22] M. Wang, L. Yang, and Y. Shi, "A dual-port microstrip rectenna for wireless energy harvest at LTE band," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 126, p. 153451, 2020.
- [23] J. Vinuesa *et al.*, "Implementación de un sistema de transmisión inalámbrica de energía eléctrica a través de acoplamiento resonante magnético de campo cercano para dispositivos de bajo consumo de potencia. Maskay [online]. 2018, vol. 8, n. 1."
- [24] J. L. Mendoza Chicaiza, "Sistema electrónico portátil para la recarga eléctrica de dispositivos móviles mediante la captación de energía electromagnética," B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas . . . , 2019.
- [25] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," *IEEE Std 145-1983*, pp. 1–31, 1983.

- [26] J. Porras and A. Chavez, “Sistema De Recolección De Energía De Señales De Radiofrecuencia Utilizando Antenas Textiles,” *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*, 2019.
- [27] K. N. O. Nuñez, “Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas.” *INAOE, Santa María Tonantzintla, Puebla*, 2019.
- [28] J. Olowoleni, C. A. Awosope, A. Adoghe, O. Obinna, and U. Ebubechukwu Udo, “Design and simulation of a novel 3-point star rectifying antenna for RF energy harvesting at 2.4 GHz,” *Cogent Engineering*, vol. 8, no. 1, p. 1943153, 2021.
- [29] B. Munir, “Hybrid energy-storage system for mobile RF energy harvesting wireless sensors,” 2020.
- [30] B. E. Rodríguez-Barrera *et al.*, “Diseño y simulación de una antena microstrip de rango de operación de súper altas frecuencia (3.5 GHz a 6 GHz) para la evaluación de la tasa de absorción específica en tejidos humanos,” 2019.
- [31] C. Rojas and J. Fernando, “Diseño e implementación de una antena microstrip con control de fase utilizando diodo varactor para aplicaciones de wifi.” B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2018.
- [32] D. S. Blanco-Ibalñez, B. J. Cerquera-Zambrano *et al.*, “Diseño y simulación de una rectenna para cosechar energía electromagnética a 2.4 GHz,” 2020.
- [33] S. Wu and H. Shi, “Design of a Wideband Antenna for 5G Indoor Base Station Application,” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 104, pp. 121–129, 2022.
- [34] K. P. Escudero Padilla, “Análisis y simulación a través de un modelo matemático para reducir el efecto handover ping-pong en una red 4G,” B.S. thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, 2021.
- [35] ARCOTEL, “Boletín Estadístico IV Trimestre 2018,” [En línea]. Disponible en: [https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BOLETIN-ESTADISTICO-Diciembre-2018-v4\\_4.pdf](https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BOLETIN-ESTADISTICO-Diciembre-2018-v4_4.pdf), 2018.
- [36] F. A. Jiménez Rubio, “Análisis del Estado Actual de la Tecnología Energy Harvesting (Recolectores de Energía) Basados en Piezoelectricidad.” 2018.
- [37] O. Ghouddana Conde, “Recolector de energía de radiofrecuencia en la banda ISM de 868 MHz,” B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
- [38] I. D. Bougas, M. S. Papadopoulou, A. D. Boursianis, K. Kokkinidis, and S. K. Goudos, “State-of-the-Art Techniques in RF Energy Harvesting Circuits,” in *Telecom*, vol. 2, no. 4. MDPI, 2021, pp. 369–389.



- [39] R. V. Martínez, “Diseño y construcción de una rectena de alta eficiencia para la recuperación y transformación de energía de RF y microondas en energía eléctrica,” 2022.
- [40] Á. D. Balarezo Jerez, “Optimización del sistema de acondicionamiento para un dispositivo de captación de energía electromagnética,” Master’s thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas . . . , 2021.
- [41] A. S. Khan, N. U. Khan, W. U. Rahman, M. M. Ahmad, H. Khan, and F. U. Khan, “Performance evaluation of voltage rectifiers for energy harvesting applications.”
- [42] A. S. Rani, E. Karthika, K. Mala, and K. Ayyappan, “Rectangular Microstrip Patch Antenna Design for 2.1 GHz and 2.3 GHz-4G Application,” in *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [43] A. L. F. Camen, O. D. O. Molina, F. E. L. Giraldo, C. E. Ramírez, and E. E. R. Vera, “Efectos en el coeficiente de reflexión de una antena de microcinta rectangular debido a las modificaciones de posición de una ranura en la capa radiante,” 2017.
- [44] Y. Rahayu and I. A. Pohan, “Design of Rectangular with 3 Slot Microstrip Antenna for Application LTE 2.1 GHz,” *Sinergi*, vol. 22, no. 2, pp. 127–131, 2018.
- [45] S. Dharmpatre *et al.*, “Design and Characterization Analysis of Microstrip Patch Array Antenna with Dumbell shaped DGS for ISM Band Applications,” *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, vol. 12, no. 9, pp. 2652–2663, 2021.
- [46] R. D. P. Jamanca Lopez, “Diseño y simulación de un captador de energía optimizado para bajas potencias,” B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
- [47] A. Mouapi, N. Hakem, and N. Kandil, “A performance analysis of Schottky diode to support RF energy harvesting,” in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. IEEE, 2019, pp. 1169–1170.
- [48] S. Narayanan and K. Thangavel, “A Compact Two Sleeve Microstrip Patch Rectenna System For Ambient RF Energy Harvesting,” in *International Journal Of Engineering Research & Technology(IJERT)*, vol. 10, 2021.
- [49] C. P. Rodriguez Caicedo, “Análisis y propuesta de infraestructura 4G para aumentar la cobertura del servicio móvil avanzado en localidades priorizadas,” 2017.
- [50] ARCOTEL, “Infraestructura Y Cobertura, Servicio Móvil Avanzado,” [En línea]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BoletinEstadistico-May2020-SMA-CoberturaInfraestructura.pdf>, 2020.

# Anexos

## I. Características de substratos.

Tabla 16: Parámetros referenciales de substratos

Substrato	Constante dieléctrica	Tangente de pérdidas	Espesor (mm)	Rendimiento	Costo
FR4 Epoxy	4.3	0.019	1.5	Bajo	Bajo
N4000-13	3.6	0.009	-	Medio	Medio
Roger 3003	3	0.0010	1.575	Alto	Alto
Roger 3210	10.2	0.003	1.6	Alto	Alto
Roger RT5880	2.2	0.0009	1.575	Alto	Alto

## II. Excitación de la antena.

Modelado de puerto de guía de onda, se realiza a través del siguiente proceso: Macros/Solver/Ports/Calculate port extension coefficient. En la Figura 26 se contempla el proceso de asignación de puerto.

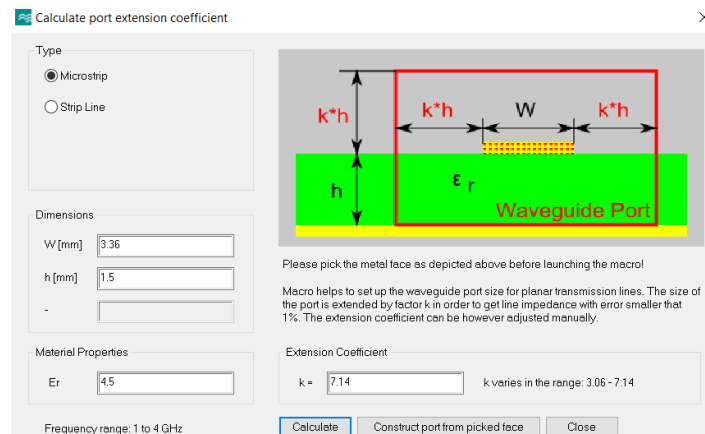
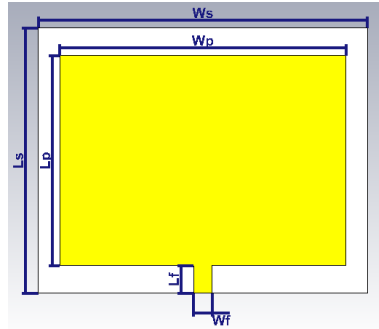


Figura 26: Asignación de puerto de alimentación

### III. Elemento rectangular radiante simple

En la Figura 27 se refleja el modelado computacional realizado en CST y dimensiones de una antena RMPA.



(a) Antena de parche microstrip

Partes de la antena	Parámetros (mm)	Valor calculado	Valor Optimizado
Sustrato	Longitud(ls)	42.36	42
	Ancho(ws)	52.03	52
	Espesor(h)	1.5	1.5
Parche	Longitud(lp)	33.36	33.35
	Ancho(wp)	43.04	45.5
	Espesor(t)	0.035	0.035
Alimentación	Longitud(lf)	4.82	4.325
	Ancho(wf)	2.78	3.36621
Plano de Tierra	Longitud(lg)	42.36	42
	Ancho(wg)	52.03	52
	Espesor(t)	0.035	0.035

(b) Dimensiones de la antena

Figura 27: Antena RMPA

### IV. Resultados elemento rectangular radiante simple

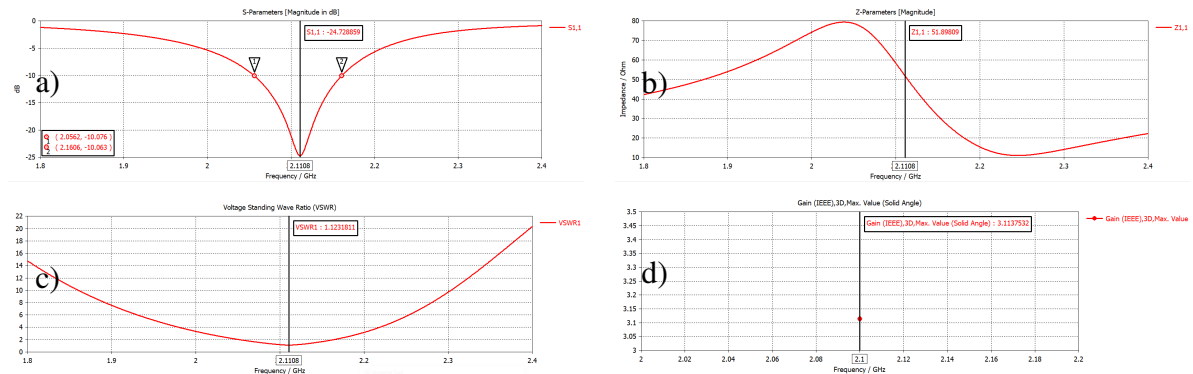


Figura 28: Parámetros optimizados, parche rectangular simple

Tabla 17: Contraste de resultados antena parche rectangular simple

Contraste de resultados antena parche rectangular simple					
Parámetros de evaluación	Variables calculadas	Variables optimizadas	Parámetros de evaluación	Variables calculadas	Variables optimizadas
Frecuencia	2.1066 GHz	2.1108 GHz	AB	4.60 %	4.94 %
S(1,1)	-19.98 dB	-24.72 dB	Directividad	5.261 dBi	5.204 dBi
Z(1,1)	56.20 Ω	51.89 Ω	Ganancia	2.943 dB	3.114 dB
VSWR	1.22	1.12	Eficiencia	55.93 %	59.83 %

## V. Resultados de ranuras de indole vertical y horizontal

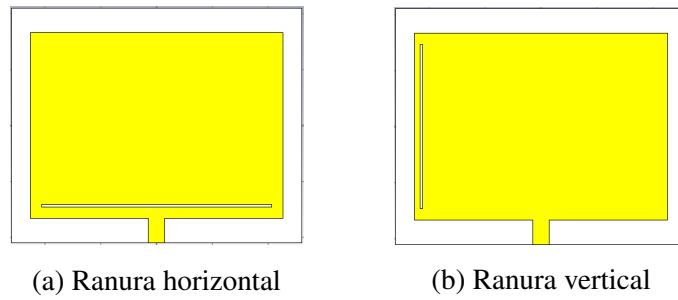


Figura 29: Parche rectangular simple, aplicado ranuras

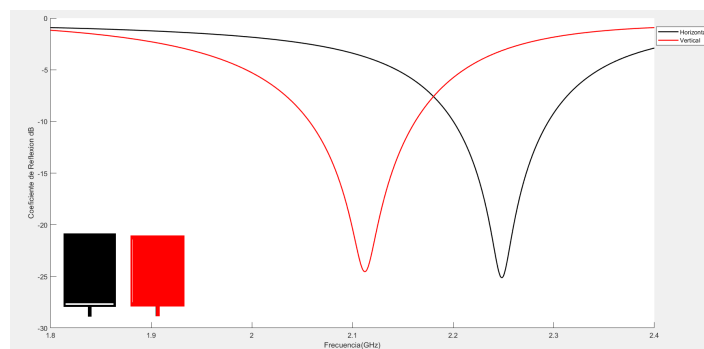
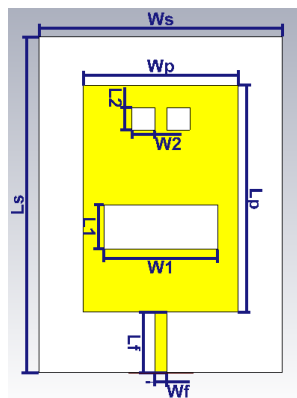


Figura 30: Simulación coeficiente de reflexión. Efecto Ranuras

## VI. Elemento rectangular radiante simple, aplicado ranuras.



(a) Antena de parche rectangular

Partes de la antena	Parámetros (mm)	Valor calculado	Valor Optimizado
Sustrato	Longitud(Ls)	42.36	76
	Ancho(ws)	52.03	55
	Espesor(h)	1.5	1.5
Parche	Longitud(lp)	33.36	51.24
	Ancho(wp)	43.04	35
	Espesor(t)	0.035	0.035
Alimentación	Longitud(lf)	4.82	13.75
	Ancho(wf)	2.78	2.69
Ranura	Longitud(L1)	10	10.02
	Ancho(W1)	25	25.75
	Longitud(L2)	5	5.06
	Ancho(W2)	5	5.20

(b) Dimensiones de la antena

Figura 31: Parche rectangular simple, con 3 ranuras

## VII. Elemento rectangular radiante simple, aplicado la técnica DGS

Perturba la provisión de la corriente de protección en el plano de tierra. En la Figura 32 se observa los planos anteriores y posteriores.

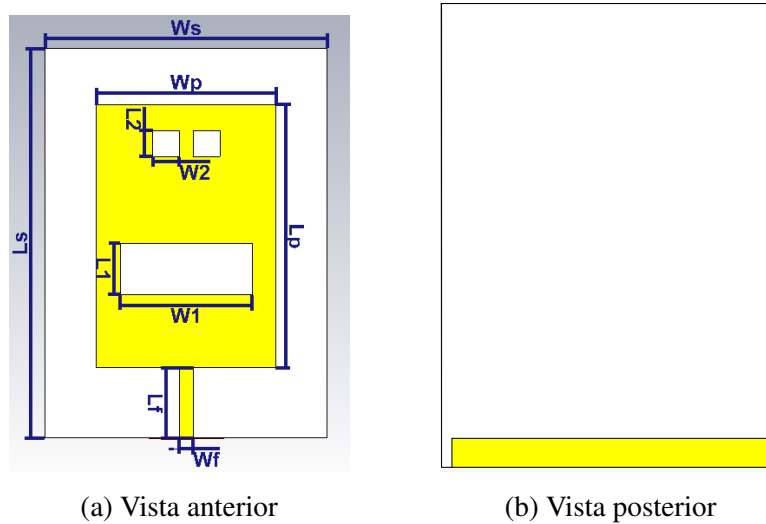


Figura 32: Parche rectangular simple, aplicado DGS

Tabla 18: Dimensiones plano de tierra

Plano de tierra			
Variable (mm)	Ancho (Wg)	Largo (Lg)	Espesor (t)
	51.64	4.87	0.035

## VIII. Dimensiones agrupación de antenas, aplicado la técnica DGS

Tabla 19: Dimensiones de la antena

Partes de la antena	Parámetros (mm)	Valor optimizado	Partes de la antena	Parámetros (mm)	Valor optimizado
Sustrato	Longitud(ls)	91.30	Parche	Longitud(lp)	51.24
	Ancho(ws)	109.12		Ancho(wp)	40
	Espesor(h)	1.5		Espesor(t)	0.035
Alimentación 50 Ω	Longitud(lf_50)	13.75	Alimentación 100 Ω	Longitud(lf_100)	0.50
	Ancho(wf_50)	2.59		Ancho(wf_100)	14.12
Ranura	Longitud(L1)	10.02	Plano de tierra	Longitud(lg)	11.15
	Ancho(W1)	25.75		Ancho(wg)	107.76
	Longitud(L2)	5.06			
	Ancho(W2)	5.20			

## IX. Resultados Elemento rectangular radiante simple, Técnica DGS

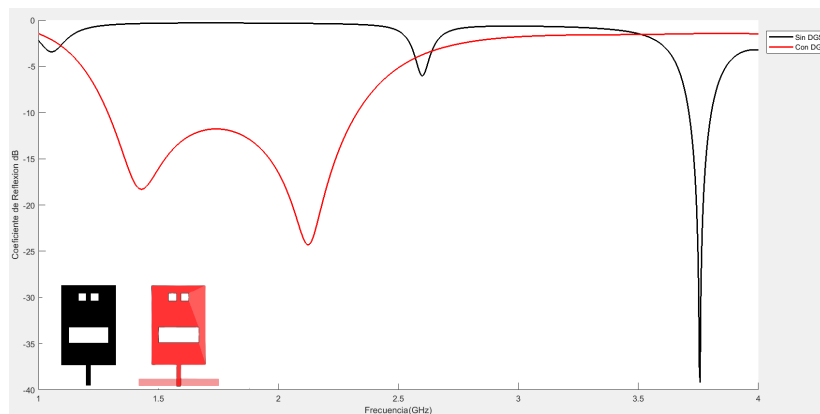
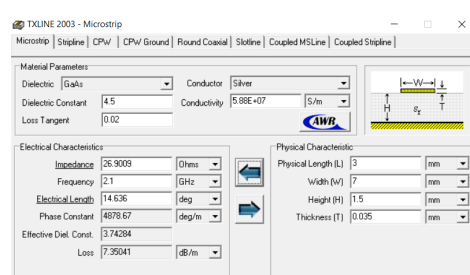
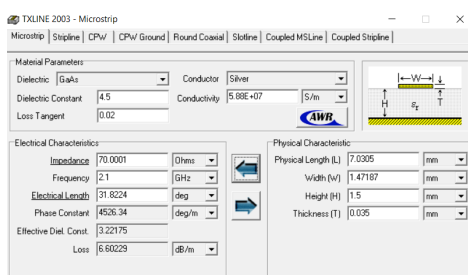


Figura 33: Simulación del Coeficiente de reflexión. Técnica DGS.

Tabla 20: Contraste de rendimiento antena DGS

Contraste de rendimiento			
Parámetros de evaluación	Antena parche rectangular simple	Antena parche rectangular, 3 ranuras	Antena parche rectangular, DGS
Frecuencia	2.1108 GHz	3.757 GHz	2.1205 GHz
S(1,1)	-24.72 dB	-39.17 dB	-39.12 dB
Z(1,1)	51.89 $\Omega$	51.06 $\Omega$	51.40 $\Omega$
VSWR	1.12	1.02	1.02
AB	4.94 \%	2.48 \%	52.07 \%
Directividad	5.204 dBi	–	3.358 dBi
Ganancia	3.114 dB	–	3.252 dB
Eficiencia	59.83 \%	–	96.84 \%
Dimensión	25x42 mm	55x76 mm	55x76 mm

## X. Acoplador de impedancias, red tipo L



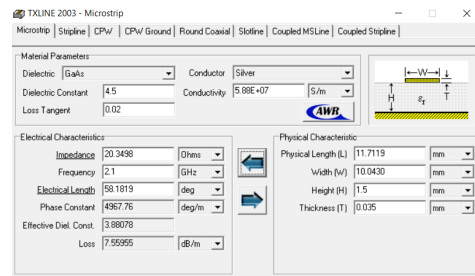
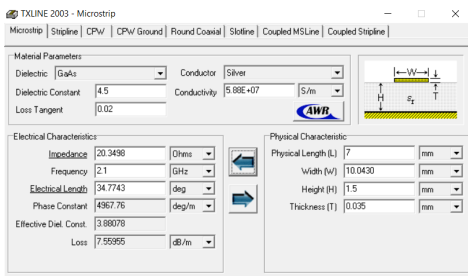


Figura 35: Medidas en TXline acoplador de impedancias

## XI. Rendimiento duplicador de voltaje, diodo HSMS 2850

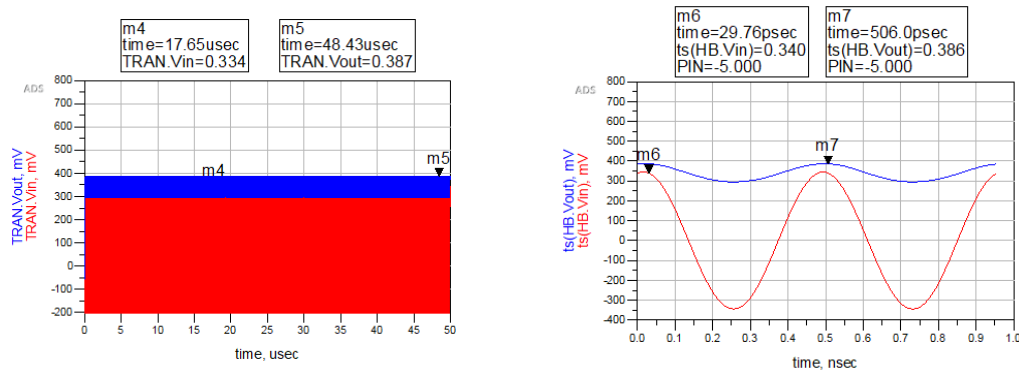
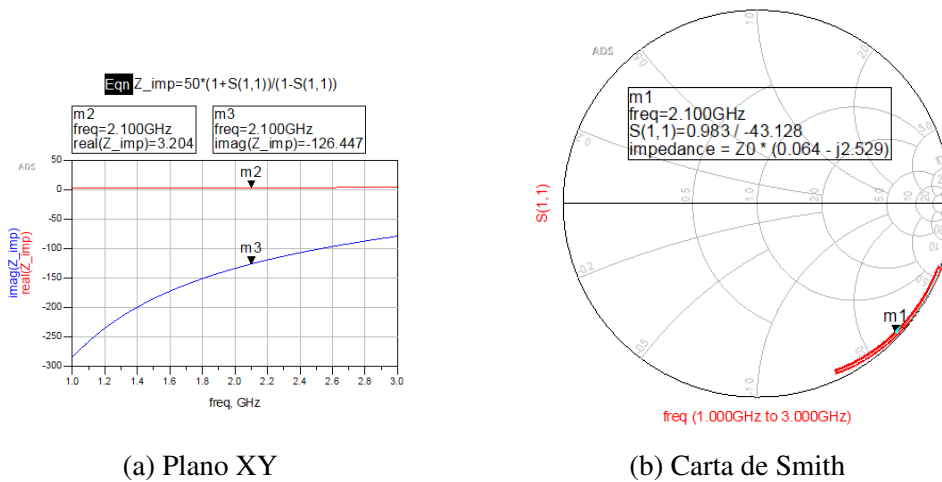


Figura 36: Rendimiento diodo HSMS2850 aplicado  $\text{PIN} = -5 \text{dBm}$  y  $C = 1 \text{pF}$

## XII. Resultados duplicador de voltaje, $\text{PIN} = -5 \text{dBm}$ , $C_1 - C_2 = 1 \text{pF}$

En el apartado (a) se observa la impedancia de entrada en parámetros XY con un valor  $Z_{in} = (3.204, -j126.447)$ , y en el apartado (b) se observa mediante la carta de Smith.



(a) Plano XY

(b) Carta de Smith

Figura 37: Impedancia de entrada, una etapa

En la Figura 38 se observa los valores de potencia de salida obtenidos a determinada potencia y valor de capacitor.

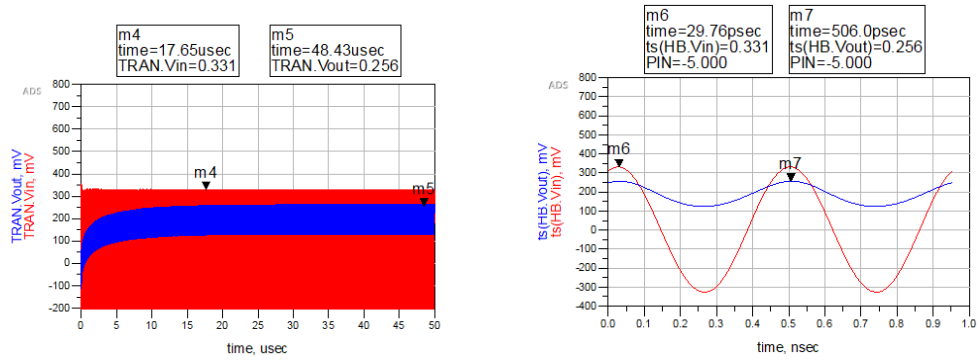
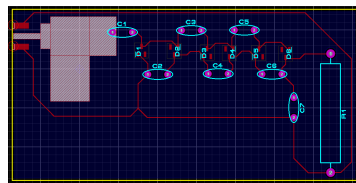
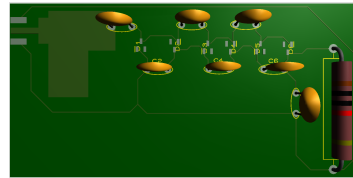


Figura 38: Circuito doblador de voltaje de una etapa, PIN=-5dBm y C=1pF

### XIII. Placa PCB desarrollado en el software Proteus



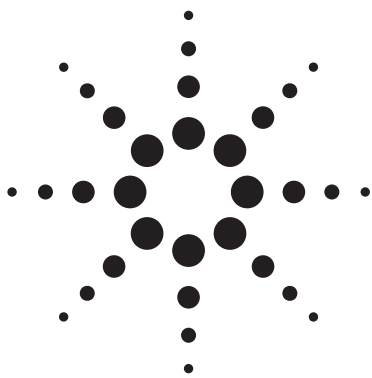
(a) Vista layout



(b) Vista 3D

Figura 39: Placa PCB





# Agilent HSMS-282x Surface Mount RF Schottky Barrier Diodes

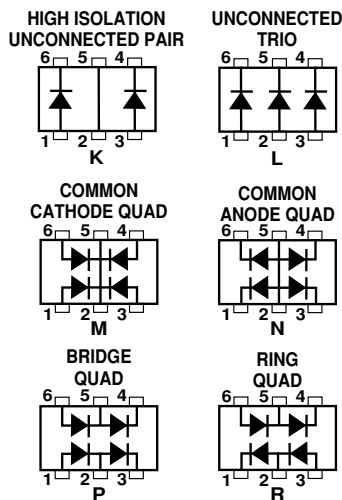
## Data Sheet

### Description/Applications

These Schottky diodes are specifically designed for both analog and digital applications. This series offers a wide range of specifications and package configurations to give the designer wide flexibility. Typical applications of these Schottky diodes are mixing, detecting, switching, sampling, clamping, and wave shaping. The HSMS-282x series of diodes is the best all-around choice for most applications, featuring low series resistance, low forward voltage at all current levels and good RF characteristics.

Note that Agilent's manufacturing techniques assure that dice found in pairs and quads are taken from adjacent sites on the wafer, assuring the highest degree of match.

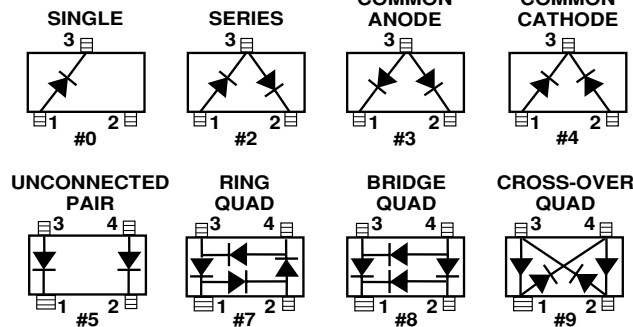
### Package Lead Code Identification, SOT-363 (Top View)



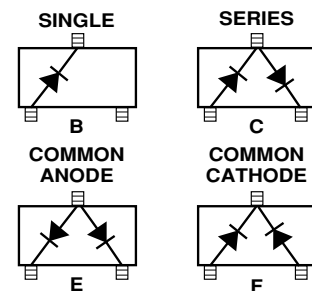
### Features

- Low Turn-On Voltage (As Low as 0.34 V at 1 mA)
  - Low FIT (Failure in Time) Rate\*
  - Six-sigma Quality Level
  - Single, Dual and Quad Versions
  - Unique Configurations in Surface Mount SOT-363 Package
    - increase flexibility
    - save board space
    - reduce cost
  - HSMS-282K Grounded Center Leads Provide up to 10 dB Higher Isolation
  - Matched Diodes for Consistent Performance
  - Better Thermal Conductivity for Higher Power Dissipation
  - Lead-free Option Available
- \* For more information see the Surface Mount Schottky Reliability Data Sheet.

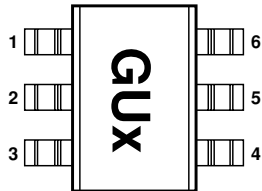
### Package Lead Code Identification, SOT-23/SOT-143 (Top View)



### Package Lead Code Identification, SOT-323 (Top View)



## Pin Connections and Package Marking



### Notes:

1. Package marking provides orientation and identification.
2. See "Electrical Specifications" for appropriate package marking.

## Absolute Maximum Ratings<sup>[1]</sup> $T_C = 25^\circ\text{C}$

Symbol	Parameter	Unit	SOT-23/SOT-143	SOT-323/SOT-363
$I_F$	Forward Current (1 $\mu\text{s}$ Pulse)	Amp	1	1
$P_{IV}$	Peak Inverse Voltage	V	15	15
$T_j$	Junction Temperature	$^\circ\text{C}$	150	150
$T_{stg}$	Storage Temperature	$^\circ\text{C}$	-65 to 150	-65 to 150
$\theta_{jc}$	Thermal Resistance <sup>[2]</sup>	$^\circ\text{C}/\text{W}$	500	150

### Notes:

1. Operation in excess of any one of these conditions may result in permanent damage to the device.
2.  $T_C = +25^\circ\text{C}$ , where  $T_C$  is defined to be the temperature at the package pins where contact is made to the circuit board.

## Electrical Specifications $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Single Diode<sup>[3]</sup>

Part Number HSMS <sup>[4]</sup>	Package Marking Code	Lead Code	Configuration	Minimum Breakdown Voltage $V_{BR}$ (V)	Maximum Forward Voltage $V_F$ (mV)	Maximum Forward Voltage $V_F$ (V) @ $I_F$ (mA)	Maximum Reverse Leakage $I_R$ (nA) @ $V_R$ (V)	Maximum Capacitance $C_T$ (pF)	Typical Dynamic Resistance $R_D$ ( $\Omega$ ) <sup>[5]</sup>						
2820	C0	0	Single	15	340	0.5 10	100 1	1.0	12						
2822	C2	2	Series												
2823	C3	3	Common Anode												
2824	C4	4	Common Cathode												
2825	C5	5	Unconnected Pair												
2827	C7	7	Ring Quad <sup>[4]</sup>												
2828	C8	8	Bridge Quad <sup>[4]</sup>												
2829	C9	9	Cross-over Quad												
282B	C0	B	Single												
282C	C2	C	Series												
282E	C3	E	Common Anode												
282F	C4	F	Common Cathode												
282K	CK	K	High Isolation Unconnected Pair												
282L	CL	L	Unconnected Trio												
282M	HH	M	Common Cathode Quad												
282N	NN	N	Common Anode Quad												
282P	CP	P	Bridge Quad												
282R	OO	R	Ring Quad												
Test Conditions										$I_R = 100 \mu\text{A}$	$I_F = 1 \text{ mA}^{[1]}$			$V_F = 0 \text{ V}$ $f = 1 \text{ MHz}^{[2]}$	$I_F = 5 \text{ mA}$

### Notes:

1.  $\Delta V_F$  for diodes in pairs and quads in 15 mV maximum at 1 mA.
2.  $\Delta C_{TO}$  for diodes in pairs and quads is 0.2 pF maximum.
3. Effective Carrier Lifetime ( $\tau$ ) for all these diodes is 100 ps maximum measured with Krakauer method at 5 mA.
4. See section titled "Quad Capacitance."
5.  $R_D = R_S + 5.2 \Omega$  at  $25^\circ\text{C}$  and  $I_F = 5 \text{ mA}$ .