



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA
RADIOELÉCTRICA EN LA BANDA UHF USANDO ANTENA PATCH**

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

AUTOR: ANDRES DAVID AUZ CABRERA

NATHALIA ALEXANDRA CHACÓN REINO

TUTOR: ING. JUAN PABLO BERMEO MOYANO, MgT.

Cuenca – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Andres David Auz Cabrera con documento de identificación N°0106411507 y Nathalia Alexandra Chacón Reino con documento de identificación N°0105749345; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 18 de marzo del 2024

Atentamente,



Andres David Auz Cabrera

0106411507



Nathalia Alexandra Chacón Reino

0105749345

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Andres David Auz Cabrera con documento de identificación N° 0106411507 y Nathalia Alexandra Chacón Reino con documento de identificación N°0105749345, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Desarrollo de un sistema para la recolección de energía radioeléctrica en la banda UHF usando antena patch”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 18 de marzo del 2024

Atentamente,



Andres David Auz Cabrera

0106411507



Nathalia Alexandra Chacón Reino

0105749345

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Pablo Bermeo Moyano, con documento de identificación N° 0102645884, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA RADIOELÉCTRICA EN LA BANDA UHF USANDO ANTENA PATCH , realizado por Andres David Auz Cabrera con documento de identificación N° 0106411507 y Nathalia Alexandra Chacón Reino con documento de identificación N° 0105749345, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 18 de marzo del 2024

Atentamente,



Ing. Juan Pablo Bermeo Moyano, MgT

010264588

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos de NATHALIA ALEXANDRA CHACÓN REINO

Deseo expresar mi gratitud a todas las personas cuya colaboración ha sido esencial en la culminación de esta investigación:

Agradezco profundamente a Fernando Guerrero, por su orientación experta, críticas constructivas y apoyo inquebrantable a lo largo de este proceso. Su experiencia ha sido una luz guía en cada etapa de mi investigación.

Mis sinceros agradecimientos al personal académico y administrativo de Telecomunicaciones, por su asistencia invaluable y su ambiente propicio para la investigación. A mis colegas y amigos del programa, por las discusiones estimulantes, el apoyo emocional y los momentos compartidos que aligeraron la carga de este viaje académico.

A mi familia, cuyo amor y apoyo incondicional han sido el pilar de mi fortaleza y determinación. Su fé en mí me ha impulsado a alcanzar mis metas.

Extiendo mi agradecimiento a todas las personas que, directa o indirectamente, han contribuido a este trabajo. Su ayuda ha sido esencial para el éxito de esta tesis.

Agradecimientos de ANDRES DAVID AUZ CABRERA

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo.

En particular:

A mi director de tesis, Fernando Guerrero, por su invaluable orientación, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proyecto. Su conocimiento experto y consejos han sido fundamentales para mi desarrollo académico y profesional.

Al cuerpo docente de la carrera de Telecomunicaciones, por su dedicación a la enseñanza y su disposición siempre generosa para compartir su sabiduría y experiencia.

A mis padres, por su apoyo emocional y comprensión en los momentos más desafiantes de mi carrera académica.

Y finalmente, a todas las personas que, de una forma u otra, contribuyeron a este proyecto, ya sea proporcionando recursos, inspiración o simplemente alentándome a seguir adelante. A todos, mi más sincero agradecimiento.

DEDICATORIAS

A mis padres, cuya incansable dedicación y amor inagotable han sido mi roca y mi refugio. Su sabiduría y su fe inquebrantable en mis capacidades han sido el faro que ha guiado mi viaje.

A mi querida familia, por su comprensión y paciencia en los largos días y las noches interminables. Cada momento de apoyo ha sido un regalo invaluable que he atesorado profundamente.

A mis amigos, por estar siempre ahí para ofrecer una palabra de aliento y una sonrisa reconfortante. Su amistad ha sido una fuente constante de alegría y fortaleza.

A mis profesores y mentores, por desafiar mi mente y nutrir mi pasión por el conocimiento. Su mentoría me ha empujado a trascender mis límites y a alcanzar nuevas alturas.

Por Autor NATHALIA ALEXANDRA CHACÓN REINO

Le dedico este logro a mis padres que me apoyaron durante todos estos años y me ayudaron a seguir a pesar de mi falta de visión.

A la memoria de mi abuela que le hubiera gustado verme cumplir con esto y siempre quiso lo mejor para mí.

Por Autor ANDRES DAVID AUZ CABRERA

Índice general

Agradecimientos	I
Agradecimientos	I
Dedicatorias	III
Índice General	V
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XI
Resumen	XII
Abstract	XIII
Antecedentes	1
Justificación	5
Objetivos	7
Introducción	8
1. Sistema de recolección de energía	10
1.1. Fundamentos de la recolección de energía	10
1.2. Tecnología de antenas para la recolección de energía	12
1.2.1. Diseño y fabricación	13
1.2.2. Personalización para aplicaciones específicas	14

1.2.3. Integración con las telecomunicaciones/electrónica	15
1.3. Conversión de energía mediante rectificadores	16
1.3.1. Tipos de rectificadores	17
1.4. Almacenamiento de la energía recolectada	20
2. Diseño y simulación	21
2.1. Desarrollo de la antena patch	21
2.1.1. Cálculo de dimensiones	21
2.1.2. Optimización de las dimensiones	24
2.1.3. Resultados de las simulaciones	28
2.2. Rectificadores	30
2.2.1. Creación de los rectificadores	30
2.2.2. Rectificadores a base de diodos SMS7630-079LF	35
2.2.3. Rectificador a base de diodos HSMS-286C	41
3. Construcción y Pruebas	47
3.1. Construcción del prototipo	47
3.1.1. Construcción de la antena patch	47
3.1.2. Pruebas de la antena	48
3.1.3. Construcción de los rectificadores	50
3.1.4. Pruebas de los rectificadores	52
3.1.5. Construcción del sistema de recolección de datos	53
3.1.6. Sistema de recolección de energía	55
3.2. Resultados	56
4. Conclusiones y Trabajos Futuros	59
4.1. Conclusiones	59
4.2. Recomendaciones	61
4.3. Trabajos futuros	61
Glosario	63
Referencias	68

ÍNDICE GENERAL

VII

Anexos

69

Índice de figuras

1.1. Principales tecnologías de conversión de energía [26].	11
1.2. Diagrama de bloques de un sistema recolector de energía RF [27].	12
1.3. Diagrama de Representación gráfica de los dispositivos médicos incorporados al cuerpo [30].	14
1.4. Diagrama del proceso de recolección de datos en IoT [33].	16
1.5. Diagrama esquemático de un rectificador de varias estaciones CMOS [34].	17
1.6. Diagrama esquemático del rectificador Dickson [38].	19
2.1. Diagrama de una antena patch rectangular [39].	22
2.2. Diagrama de una antena patch rectangular	25
2.3. Vista frontal de la antena uno	26
2.4. Vista posterior de la antena uno	26
2.5. Vista frontal de la antena dos	27
2.6. Vista posterior de la antena dos	28
2.7. Coeficiente de reflexión de la antena uno en dB	28
2.8. Coeficiente de reflexión de la antena dos en dB	29
2.9. Patrón de radiación azimuth y elevación de la antena uno	29
2.10. Patrón de radiación azimuth y elevación de la antena dos	30
2.11. Implementación de la herramienta <i>Single Stub Match</i>	32
2.12. Resultado de la herramienta <i>Single Stub Match</i>	32
2.13. Implementación de la herramienta calculo de la linea microstrip	33
2.14. Implementación del single stub con el diodo a analizar	34
2.15. Respuesta del coeficiente de reflexión en dB	34
2.16. Diagrama esquemático del primer rectificador	35

2.17. Placa del primer rectificador	36
2.18. Respuesta del coeficiente de reflexión en dB	36
2.19. Diagrama esquemático del segundo rectificador	37
2.20. Placa del segundo rectificador	38
2.21. Respuesta del coeficiente de reflexión en dB	38
2.22. Diagrama esquemático del tercer rectificador	39
2.23. Placa del tercer rectificador	40
2.24. Respuesta del coeficiente de reflexión en dB	40
2.25. Diagrama esquemático del primer rectificador	41
2.26. Placa del primer rectificador	42
2.27. Respuesta del coeficiente de reflexión en dB	42
2.28. Diagrama esquemático del segundo rectificador	43
2.29. Placa del segundo rectificador	44
2.30. Respuesta del coeficiente de reflexión en dB	44
2.31. Diagrama esquemático del quinto rectificador	45
2.32. Diagrama esquemático del quinto rectificador	46
2.33. Respuesta del coeficiente de reflexión en dB	46
3.1. Vista frontal y posterior de la antena 2.3	48
3.2. Vista frontal y posterior de la antena 2.5	48
3.3. Comparación del Coeficiente de Reflexión antena uno 2.3	49
3.4. Comparación del Coeficiente de Reflexión antena dos 2.5	49
3.5. Patrón de radiación azimuth y de elevación de la antena 2.3	50
3.6. Patrón de radiación azimuth y de elevación de la antena 2.5	50
3.7. Implementación de rectificador de banda doble del diodo SMS7630-079LF, 2.16	51
3.8. Implementación de rectificador para ambientes de poca densidad de potencia del diodo SMS7630-079LF, 2.19	51
3.9. Implementación de rectificador de banda doble para transmisión del diodo HSMS-286C, 2.25	51
3.10. Comparación del coeficiente de reflexión del rectificador de banda doble del diodo SMS7630-079LF, 2.16	52

3.11. Comparación del coeficiente de reflexión del rectificador para ambientes de poca densidad de potencia del diodo SMS7630-079LF, 2.19 52

3.12. Comparación del coeficiente de reflexión del rectificador de banda doble para transmisión del diodo HSMS-286C, 2.25 53

3.13. Diagrama de Flujo del proceso de recolección 54

3.14. Diagrama de bloques del proceso de recolección 55

3.15. Implementación del sistema de recolección de energía 56

3.16. Resultados del sistema de recolección de energía 57

Índice de tablas

2.1. Variables de la antena uno	25
2.2. Variables de inserción de la antena uno	26
2.3. Variables de la antena dos	27
2.4. Variables de inserciones de la antena dos	27

Resumen

En este trabajo se desarrolló un sistema de recolección de energía radioeléctrica utilizando una antena patch optimizada para operar en la frecuencia de 2.45GHz. El trabajo comenzó con una revisión teórica, para sustentar los diseños iniciales, empleando experiencias previas de otros autores. Luego, se aplicaron varias metodologías orientadas a optimizar la antena patch, redes de acoplamiento y rectificadores, hasta obtener diseños con resultados aceptables e implementables en procesos de manufactura locales. Posteriormente, se implementó el sistema integral dentro de un ambiente de pruebas indoor para la realización de pruebas experimentales. Finalmente, el resultado fue un sistema capaz de convertir la energía de radiofrecuencia en energía eléctrica útil.

Los resultados más significativos incluyeron la demostración de que la eficiencia de la recolección de energía es sensible a la distancia entre la antena y su fuente, así como a las interferencias ambientales, particularmente en una frecuencia susceptible a la saturación por dispositivos comunes de Wi-Fi.

La antena patch diseñada demostró una ganancia considerable y el rectificador implementado mostró una conversión de energía efectiva, con voltajes de salida medidos que confirmaron la viabilidad de la propuesta para aplicaciones de baja potencia. La investigación también destacó la importancia del entorno operativo y la proximidad física en la eficiencia de recolección, lo que sugiere áreas para futuras mejoras y estudios.

Palabras clave: Antena Patch; Recolección de energía; Diseño de antenas; Eficiencia energética; Energía radioeléctrica; UHF; Generación de energía; Rectificadores; Sistemas de comunicación.

Abstract

In this work, a radioelectric energy harvesting system was developed using a patch antenna optimized to operate at the frequency of 2.45GHz. The work began with a theoretical review to support the initial designs, employing previous experiences from other authors. Then, various methodologies aimed at optimizing the patch antenna, matching networks, and rectifiers were applied until obtaining designs with acceptable and implementable results in local manufacturing processes. Subsequently, the integral system was implemented within an indoor testing environment for experimental testing. Finally, the result was a system capable of converting radiofrequency energy into useful electrical energy.

The most significant results included demonstrating that the efficiency of energy collection is sensitive to the distance between the antenna and its source, as well as to environmental interferences, particularly at a frequency susceptible to saturation by common Wi-Fi devices.

The designed patch antenna demonstrated considerable gain, and the implemented rectifier showed effective energy conversion, with measured output voltages that confirmed the viability of the proposal for low-power applications. The research also highlighted the importance of the operating environment and physical proximity in the efficiency of collection, suggesting areas for future improvements and studies.

Keywords: Patch Antenna; Energy Conversion; Antenna Design; Energy Efficiency; Radioelectric Energy; UHF Frequency; Energy Generation; Rectifiers; Communication Systems.

Antecedentes

En la búsqueda continua de alternativas energéticas más sostenibles y eficientes, la recolección de energía en el rango de Frecuencia Ultra Altas (*UHF, Ultra High Frequency*) emerge como una solución prometedora para aplicaciones de baja potencia [1]. La generación de energía en gran escala ha sido dominada por métodos que implican el uso intensivo de recursos naturales y la producción de emisiones nocivas. En contraposición, la recolección de energía en frecuencias UHF representa una modalidad en cierta medida poco explotada que abre nuevas perspectivas para la generación de energía limpia y eficiente [2].

Por un lado, los métodos convencionales, como la energía solar y eólica, aunque sostenibles, son dependientes de factores ambientales los cuales tienen costos iniciales elevados. Además, en aplicaciones de baja potencia, como sensores inalámbricos y dispositivos de Internet de las Cosas (*IOT, Internet of things*), estos métodos pueden ser poco prácticos tanto por sus dimensiones como sus requisitos de mantenimiento [3], [4].

Por otro lado, el uso de baterías tiene el inconveniente de la necesidad de recarga o reemplazo, además de la problemática ambiental relacionada con su disposición y reciclaje [5]. En este sentido, las celdas de Peltier, aunque útiles para ciertas aplicaciones, también tienen limitaciones en términos de eficiencia y costo [6]. Concluyendo, estos modelos de recolección nos ubican en numerosas restricciones importantes a tener en cuenta como:

- Las baterías, si bien son una fuente común de energía, poseen una duración finita, necesitando reemplazo o recargas periódicas. También, su costo y, en ocasiones, su considerable tamaño las hacen poco adecuadas para ciertos aparatos.

- La energía solar, aunque es una opción ecológica, presenta la problemática de la intermitencia, condicionada por el clima, lo que puede restringir su potencial para proveer una alimentación constante a los dispositivos. Además, los paneles solares conllevan un costo elevado y demandan un espacio considerable para su disposición.
- En cuanto a los captadores de energía ambiental, si bien son capaces de aprovechar fuentes como la luz del entorno, vibraciones y calor, la energía que se puede extraer de estas fuentes suele ser limitada en cantidad.
- Finalmente, la inducción electromagnética, a pesar de ser una opción viable, puede implicar un costo elevado y posee restricciones en cuanto a la distancia de transmisión y la cantidad de energía que puede ser transmitida.

La recolección de energía en frecuencias UHF se basa en el aprovechamiento de señales electromagnéticas disponibles en el ambiente, como las emitidas por transmisores de radio, televisión y comunicaciones móviles. Las antenas especialmente diseñadas capturan estas señales y las convierten en energía eléctrica utilizable [7]. Este método tiene el potencial de proporcionar una fuente constante de energía, que es principalmente relevante para dispositivos de baja potencia ubicados en áreas remotas o de difícil acceso.

Una consideración clave en la recolección de energía en frecuencias UHF es la optimización del diseño de la antena para maximizar la eficiencia de su capacidad de recepción [8]. Sin embargo, es un campo todavía en desarrollo, en el cual existen retos técnicos a superar, como la necesidad de convertidores de energía más eficientes y sistemas de almacenamiento adecuados [9].

Otra dimensión poco explorada en este tipo de recolección de energía es la posibilidad de utilizar múltiples fuentes de señales UHF para aumentar la eficiencia del sistema. Asimismo, la integración de tecnologías de inteligencia artificial para el monitoreo y control de estas redes de recolección podría significar un gran avance en la optimización de la recolección y utilización de la energía capturada [10].

En la última década, las antenas tipo patch han surgido como una estrategia significativa en el dominio de la recolección de energía de radiofrecuencia (RF) [11].

Estas antenas, que son conocidas por su estructura plana y diseño adaptable, son particularmente propicias para aplicaciones donde el espacio, el peso y la funcionalidad aerodinámica son cruciales [9]. En este contexto, se han implementado diversas soluciones energéticas que se apoyan en antenas patch para acumular energía del entorno RF.

Diversas indagaciones en el ámbito de las antenas patch recolectoras de energía RF abarcan múltiples aspectos, incluyendo el diseño, optimización, y adaptación de las antenas para maximizar la eficiencia en recolección energética. La caracterización de estas antenas se enfoca en asegurar la captura de niveles óptimos de potencia del ambiente RF, mediante la utilización de circuitos acopladores y rectificadores, dada la omnipresencia de las ondas electromagnéticas en nuestros entornos [12], [13].

A pesar de los avances, las investigaciones relacionadas con antenas patch recolectoras de RF han mostrado ciertos inconvenientes, particularmente en lo referente a la presentación y análisis de resultados experimentales [14], [15].

A menudo, estos estudios han obviado detalles cruciales acerca de las pruebas y los protocolos empleados, dejando un vacío en la comprensión detallada del rendimiento, además de la eficacia de estas antenas en condiciones variadas y prácticas. A fin de subsanar esta deficiencia, es imperativo dirigir la atención hacia un análisis a profundidad de los datos emergentes de las pruebas, evaluando variables clave como la eficiencia de recolección de energía y el desempeño bajo diversas condiciones ambientales.

Asegurando que los resultados de las pruebas sean presentados de manera coherente y detallada, se facilita una evaluación más certera del rendimiento de las antenas patch en el contexto de recolección de energía RF, profundizando así nuestra comprensión respecto al potencial y las limitaciones de estas tecnologías en aplicaciones prácticas y así potencialmente, impulsar el desarrollo de futuras investigaciones y aplicaciones en este campo.

En resumen, la recolección de energía en frecuencias UHF mediante antenas patch nos ofrece un camino prometedor hacia sistemas de generación de energía más sostenibles, especialmente para aplicaciones de baja potencia. No obstante, todavía existen desafíos técnicos y conceptuales que deben abordarse para maximizar su

potencial.

Justificación

En la actualidad, la exploración en el desarrollo de antenas para la conversión de energía electromagnética en eléctrica ha tomado un impulso notable. Este avance surge en un momento donde la multiplicación de dispositivos electrónicos, especialmente aquellos con conectividad a Internet, nos llevan a una demanda elevada de fuentes energéticas para su operación. Además, muchas aplicaciones electrónicas encaran desafíos relacionados con la longevidad de la batería, lo cual puede truncar servicios y disminuir la productividad.

El empleo de antenas que recolectan energía emerge como una solución potencial a estos retos, ofreciendo una fuente de energía suplementaria para dispositivos electrónicos. No sólo proporcionan una alternativa para cargar las baterías, sino que también elevan la fiabilidad de los servicios electrónicos al presentar una opción de alimentación continua a largo plazo. Además, representan una modalidad de energía que es tanto limpia como renovable, lo cual puede ayudar a disminuir nuestra dependencia de métodos de generación de energía más convencionales y ecológicamente cuestionables.

La importancia de la recolección de energía a través de antenas, especialmente en las bandas UHF, radica no solo en abordar las crecientes necesidades energéticas de los dispositivos modernos, sino también en impulsar un paradigma sostenible y eficiente en la generación de energía. En un mundo que se inclina cada vez más hacia la digitalización y la conectividad, asegurar una fuente de alimentación constante y ecológica es esencial. Mientras que muchos estudios han abordado superficialmente el potencial de las antenas recolectoras, este proyecto se distingue por su enfoque en las antenas de tipo patch, antenas las cuales se distinguen por su capacidad extraordinaria de adaptabilidad a diferentes usos y requerimientos para

su usuario. Este trabajo de titulación no solo permite el análisis más detallado y técnico, sino que también explora un nicho que puede ser crítico en futuras redes de comunicación y sistemas IoT debido a su capacidad de adaptabilidad. La combinación de la recolección de energía con la inteligencia artificial, para monitoreo y control, propone una innovación significativa respecto a trabajos anteriores, abriendo la puerta a sistemas auto-sostenibles, adaptativos y altamente eficientes.

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar un sistema para la recolección de energía radioeléctrica en la banda UHF usando antena patch.

Objetivos específicos:

- Optimizar una antena patch en una frecuencia de resonancia de 2.45 GHz con alta ganancia para la recolección de energía de radiofrecuencia en ambiente Indoor.
- Implementar un circuito rectificador con una red de acoplamiento que minimice pérdidas en la transformación de energía electromagnética de alta frecuencia en corriente continua.
- Evaluar el rendimiento del sistema en ambientes Indoor con un monitoreo constante de los niveles de voltajes obtenidos a la salida del rectificador.

Introducción

La búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes en la recolección de energía es una prioridad creciente en el ámbito global, marcada con una gran urgencia por enfrentar los desafíos energéticos contemporáneos. Este trabajo se enmarca en el contexto de la recolección de energía radioeléctrica en la banda UHF, un área prometedora, pero insuficientemente explorada, que ofrece potencial para el desarrollo de sistemas energéticos autónomos, especialmente en aplicaciones de baja potencia. A través de la optimización de antenas tipo patch y la selección cuidadosa de rectificadores, esta tesis propone un enfoque innovador para mejorar la eficiencia en la recolección y conversión de energía.

La relevancia de este estudio resalta por la creciente demanda de energía en sectores como el industrial, empresarial y de telecomunicaciones, donde la eficiencia y la sostenibilidad energética se han convertido en criterios críticos. Documentos oficiales e institucionales resaltan la importancia de avanzar hacia modelos energéticos más limpios y eficientes, lo que justifica la necesidad de investigaciones orientadas a optimizar la recolección de energía ambiental [16], [17].

Este trabajo aborda el problema desde una perspectiva holística, comenzando con una revisión detallada de las bases teóricas de la recolección de energía, seguida por el diseño y simulación de componentes clave del sistema, como son las antenas patch y los circuitos rectificadores. Se pone especial énfasis en la adaptabilidad y eficiencia de estos elementos, fundamentales para maximizar el rendimiento energético.

La organización del documento refleja un enfoque estructurado hacia la solución del problema. Tras una introducción general, en el primer capítulo se detalla la estructura de funcionamiento de un sistema de recolección de energía, en el segundo

capítulo se incluye estudios de simulación y optimización para partes esenciales de la recolección como lo son las antenas patch y los rectificadores. Los capítulos subsiguientes presentan los resultados, discuten su aplicabilidad en contextos reales y sugieren direcciones para investigaciones futuras.

Los hallazgos de este estudio revelan avances significativos en la optimización de la antena, la selección del rectificador más adecuado y la eficiencia del sistema de recolección como un todo. Estos resultados no solo contribuyen al desarrollo tecnológico en el campo de la recolección de energía sino que también ofrecen perspectivas prácticas para su implementación en sistemas energéticos sostenibles.

Capítulo 1

Sistema de recolección de energía

En un mundo donde la demanda de energía sostenible y eficiente nunca ha sido tan crítica, este primer capítulo nos llevara en gran profundidad sobre el campo de la recolección de energía [17], [18]. Centrándonos específicamente en el potencial sin explotar de la banda UHF a 2.45 GHz. Esta revisión abarcará tanto los fundamentos teóricos como los avances tecnológicos que marcan el futuro de cómo captamos y utilizamos la energía ambiental. A través de un análisis detallado, esta sección no solo destaca la importancia de la recolección de energía radioeléctrica sino que también contextualiza nuestra investigación dentro del panorama actual de innovaciones energéticas.

1.1. Fundamentos de la recolección de energía

La recolección de energía, se refiere al proceso de capturar pequeñas cantidades de energía desde fuentes externas disponibles en el ambiente, como la solar, térmica, eólica, cinética, además radioeléctrica, y convertirlas en energía utilizable [19]. Esta tecnología es esencial para alimentar pequeños dispositivos electrónicos, especialmente en situaciones donde el uso de baterías convencionales es poco viable.

El concepto de recolección de energía se centra en el aprovechamiento de las fuentes de energía disponibles en nuestro entorno, conocidas como energía ambiental. Esta energía puede manifestarse en diversas formas: luz solar, movimiento del aire (viento), vibraciones mecánicas, diferencias de temperatura, y ondas

electromagnéticas [20]. La clave de la recolección de energía radica en su capacidad para capturar estas formas de energía ambiental y convertirlas en electricidad. Por ejemplo, la tecnología fotovoltaica, comúnmente empleada en los paneles solares, utiliza células solares para convertir la energía lumínica del sol en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico [21].

Así mismo existen otras tecnologías de conversión de energía como la piezoeléctrica, que aprovecha la energía mecánica generada por vibraciones o estrés mecánico [22], la termoeléctrica, basada en el efecto Seebeck para generar electricidad a partir de diferencias de temperatura [23], la energía eólica, la tecnología electrodinámica, la cual utiliza turbinas para transformar la energía cinética del viento en electricidad, como se visualiza en la Figura 1.1. Pero el énfasis de este proyecto se basa particularmente en la recolección de energía a través de radiofrecuencia (RF). Esta tecnología, que convierte la energía de las ondas de radio y señales electromagnéticas en electricidad, se sitúa en el núcleo de nuestra investigación. Dada su capacidad de alimentar dispositivos sin la necesidad de conexiones físicas, la recolección de energía RF emerge como una solución prometedora para el desafío de crear sistemas energéticos mas sostenibles y autónomos. Ya que tiene un alto potencial tanto eficiente como viable para una amplia gama de aplicaciones [24], [25].

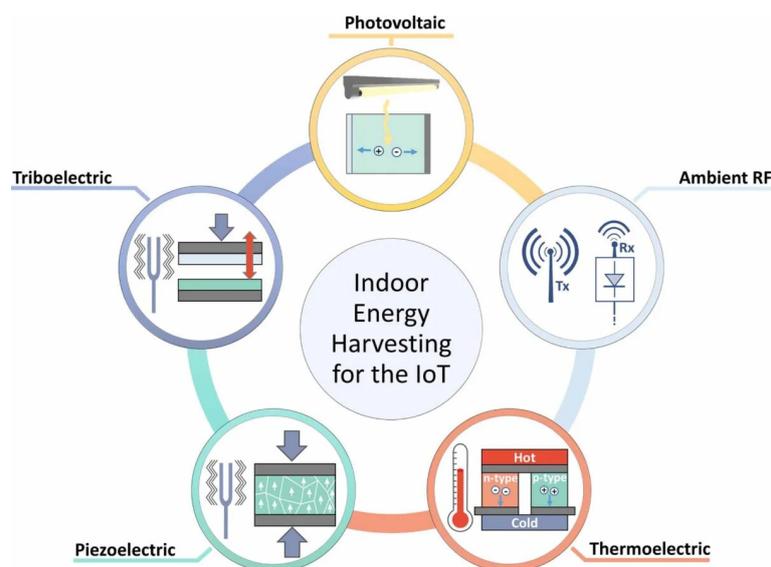


Figura 1.1: Principales tecnologías de conversión de energía [26].

La eficacia con la que estas tecnologías convierten la energía disponible en electricidad es conocida como eficiencia de conversión, un parámetro crítico para evaluar su viabilidad. Además, la densidad de potencia, que indica la cantidad de energía que puede ser recolectada por unidad de área o volumen, es otra consideración fundamental en el diseño y la implementación de sistemas de recolección de energía, todos estos son aspectos fundamentales en el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y eficientes.

En conclusión, cuando hablamos de este proceso involucramos varias fases clave para lograrlo, como lo es el diseño de un sistema de recolección (en este caso mediante antenas), la conversión de lo obtenido (rectificadores), y finalmente el almacenamiento de nuestra energía, como se visualiza en la Figura 1.2.

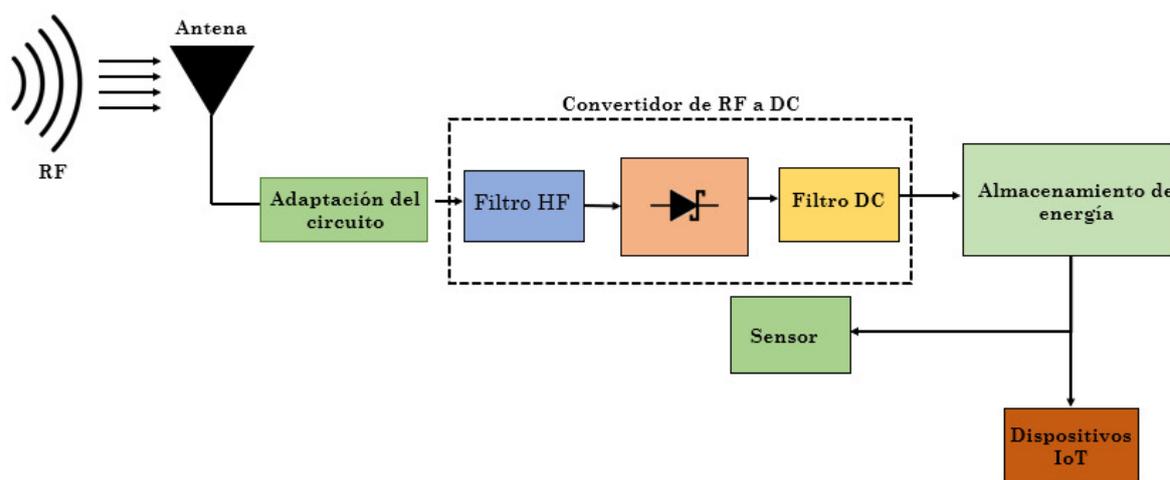


Figura 1.2: Diagrama de bloques de un sistema recolector de energía RF [27].

1.2. Tecnología de antenas para la recolección de energía

Las antenas de recolección de energía, y en particular las antenas patch, son una piedra angular en el ámbito de la energía sostenible, ya que permiten capturar y convertir la energía de las ondas electromagnéticas en electricidad. Su relevancia se extiende a través de múltiples disciplinas y aplicaciones, ofreciendo una

promesa significativa para el futuro de la tecnología inalámbrica y la sostenibilidad energética [28].

1.2.1. Diseño y fabricación

El diseño y la fabricación de antenas patch son procesos que requieren una precisión excepcional con un profundo entendimiento de la teoría electromagnética y los materiales. Estos procesos comienzan con la definición de los parámetros de diseño, que incluyen la frecuencia de operación deseada, la ganancia, la directividad y la impedancia de entrada. La frecuencia de operación es particularmente crítica, ya que dicta las dimensiones físicas de la antena y su capacidad para resonar en la frecuencia objetivo.

En el diseño, se utilizan herramientas de simulación avanzadas para modelar el comportamiento electromagnético de la antena. Estas herramientas permiten a los ingenieros prever cómo diferentes materiales, geometrías y tamaños afectan las propiedades de la antena, como la eficiencia de radiación y el ancho de banda. La elección del material del sustrato es fundamental; no solo debe soportar el conductor metálico, sino también influir en las propiedades dieléctricas de la antena. Materiales con baja constante dieléctrica y baja pérdida son generalmente preferibles para maximizar la eficiencia.

La fase de fabricación también presenta sus propios desafíos y consideraciones. Las técnicas de fabricación deben ser capaces de producir estructuras con tolerancias muy precisas, ya que incluso pequeñas desviaciones pueden afectar significativamente el rendimiento de la antena. Técnicas como la litografía, el grabado y la impresión 3D han sido adoptadas para producir antenas patch con la precisión necesaria. Además, la integración de la antena con otros componentes electrónicos requiere métodos de montaje y conexión precisos para asegurar un rendimiento óptimo del sistema completo.

Es así que a través de la optimización cuidadosa de cada paso, desde la conceptualización hasta la producción, es posible desarrollar antenas que no solo cumplen con los requisitos específicos de aplicación, sino que también empujan los límites de lo que es técnicamente posible en el campo de la recolección de energía

radioeléctrica [28].

1.2.2. Personalización para aplicaciones específicas

Por otro lado, la personalización de antenas patch para aplicaciones específicas es uno de los factores más notables de el uso de antenas, ya que permite adaptar estas tecnologías a necesidades únicas y entornos operativos diversos. Esta flexibilidad en el diseño se manifiesta en varias industrias, cada una con sus propios requisitos y desafíos.

En el sector de la salud, por ejemplo, las antenas pueden ser diseñadas para dispositivos médicos implantables [29]. Aquí, el tamaño junto con la biocompatibilidad son de suma importancia. Las antenas deben ser extremadamente compactas para adaptarse a las limitaciones de espacio y deben ser fabricadas con materiales que sean seguros para el cuerpo humano. Además, deben ser capaces de operar de manera eficiente en frecuencias específicas para comunicarse con equipos externos sin causar interferencias con otros dispositivos médicos, siendo un esquema general del funcionamiento lo que se visualiza en la Figura 1.3.

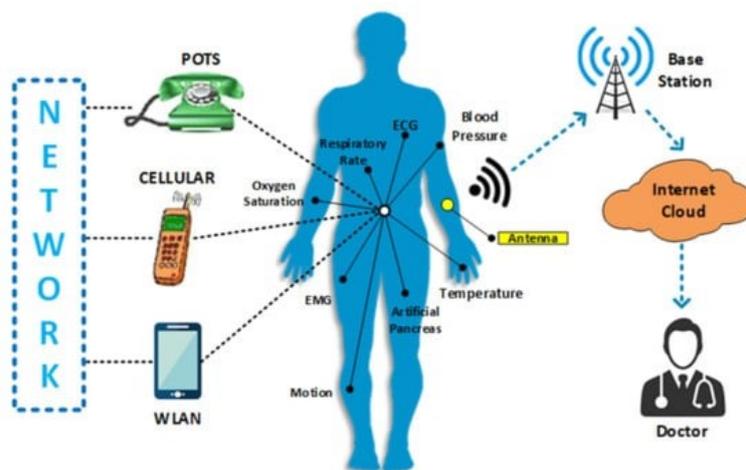


Figura 1.3: Diagrama de Representación gráfica de los dispositivos médicos incorporados al cuerpo [30].

En la industria automotriz, las antenas patch se utilizan para sistemas de telemetría y monitoreo de vehículos. En estos casos, las antenas deben ser robustas, capaces de

soportar condiciones ambientales adversas, y tener la capacidad de operar en un rango dinámico de frecuencias para adaptarse a las distintas tecnologías de comunicación utilizadas en vehículos modernos [31].

En el ámbito de la comunicación móvil y el IoT, la personalización de antenas se enfoca en lograr diseños compactos y eficientes energéticamente. Estas antenas deben ser capaces de integrarse a la perfección con una variedad de dispositivos, desde teléfonos móviles hasta sensores ambientales, y operar en bandas de frecuencia que permitan una comunicación eficaz y fiable [32].

La personalización de antenas patch no solo aborda las necesidades funcionales y operativas de las aplicaciones, sino que también contribuye al avance continuo de la tecnología, impulsando la innovación y abriendo nuevas posibilidades para la recolección y utilización de energía radioeléctrica en diversos campos.

1.2.3. Integración con las telecomunicaciones/electrónica

La integración de las antenas patch con electrónica y sistemas de comunicación es un área que combina innovación técnica con soluciones prácticas, abriendo un abanico de posibilidades para la recolección eficiente de energía. La habilidad de estas antenas para captar señales de radiofrecuencia y transformarlas en electricidad es crucial en aplicaciones donde la independencia energética y la miniaturización son fundamentales.

En este contexto, el acoplamiento de antenas patch con circuitos rectificadores se convierte en un enfoque integral. Estos circuitos, cuidadosamente diseñados, convierten la energía de las señales de radiofrecuencia (AC) capturadas por la antena en corriente continua (DC), la cual es más adecuada para alimentar dispositivos electrónicos. La eficiencia de este proceso depende de la sinergia entre la antena y el rectificador, donde una sintonización precisa y una selección adecuada de materiales son esenciales para minimizar las pérdidas y maximizar la conversión de energía.

Más allá de la recolección y conversión de energía, la integración de estas antenas en sistemas de comunicación plantea una dualidad fascinante: no solo se aprovecha la energía ambiental para alimentar dispositivos, sino que también se facilita la transmisión de datos. En sistemas de IoT, por ejemplo, las antenas patch

pueden desempeñar un doble papel, actuando como recolectores de energía y como transmisores de información, contribuyendo a la creación de redes más eficientes y autónomas [32], como se visualiza las aplicaciones en la Figura 1.4.

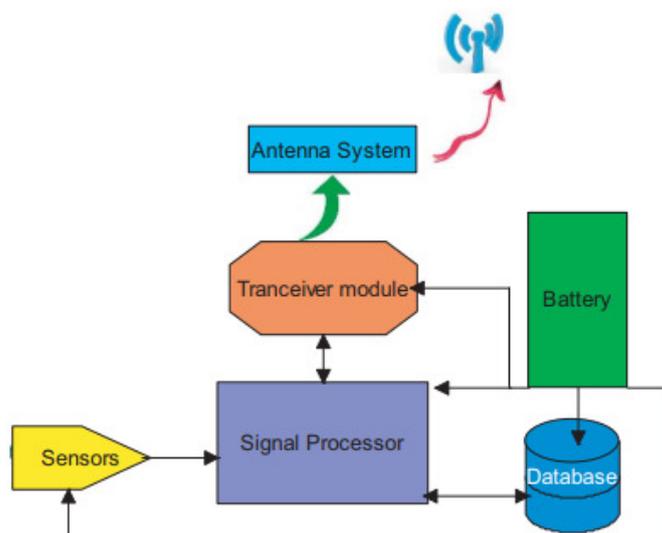


Figura 1.4: Diagrama del proceso de recolección de datos en IoT [33].

Los avances en este campo no solo prometen extender la vida útil de los dispositivos y reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales, sino también abrir caminos hacia una mayor sostenibilidad. La investigación constante y la innovación en el diseño de antenas, circuitos rectificadores y sistemas de almacenamiento de energía están llevando a la creación de soluciones cada vez más integradas y eficientes.

1.3. Conversión de energía mediante rectificadores

Como ya se menciona los rectificadores en sistemas de recolección de energía desempeñan un papel crucial, convirtiendo la corriente alterna (AC), generada por las antenas al captar ondas electromagnéticas, en corriente continua (DC) utilizable. Esta conversión es crucial, ya que los dispositivos electrónicos generalmente operan con corriente continua. Un rectificador eficiente nos garantizará que la energía recolectada se aproveche al máximo, minimizando las pérdidas durante la conversión.

El funcionamiento de un rectificador se basa en componentes semiconductores, como lo pueden ser: diodos, transistores, etc, que permiten el flujo de corriente en una sola dirección, convirtiendo así la corriente alterna en corriente continua. Estos componentes deben ser seleccionados cuidadosamente para soportar las características de la señal de entrada y proporcionar la eficiencia deseada en la conversión. La calidad de estos componentes y su configuración en el circuito rectificador son determinantes para la eficiencia general del sistema.

1.3.1. Tipos de rectificadores

Rectificadores basados en transistores

Cada tipo de rectificador tiene aplicaciones específicas basadas en los requisitos de eficiencia, tamaño, costo y complejidad del circuito. La elección depende de las características de la señal de entrada y las necesidades del sistema de recolección de energía, buscando siempre optimizar la conversión de energía RF a DC para maximizar la eficiencia y la funcionalidad del sistema completo. Por ejemplo tenemos rectificadores basados en: transistores con sistemas CMOS, NMOS, o rectificadores a base de diodos, y dentro de los mismos se puede dar diferentes enfoques para optimizarlos de diferente manera, como se visualiza en la Figura 1.5.

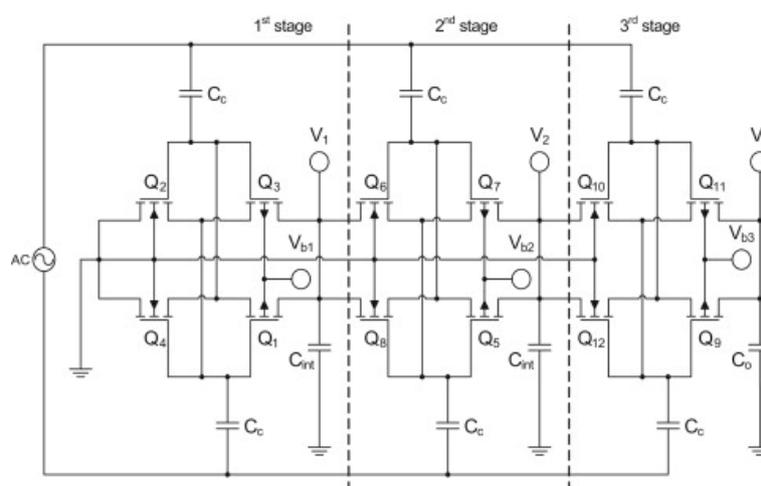


Figura 1.5: Diagrama esquemático de un rectificador de varias estaciones CMOS [34].

Los rectificadores CMOS, utilizan tecnología de semiconductores complementarios de óxido metálico (CMOS) para la conversión de energía. Esta tecnología es preferida por su eficiencia energética y baja disipación de calor, lo que la hace ideal para aplicaciones de baja potencia. Los rectificadores CMOS funcionan permitiendo el flujo de corriente en una dirección mediante el uso de un par de transistores (pMOS y nMOS) que se activan alternativamente, convirtiendo así la corriente alterna en corriente continua.

Una ventaja clave de los rectificadores CMOS es su capacidad para integrarse fácilmente en circuitos integrados, lo que permite el desarrollo de sistemas de recolección de energía compactos y eficientes. Además, la tecnología CMOS puede operar a frecuencias relativamente altas, lo cual es crucial para la recolección de energía de señales RF.

Sin embargo, la eficiencia de los rectificadores CMOS puede verse limitada por las pérdidas inherentes a los transistores en estado de conducción y por las limitaciones de velocidad de los dispositivos semiconductores [35].

Rectificadores basados en diodos

Por otro lado tenemos a los rectificadores de diodos, los cuales funcionan basándose en la propiedad unidireccional de los diodos, permitiendo el paso de la corriente en una sola dirección para convertir la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). Esta característica se aprovecha alineando diodos de manera que solo permitan el flujo de corriente durante las medias ondas positivas o negativas de la señal de AC, resultando en una salida de DC. Los diodos Schottky, por ejemplo, son frecuentemente elegidos por su baja caída de voltaje en la unión y rápida respuesta, siendo ideales para aplicaciones de alta eficiencia y alta frecuencia [36].

La base de los rectificadores con diodos es principalmente su simplicidad y robustez. Mientras que los rectificadores CMOS utilizan pares de transistores para dirigir el flujo de corriente, los rectificadores con diodos se basan en la propiedad unidireccional natural de los diodos para permitir el paso de corriente en una sola dirección. Esta simplicidad hace que los rectificadores con diodos sean menos costosos y más fáciles de implementar. Son particularmente eficaces en aplicaciones de baja

frecuencia y cuando la eficiencia de conversión no es crítica. Sin embargo, los diodos presentan una caída de voltaje inherente en la unión, lo que puede resultar en mayores pérdidas de potencia en comparación con los rectificadores CMOS, especialmente en aplicaciones de baja potencia.

Entre los rectificadores basados en diodos, el rectificador de Dickson es notable por su capacidad para incrementar el voltaje de salida mediante etapas múltiples de diodos y capacitores, sin necesidad de un transformador. Este diseño es especialmente útil en aplicaciones de recolección de energía de RF, donde la eficiencia de conversión y la compactibilidad son esenciales. El rectificador de Dickson aprovecha la configuración en cascada para multiplicar el voltaje de salida, lo que lo hace ideal para generar voltajes más altos a partir de fuentes de baja potencia [37], como se puede visualizar su configuración en la Figura 1.6.

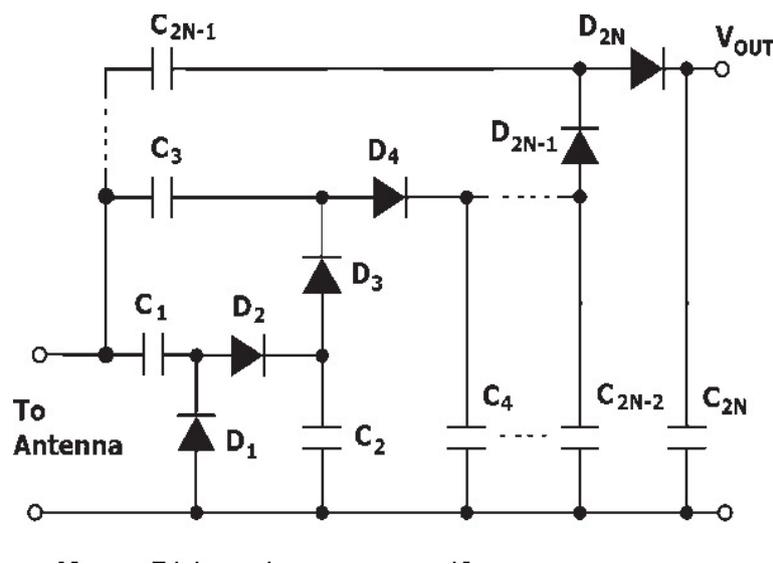


Figura 1.6: Diagrama esquemático del rectificador Dickson [38].

Es debido a este tipo de factores que la eficiencia de un rectificador se puede ver influenciada, desde el cómo se construye, que elementos se utilizan hasta cuál es la capacidad del semiconductor para manejar altas frecuencias y potencias, y la minimización de pérdidas resistivas y capacitivas en el circuito. Por lo tanto, el diseño del rectificador implica un equilibrio cuidadoso entre estos elementos para optimizar la conversión de energía.

Además, la integración del rectificador con el sistema de antenas y el almacenamiento de energía es crucial. Un diseño bien integrado asegura que la energía recolectada y convertida sea entregada eficientemente al sistema de almacenamiento o al dispositivo final, maximizando así la utilidad de la energía recolectada. La evolución continua en los materiales semiconductores y las técnicas de fabricación está llevando a la creación de rectificadores más eficientes y compactos, ampliando las posibilidades de la recolección de energía y su aplicabilidad en diversas áreas.

1.4. Almacenamiento de la energía recolectada

Finalmente el almacenamiento de la energía recolectada es el ultimo eslabón de este proceso de recolección de energía, asegurando que la electricidad generada esté disponible para su uso cuando se necesite. Los sistemas de almacenamiento comúnmente utilizados incluyen baterías y supercondensadores, cada uno con sus propias ventajas y consideraciones específicas.

Las baterías, conocidas por su capacidad para almacenar grandes cantidades de energía durante períodos prolongados, son una opción común. Sin embargo, la elección del tipo de batería (como ion-litio, níquel-metal hidruro, etc.) dependerá de factores como la densidad de energía requerida, la longevidad y la estabilidad.

Por otro lado, los supercondensadores, aunque no almacenan tanta energía como las baterías, se destacan por su capacidad para cargar y descargar energía rápidamente. Esto los hace ideales para aplicaciones que requieren ráfagas de energía en cortos periodos de tiempo.

En resumen, el proceso desde la recolección de energía por las antenas, su conversión a través de rectificadores, hasta su almacenamiento, es un flujo continuo y sincronizado. Las antenas capturan energía electromagnética, los rectificadores la convierten en una forma utilizable, y los sistemas de almacenamiento aseguran que esta energía esté disponible para su uso posterior. La eficiencia y efectividad de cada etapa son cruciales para el rendimiento general del sistema de recolección de energía.

Capítulo 2

Diseño y simulación

En el siguiente capítulo se adentra en la parte técnica de nuestra investigación, explorando a fondo las simulaciones de la antena y el rectificador, elementos cruciales para el desarrollo de un sistema eficaz de recolección de energía. Este capítulo no solo desglosa el proceso de diseño y las decisiones técnicas detrás de la creación de estos componentes, sino que también presenta una evaluación detallada de su rendimiento a través de simulaciones avanzadas. A través de este análisis, buscamos optimizar el diseño para maximizar la eficiencia de recolección y conversión de energía, estableciendo así las bases para el desarrollo práctico de nuestro sistema.

2.1. Desarrollo de la antena patch

El diseño de una antena patch involucra varios cálculos cruciales que determinan sus propiedades resonantes y de radiación. Basándonos en el enfoque de Constantine A. Balanis [39] en su referencia seminal sobre teoría de antenas, abordamos el diseño sistemático de nuestra antena operando en la banda UHF a 2.45 GHz.

2.1.1. Cálculo de dimensiones

Las dimensiones físicas de la antena son fundamentales para su rendimiento. La longitud (L) y el ancho (W) de la antena patch pueden ser determinados por las siguientes fórmulas, donde ϵ_r representa la constante dieléctrica del sustrato utilizado,

h representa nuestro grosor del sustrato, c es la velocidad de la luz, f_r la frecuencia de resonancia deseada, y ΔL es la extensión de longitud debido al efecto de borde, como se puede apreciar en la Figura 2.1.

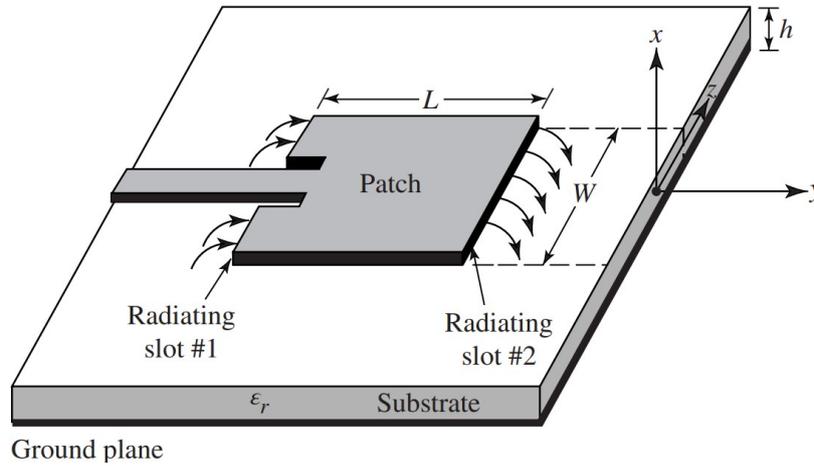


Figura 2.1: Diagrama de una antena patch rectangular [39].

Como punto de partida para poder realizar estos cálculos necesitamos elegir el material en el cual se realizara la antena, en este caso elegimos la baquelita, debido a su facilidad de adquisición. Material el cual nos da una constante dieléctrica $\epsilon_r = 4.4$, un grosor $h = 1.6 \text{ mm}$ y como ya elegimos nuestra frecuencia de resonancia objetivo $f_r = 2.45 \text{ GHz}$, por ende podemos calcular las dimensiones requeridas.

Primero, calculamos el ancho (W) de la antena:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.1)$$

$$W \approx 37.3 \text{ mm}$$

Luego, determinamos la constante dieléctrica efectiva; (ϵ_{eff}):

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx 4.0812 \text{ mm}$$

El cálculo de la extensión de longitud ΔL se da por:

$$\Delta L = \left(\frac{\epsilon_{\text{eff}} + 0.3}{\epsilon_{\text{eff}} - 0.258} \right) \left(\frac{W/h + 0.264}{W/h + 0.8} \right) \cdot 0.412 \cdot h \quad (2.3)$$

$$\Delta L = 0.7386 \text{ mm}$$

La longitud efectiva (L_{eff}) se calcula como:

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \cdot 1000 \quad (2.4)$$

$$L_{\text{eff}} = 30.306 \text{ mm}$$

Y finalmente, obtenemos la longitud física actual (L) de la antena:

$$L = L_{\text{eff}} - 2 \cdot \Delta L \quad (2.5)$$

$$L = 28.829 \text{ mm}$$

Estos cálculos brindan una base para el diseño óptimo de la antena, enfocándose en la eficiencia de operación en la frecuencia deseada de 2.45 GHz .

Cálculo del ancho de banda

El ancho de banda de la antena es crucial para determinar su capacidad para operar efectivamente en un rango de frecuencias. Se puede estimar mediante:

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (2.6)$$

Donde f_2 y f_1 son las frecuencias a las que la potencia cae $3dB$ desde el pico, y f_r es la frecuencia de resonancia.

Determinación de la impedancia de entrada

La impedancia de entrada afecta la eficiencia de transferencia de energía de la antena y se calcula a través de:

$$Z_{in} = Z_0 \left(\frac{1 + j \frac{Z_0}{R_{in}} \tan(\beta L)}{1 + j \frac{Z_0}{R_{in}} \tan(\beta L)} \right) \quad (2.7)$$

Donde Z_0 es la impedancia característica del medio, β es la constante de propagación y L la longitud del parche.

Evaluación de la ganancia

La ganancia de una antena indica su eficiencia en dirigir la energía en una dirección específica:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.8)$$

Donde A_e es el área efectiva de la antena y λ es la longitud de onda de la señal. Estos cálculos adicionales complementan los aspectos fundamentales del diseño de la antena, proporcionándonos así una visión completa de cómo optimizar su rendimiento para aplicaciones específicas de recolección de energía.

2.1.2. Optimización de las dimensiones

Tras calcular las dimensiones y propiedades físicas, procedemos con simulaciones utilizando software especializado como lo es HFSS, que permite evaluar parámetros críticos como la ganancia, el patrón de radiación, la impedancia de entrada y el ancho de banda de la antena.

Estos cálculos y simulaciones son esenciales para el diseño óptimo de una antena patch que cumpla con los requisitos específicos de nuestra aplicación de recolección de energía, asegurando la máxima eficiencia y rendimiento, cumpliendo con el diagrama que se visualiza en la Figura 2.2.

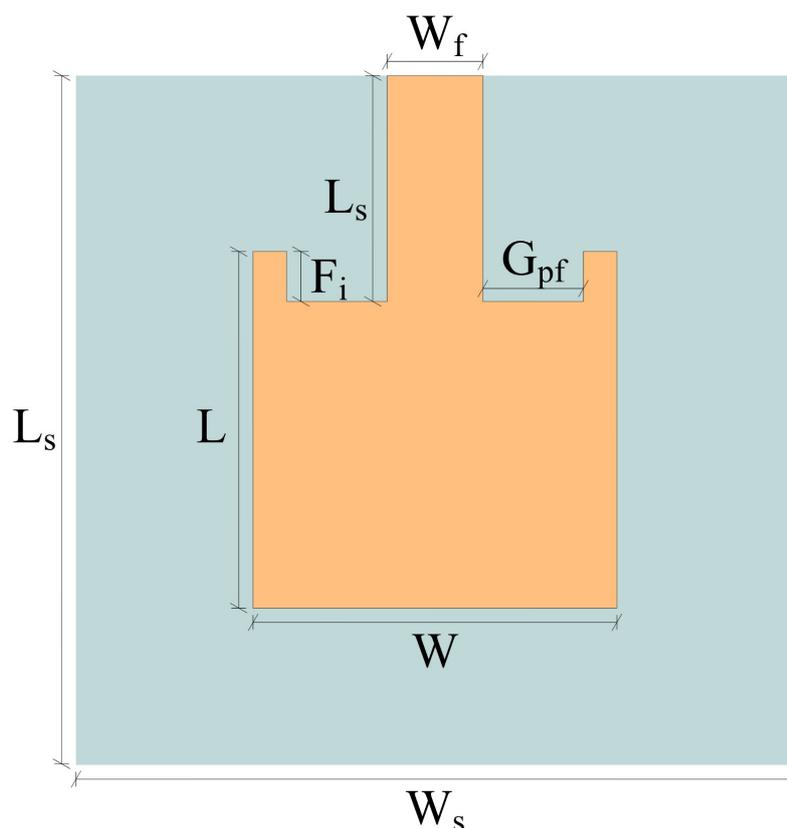


Figura 2.2: Diagrama de una antena patch rectangular

Mediante múltiples iteraciones en HFSS para ajustar dimensiones críticas como la longitud y el ancho de la antena, la posición y la dimensión de los elementos radiantes, y otros parámetros estructurales relevantes. Como lo fueron sobre todo las ranuras tanto en el plano de tierra como en la antena patch. Nos dieron como resultado la mejor respuesta en dos casos donde pudimos conseguir nuestra frecuencia objetivo a una gran resonancia.

Dando como resultados las dimensiones que se muestran en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 para la primera antena y las dimensiones de la Tabla 2.3 y Tabla 2.4 para la segunda antena.

Variables	L_s	W_s	L	W	F_i	G_{pf}	W_f	h	L_f
Valores (mm)	70	70	28.72	38	10	6	2.3	1.6	33

Tabla 2.1: Variables de la antena uno

Variables	Valores (mm)	Variables	Valores (mm)
S_L	3.25	h_2	1
S_h	4.2	R_{3L}	10
R_{1L}	11	D_1	4.7
R_{1h}	6	R_{3h}	6
h_1	32	h_c	11.65
R_{2L}	9	h_3	1
R_{2h}	6	h_f	17.3

Tabla 2.2: Variables de inserción de la antena uno

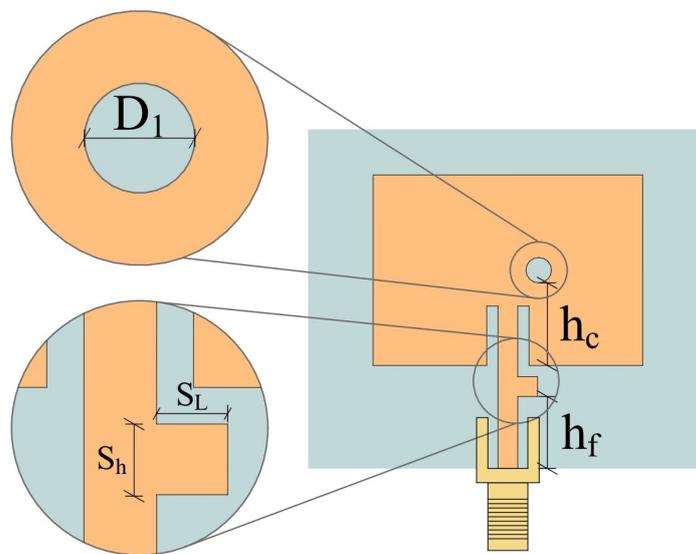


Figura 2.3: Vista frontal de la antena uno

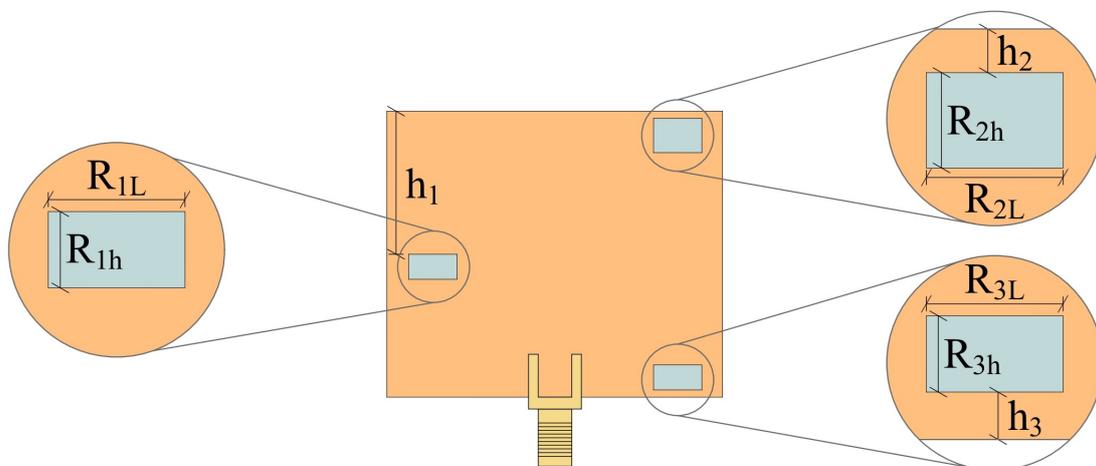


Figura 2.4: Vista posterior de la antena uno

Valores	L_s	W_s	L	W	F_i	G_{pf}	W_f	h	L_f
Valores (mm)	40	55	26.7	30	11	4	1.53	1.6	8.5

Tabla 2.3: Variables de la antena dos

Variables	Valores (mm)
D_1	4
h_1	10.5
L_1	0.6
D_2	8
h_2	12.5
L_2	1
G_l	30

Tabla 2.4: Variables de inserciones de la antena dos

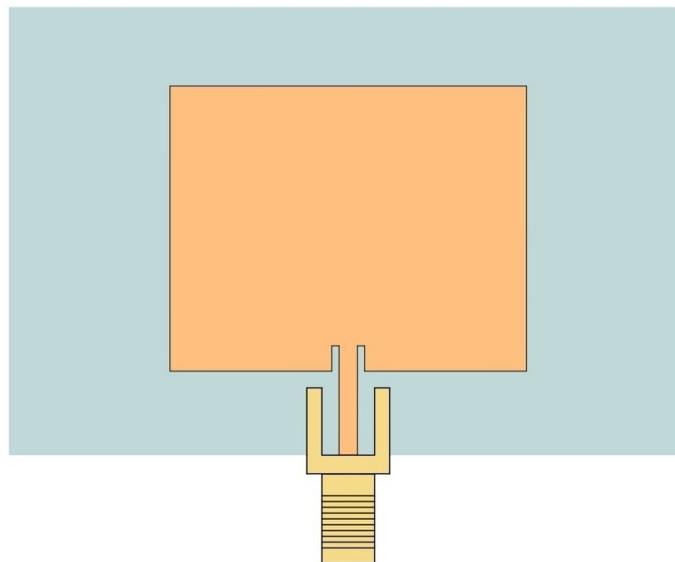


Figura 2.5: Vista frontal de la antena dos

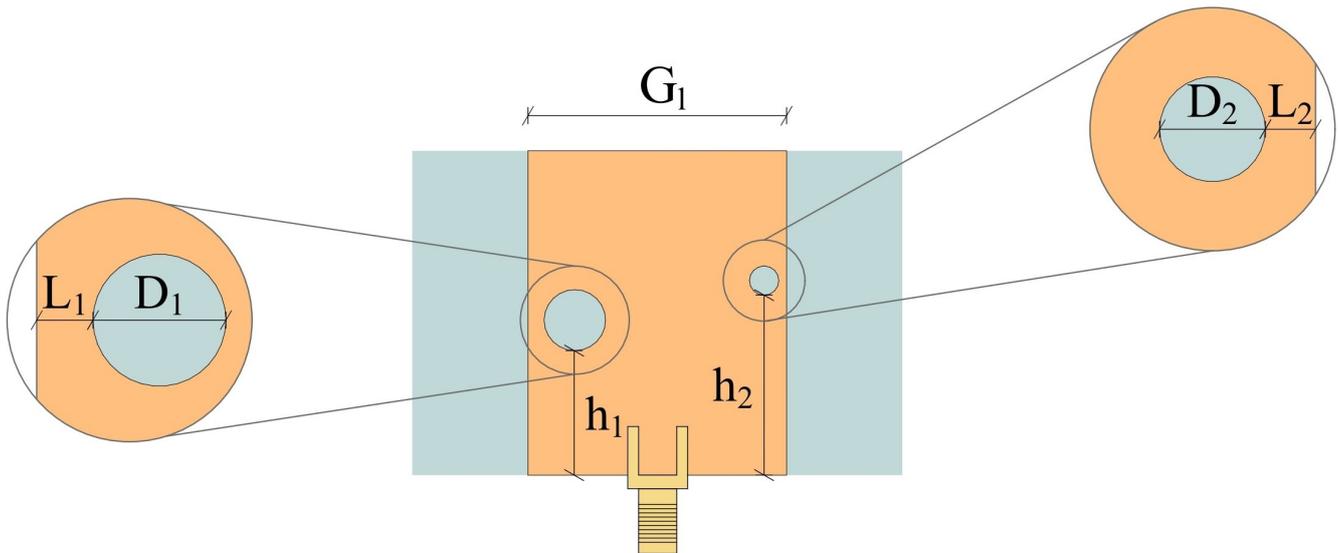
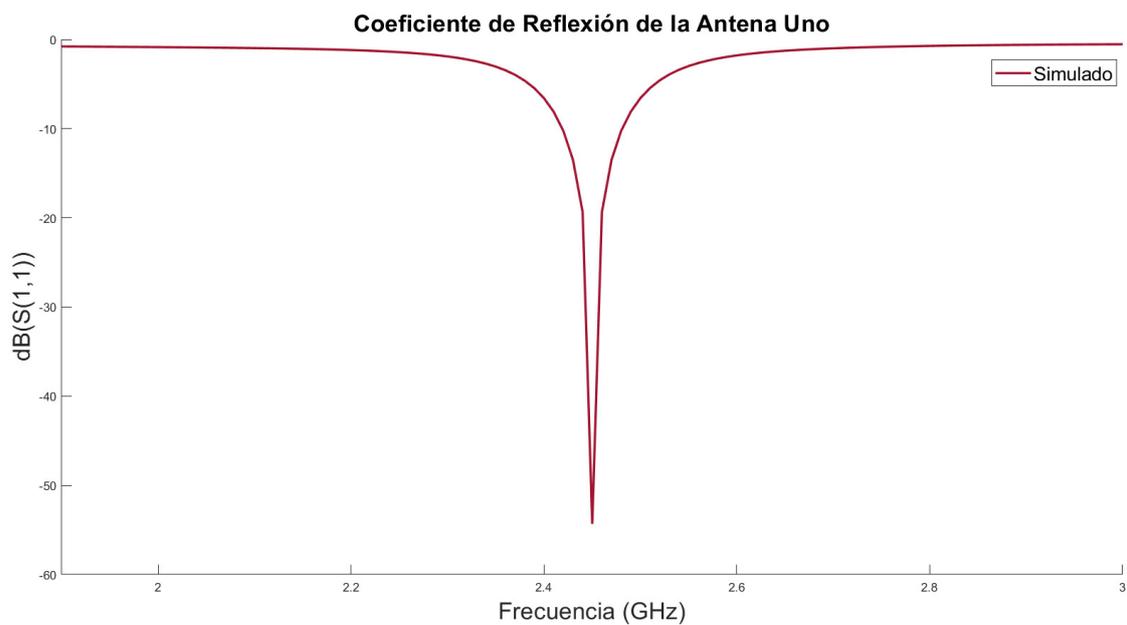


Figura 2.6: Vista posterior de la antena dos

2.1.3. Resultados de las simulaciones

Como parámetro crucial obtenemos nuestro S_{11} para poder comprobar si logramos obtener nuestra ganancia objetivo de al menos $-50dB$.

Figura 2.7: Coeficiente de reflexión de la antena uno en dB

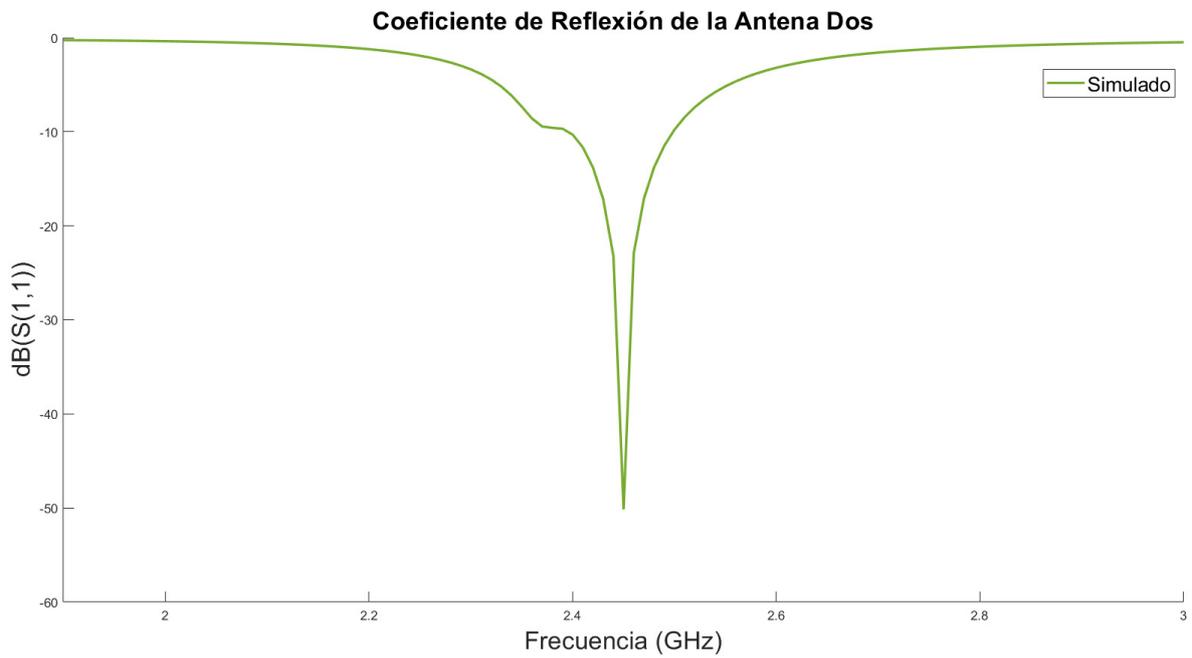


Figura 2.8: Coeficiente de reflexión de la antena dos en dB

A su vez obtenemos nuestros patrones de radiación:

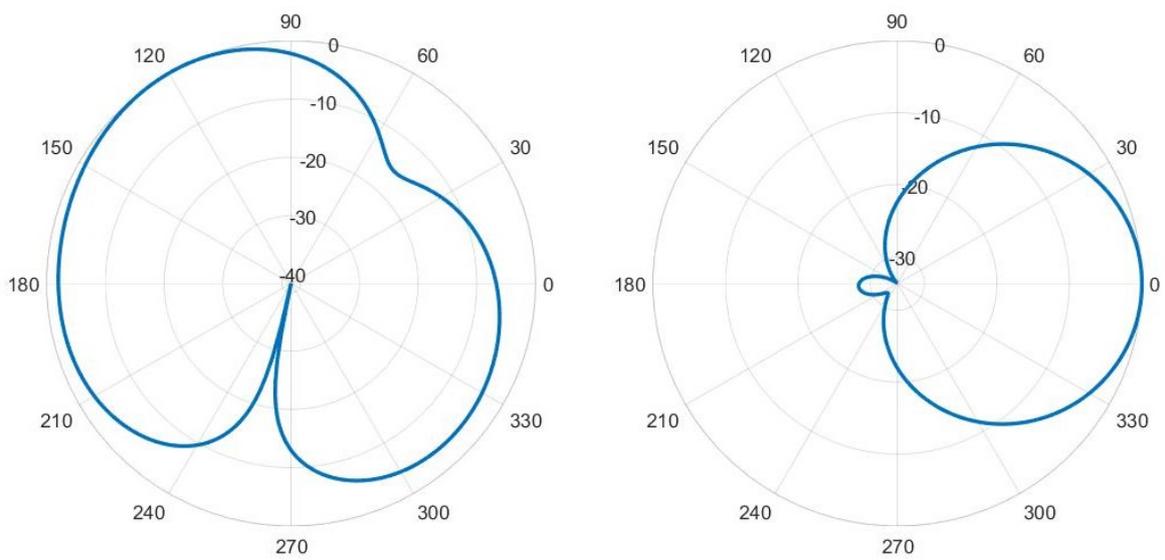


Figura 2.9: Patrón de radiación azimuth y elevación de la antena uno

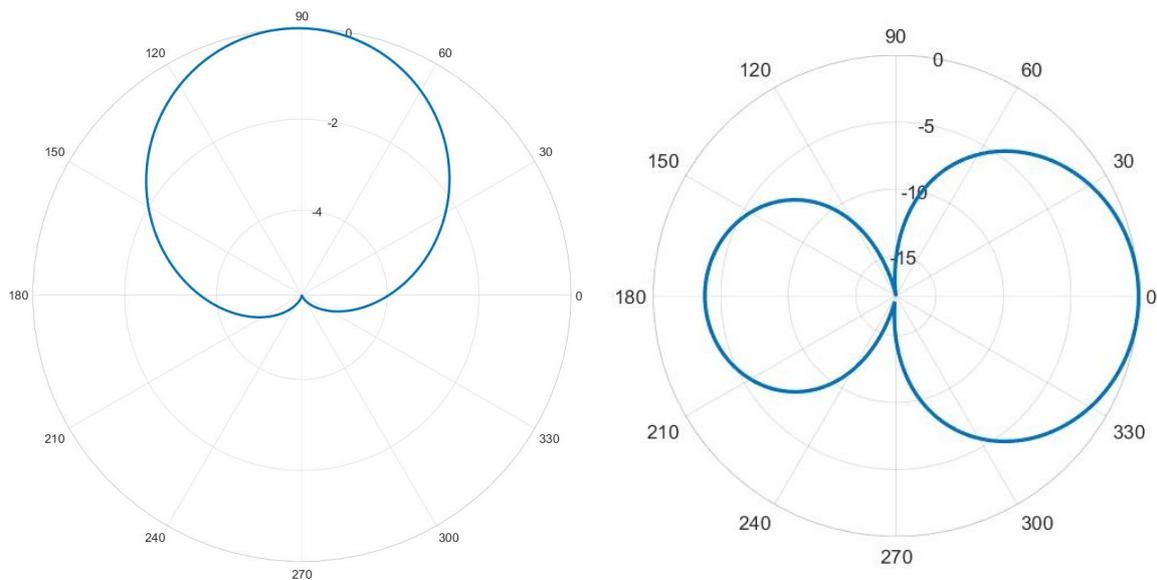


Figura 2.10: Patrón de radiación azimuth y elevación de la antena dos

Como podemos observar cumplimos nuestro objetivo principal, por lo cual podemos decir que nuestras antenas están totalmente optimizadas para poder darle uso en aplicaciones practicas. Por ende se puede considerar las antenas lista para su creación.

2.2. Rectificadores

Al momento de diseñar un rectificador es de suma importancia elegir como lo vamos a implementar, ya sea basado en transistores o en diodos Schottky, esto dependerá de las condiciones del sistema, como lo puede ser: la frecuencia de resonancia y la disponibilidad de elementos electrónicos. Particularmente en este caso, se optó por utilizar un esquema basado en diodos Schottky, utilizando dos tipos: el modelo SMS7630-079LF y, el modelo HSMS286C.

2.2.1. Creación de los rectificadores

Debido a que para nuestra aplicación necesitamos que el sistema funcione a la frecuencia de 2.45 GHz , es necesario realizar un acoplamiento de impedancias, proceso

el cual es realizado en base al enfoque de David Pozar [40] el cual nos dice que al tener una impedancia de entrada diferente a la impedancia de salida se imperativo realizar un diseño de un stub simple. A continuación, realizamos la normalización de impedancia del diodo la cual se hace mediante nuestra impedancia de entrada y la del diodo:

Diodo modelo SMS7630-079LF

Como punto de partida obtenemos el valor de Z_L de nuestro diodo mediante su hoja de datos, [41], [42]:

$$Z_L = 20 + j \cdot 464,01\Omega$$

$$Z_0 = 50\Omega$$

$$Z'_L = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (2.9)$$

$$Z'_L = 0,4 + j \cdot 9,2802\Omega$$

Diodo modelo modelo HSMS286C

$$Z_L = 6 + j \cdot 360,90\Omega$$

$$Z_0 = 50\Omega$$

$$Z'_L = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (2.10)$$

$$Z'_L = 0,12 + j \cdot 7,22\Omega$$

Acoplamiento de impedancias

Para agilizar este proceso podemos emplear el simulador *Advanced Design System* (ADS), el cual nos permite utilizar varias herramientas, como lo es la carta de Smith, que garantiza un cálculo preciso de las líneas microstrip según los datos y la implementación del usuario. Además, proporciona una herramienta especializada en el cálculo de *Single-stub*, simplificando así el proceso de ajuste de impedancias. Esto se ilustra en la Figura 2.11.

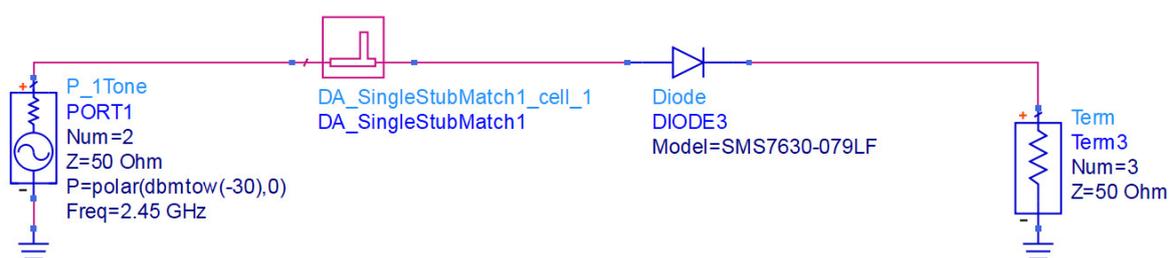


Figura 2.11: Implementación de la herramienta *Single Stub Match*

Como resultado obtenemos la Figura 2.12, la cual nos provee de datos importantes como la impedancia, frecuencia de resonancia y, especialmente, la permitividad equivalente (ϵ_{eff}). Dichos datos nos sirven como entrada para la herramienta *LineCalc*, como se muestra en la Figura 2.13 del simulador de ADS. Esta herramienta proporciona tanto el ancho (W) como la longitud (L) de las líneas, tomando los parámetros del sustrato, que en este caso es baquelita como ya antes fue mencionado en nuestro diseño de antenas.

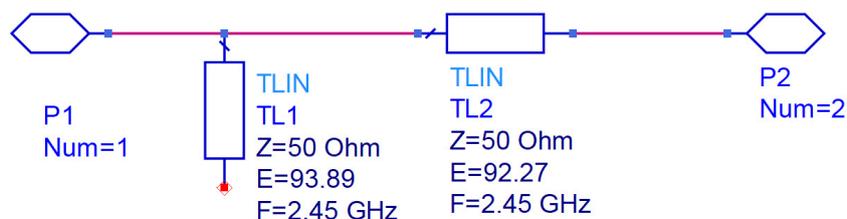


Figura 2.12: Resultado de la herramienta *Single Stub Match*

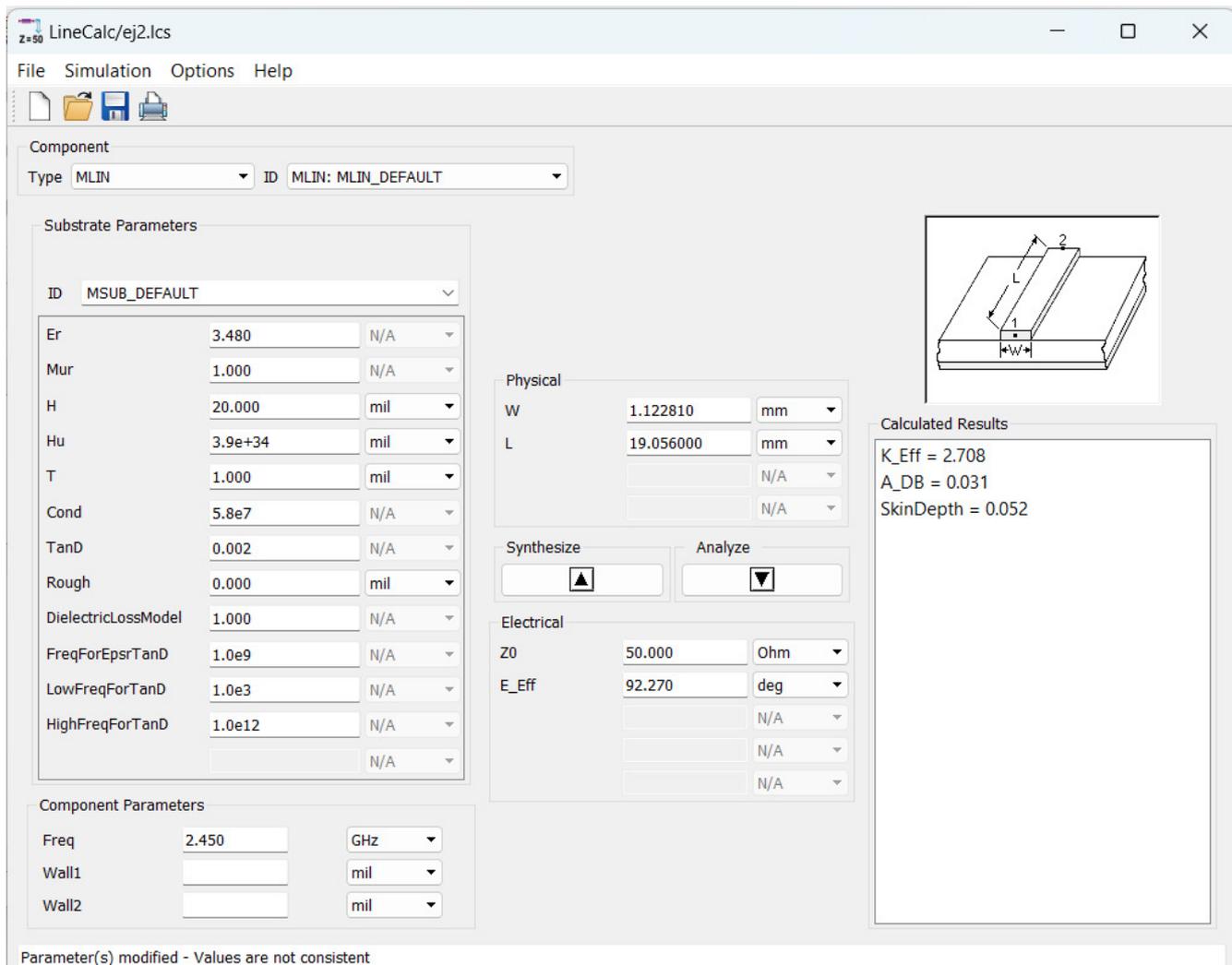


Figura 2.13: Implementación de la herramienta calculo de la linea microstrip

Como resultado del uso del simulador se obtuvo un *Single-stub* con sus medidas correspondientes como se visualiza en la Figura 2.14, cuyo objetivo es que el coeficiente de reflexión (S_{11}) tenga la mayor potencia posible, obteniendo como resultado la Figura 2.15, siendo este el esquema básico para la implementación en todos los diseños de rectificadores que garantice un buen acoplamiento y potencia.

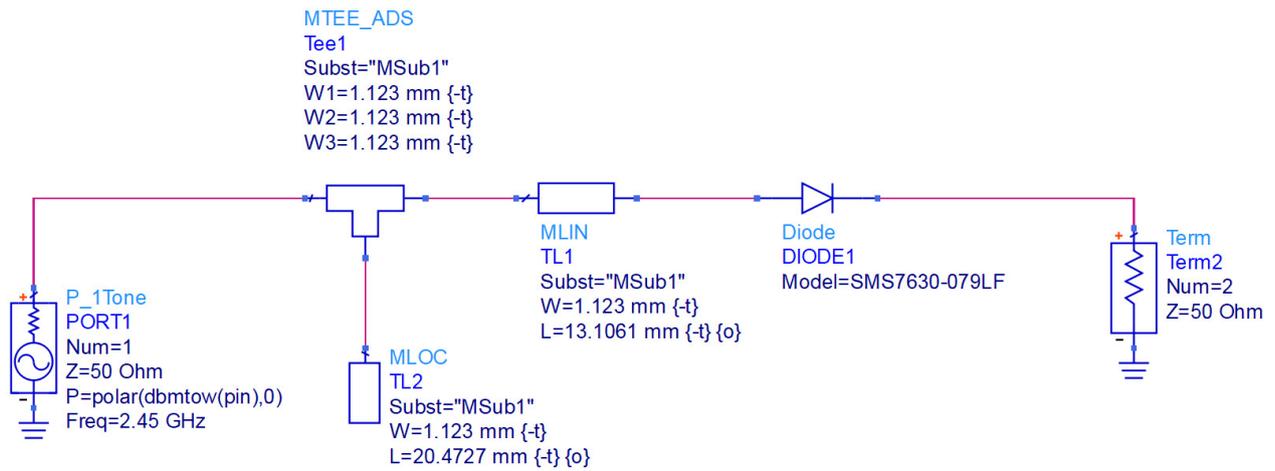


Figura 2.14: Implementación del single stub con el diodo a analizar

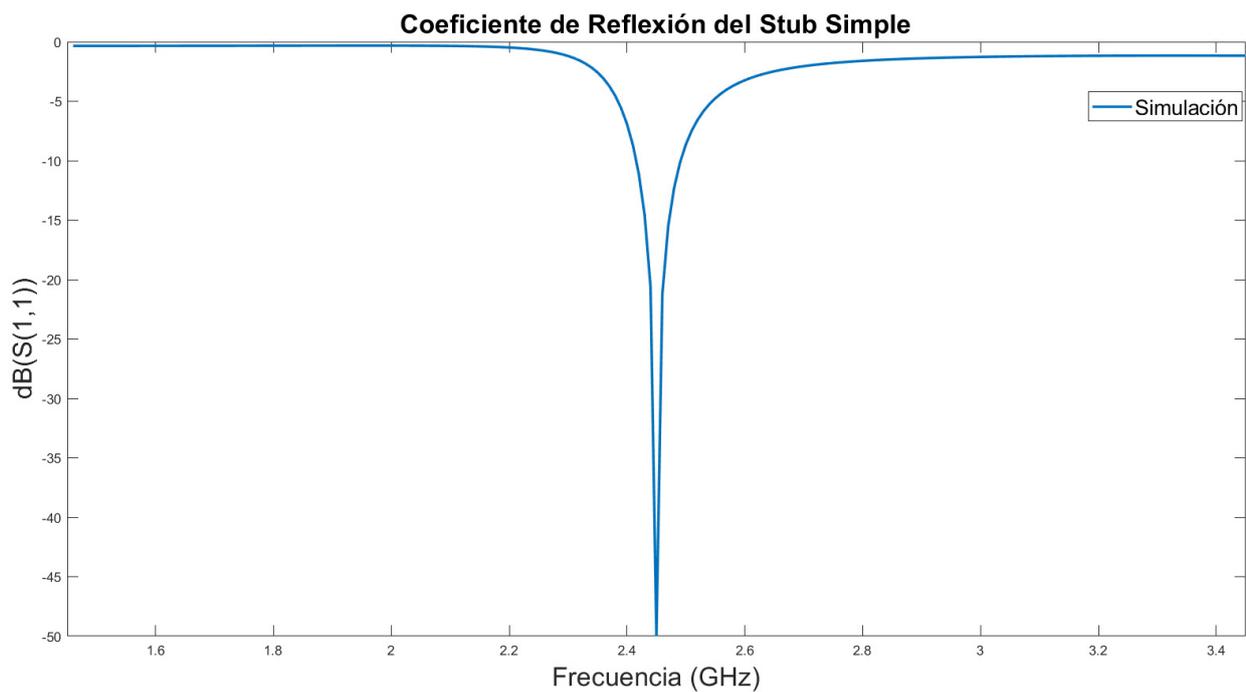


Figura 2.15: Respuesta del coeficiente de reflexión en dB

2.2.2. Rectificadores a base de diodos SMS7630-079LF

Rectificador de banda doble

Para el diseño inicial del primer rectificador, implementamos el acoplamiento de impedancias mencionado previamente. En este diseño, creamos una línea microstrip que asegura un espacio para soldar el conector SMA hembra. Dado que en el ámbito de radiofrecuencia, incluso pequeños cambios en las dimensiones de una línea microstrip pueden afectar negativamente la respuesta del sistema, por ende es crucial considerar cuidadosamente diversos escenarios para garantizar la estabilidad de nuestro diseño ante posibles cambios. Como resultado, se diseñó una línea microstrip que toma en cuenta tanto el ancho de entrada del conector como el ancho del acoplamiento de impedancias.

Debido a que tenemos una variación en la potencia de entrada de nuestra fuente, que oscila entre $-30dB$ y $-10dB$, resulta imperativo igualar los valores de las impedancias, siguiendo la sugerencia de Rehman, Ahmad y Khan [43]. Este ajuste garantiza una recolección de energía óptima. En nuestra búsqueda de la máxima eficiencia, aprovechamos la herramienta de optimización proporcionada por el simulador ADS. Para este proceso, variamos el ancho y largo de las líneas microstrip, pero manteniendo constante la línea microstrip de soldadura.

La figura 2.16 muestra el diseño del rectificador optimizado en función del parámetro S_{11} , cuya representación se detalla en la figura 2.18, con una potencia de entrada de $-30dB$.

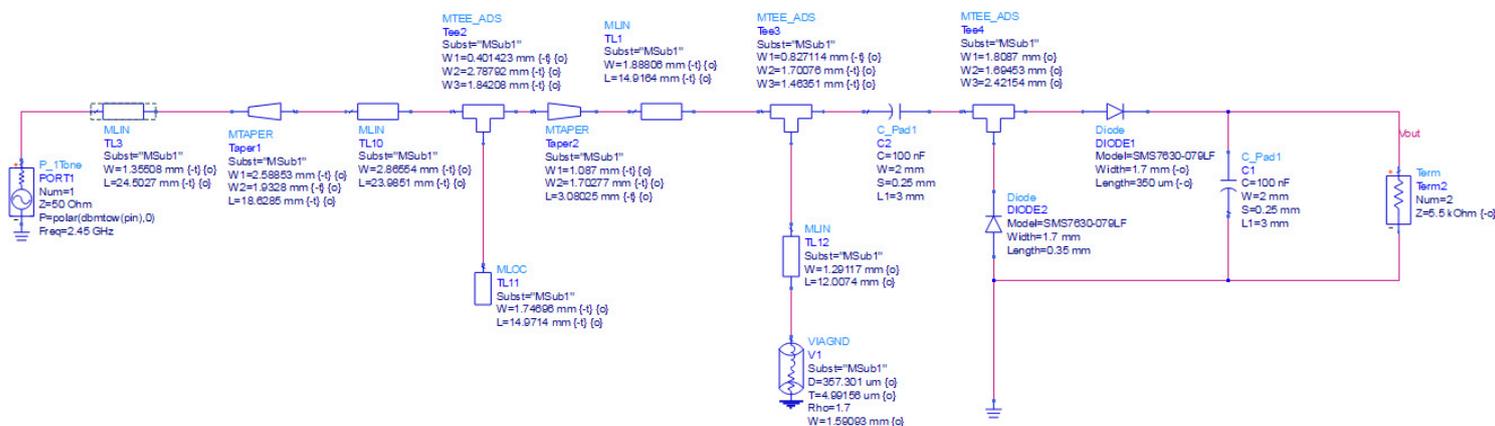
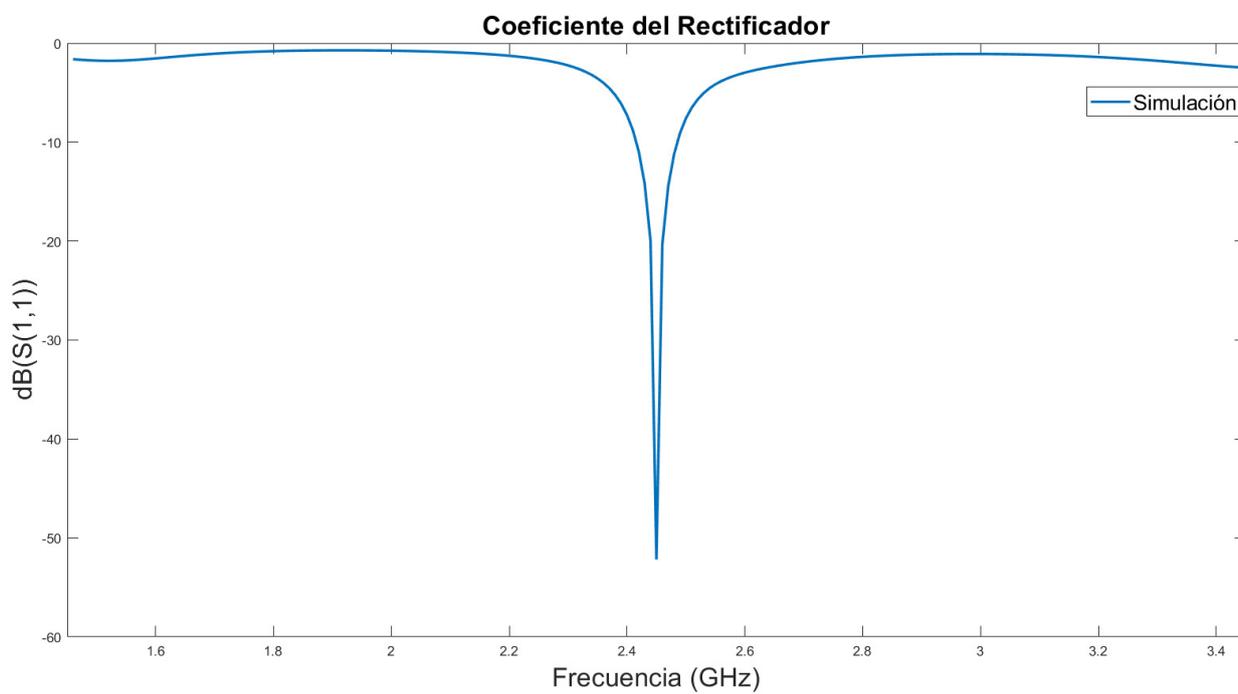


Figura 2.16: Diagrama esquemático del primer rectificador



Figura 2.17: Placa del primer rectificador

Figura 2.18: Respuesta del coeficiente de reflexión en dB

Rectificador para ambientes de poca densidad de potencia

En el diseño del segundo rectificador, se inició abordando el acoplamiento de impedancia, asignando una porción específica para la soldadura del conector SMA. Por otro lado, dado que la eliminación de armónicos es fundamental, se desarrolló una estrategia basada en la eliminación efectiva de estos componentes no deseados que distorsionan la señal en cualquier sistema de radiofrecuencia, tomando como guía el trabajo de Li, Fan y Yang [44]. Para ello, se implementó una rama de cortocircuito de 1/4 de longitud de onda, con el propósito de evitar la entrada de armónicos de alto orden en el circuito rectificador. Además, se introdujo un filtro de circuitos complementarios para suprimir aún más estos armónicos. Este enfoque de supresión incluyó el uso de líneas microstrip de longitud de onda específicas, 1/4 para los armónicos pares y 1/8 para los impares. Para optimizar la eficiencia del diseño, se aplicó un algoritmo basado en el parámetro S_{11} , proporcionado por el simulador ADS. Como resultado de este proceso, se obtuvo el diagrama esquemático detallado en la Figura 2.19, junto con la representación de la respuesta del coeficiente de reflexión en la Figura 2.21.

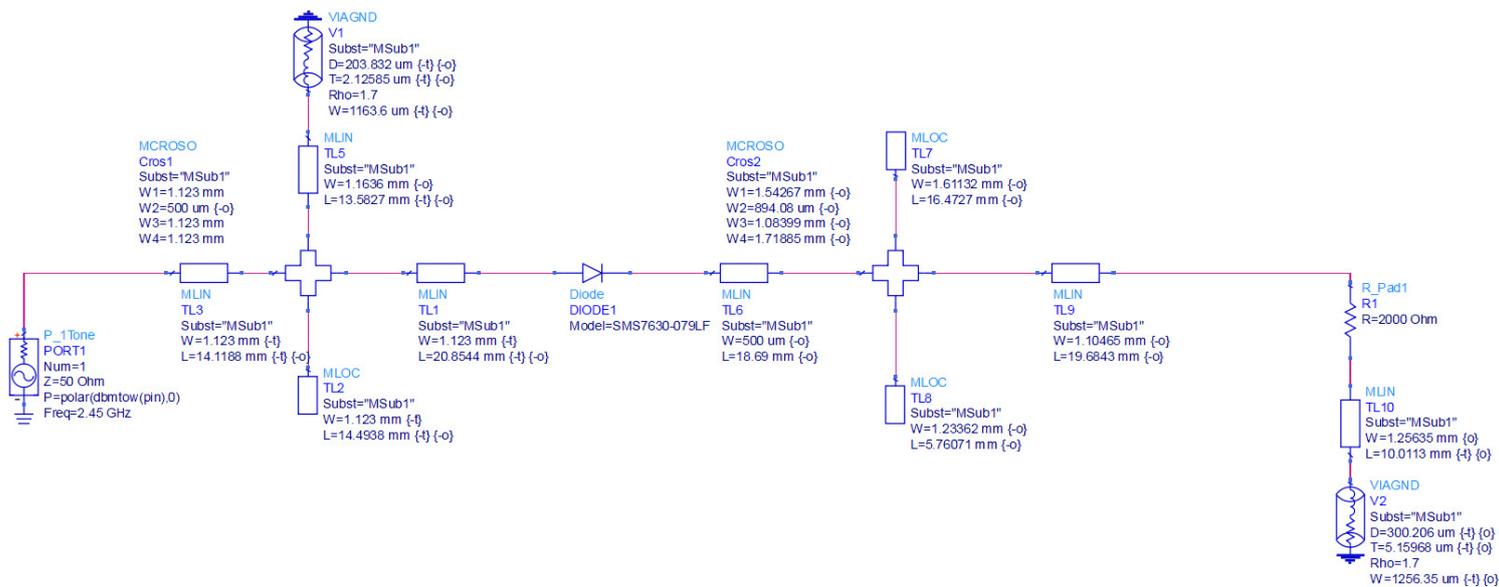


Figura 2.19: Diagrama esquemático del segundo rectificador

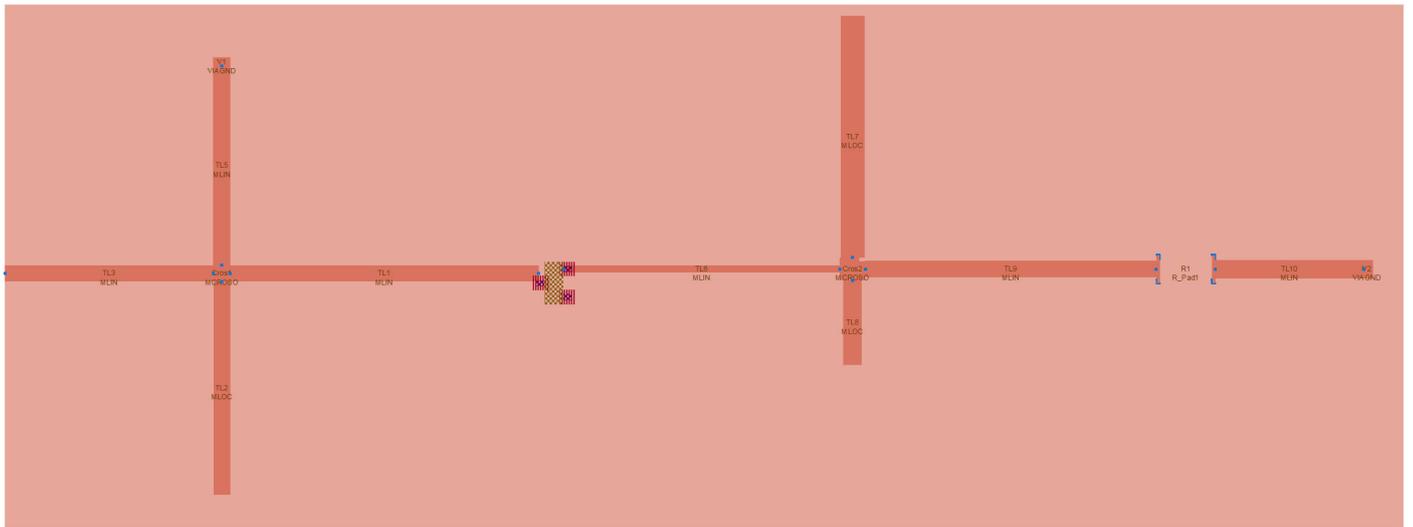


Figura 2.20: Placa del segundo rectificador

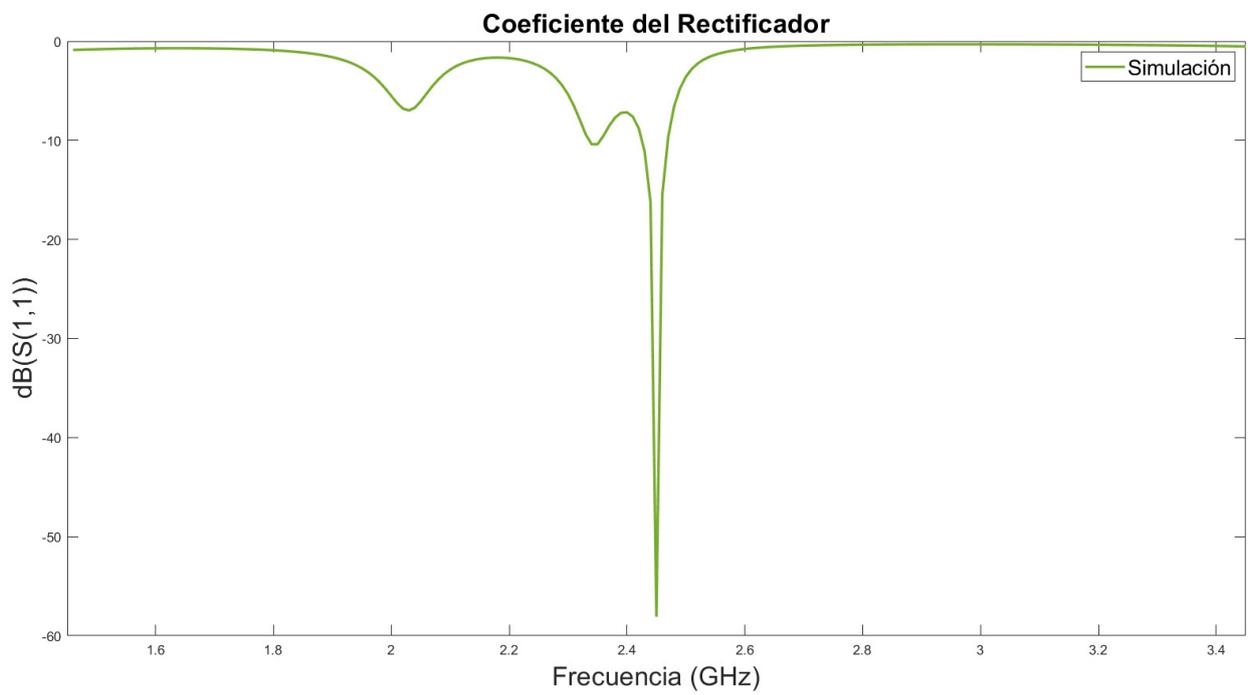


Figura 2.21: Respuesta del coeficiente de reflexión en dB

Rectificador basado en líneas microstrip

La estrategia para el diseño del tercer rectificador se fundamentó en el trabajo investigativo de Benayad & Tellache [45], cuyo artículo describe detalladamente el diseño de un rectificador basado en líneas de transmisión microstrip no uniformes (NULT). El enfoque principal de este diseño es la exploración de diversas dimensiones en las líneas microstrip con el objetivo de acoplar la impedancia de entrada y la impedancia del diodo sin la necesidad de utilizar un elemento pasivo como un condensador. El diagrama esquemático de este diseño se presenta en la Figura 2.22, mientras que la respuesta del coeficiente de reflexión se ilustra en la Figura 2.24. Al buscar la máxima eficiencia del rectificador, se aplicó la herramienta de optimización proporcionada por el simulador ADS. Sin embargo, como se observó en los resultados de la Figura 2.24, los resultados obtenidos no son los esperados. Este hallazgo resalta la complejidad de alcanzar la máxima eficiencia en el diseño de rectificadores y subraya la importancia de seguir investigando nuevas estrategias y técnicas para mejorar el desempeño de estos dispositivos.

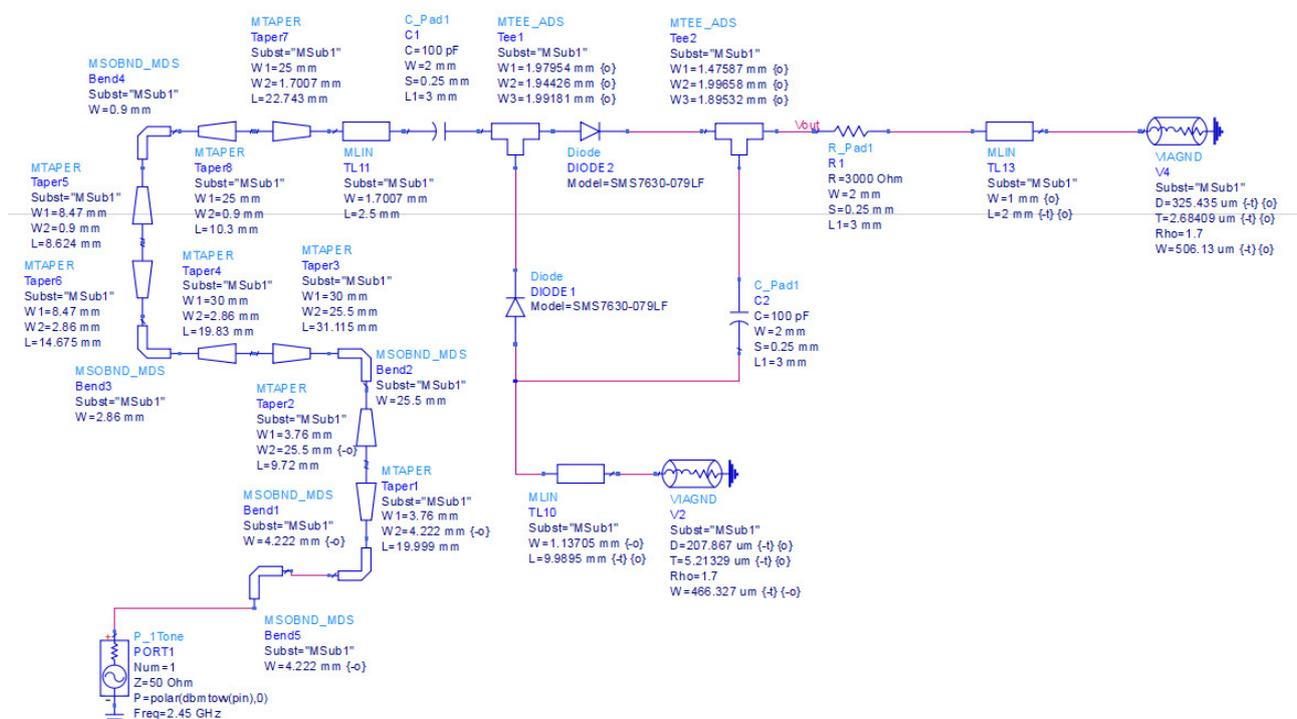


Figura 2.22: Diagrama esquemático del tercer rectificador

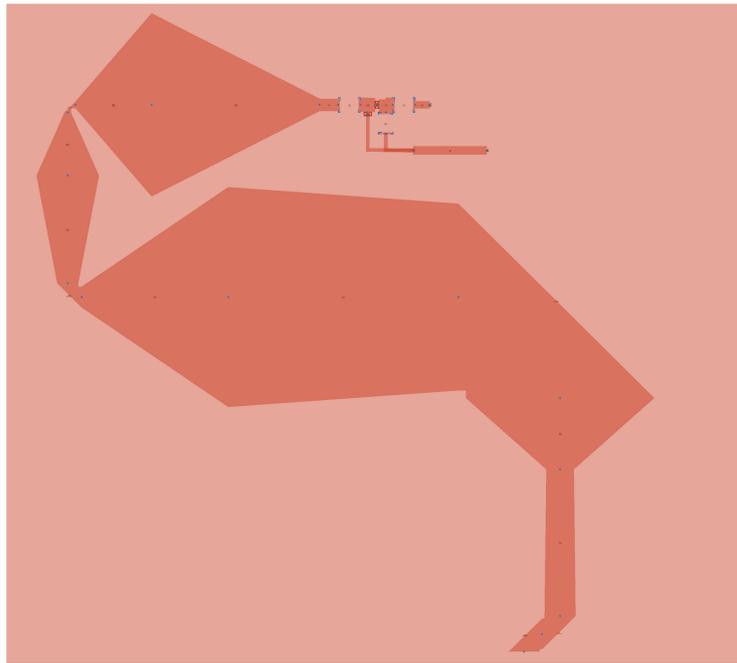


Figura 2.23: Placa del tercer rectificador

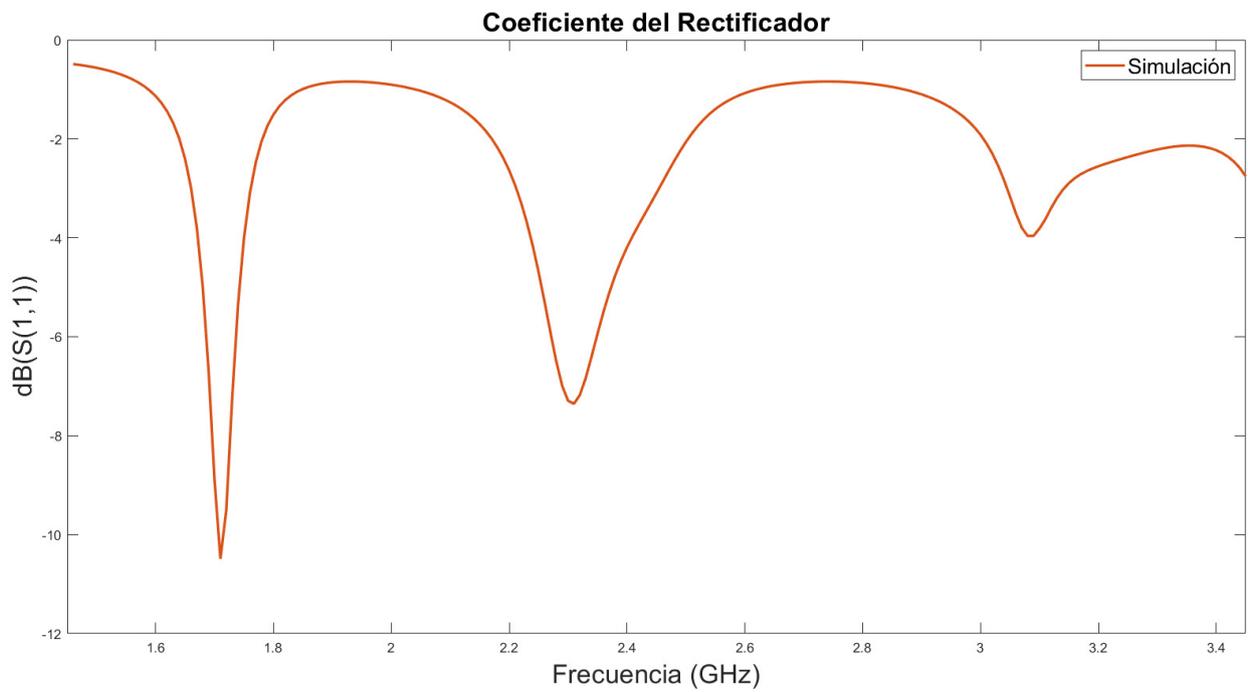


Figura 2.24: Respuesta del coeficiente de reflexión en dB

2.2.3. Rectificador a base de diodos HSMS-286C

Rectificador de banda doble para transmisión

Para el diseño de este rectificador, se implementó una red de adaptación de impedancia en una configuración de una sola etapa, utilizando segmentos de línea de transmisión dispuestos en forma de rectificador en forma de “L”. Este enfoque se basó en el artículo de Jian Liu, Mo Huang y Zisheng Du [46], donde se detalla el proceso de diseño centrado en el acoplamiento de impedancias y la eliminación de armónicos en frecuencias que no son de interés, lo cual es crucial para garantizar la pureza de la señal. Sin embargo, con el objetivo de maximizar la eficiencia del rectificador y optimizar su desempeño en la banda de frecuencia de interés, se empleó la herramienta de optimización disponible en el simulador ADS. Esta herramienta permitió ajustar el diseño para operar eficientemente en una sola banda de interés, seleccionada en este caso a 2.45 GHz. El resultado final del diseño del rectificador se presenta en la Figura 2.25, junto con los datos obtenidos, que se muestran en la Figura 2.27.

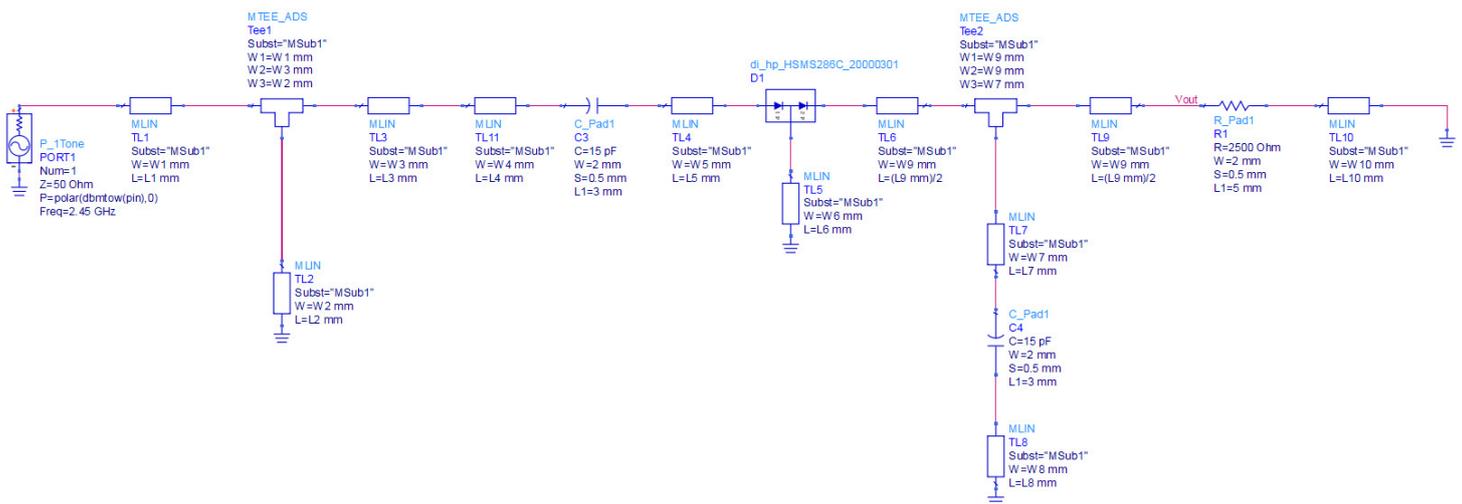


Figura 2.25: Diagrama esquemático del primer rectificador

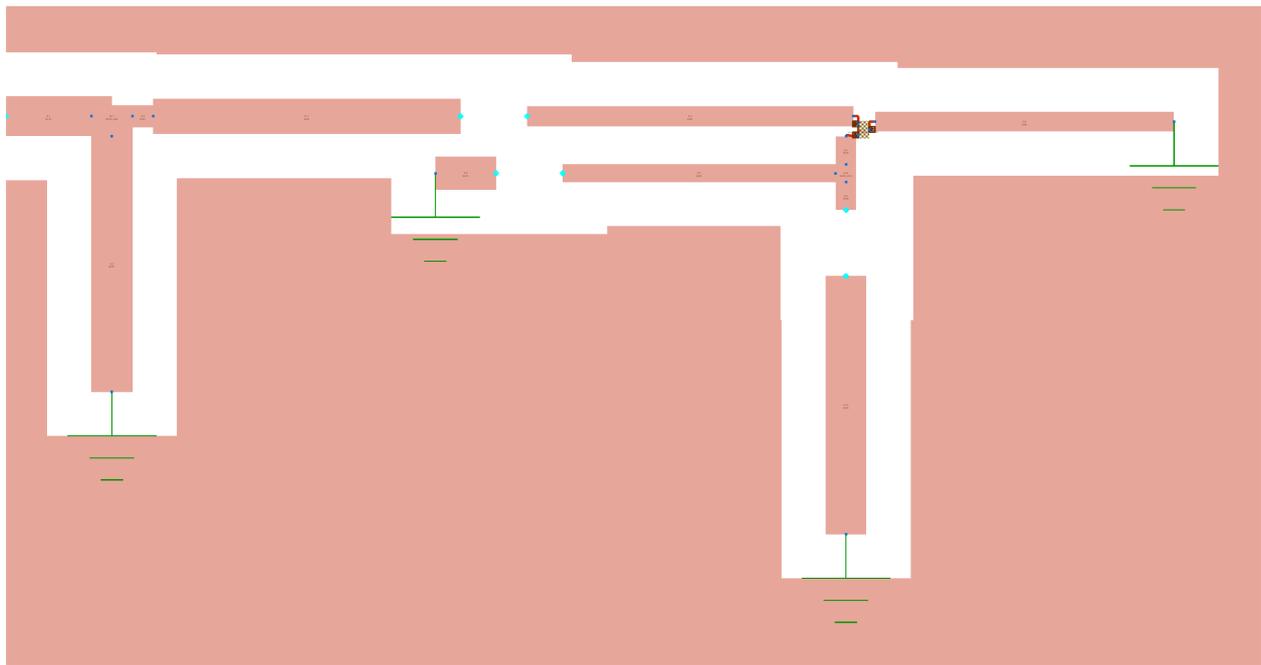


Figura 2.26: Placa del primer rectificador

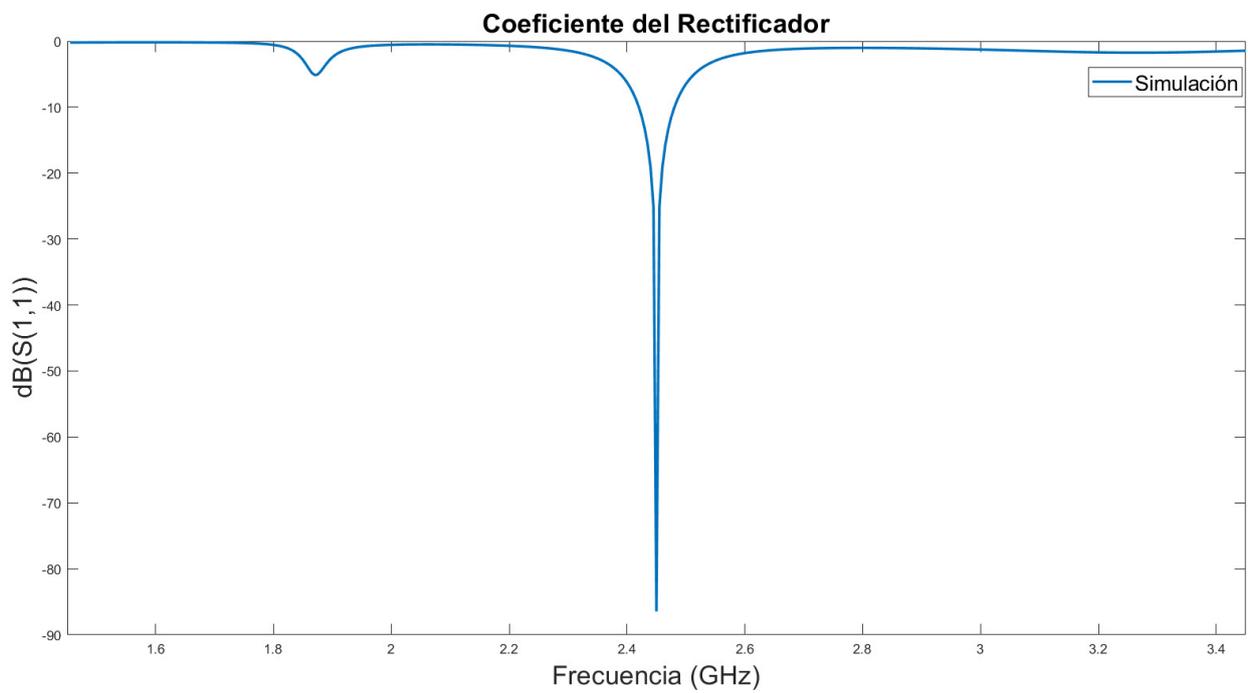


Figura 2.27: Respuesta del coeficiente de reflexión en dB

Rectificador de banda triple

Para el diseño del segundo rectificador, optamos por un rectificador duplicador de tensión, como su nombre sugiere, amplía el voltaje en su salida mediante la incorporación de capacitores. Nos basamos en el artículo de Tafekirt, Pelegri-Sebastia, Bouajaj y Mohamed [47], que ofrece una guía detallada sobre el proceso. El diseño incluyó un acoplamiento de impedancias para asegurar que la entrada de potencia sea óptima y no afecte negativamente al sistema. Este acoplamiento constó de un stub radial, un stub corto y varias líneas de transmisión, todas cuidadosamente seleccionadas para garantizar un buen acoplamiento a la frecuencia de 2.45 GHz. Implementamos el duplicador de tensión y diseñamos un filtro compuesto por stubs radiales y líneas de transmisión en serie para eliminar la señal de frecuencia fundamental y los armónicos generados por los diodos no lineales. Es importante destacar que optimizamos todo el sistema utilizando la herramienta de simulación ADS, en función del parámetro S_{11} . Esto nos permitió obtener el diseño esquemático, que se muestra en la Figura 2.28, y los resultados correspondientes, presentados en la Figura 2.30.

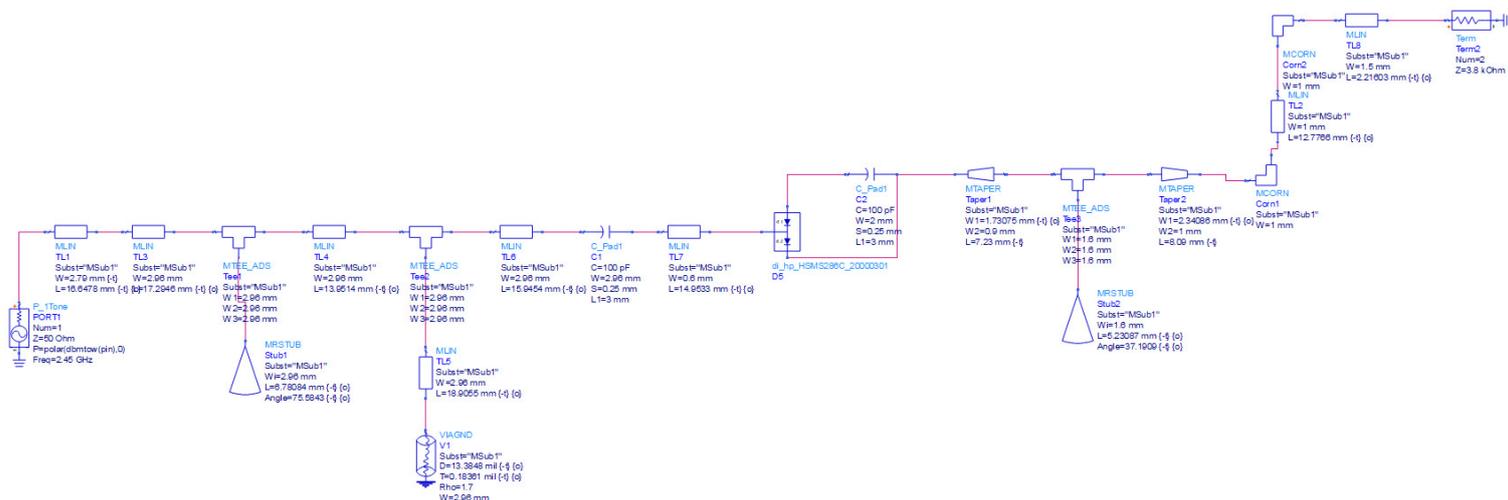


Figura 2.28: Diagrama esquemático del segundo rectificador

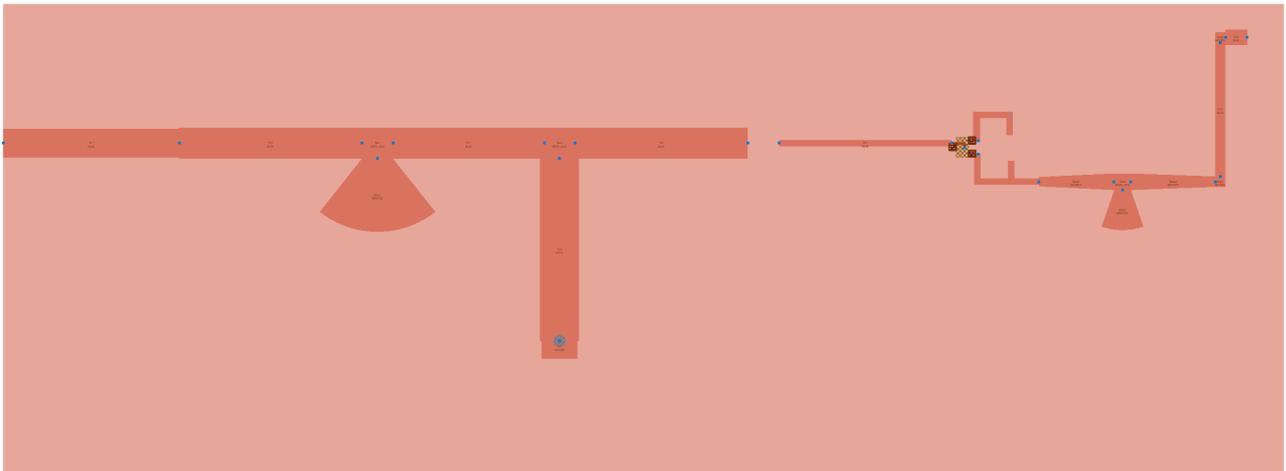
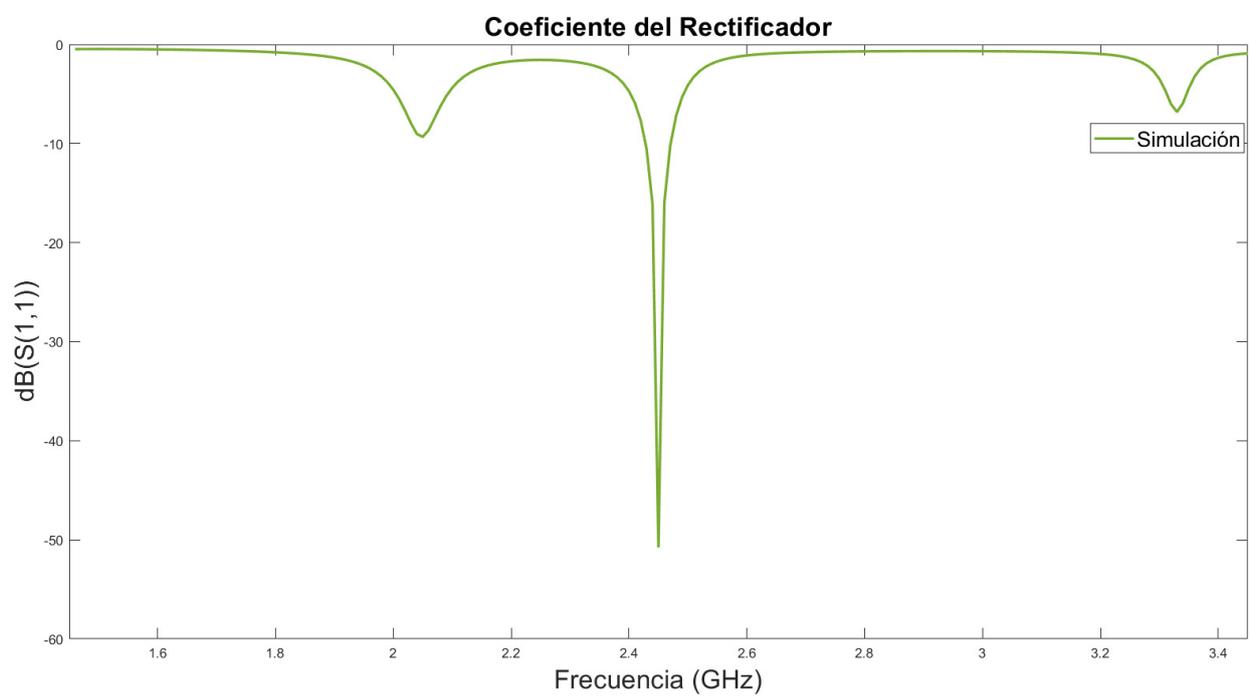


Figura 2.29: Placa del segundo rectificador

Figura 2.30: Respuesta del coeficiente de reflexión en dB

Rectificador acoplado mediante stubs

El diseño de este rectificador se basa en las topologías de Dickson y Villardi, que han demostrado ser eficaces para generar tensiones elevadas a partir de fuentes de alimentación de menor voltaje, como se detalla en el artículo de Ismahayati, Mohd y Siti Norshakila [37]. La topología de Dickson implica la disposición en paralelo de etapas de rectificación, donde cada etapa consta de un diodo y un capacitor. Por otro lado, la topología de Villardi dispone las etapas de forma secuencial, lo que permite una mayor eficiencia en la conversión de la energía al establecer una conexión en cascada. Dado que ambas topologías tienen ventajas y desventajas, se buscó una topología optimizada que combinara lo mejor de cada una para lograr una gran eficiencia en el rectificador diseñado. Basándonos en esta topología, desarrollamos un esquema utilizando el simulador ADS, representado en la Figura 2.31, compuesto por siete etapas, y aplicamos la herramienta de optimización con respecto al parámetro S_{11} . Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 2.33.

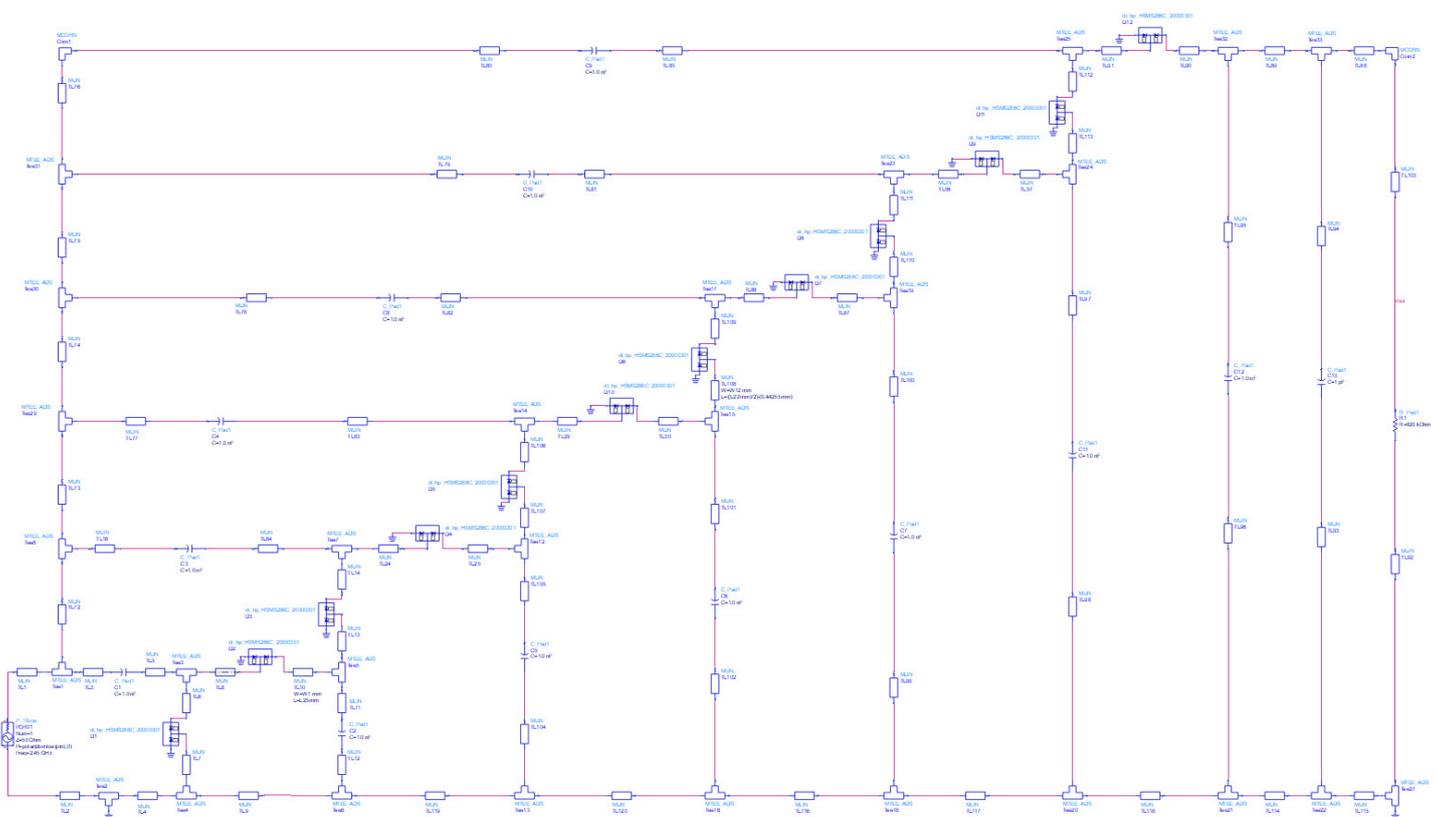


Figura 2.31: Diagrama esquemático del quinto rectificador

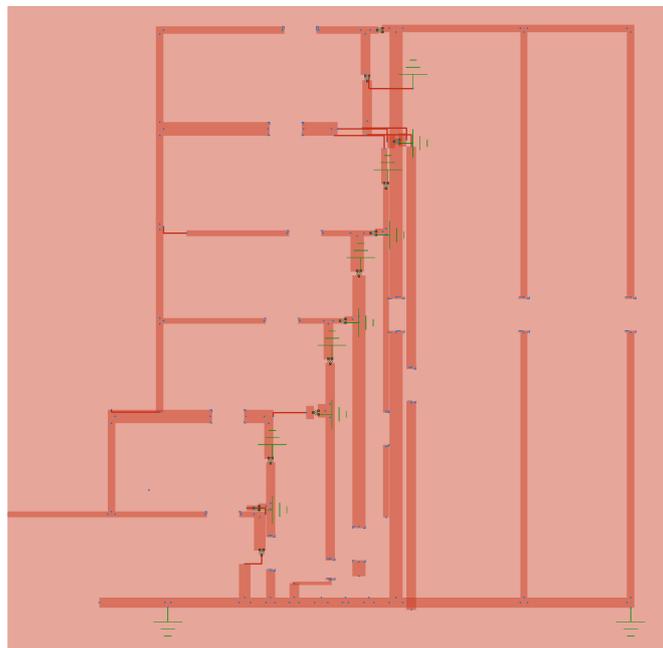
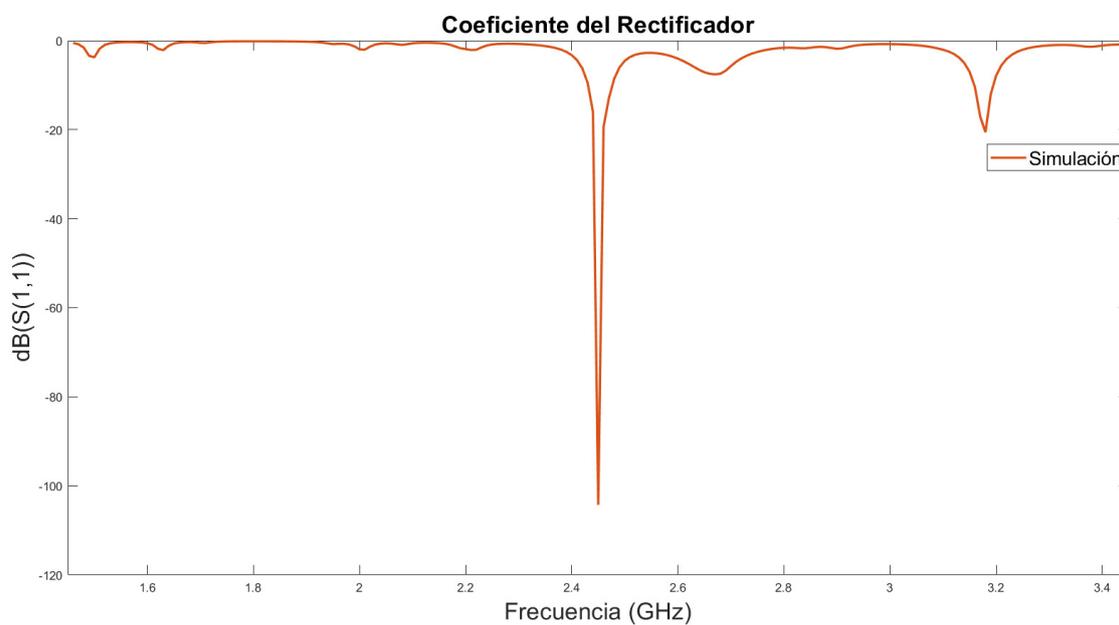


Figura 2.32: Diagrama esquemático del quinto rectificador

Figura 2.33: Respuesta del coeficiente de reflexión en dB

Capítulo 3

Construcción y Pruebas

Este capítulo se dedica a la fase práctica del proyecto, donde se lleva a cabo la construcción del sistema de recolección de energía diseñado, seguido por una serie de pruebas exhaustivas para evaluar su rendimiento. Y finalmente los resultados son analizados detalladamente, ofreciendo observaciones valiosas sobre la eficacia del diseño propuesto.

3.1. Construcción del prototipo

La construcción del prototipo implicó la selección de materiales, el ensamblaje de componentes electrónicos y la integración del sistema completo.

A continuación se describen los pasos seguidos para el montaje de la antena, el circuito rectificador y el sistema de almacenamiento de energía.

3.1.1. Construcción de la antena patch

En la construcción de la antena, se optó por la fabricación mediante corte láser para asegurar una precisión y exactitud superiores en las dimensiones de la antena. Este método ofrece ventajas significativas sobre técnicas tradicionales, tales como una mayor precisión en el corte, capacidad para manejar complejidades en el diseño de forma eficiente, y reducción en el tiempo de producción. A diferencia de otros métodos como el corte manual o el fresado, que pueden ser menos precisos y más laboriosos, el corte láser permite una elaboración detallada y fiel a las especificaciones de diseño.

La elección de esta técnica subraya la importancia de la precisión en la fabricación de componentes críticos para el rendimiento del sistema de recolección de energía, asegurando que la antena opere en su frecuencia de resonancia óptima y maximice la captación de energía.

Como resultado de este proceso obtenemos antenas como las siguientes:

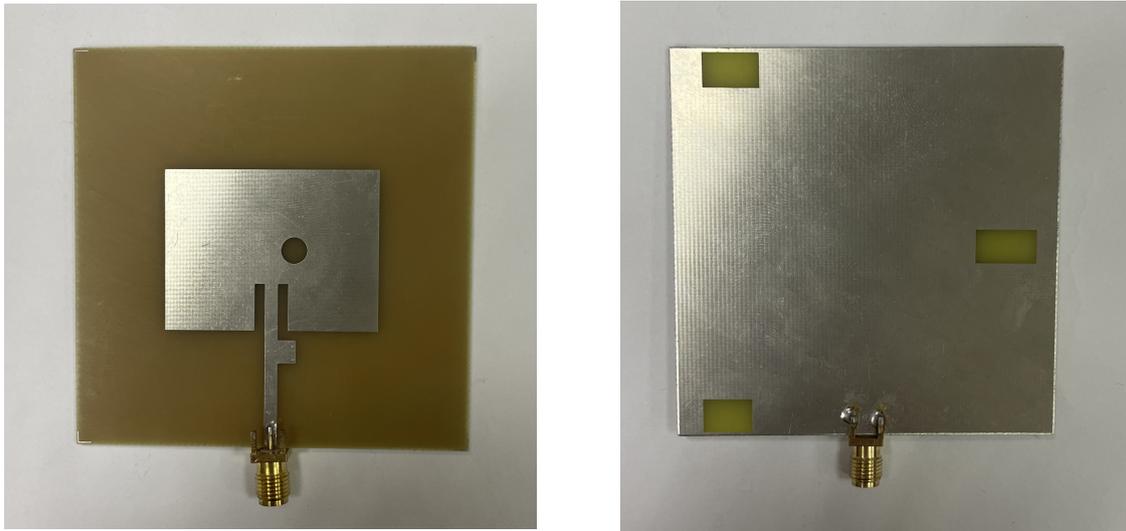


Figura 3.1: Vista frontal y posterior de la antena 2.3

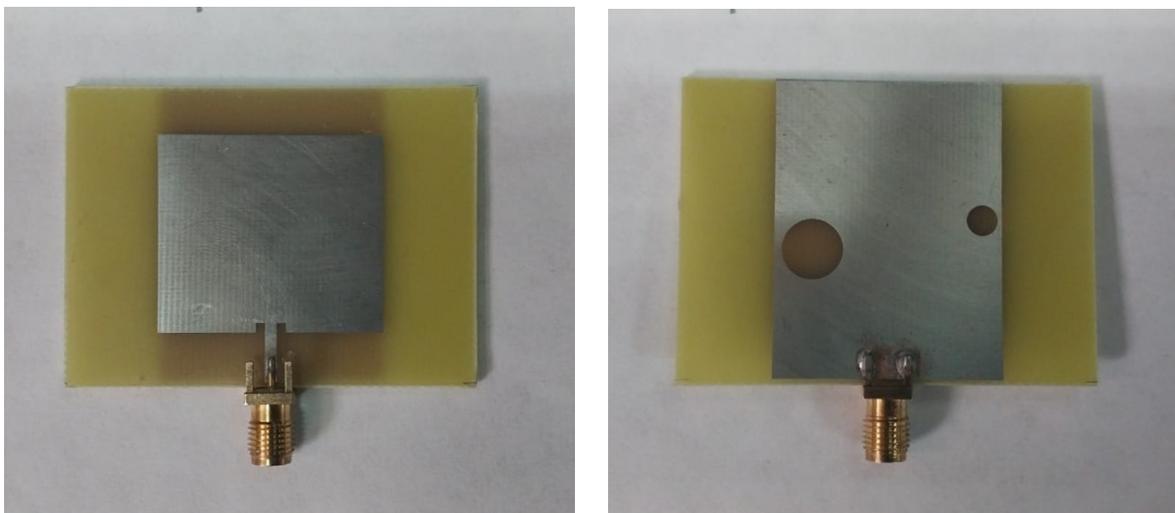


Figura 3.2: Vista frontal y posterior de la antena 2.5

3.1.2. Pruebas de la antena

Para caracterizar la antena, se realizaron pruebas en el PXI, una plataforma modular para mediciones automatizadas que permite evaluar con precisión

parámetros como el S11, que indica la eficiencia de la antena en términos de energía reflejada versus absorbida. Además, se analizó el patrón de radiación de la antena, esencial para entender cómo distribuye la energía en diferentes direcciones. Estas pruebas son cruciales para validar el diseño de la antena y asegurar su óptimo rendimiento en aplicaciones prácticas.

Obtenemos los siguientes resultados:

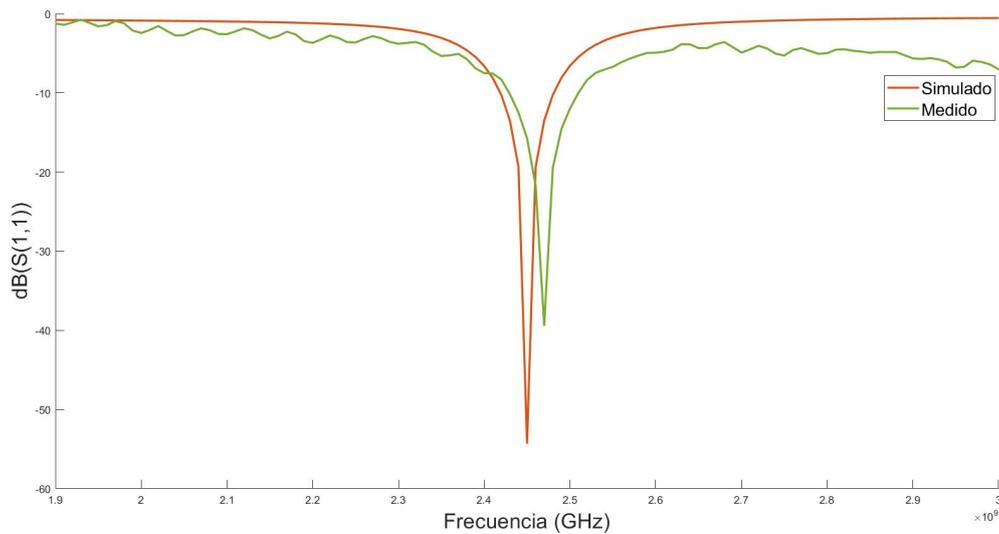


Figura 3.3: Comparación del Coeficiente de Reflexión antena uno 2.3

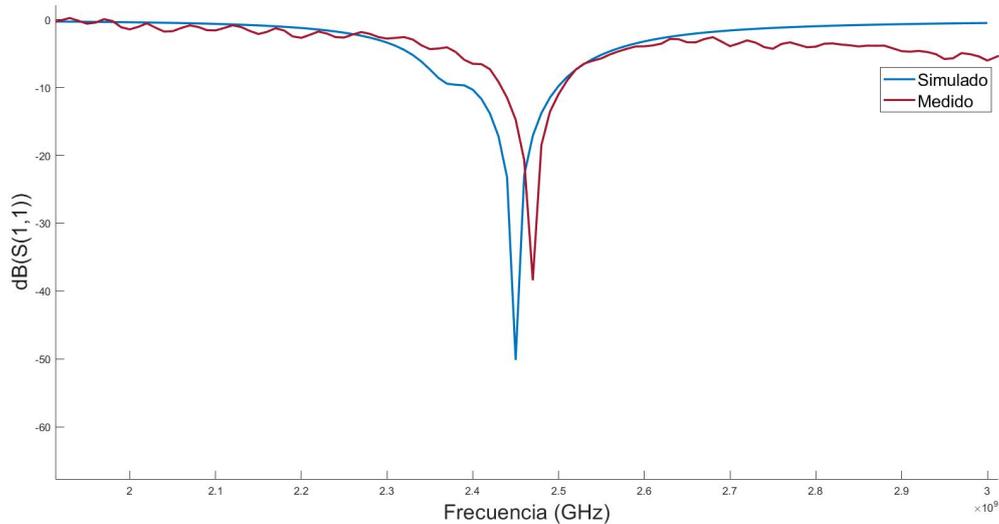


Figura 3.4: Comparación del Coeficiente de Reflexión antena dos 2.5

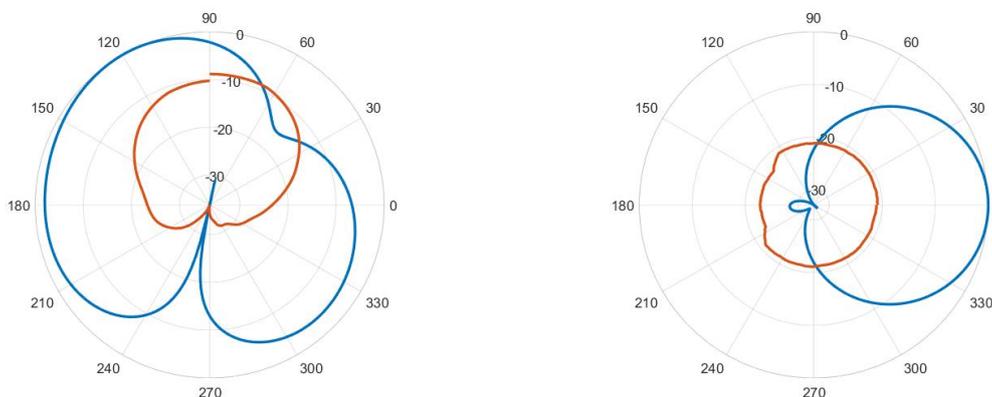


Figura 3.5: Patrón de radiación azimuth y de elevación de la antena 2.3

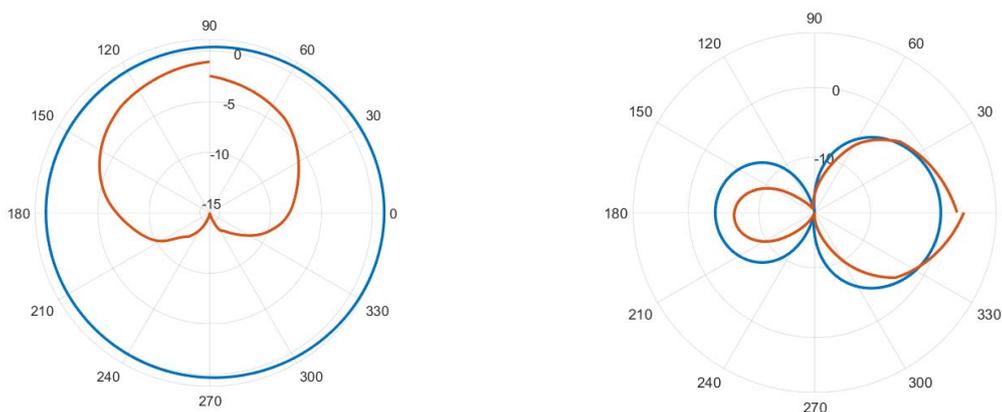


Figura 3.6: Patrón de radiación azimuth y de elevación de la antena 2.5

3.1.3. Construcción de los rectificadores

La construcción del rectificador, al igual que la antena, se realizó utilizando corte láser para garantizar la precisión en las dimensiones de los componentes. La precisión alcanzada con el corte láser minimiza las pérdidas eléctricas y asegura una transferencia de energía óptima a través del circuito del rectificador.

Dándonos como resultado los siguientes rectificadores:

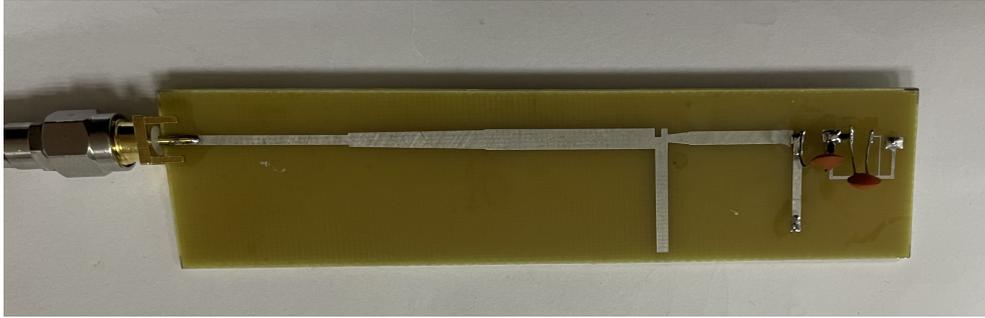


Figura 3.7: Implementación de rectificador de banda doble del diodo SMS7630-079LF, 2.16

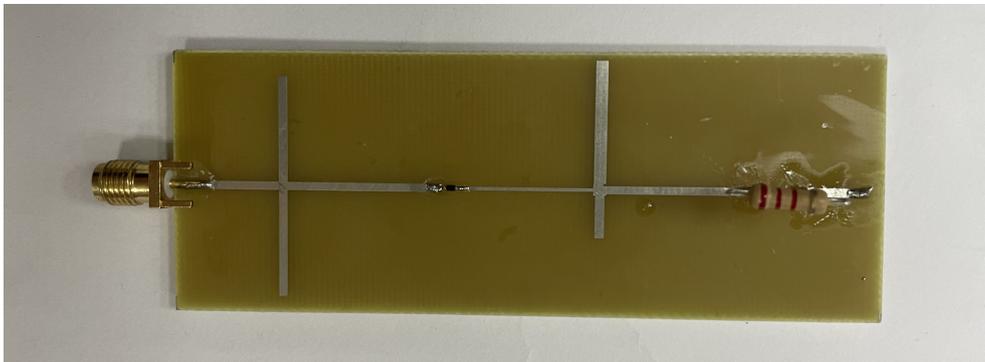


Figura 3.8: Implementación de rectificador para ambientes de poca densidad de potencia del diodo SMS7630-079LF, 2.19

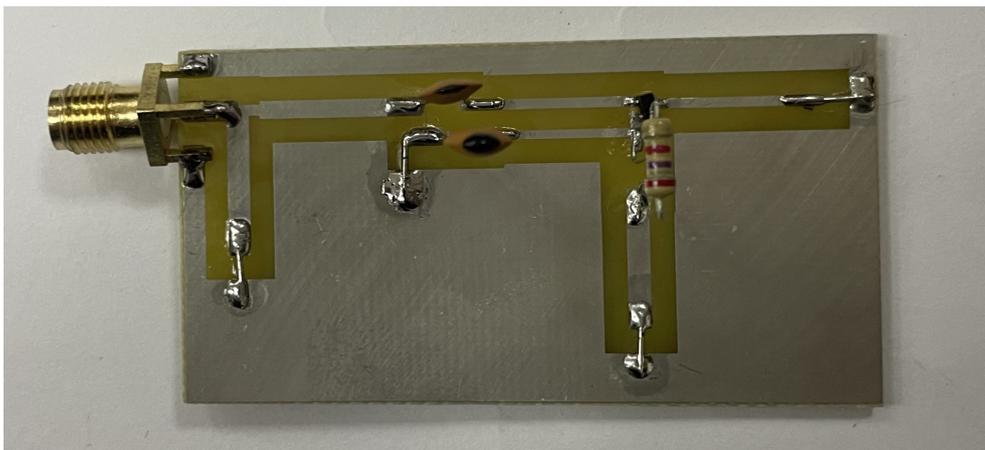


Figura 3.9: Implementación de rectificador de banda doble para transmisión del diodo HSMS-286C, 2.25

3.1.4. Pruebas de los rectificadores

De igual manera, se caracterizaron los rectificadores mediante el uso de el PXI, donde se analizo su S11 y el patrón de radiación. Obteniendo así lo siguiente:

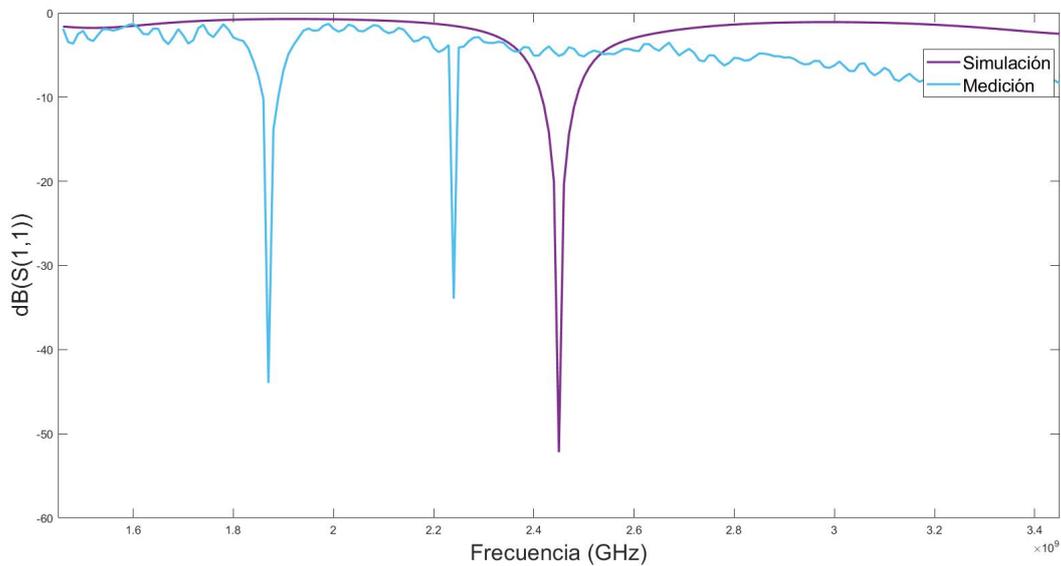


Figura 3.10: Comparación del coeficiente de reflexión del rectificador de banda doble del diodo SMS7630-079LF, 2.16

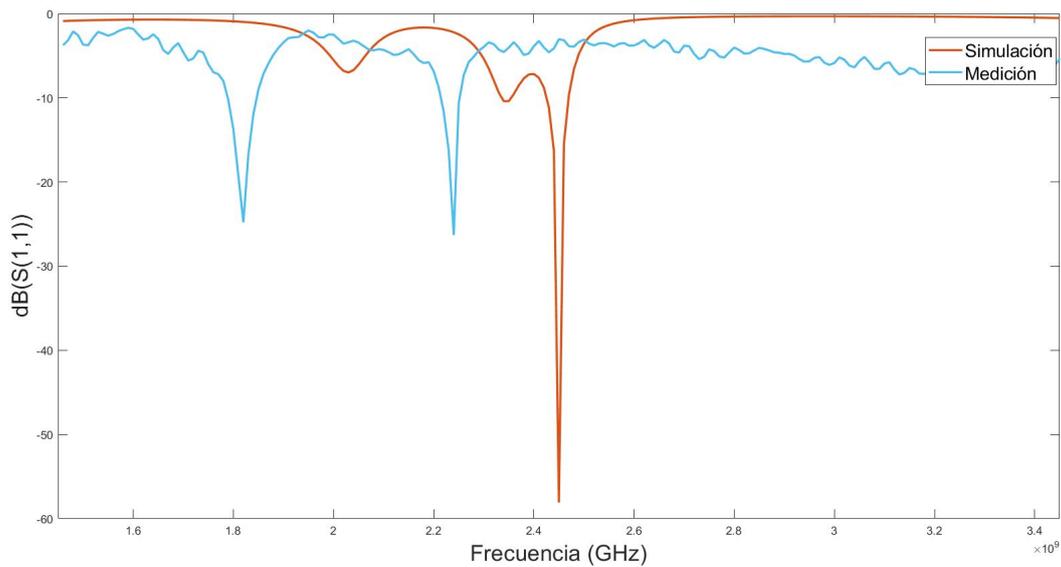


Figura 3.11: Comparación del coeficiente de reflexión del rectificador para ambientes de poca densidad de potencia del diodo SMS7630-079LF, 2.19

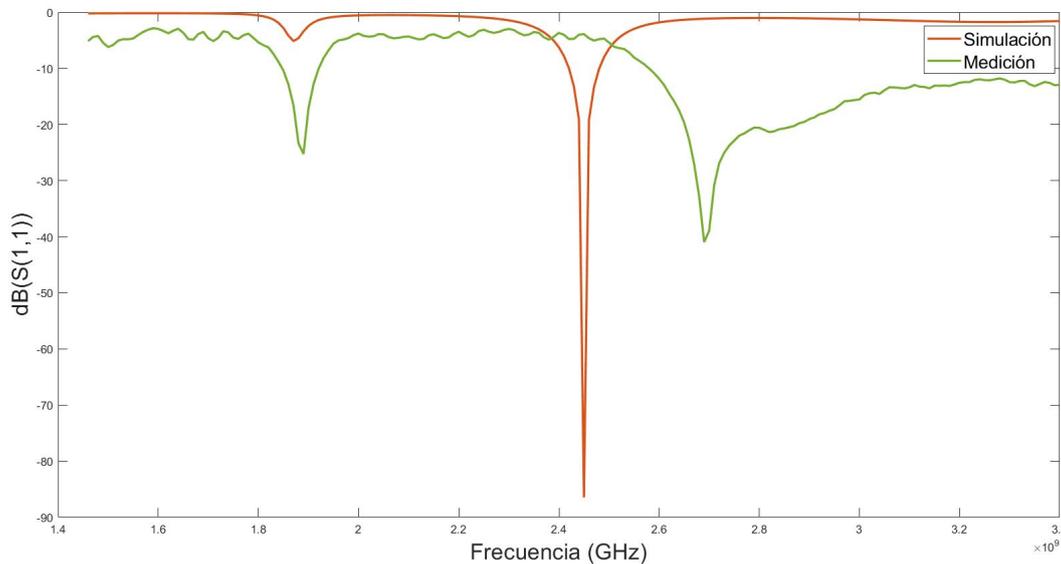


Figura 3.12: Comparación del coeficiente de reflexión del rectificador de banda doble para transmisión del diodo HSMS-286C, 2.25

3.1.5. Construcción del sistema de recolección de datos

Para el sistema de recolección de datos, se desarrolló un programa en arduino diseñado específicamente para capturar y registrar la información de voltaje recibida a través del sistema en su puerto serial. A continuación la información es leída mediante un código de python de fondo el cual registra todo lo que llega al puerto serial de arduino y lo registra en un documento de tipo .txt. Finalmente nuestro documento es ingresado en un código de matlab donde se calculara un promedio de nuestros datos recolectados. Este enfoque permite una monitorización precisa y en tiempo real del rendimiento del sistema de recolección de energía, facilitando la evaluación de su eficacia en diversas condiciones. Se utilizó arduino para esta tarea, ya que ofrece la ventaja de ser una solución económica, flexible y ampliamente accesible, ideal para prototipos experimentales y pruebas de concepto en etapas iniciales de investigación.

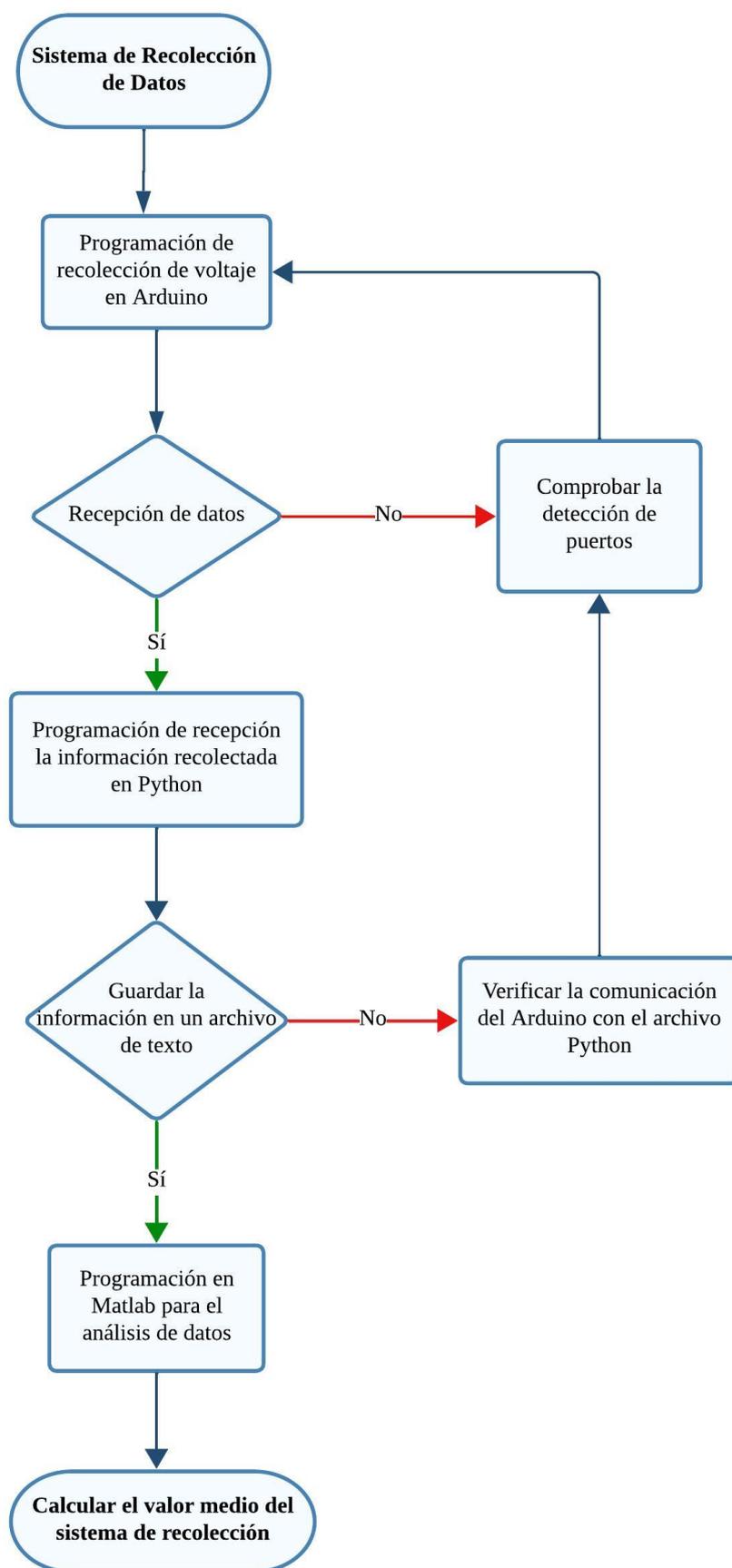


Figura 3.13: Diagrama de Flujo del proceso de recolección

3.1.6. Sistema de recolección de energía

El sistema implementado consta de una antena patch resonante diseñada específicamente para operar a 2.45 GHz , un circuito rectificador para convertir la energía RF captada en energía utilizable y un circuito de almacenamiento para almacenar la energía recolectada. La antena patch proporciona una alta eficiencia de recolección de energía en la banda de frecuencia de interés, mientras que el circuito rectificador garantiza una conversión eficiente de la energía RF en energía eléctrica utilizable.

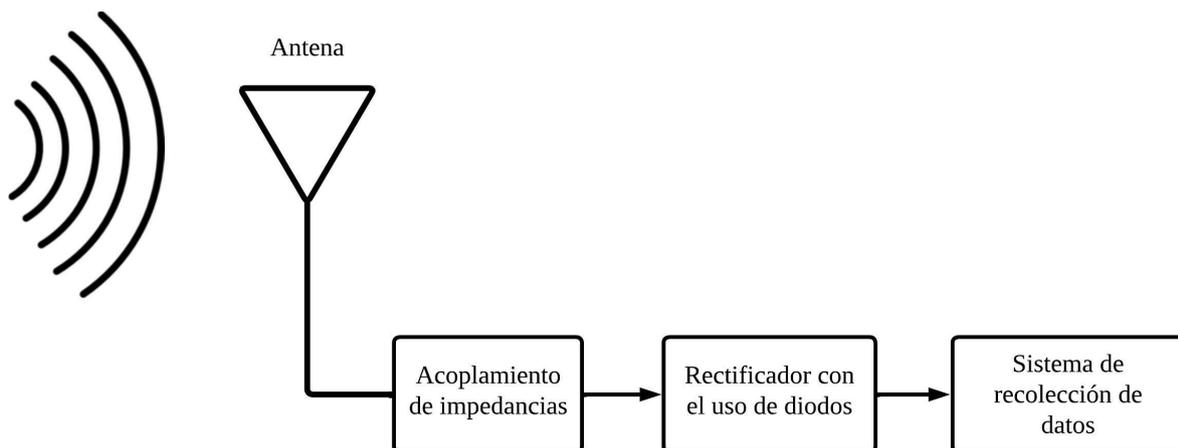


Figura 3.14: Diagrama de bloques del proceso de recolección

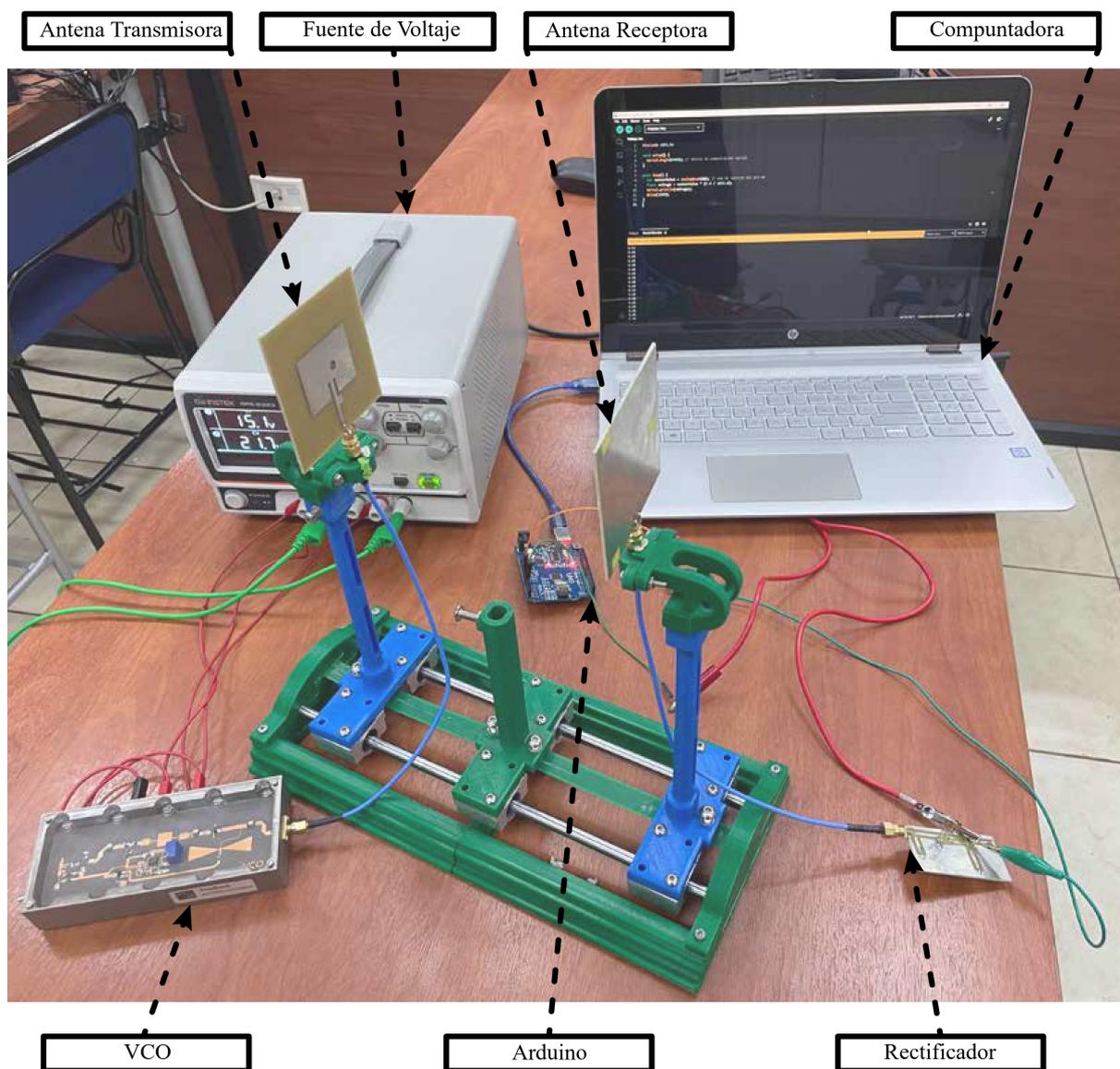


Figura 3.15: Implementación del sistema de recolección de energía

3.2. Resultados

Durante la fase experimental de este proyecto, se recolectaron aproximadamente 17,000 mediciones de voltaje, capturando en un intervalo de un segundo en un entorno de laboratorio controlado, minimizando la interferencia externa para garantizar la integridad de los datos. Las antenas utilizadas, diseñadas

para resonar específicamente a 2.45 GHz , demostraron ganancias consistentes en el rango de -30 a -40 dB , operando en condiciones óptimas al estar conectadas a un PXI que emitía señales a 2.45 GHz con una potencia de salida de 5 dBm .

Los resultados evidenciaron una clara correlación entre la proximidad física de las antenas y la eficiencia en la recolección de energía; a menor distancia, se observó una mejora significativa en la recepción, alcanzando picos de hasta 0.06 V en condiciones ideales y un promedio de 0.04 V , como se visualiza en la Figura 3.16. Esta observación se alinea con los principios fundamentales de propagación de ondas electromagnéticas, donde la intensidad de la señal disminuye con el cuadrado de la distancia respecto a la fuente.



Figura 3.16: Resultados del sistema de recolección de energía

Comparando los resultados obtenidos con modelos teóricos previos, se anticipaba que la eficiencia de la recolección de energía disminuiría a medida que aumentaba la distancia entre el transmisor y el receptor, un fenómeno bien documentado en la literatura sobre sistemas de comunicación inalámbrica y recolección de energía RF. Sin embargo, la notable eficacia en la captación de energía a distancias cortas y la capacidad del sistema para generar voltajes útiles superó las expectativas iniciales, destacando la eficiencia del diseño de la antena y la configuración experimental.

Las variaciones en los datos recolectados pueden atribuirse a varios factores, incluyendo las fluctuaciones en la distancia entre las antenas, la potencia de la

señal emitida por el PXI, y posibles interferencias ambientales como dispositivos electrónicos cercanos, presencia de personas y otros objetos que potencialmente afectan la propagación de la señal en la frecuencia de 2.45 GHz. Es relevante destacar que esta frecuencia, comúnmente utilizada en redes WiFi, es particularmente susceptible a interferencias, lo que subraya la importancia de considerar el entorno de operación al implementar sistemas de recolección de energía RF en aplicaciones prácticas.

En conclusión, los resultados de este estudio no solo validan la viabilidad de la recolección de energía RF como una fuente potencial de alimentación para dispositivos electrónicos de baja potencia, sino que también proporcionan aportes valiosos sobre el impacto de la distancia y las condiciones ambientales en la eficiencia de la recolección. Estos hallazgos abren caminos para futuras investigaciones dirigidas a optimizar la captación de energía en entornos complejos y a desarrollar sistemas de recolección más eficientes y resilientes a interferencias.

Capítulo 4

Conclusiones y Trabajos Futuros

4.1. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto de tesis se ha centrado en la creación de un sistema eficiente de recolección de energía radioeléctrica, utilizando antenas patch optimizadas para la frecuencia de 2.45 GHz y un diseño meticuloso de rectificadores, evidenciando su potencial para alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia en entornos controlados. A través del proceso de diseño, simulación, construcción y pruebas rigurosas, hemos logrado un sistema que no solo cumple con los objetivos propuestos sino que también supera las expectativas iniciales en términos de eficiencia y rendimiento.

A lo largo del proceso, se encontró varios desafíos, sobre todo en optimización del sistema. Como primer punto, en la primera fase, la creación de las antenas es un proceso en base sencillo, pero al momento de necesitar optimizar estas a las especificaciones necesarias como ya sean la frecuencia, ancho de banda, potencia entre otros esto puede presentar un problema. Debido a que no hay muchos antecedentes sobre como manejar todo este proceso y mucho menos existen programas que te ayuden a solventarlo. Como resultado se necesita hacer varias pruebas y cambios mínimos hasta alcanzar lo necesario. Proceso mediante el cual se obtuvo conocimiento de ciertos patrones de reacción de la antena patch rectangular base al exponerla a ciertos cambios, ya sea de dimensiones, inserciones, entre otros.

En nuestra siguiente etapa, la creación de los rectificadores, al contrario de las

antenas, este proceso si tiene sistemas que nos ayudan en la optimización a cierto nivel de nuestro sistema, el desafío en este ámbito recae sobre elegir que sistema sera el mas óptimo para nuestra meta, ya que hay una gran extensión de técnicas para la creación de rectificadores ya registradas. Dándonos así bastante área a cubrir sobre entender los puntos fuertes y débiles de cada técnica, a parte de esto es bastante necesario comprender como fue la implementación del sistema, y como se puede adaptar a ciertos parámetros para una investigación nueva, ya sea por que se use una frecuencia diferente o se quiera aumentar la eficiencia del sistema.

Sin embargo, es importante recalcar que una cosa es una simulación y otra muy diferente es llevarlo al mundo practico, ya que existen incontables factores que por mas mínimos que sean pueden cambiar en gran escala nuestros resultados esperados. Y eso se pudo experimentar en nuestro sistema, empezando por como tuvimos una pequeña disminución de nuestra ganancia al crear las antenas. También se observo cambios de frecuencia con nuestros rectificadores, y a su vez no se pudo realizar todos los que se planearon por factores como la disponibilidad de algunos componentes, errores en la creación al no tomar en cuenta acoplaciones en su momento, o incluso errores al momento del ensamblado del sistema. Todo esto tuvo un impacto en los resultados que se obtuvieron.

A pesar de todo pudimos completar nuestro sistema, el cual nos dio resultados satisfactorios y del cual pudimos sacar información valiosa sobre su comportamiento. Por ejemplo, observamos que la distancia entre las antenas y la fuente de energía es un factor crítico que influye directamente en la eficiencia de la recolección de energía. A pesar de las interferencias ambientales inherentes a la frecuencia de 2.45 GHz , común en aplicaciones de redes WiFi, el sistema demostró una capacidad notable para captar energía de manera efectiva, alcanzando picos de hasta 0.06 V y manteniendo un promedio de 0.04 V . Este resultado es un testimonio de el éxito del sistema, desde el diseño de las antenas, hasta la optimización de los rectificadores, que se realizaron con ayuda de herramientas avanzadas de simulación y técnicas de fabricación de alta precisión como el corte láser.

El proceso de recolección de datos fue igualmente exitoso, utilizando un sistema Arduino para la captura y registro de voltajes, lo que permitió un análisis

detallado y en tiempo real de las condiciones operativas del sistema. Este enfoque metodológico y la aplicación de tecnologías adaptativas han sido fundamentales para validar la viabilidad técnica de la recolección de energía RF.

En conclusión, este trabajo de tesis no solo ha alcanzado sus objetivos sino que también ha contribuido significativamente al campo de la recolección de energía RF. Ha establecido un precedente para la eficiencia de los sistemas de antenas y ha sentado las bases para futuros desarrollos en la optimización de la recolección de energía, especialmente en el contexto de las crecientes demandas de energía de dispositivos IoT y sistemas electrónicos portátiles. La combinación de un diseño sólido, pruebas exhaustivas y análisis meticuloso ha resultado en un sistema robusto y eficiente, capaz de avanzar la tecnología de recolección de energía y ampliar sus aplicaciones prácticas.

4.2. Recomendaciones

Para futuras implementaciones, se recomienda explorar la integración de materiales con mejores propiedades dieléctricas para el sustrato de las antenas, con el fin de aumentar la eficiencia de la recolección de energía. Además, sería beneficioso investigar la implementación de algoritmos de filtrado para minimizar el impacto de las interferencias, especialmente en frecuencias susceptibles a la congestión, como la de 2.45 GHz.

4.3. Trabajos futuros

Este trabajo abre varias vías para investigaciones futuras, incluyendo la exploración de técnicas avanzadas de optimización de antenas para mejorar la ganancia y la eficiencia en otras bandas de frecuencia. Asimismo, la adaptación del sistema de recolección para entornos exteriores y su integración con redes de sensores inalámbricos representa un campo prometedor.

Así mismo, se podría desarrollar textiles inteligentes que recojan energía del ambiente para alimentar dispositivos portátiles, o incluso ver la implementación de esta tecnología en vehículos eléctricos, capturando energía para sistemas auxiliares

mientras transitan. La exploración de materiales avanzados y diseños de circuitos podría llevar a avances significativos en la eficiencia y en la miniaturización de estos sistemas, mas aun en áreas de aplicación aun no exploradas, y explotando nuevas técnicas de creación de antenas, como lo pueden ser antenas flexibles dando paso poder arrays de antenas recolectoras en superficies fuera de lo común. Abriendo la puerta a aplicaciones aún no imaginadas.

Finalmente, el desarrollo de modelos predictivos que permitan anticipar el rendimiento del sistema bajo diversas condiciones ambientales podría significar un avance significativo en la planificación y despliegue de sistemas de recolección de energía RF a gran escala.

Glosario

ADS Sistema de Diseño Avanzado (por sus siglas en inglés: Advanced Design System).

GHz Gigahertz (unidad de medida de frecuencia equivalente a mil millones de hercios).

IoT Internet de las Cosas (por sus siglas en inglés: Internet of Things).

MHz Megahertz (unidad de medida de frecuencia equivalente a un millón de hercios).

RF Radiofrecuencia.

UHF Ultra Alta Frecuencia (por sus siglas en inglés: Ultra High Frequency).

Referencias

- [1] L. G. Tran, H. K. Cha y W. T. Park, «RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications,» *Micro and Nano Systems Letters*, vol. 5, n.º 1, 2017, ISSN: 22139621. DOI: 10.1186/s40486-017-0051-0.
- [2] Y. S. Gonçalves, U. C. Resende y Í. V. Soares, «Electromagnetic energy harvesting using a glass window,» *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 19, n.º 1, págs. 50-59, 2020, ISSN: 21791074. DOI: 10.1590/2179-10742020v19i11892.
- [3] A. Sidibe, A. Takacs y T. E. Djidjekh, «A Compact Triple-Band Rectifier and Dual-Band Rectenna for IoT Applications,» en *2023 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE)*, IEEE, 2023, págs. 1-5.
- [4] K. Shafique, B. A. Khawaja, M. D. Khurram et al., «Energy Harvesting Using a Low-Cost Rectenna for Internet of Things (IoT) Applications,» *IEEE Access*, vol. 6, págs. 30 932-30 941, 2018, ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2834392.
- [5] D. Lauder e Y. Sun, «Design Considerations of Antennas and Adaptive Impedance Matching Networks for RF Energy Harvesting,» *ECCTD 2020 - 24th IEEE European Conference on Circuit Theory and Design*, págs. 20-23, 2020. DOI: 10.1109/ECCTD49232.2020.9218310.
- [6] K. Lubikowski, S. Radkowski, K. Szczurowski y M. Wikary, «Analysis of possibility of use peltier modules in task of energy scavenging,» *Key Engineering Materials*, vol. 588, págs. 1-11, 2014, ISSN: 16629795. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.588.1.
- [7] G. Moloudian, J. L. Buckley y B. O'Flynn, «A Novel Rectenna With Class-F Harmonic Structure for Wireless Power Transfer,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023.

- [8] S. Shrestha, S. K. Noh y D. Y. Choi, «Comparative study of antenna designs for RF energy harvesting,» *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, 2013, ISSN: 16875869. DOI: 10.1155/2013/385260.
- [9] M. Wagih, A. S. Weddell y S. Beeby, «Millimeter-Wave Power Harvesting: A Review,» *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 1, n.º October, págs. 560-578, 2020, ISSN: 26376431. DOI: 10.1109/OJAP.2020.3028220.
- [10] H.-C. Chang, H.-T. Lin y P.-C. Wang, «Wireless Energy Harvesting for Internet-of-Things Devices Using Directional Antennas,» *Future Internet*, vol. 15, n.º 9, pág. 301, 2023, ISSN: 19995903. DOI: 10.3390/fi15090301.
- [11] M. A. Ullah, R. Keshavarz, M. Abolhasan, J. Lipman, K. P. Esselle y N. Shariati, «A Review on Antenna Technologies for Ambient RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer: Designs, Challenges and Applications,» *IEEE Access*, vol. 10, págs. 17 231-17 267, 2022, ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3149276.
- [12] A. Shameli, A. Safarian, A. Rofougaran, M. Rofougaran y F. De Flaviis, «Power harvester design for passive UHF RFID tag using a voltage boosting technique,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, n.º 6, págs. 1089-1097, 2007.
- [13] P. U. Linge, T. Gerges, P. Bevilacqua et al., «Evaluation of Polylactic Acid Polymer as a Substrate in Rectenna for Ambient Radiofrequency Energy Harvesting,» *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 13, n.º 2, pág. 34, 2023.
- [14] H. I. Nivetha, T. Sathiyapriya, R. Sudhakar y S. Thilagavathi, «A Comparative Analysis of Substrate Selection for RF Energy Harvesting Antennas,» en *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, IEEE, vol. 1, 2023, págs. 1213-1217.
- [15] P. K. Sonwalkar y V. Kalmani, «Energy Harvesting Rectenna Design for Enhanced Node Lifetime in Wsns,» *International Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 14, n.º 2, págs. 135-152, 2022, ISSN: 09749322. DOI: 10.5121/ijcnc.2022.14208.
- [16] A. M. Omer, «Green energies and the environment,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, n.º 7, págs. 1789-1821, 2008.
- [17] S. Priya, «Energy Harvesting Technologies,» *Springer Science+ Business Media google schola*, vol. 2, págs. 49-58, 2009.

- [18] R. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof y R. Mertens, «Micropower energy harvesting,» *Solid-State Electronics*, vol. 53, n.º 7, págs. 684-693, 2009.
- [19] S. P. Beeby, M. J. Tudor y N. White, «Energy harvesting vibration sources for microsystems applications,» *Measurement science and technology*, vol. 17, n.º 12, R175, 2006.
- [20] T. J. Kazmierski y S. Beeby, «Energy harvesting systems,» *Principles, Modeling and Applications; Springer Science+ Business Media LLC: New York, NY, USA*, 2011.
- [21] P. G. V. Sampaio y M. O. A. González, «Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, págs. 590-601, 2017.
- [22] N. Sezer y M. Koç, «A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting,» *Nano energy*, vol. 80, pág. 105567, 2021.
- [23] B. I. Ismail y W. H. Ahmed, «Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology,» *Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical Engineering)*, vol. 2, n.º 1, págs. 27-39, 2009.
- [24] N. Shinohara, *Wireless power transfer via radiowaves*. John Wiley & Sons, 2014.
- [25] D. Mishra, S. De, S. Jana, S. Basagni, K. Chowdhury y W. Heinzelman, «Smart RF energy harvesting communications: challenges and opportunities,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, n.º 4, págs. 70-78, 2015. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7081078.
- [26] V. Pecunia, S. R. P. Silva, J. D. Phillips et al., «Roadmap on Energy Harvesting Materials,» *Journal of Physics: Materials*, 2023.
- [27] E. A. Zapata Ochoa, F. López Giraldo y G. D. Góez, «Dual Band Rectenna for Wireless Energy Harvesting in the 2.40 GHz and 5.38 GHz,» *TecnoLógicas*, vol. 25, n.º 55, 2022, ISSN: 0123-7799. DOI: 10.22430/22565337.2384.
- [28] S. Shrestha, S.-K. Noh, D.-Y. Choi et al., «Comparative study of antenna designs for RF energy harvesting,» *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, 2013.
- [29] L. Corchia, G. Monti, E. De Benedetto y L. Tarricone, «Wearable antennas for remote health care monitoring systems,» *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, págs. 1-11, 2017.
- [30] S. Ahmad, B. Manzoor, K. N. Paracha et al., «A wideband bear-shaped compact size implantable antenna for in-body communications,» *Applied sciences*, vol. 12, n.º 6, pág. 2859, 2022.

- [31] V. Rabinovich y N. Alexandrov, *Antenna arrays and automotive applications*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [32] K. R. Jha, B. Bukhari, C. Singh, G. Mishra y S. K. Sharma, «Compact planar multistandard MIMO antenna for IoT applications,» *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 66, n.º 7, págs. 3327-3336, 2018.
- [33] P. P. Singh, P. K. Goswami, S. K. Sharma y G. Goswami, «Frequency reconfigurable multiband antenna for IoT applications in WLAN, Wi-Max, and C-band,» *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 102, págs. 149-162, 2020.
- [34] S.-Y. Wong y C. Chen, «Power efficient multi-stage CMOS rectifier design for UHF RFID tags,» *Integration*, vol. 44, n.º 3, págs. 242-255, 2011.
- [35] G. A. Vera, A. Georgiadis, A. Collado y S. Via, «Design of a 2.45 GHz rectenna for electromagnetic (EM) energy scavenging,» en *2010 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, IEEE, 2010, págs. 61-64.
- [36] S. Gupta, N. Vamanan y V. John, «A diode bridge rectifier with improved power quality using the capacitive network,» *IEEE transactions on Industry applications*, vol. 54, n.º 2, págs. 1563-1572, 2017.
- [37] I. Adam, M. N. Mohd Yasin, S. Z. Ibrahim y N. Haris, «DEVELOPMENT OF CASCADED VOLTAGE DOUBLER RECTIFIER FOR RF ENERGY HARVESTING,» *Jurnal Teknologi*, vol. 84, n.º 2, págs. 153-161, 2022.
- [38] I. Adam, M. N. M. Yasin, M. Aziz y S. MI, «Rectifier for RF energy harvesting using stub matching,» *Indonesia Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 13, n.º 3, 2019.
- [39] C. A. Balanis, «Antenna theory: A review,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, n.º 1, págs. 7-23, 1992.
- [40] D. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th. Hamilton Printing, 2012, ISBN: 9780470631553. dirección: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>.
- [41] *Surface-Mount Mixer and Detector Schottky Diodes Applications*. dirección: [www . skyworksinc.com](http://www.skyworksinc.com).
- [42] *HSMS-286x Series Surface Mount Microwave Schottky Detector Diodes SOT-23/SOT-143 Package Lead Code Identification (top view)*.

- [43] M. ur Rehman, W. Ahmad y W. T. Khan, «Highly efficient dual band 2.45/5.85 GHz rectifier for RF energy harvesting applications in ISM band,» en *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, IEEE, 2017, págs. 150-153.
- [44] Z. Li, Y. Fan y Q. Yang, «A Novel Dual Polarized Rectenna For Ambient RF Energy Harvesting,» en *2021 IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, IEEE, 2021, págs. 334-337.
- [45] A. Benayad y M. Tellache, «Broad band rectenna based on Antipodal Vivaldi antenna and NULT rectifier,» en *2020 2nd International Workshop on Human-Centric Smart Environments for Health and Well-being (IHSH)*, IEEE, 2021, págs. 40-43.
- [46] J. Liu, M. Huang y Z. Du, «Design of compact dual-band RF rectifiers for wireless power transfer and energy harvesting,» *IEEE access*, vol. 8, págs. 184 901-184 908, 2020.
- [47] H. Tafekirt, J. Pelegri-Sebastia, A. Bouajaj y B. M. Reda, «A sensitive triple-band rectifier for energy harvesting applications,» *IEEE Access*, vol. 8, págs. 73 659-73 664, 2020.

Anexos

```
1 filename = 'voltajes.txt';
2 fid = fopen(filename, 'r');
3 data = fscanf(fid, '%f');
4
5 fclose(fid);
6
7 totalSum = sum(data);
8
9 average = mean(data);
10
11 fprintf('El promedio de voltajes: %fV\n', average);
```

Listing 4.1: Código MATLAB

```
1
2 import serial
3 import time
4
5 ser = serial.Serial('COM4', 9600)
6 time.sleep(2)
7
8 with open("voltajes.txt", "a") as file:
9     while True:
10         if ser.in_waiting > 0:
11             line = ser.readline().decode('utf-8').rstrip()
12             print(line)
13             file.write(line + "\n")
14             file.flush()
```

Listing 4.2: Código Python

```
1
2 #include <SPI.h>
3
4 void setup() {
5     Serial.begin(9600);
6 }
7
8 void loop() {
9     int sensorValue = analogRead(A0);
10    float voltage = sensorValue * (2.0 / 1023.0);
11    Serial.println(voltage);
12    delay(1000); //
13 }
```

Listing 4.3: Código Arduino