



Institución Universitaria

Sistema de Monitoreo de Variables Asociadas al Estado de Salud de un Ecosistema de Bosque Usando Redes de Sensores Inalámbricos y Transferencia de Energía Inalámbrica

Gustavo Adolfo Urrea Castaño

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2024

Sistema de Monitoreo de Variables Asociadas al Estado de Salud de un Ecosistema de Bosque Usando Redes de Sensores Inalámbricos y Transferencia de Energía Inalámbrica

Gustavo Adolfo Urrea Castaño

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Automatización y Control Industrial

Directores:

Ph.D. Juan Sebastián Botero Valencia

Ph.D. Erick Estefen Reyes Vera

Ph.D. Dinael Guevara Ibarra

Línea de Investigación:

Línea de Sistemas de Control y Robótica

Grupo de Investigación:

Grupo de Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales – AEyCC

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2024

“Keep fighting.”

Jonathan Lopera

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional, en especial a mi padre y madre por su paciencia y sacrificio para ayudarme a finalizar este proyecto. A mis hermanas, por su tolerancia y consejos. A Emilio, quien me brindó la oportunidad de conocer a la persona que me motivó a realizar este estudio de maestría, el Ph.D. Juan Sebastián Botero Valencia, quien, además de ser mi asesor, actuó como consejero y guía durante esta etapa.

También quiero agradecer a mis otros asesores, Ph.D. Erick Estefen Reyes Vera y Ph.D. Dinael Guevara Ibarra, quienes me motivaron y me ayudaron a encontrar soluciones cuando me sentí enfrascado en el diseño de la rectena.

Además, quiero expresar mi agradecimiento al ITM, institución donde se desarrolló la mayor parte del proyecto y bajo el marco del Programa Minciencias 475 de 2020, titulado "Sistemas Inteligentes para el Monitoreo de Cultivos Permanentes y Transitorios". Este programa incluye los proyectos: 70703 "Monitoreo de cultivos de aguacate usando sistemas de percepción remota", 70704 "Aplicación de tecnologías de percepción remota para el estudio de limitantes abióticas en cultivos transitorios" y 70706 "IoT para el monitoreo de variables agroclimáticas en cultivos agrícolas permanentes y transitorios". Asimismo, agradezco a los laboratoristas de la institución por su apoyo, especialmente en el laboratorio de telecomunicaciones, el laboratorio de óptica, fotónica y visión artificial, y el laboratorio de sistemas de control y robótica. Ellos siempre estuvieron atentos y dispuestos a ayudar cuando los necesité, en especial a Sebastián Montoya, quien me asistió en la simulación y estudio de antenas, y a Elizabeth Ospina, quien me ayudó con el diseño del prototipo.

Resumen

El proyecto de investigación se desarrolló para detectar incendios forestales tempranamente, previniendo su expansión y reduciendo el daño ambiental. Utiliza redes de sensores inalámbricas y transferencia de energía inalámbrica. Se implementó una arquitectura de red en estrella con el sensor BME688 para detectar humo, temperatura y humedad. La red incluye tres gateways Dragino distribuidos por la ciudad para maximizar el alcance y estudiar la calidad de la señal, alcanzando hasta 9,11 km. Los nodos se comunican a través de LoRaWAN, enviando información a la plataforma IoT The Things Network, integrada con Datacake para visualizar datos, almacenarlos y generar alarmas ante situaciones anómalas. Además, se emplea una rectena para recolectar energía electromagnética y almacenarla en un supercapacitor, asegurando un suministro de energía constante para la operación continua de la red a una distancia máxima de 60 cm.

Palabras clave: Redes de sensores inalámbricas, Transferencia de energía inalámbrica, LoRaWAN, Energía Electromagnética, Antena, Rectificador.

Abstract

The research project was developed to detect wildfires early, preventing their spread and reducing environmental damage. It utilizes wireless sensor networks and wireless energy transfer. A star network architecture with the BME688 sensor was implemented to detect smoke, temperature, and humidity. The network includes three Dragino gateways distributed throughout the city to maximize range and study signal quality, reaching up to 9,11 km. The nodes communicate via LoRaWAN, sending information to the IoT platform The Things Network, which is integrated with Datacake to visualize data, store it, and generate alarms in anomalous situations. Additionally, a rectenna is used to collect electromagnetic energy and store it in a supercapacitor, ensuring a constant energy supply for the continuous operation of the network at a maximum distance of 60 cm.

Keywords: Wireless Sensor Network, Wireless Power Transfer, LoRaWAN, Electromagnetic Energy, Antenna, Rectifier.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción.....	1
1. Marco Teórico	10
1.1 Redes Inalámbricas de Sensores	10
1.1.1 Arquitectura WSN.....	11
1.1.2 Bandas de frecuencia ISM	12
1.1.3 Protocolo de comunicación LoRaWAN	13
1.2 Transferencia Inalámbrica de Energía	18
1.2.1 Recolección de energía.....	22
1.2.2 Antenas	23
1.2.3 Rectificador.....	25
2. Diseño y Validación WSN	31
2.1 Descripción general.....	31
2.2 Nodos	32
2.3 Gateway	34
2.4 Plataforma IoT	35
2.5 Diseño y fabricación del prototipo	36
2.6 Arquitectura de la red	38
2.7 Validación de WSN	39
2.8 Alarmas	45
3. Diseño y Validación WPT	47
3.1 Preámbulo	47
3.2 Descripción de equipos	48

XII Sistema de Monitoreo de Variables Asociadas al Estado de Salud de un Ecosistema de Bosque Usando WSN y WPT

3.2.1	Máquina CNC (LPKF ProtoMat D104, LPKF Laser & Electronics AG, Hannover, Alemania)	48
3.2.2	Analizador de espectros vectorial (FSH4, Rohde & Schwarz)	49
3.2.3	Generador de radiofrecuencia (SMBV100A, Rhode & Schwartz)	49
3.2.4	Multímetro Test Bench 390A (BK Precision)	49
3.3	Diseño de la rectena	50
3.4	Fabricación del rectificador propuesto	52
3.5	Validación experimental del rectificador	53
3.5.1	Verificación de la frecuencia de resonancia	56
3.5.2	Verificación de la potencia de trabajo	59
3.6	Diseño de antena Yagi microcinta	62
3.7	Análisis de la antena propuesta	64
3.8	Comparación con antenas comerciales	66
3.8.1	Caracterización de las antenas	68
3.8.1.1	Antena Log – periódica UWB 1,35 – 9,5 GHz	69
3.8.1.2	Antena Alfa APA-M25	69
3.8.1.3	Antena Log – periódica UWB 600-6000MHz	70
3.8.1.4	Antena Yagi	71
3.8.1.5	Dipolo 72	72
3.8.1.6	Antena log – periódica Aaronia	72
3.8.1.7	Dipolo Vert2450	73
3.8.2	Selección de antenas	74
3.9	Sistema WPT	76
4.	Integración de Sistemas WSN y WPT	80
4.1	Preámbulo	80
4.2	Consumo de potencia del nodo	81
4.2.1	Consumo mínimo	82
4.2.2	Descarga de batería	83
4.3	Análisis de la carga del supercapacitor	85
4.3.1	Carga del supercapacitor	85
4.3.2	Distancia de operación	87
4.3.2.1	Distancia máxima de operación	89
4.3.3	Tiempo de carga de supercapacitor	92
4.3.4	Descarga de supercapacitor	93
4.4	Experimento de campo	95
4.5	Análisis general	96
5.	Conclusiones y recomendaciones	98
5.1	Conclusiones	98
5.2	Recomendaciones	101

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Arquitecturas de WSN.	11
Figura 1-2: Arquitectura de red de LoraWAN.	15
Figura 1-3: Redes de compensación.....	19
Figura 1-4: Filtro pasa banda en receptor.....	20
Figura 1-5: EH por microondas.....	23
Figura 1-6: Tipos de patrones de radiación	24
Figura 1-7: Rectificador de media onda.....	26
Figura 1-8: Rectificador de onda completa de entrada	26
Figura 1-9: Dobrador de voltaje	27
Figura 1-10: Triplicador de voltaje.....	28
Figura 2-1: Diagrama de bloques comunicación WSN.....	31
Figura 2-2: Esquema de funcionamiento del nodo.	32
Figura 2-3: Diagrama de bloques sensor BME688	33
Figura 2-4: Arquitectura del nodo.	34
Figura 2-5: Arquitectura de Gateways Dragino empleados en la WSN	35
Figura 2-6: Arquitectura IoT implementada.	35
Figura 2-7: Diseño y fabricación del prototipo	37
Figura 2-8: Arquitectura WSN desarrollada.....	38
Figura 2-9: Experimento detección de humo.....	39
Figura 2-10: Vista de datos en plataformas IoT	40
Figura 2-11: Verificación distancias	41
Figura 2-12: Alarmas.....	45
Figura 3-1: Esquema del circuito rectificador modelado empleando AWR.	50
Figura 3-2: Parámetros S ₁₁ y S ₂₁ del rectificador propuesto modelado en AWR.	51
Figura 3-3: Rectificadores fabricados	52
Figura 3-4: Parámetro S ₁₁ experimental de rectenas	53
Figura 3-5: Carta de Smith experimental de rectenas.....	55
Figura 3-6: Montaje de verificación de la frecuencia de resonancia.	56

XIV Sistema de Monitoreo de Variables Asociadas al Estado de Salud de un Ecosistema de Bosque Usando WSN y WPT

Figura 3-7:	Gráfica del voltaje de salida del rectificador respecto a la frecuencia.	57
Figura 3-8:	Montaje de verificación del funcionamiento del rectificador con conexión directa ..	57
Figura 3-9:	Voltaje de salida del rectificador según la frecuencia con conexión directa.....	58
Figura 3-10:	Voltaje de salida del rectificador según la potencia de entrada.	60
Figura 3-11:	Voltajes alcanzados según la carga	61
Figura 3-12:	Esquema de la antena Yagi-Uda de microcinta utilizada.....	63
Figura 3-13:	Parámetro S_{11} y carta de Smith antena Yagi utilizada	65
Figura 3-14:	Gráfica de la impedancia de la antena Yagi en función de la frecuencia.	65
Figura 3-15:	Patrón de radiación Plano XY antena Yagi	66
Figura 3-16:	Antenas comerciales utilizadas en WPT	68
Figura 3-17:	Parámetro S_{11} y carta de Smith antena Log-periódica UWB 1,35-9,5 GHz.....	69
Figura 3-18:	Parámetro S_{11} y carta de Smith antena Alfa APA-M25	70
Figura 3-19:	Parámetro S_{11} y carta de Smith antena Log-periódica UWB 600-6000MHz	71
Figura 3-20:	Parámetro S_{11} y carta de Smith antena Yagi	71
Figura 3-21:	Parámetro S_{11} y carta de Smith antena Dipolo	72
Figura 3-22:	Parámetro S_{11} y carta de Smith antena log-periódica Aaronia	73
Figura 3-23:	Parámetro S_{11} y carta de Smith antena Dipolo Vert2450.....	74
Figura 3-24:	Montaje para la verificación de transferencia de energía.	75
Figura 3-25:	Montaje sistema WPT	76
Figura 3-26:	Voltaje de salida de la rectena según potencia de transmisión y carga.	77
Figura 3-27:	Led encendido a 1 m de distancia.....	77
Figura 3-28:	Montaje sistema WPT con supercapacitor	79
Figura 4-1:	Montaje del sistema integrado – Nodo y WPT.....	80
Figura 4-2:	Medición de potencia del nodo	81
Figura 4-3:	Montaje de medición de consumo del nodo.	82
Figura 4-4:	Relación entre el consumo de corriente del nodo y el voltaje.	83
Figura 4-5:	Tiempo de descarga de la batería.	84
Figura 4-6:	Tiempo de carga del supercapacitor con el nodo conectado.	86
Figura 4-7:	Voltaje del supercapacitor en función del tiempo y distancia.	89
Figura 4-8:	Voltaje del supercapacitor en función del tiempo y distancia.	91
Figura 4-9:	Voltaje del supercapacitor en función del tiempo a 60 cm.	91
Figura 4-10:	Voltaje del supercapacitor en función del tiempo a 53 cm.	92
Figura 4-11:	Tiempo de descarga del supercapacitor.....	93
Figura 4-12:	Comparación de medidas de voltaje entre Datacake y multímetro.....	94
Figura 4-13:	Ensayos de transferencia inalámbrica con ruteadores.	96

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Bandas de frecuencias ISM.	12
Tabla 1-2: Comparación de protocolos de comunicación inalámbrica para una WSN.	14
Tabla 1-3: Tabla comparativa entre clase A clase B clase C.....	16
Tabla 1-4: Diferencias entre OTAA y ABP.	17
Tabla 1-5: Transmisiones de campo cercano y campo lejano	18
Tabla 2-1: Ubicación y calidad de la señal.	43
Tabla 3-1: Voltajes máximos con frecuencias de mayor transferencia.	59
Tabla 3-2: Lista de antenas comerciales analizadas.	67
Tabla 3-3: Mejores 8 combinaciones de antenas.....	75
Tabla 3-4: Resultados: $d = 1\text{m}$, con las 3 mejores combinaciones de antenas.	76

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ABP</i>	Activation by Personalization
<i>ADC</i>	Analog to Digital Converter
<i>AES</i>	Advanced Encryption Standard
<i>AppEUI</i>	Application Identifier
<i>AppSKey</i>	ApplicationSessionKey
<i>CNN</i>	Convolutional Neural Network
<i>CP</i>	Contention Period
<i>CPT</i>	Capacitive Power Transfer
<i>DevAddr</i>	Device Address
<i>EA-MAC</i>	Energy Adaptative Medium Access Control
<i>EH</i>	Energy Harvesting
<i>ERI-MAC</i>	Energy harvested Receiver-Initiated MAC
<i>HP</i>	Harvesting Period
<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>IPT</i>	Inductance Power Transfer
<i>ISM</i>	Industrial Scientific and Medical
<i>ITU</i>	International Telecommunication Union
<i>LoRaWAN</i>	Long Range Wireless Area Network
<i>LPT</i>	Laser Power Transfer
<i>LP-WAN</i>	Low Power Wide Area Network
<i>M2M</i>	Machine to Machine
<i>MAC</i>	Media Access Control
<i>MIC</i>	Message Integrity Code
<i>MODIS</i>	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
<i>MPT</i>	Microwave Power Transfer
<i>NP</i>	Notification Period

Abreviatura	Término
<i>NwkSKey</i>	Network Session Key
<i>ODMAC</i>	On Demand MAC
<i>OE</i>	Objetivo Específico
<i>OTAA</i>	Over The Air Activation
<i>P2P</i>	Point to Point
<i>PSoC</i>	Programmable System on Chip
<i>RF</i>	Radiofrecuencia
<i>RF-MAC</i>	Radiofrecuencia MAC
<i>RIPT</i>	Resonant Inductive Power Transfer
<i>SWIPT</i>	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
<i>TP</i>	Transmission Period
<i>TTL</i>	Time to Live
<i>TTN</i>	The Things Network
<i>UNGRD</i>	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
<i>VIIRS</i>	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
<i>VOC</i>	Volatile Organic Compound
<i>WPT</i>	Wireless Power Transfer
<i>WSN</i>	Wireless Sensor Network

Introducción

Los ecosistemas de bosques o forestales albergan gran diversidad de especies de flora y fauna esenciales para la vida en el planeta Tierra, lo que convierte su biodiversidad en un factor clave para determinar su estado de salud e integridad [1]. Un ecosistema forestal saludable se caracteriza por su diversidad y fortaleza, lo que le permite recuperarse ante perturbaciones naturales o externas. En ese contexto, la detección temprana de incendios es esencial para conservar la salud del ecosistema, ya que permite intervenir antes de que el daño alcance niveles irreversibles. Así, monitorear el 'estado de salud' no solo abarca la preservación de su biodiversidad, sino que también implica la capacidad de respuesta rápida ante amenazas como los incendios [1, 2, 3].

Los incendios de cobertura vegetal, también conocidos como incendios forestales, han experimentado un preocupante aumento en Colombia durante las últimas décadas. En algunos años, la pérdida de terreno debido a estos incendios ha alcanzado cifras alarmantes, superando las 180,000 hectáreas en el peor de los casos [4]. Un ejemplo ilustrativo de esta problemática se encuentra en Antioquia, donde se han registrado incendios que afectaron hasta 6,000 hectáreas [4], contribuyendo significativamente al crecimiento de estas las estadísticas de este fenómeno y a sus devastadoras consecuencias. Además, la detección tardía de un incendio y la falta de control sobre su propagación agravan estas repercusiones, transformando esta problemática en un asunto de relevancia social y ambiental que no puede ser pasado por alto. La cartilla de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) [5] detalla las consecuencias de estos incendios, evidenciando la magnitud del impacto negativo en los ecosistemas, las cuales se enuncian a continuación:

- ✓ Pérdida de biodiversidad: La degradación y destrucción del hábitat natural resultante de los incendios forestales conduce a la desaparición de especies de flora y obliga a la fauna a abandonar la zona afectada.
- ✓ Destrucción del suelo: Las altas temperaturas alcanzadas durante un incendio tienen un impacto devastador en el suelo, eliminando los microorganismos esenciales para su salud. Esto impide la regeneración de las especies vegetales que habitaban en la zona afectada. Además, se aumenta el riesgo de inundaciones y erosiones.
- ✓ Pérdidas económicas: Los incendios forestales afectan directamente a las actividades económicas, incluyendo el turismo, las actividades recreativas y la agricultura y ganadería. También pueden causar daños y pérdidas en infraestructuras vitales, como carreteras, redes eléctricas, edificaciones y viviendas.
- ✓ Efectos sobre las corrientes de agua: Los incendios forestales contaminan las aguas a medida que transportan lodo, cenizas y restos de vegetación, afectando gravemente la calidad del agua. También afecta gravemente a los peces y otros seres vivos que habitan en el agua.
- ✓ Contribución al calentamiento global: Los incendios forestales tienen un efecto a largo plazo al provocar cambios en las temperaturas y olas de calor. Esto hace que la vegetación en otros bosques sea más vulnerable a futuros incendios.
- ✓ Efectos sobre la población humana: Los incendios forestales y la contaminación causada por el humo tienen graves implicaciones para la salud humana, incluyendo infecciones respiratorias agudas, quemaduras, aumento de casos de asma, mortalidad cardiovascular, y enfermedades respiratorias infantiles que están relacionadas con una alta mortalidad, especialmente en niños menores de un año. Además, se asocian con alteraciones en la función pulmonar y un mayor riesgo de cáncer.

Un incendio se produce cuando se combinan tres elementos esenciales: calor, combustible y oxígeno, conocidos como los componentes del "triángulo del fuego" [6, 7]. El calor puede originarse de manera natural, especialmente durante estaciones secas y cálidas, pero también puede ser provocado por actividades humanas imprudentes en o cerca de bosques, como quemas no controladas, colillas de cigarrillos encendidas, accidentes relacionados con líneas eléctricas o fogatas irresponsables, entre otras [7, 8]. El término "combustible" se refiere a cualquier material que pueda arder y facilite la ignición o propagación de fuego [9] por lo que materiales leñosos como árboles, arbustos, matorrales y pasto se pueden clasificar como combustibles ya que alimentan y mantienen el fuego. Por último, el oxígeno, un componente omnipresente en el aire, es esencial para la combustión. Sin embargo, la propagación del fuego también está influenciada principalmente por factores como la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la humedad relativa, la precipitación, la topografía y la naturaleza de los combustibles disponibles [5, 10, 11].

Por otro lado, es fundamental entender que los incendios forestales se clasifican en varios tipos, cada uno con sus características distintivas. Estos incluyen los incendios de superficie, que afectan a pequeños árboles, tallos de árboles más grandes y matorrales. También están los incendios de copas, donde las llamas de los incendios de superficie alcanzan la parte superior de los árboles y los envuelven en fuego. Por último, los incendios subterráneos que se originan en las raíces de los árboles y pueden aparecer posteriormente a la supuesta extinción de un incendio superficial o de copas, si no se asegura que el suelo esté libre de riesgos [5].

Al comprender los tipos de incendios y la manera en que los factores que contribuyen a la generación y propagación de ellos, es posible implementar sistemas de monitoreo en nuestros bosques que detecten su presencia y emitan alertas tempranas, lo que puede prevenir su expansión descontrolada. En Colombia se han adoptado diversas estrategias para combatir este problema, incluyendo la capacitación de comunidades locales, incentivos económicos y la utilización de imágenes satelitales [12]. La capacitación de las comunidades locales desempeña un papel importante al crear conciencia sobre los riesgos asociados con los incendios forestales. Además, se ofrecen incentivos económicos a aquellas comunidades que logren reducir sus emisiones de carbono, lo que a su vez

implica la conservación de los bosques o la implementación de programas de reforestación.

Por otro lado, una solución más confiable para la detección de incendios es el uso de imágenes satelitales capturadas por sensores como el MODIS (MODIS, por sus siglas en inglés de *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) Terra y Aqua, así como el sensor VIIRS (VIIRS, por sus siglas en inglés de *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), todos desarrollados por la NASA. Estos instrumentos brindan una confiabilidad superior al 90% y permiten obtener información crucial, como la concentración de carbono en los bosques, la detección de incendios y la identificación de las principales causas de la deforestación [13].

En el contexto actual, el avance tecnológico ha habilitado una nueva era de monitoreo ambiental mediante el uso del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés de *Internet of Things*) [14, 15, 16]. Esta tecnología facilita la comunicación eficiente entre dispositivos a través de una o varias redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés de *Wireless Sensor Network*) [17], donde la instalación de nodos fijos permite detectar cambios en variables físicas o químicas del entorno y transmitir información que posibilita el monitoreo para generar alertas o notificaciones a los entes responsables de la toma de decisiones. Cada nodo está compuesto por sensores, un procesador, un transceptor, una memoria y un dispositivo de alimentación de energía [17]. La combinación de múltiples nodos forma una red inalámbrica de sensores, facilitando el monitoreo y control del entorno.

La tecnología de IoT ha permitido desarrollar diversas estrategias para abordar desastres naturales, incluidos los incendios forestales, mediante sistemas inteligentes que garantizan la seguridad y protección de los bosques a través de un monitoreo constante [18]. Además de la prevención, se han propuesto soluciones avanzadas para la detección temprana de incendios. Por ejemplo, en China se han implementado nodos equipados con cámaras y sensores para capturar algunos parámetros ambientales. Utilizando redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés de *Convolutional Neural Network*), estos nodos procesan los datos recopilados para mejorar la precisión y minimizar las falsas alarmas basándose en la "ley de 30", que establece que el riesgo de incendio es alto si la

temperatura supera los 30 °C, la humedad es inferior al 30% y la velocidad del viento excede los 30 km/h [19]. Otro ejemplo destacado de la aplicación de IoT en la detección de incendios se encuentra en el proyecto presentado por Marcu y colaboradores [20], que implica la implementación de una red inalámbrica de sensores con diversos sensores que monitorean parámetros clave como temperatura, concentración de gases y humedad del suelo. Los datos recopilados se transmiten a un servidor central accesible de manera remota desde dispositivos como computadoras de escritorio, portátiles o teléfonos inteligentes, facilitando el monitoreo continuo y la toma de decisiones informadas.

Sin embargo, la operación efectiva de un nodo aún depende de su aprovisionamiento constante de energía, lo cual representa un desafío continuo para las redes inalámbricas de sensores, especialmente en entornos remotos y sensibles al medio ambiente como los bosques, como señalan Wang y su equipo [21]. Los autores destacan que, aunque las fuentes de energía renovable como la solar y la eólica han demostrado ser efectivas en muchos contextos, enfrentan limitaciones significativas en áreas boscosas densas. Para mitigar estas limitaciones, a menudo se complementan con dispositivos de almacenamiento de energía, como baterías. Sin embargo, la accesibilidad y la durabilidad de estas baterías dependen de la aplicación específica de las WSN, lo que puede resultar en procedimientos costosos para el monitoreo y reemplazo de las mismas, incrementando así el costo de mantenimiento de la infraestructura [22, 23].

Una solución innovadora y prometedora es la tecnología de transferencia inalámbrica de energía (WPT, por sus siglas en inglés de *Wireless Power Transfer*), que se fundamenta en principios de inducción electromagnética similares a los de un transformador [24]. Esta tecnología permite la transmisión de energía a través de una antena transmisora que emite ondas electromagnéticas, las cuales son captadas por una antena receptora. Sin embargo, dado que la eficiencia de la transmisión disminuye con la distancia, se ha desarrollado un enfoque conocido como recolección de energía (EH, por sus siglas en inglés de *Energy Harvesting*). Este método implica la captura y almacenamiento de energía para su distribución posterior según las demandas de los dispositivos. Para maximizar la eficacia de la recolección de energía, se han implementado diversas tecnologías como rectenas, arreglos de antenas y absorbedores [25]. Además, el proceso de recolección generalmente incluye un rectificador que convierte la energía capturada en voltaje de corriente continua (DC) disponible para su uso inmediato [23].

La tecnología de WPT ha ganado relevancia debido a su potencial versatilidad en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la conservación de la naturaleza [26]. Ejemplos destacados de estas aplicaciones abarcan tanto el ámbito industrial como el social. En la industria, se utiliza para suministrar energía a robots, dispositivos móviles y sensores de seguridad como detectores de humo y alarmas, así como para cargar baterías de vehículos mientras están estacionados [27]. Por otro lado, en el ámbito social, la tecnología WPT se aplica en el sector de la salud [28] y en la investigación científica. En este último caso, permite la recolección de datos geo-ambientales [29] para la caracterización y comprensión del medio ambiente. Esta capacidad ha facilitado actividades dirigidas a la conservación y preservación del entorno, como estudios de variables físicas como temperatura, presión, conductividad y humedad en entornos aéreos, terrestres y marítimos [29].

Dado que estos dispositivos de medición suelen ubicarse en lugares de difícil acceso, mantener un suministro de energía constante es fundamental. Un fallo en uno o varios de estos sensores podría resultar en la pérdida de datos críticos y comprometer la fiabilidad de la información recopilada [30]. Para abordar este desafío, se propone un proyecto que combine tecnologías de WPT y recolección de energía. Esta iniciativa busca mantener energizados los nodos de manera continua, permitiendo la detección temprana de anomalías en entornos forestales y la generación de alertas anticipadas de incendios.

El proyecto tuvo como objetivo general desarrollar un sistema de monitoreo y alerta temprana que reciba y procese información acerca del estado de salud de un ecosistema de bosque a través de las redes de sensores inalámbricas y de la transferencia inalámbrica de energía. Para lograrlo, se plantearon los siguientes objetivos específicos (OE):

OE1: Desarrollar un sistema estable de comunicación entre los nodos que conforman la WSN que permita la recepción y transmisión de datos para la detección temprana de incendios forestales.

OE2: Construir un sistema WPT que permita controlar el estado de energía de batería de cada nodo perteneciente a una WSN.

OE3: Integrar una red WSN con el sistema WPT y validar su funcionamiento.

El proyecto se estructuró para alcanzar sus objetivos a través de una secuencia organizada de etapas. Los dos primeros objetivos específicos (OE1 y OE2) fueron abordados de manera independiente antes de integrar sus resultados en el OE3. En el desarrollo del OE1, se estructuró una metodología para el diseño y desarrollo de un nodo de detección temprana de incendios forestales. En primer lugar, se identificaron las principales variables a monitorear: temperatura ambiente, humedad relativa y concentración de gases. Con estas variables se monitorea dos de los tres elementos necesarios para la generación de fuego: el calor y el oxígeno. El nivel de calor se mide mediante la temperatura y la humedad relativa, mientras que la concentración de gases permite evaluar la presencia de oxígeno y la detección de humo. Posteriormente, se seleccionaron los componentes más adecuados para la implementación del nodo. Se optó por el microcontrolador Cubecell HTCC AB-01, por su capacidad de recepción, procesamiento y transmisión de datos, y el sensor BME688, por su precisión en la medición de las variables ambientales definidas. Se programó el nodo para recolectar datos cada 30 minutos y transmitirlos en tiempo real mediante el protocolo de comunicación LoRaWAN. Los datos se enviaron a las plataformas *The Things Network* y *Datacake*, donde esta última brindan una interfaz accesible para los usuarios finales. Adicionalmente, se implementó un sistema de notificaciones a través de correos electrónicos, configurado para activarse cuando se detectaran condiciones críticas: temperatura superior a 30 °C, humedad relativa inferior a 30 %, presencia de humo o una combinación de estos factores. Finalmente, se realizaron pruebas en un entorno controlado, donde se verificó el funcionamiento del sistema. Posteriormente, se ejecutaron pruebas en exteriores para evaluar el alcance de la señal y las condiciones óptimas de la red.

Por otro lado, el OE2 se centró en el desarrollo y evaluación de un sistema de recepción de energía mediante una rectena. En primer lugar, se diseñó un circuito rectificador utilizando el software *AWR Design Environment*, donde se simuló su comportamiento operando en la banda de 2,4 GHz. Una vez obtenidos los resultados de la simulación, el rectificador fue fabricado para su posterior integración con la antena. El siguiente paso consistió en el diseño de la antena, realizado en el software *CST Microwave Studio*, que permitió simular su comportamiento a 2,4 GHz y esclarecer su desempeño para captar la mayor cantidad de energía posible. La antena y el rectificador se combinaron para formar la rectena completa. Una vez ensamblada la rectena, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para verificar su funcionalidad, evaluando su capacidad de recepción de

energía. Posteriormente, se realizaron comparaciones con antenas comerciales a fin de determinar cuál ofrecía un mejor rendimiento en la captación de energía disponible. Finalmente, se validó el almacenamiento de la energía captada en un supercapacitor, el cual se utilizó como dispositivo de almacenamiento de energía para alimentar el sistema.

Por último, en el OE3 se llevó a cabo la integración y evaluación del nodo desarrollado en el OE1 con el sistema de recepción y almacenamiento de energía diseñado en el OE2. Inicialmente, se realizó un estudio del consumo de la energía típica y mínima requerida para el funcionamiento del nodo. Posteriormente, se realizó un análisis del tiempo de duración de una batería de litio de 3,7 V y 1050 mAh mientras el nodo operaba de forma continua. A continuación, se replicó el estudio de descarga, pero esta vez utilizando un supercapacitor de 4F, con el fin de comparar los tiempos de descarga entre ambos dispositivos de almacenamiento. Además, se validó el tiempo de carga del supercapacitor al conectarlo a la rectena, lo que permitió evaluar la capacidad de la rectena para suministrar energía. Posteriormente, se realizaron pruebas para determinar las distancias máximas a las que el nodo podía operar sin problemas de suministro energético cuando estaba conectado a la rectena. Finalmente, se validó el funcionamiento de la rectena en un ambiente distinto al laboratorio para evaluar su rendimiento en condiciones reales.

Para mayor comprensión del trabajo desarrollado, se organizó este documento en capítulos con los cuales se facilitará su entendimiento. El Capítulo 1 aborda la teoría de las tecnologías utilizadas en este proyecto, como WSN y WPT. En el Capítulo 2 se presenta el diseño, metodología, análisis y verificación de la red inalámbrica elaborada. Asimismo, el Capítulo 3 detalla el procedimiento de modelado, fabricación, pruebas y análisis del sistema de transferencia de energía inalámbrica. El Capítulo 4 se expone los experimentos, análisis y resultados de la integración de estas dos tecnologías. Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones para fortalecer esta investigación o desarrollar en un futuro investigaciones similares.

1.Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales de las tecnologías empleadas en este proyecto. Se inicia explorando la tecnología de redes inalámbricas de sensores, incluyendo sus arquitecturas y protocolos de comunicación. Se profundiza en LoRaWAN explicando su arquitectura, clases de dispositivos y métodos de activación. Posteriormente, se introduce la transferencia de energía inalámbrica con un enfoque en la recolección de energía, tema central del proyecto. Allí, se discuten aspectos relevantes como antenas y técnicas de rectificación aplicables en este contexto.

1.1 Redes Inalámbricas de Sensores

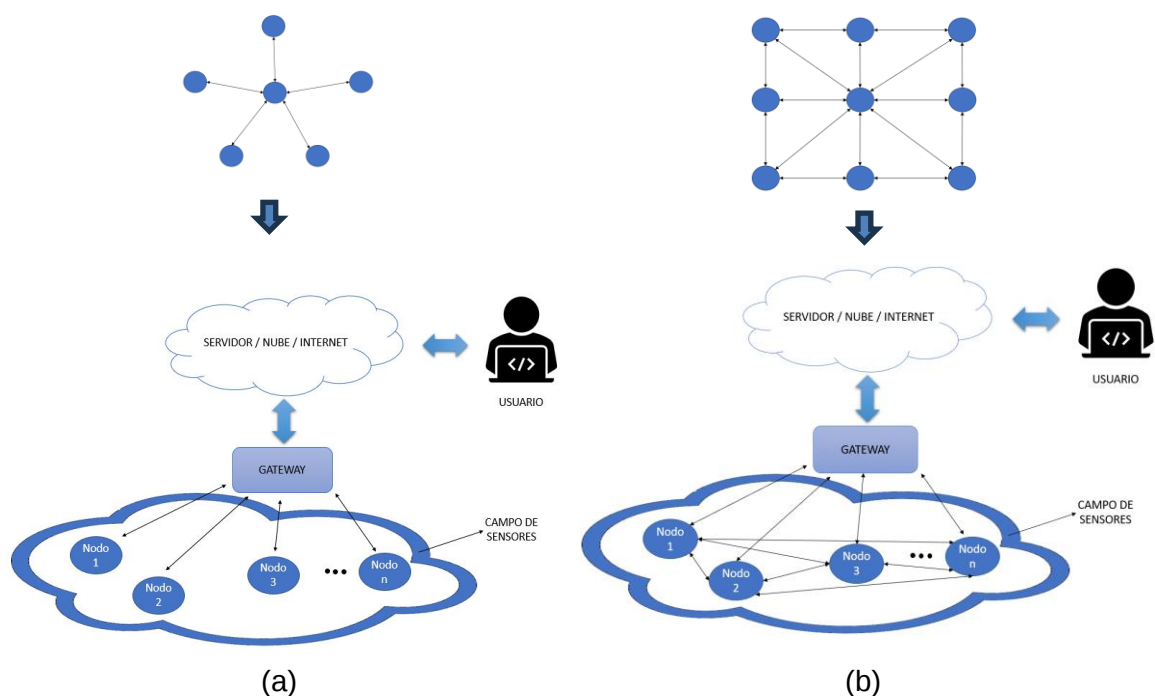
Las redes inalámbricas de sensores consisten en múltiples nodos distribuidos en varias ubicaciones, que se comunican inalámbricamente entre sí o con un Gateway central. Un nodo es un dispositivo formado por 5 elementos: dispositivo final, memoria, procesador, transceptor y batería. El dispositivo final es un sensor el cual toma datos del entorno, la memoria es en donde se almacena la información tomada por el sensor; el procesador indica qué hacer con la información; un transceptor (transmisor y receptor), es quien configura la dirección MAC (MAC, por sus siglas en inglés de *Media Access Control*) y es usado para transmitir y recibir información, y la batería es la que provee de energía al nodo [17]. Los nodos de una red de sensores están ubicados en puntos diferentes y se encargan de tomar uno o más datos asociados a parámetros físicos o químicos de interés [17, 31]. Los tipos de arquitectura WSN se pueden ver en la Figura 1-1 y dependiendo de ella, los nodos pueden estar comunicados entre sí o directamente con el Gateway, sin importar la arquitectura la información recolectada es transmitida al Gateway. El Gateway es el encargado de transmitir la información tomada por la red de sensores a través de internet en donde el usuario final puede observar la información [17].

1.1.1 Arquitectura WSN

A pesar de que existen diferentes topologías, como punto a punto (P2P, por sus siglas en inglés de *Point to Point*), bus, anillo, estrella, árbol y malla, se hará énfasis en las topologías estrella y malla, ya que son las más utilizadas en proyectos de larga distancia [32]. Dado que generalmente los nodos están ubicados en la intemperie, deben ser robustos para poder soportar las diferentes condiciones ambientales. Por lo tanto, al momento de ubicar cada nodo es necesario tener en cuenta el tipo de topología de comunicación que se usará para evitar la pérdida de información [17].

La topología de estrella conecta nodos a un Gateway central, como se puede ver en la Figura 1-1 (a). Si un nodo falla, no afecta a los demás, y el Gateway evita problemas de eco. Los dispositivos están conectados en forma de estrella y los datos fluyen a través del Gateway, sin conexiones directas entre dispositivos. El nodo emisor envía datos al Gateway, que los dirige al destinatario correcto. Esta topología facilita la resolución de problemas y la facilidad para agregar o eliminar dispositivos. Sin embargo, depende del Gateway; si este falla, toda la red se ve afectada [32].

Figura 1-1: Arquitecturas de WSN. (a). Arquitectura tipo estrella. (b). Arquitectura tipo malla.



Por otro lado, en una topología de malla (representada en la Figura 1-1 (b)), los nodos eligen el camino más eficiente basándose en la conectividad y la velocidad. Es ideal para manejar mucho tráfico y reduce significativamente los fallos de red. Los datos fluyen constantemente utilizando una estrategia de inundación, limitada por el tiempo de vida (TTL, por sus siglas en inglés de *Time to Live*). Las ventajas incluyen ausencia de problemas de tráfico, redundancia, alta privacidad, seguridad y fiabilidad en la transferencia de datos. Sin embargo, es más costosa, su instalación es desafiante y requiere más energía debido a la actividad constante de los nodos [32].

1.1.2 Bandas de frecuencia ISM

Las bandas ISM (ISM, por sus siglas en inglés de *Industrial, Scientific and Medical*) son frecuencias de uso libre destinadas a dispositivos que generan y utilizan energía de radiofrecuencia para fines diferentes a las telecomunicaciones, como aplicaciones industriales, científicas y médicas [33, 34, 35], es por ello que el incremento de dispositivos inalámbricos conectados a redes, existen entidades reguladoras que deben gestionar el ancho de banda de las frecuencias disponibles, como se menciona en [36, 37]. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés de *International Telecommunication Union*) es la entidad global encargada de asegurar esta conectividad y quien recomendó los límites para los servicios de radio de los equipos ISM a un rango de frecuencias para reducir la interferencia generada [33].

Las bandas de frecuencia ISM se han empleado en procesos como secado, fundición, calentamiento, soldadura, descongelación, cocción, soldadura por puntos, soldadura fuerte, moldeo, e imagenología, entre otros [33, 34, 35]. Las frecuencias en las que operan abarcan desde 6.765 kHz hasta 245 GHz y son utilizadas para desarrollar aplicaciones inalámbricas que requieren una tasa de transmisión de datos relativamente baja [38]. La Tabla 1-1 detalla estas bandas.

Tabla 1-1: Bandas de frecuencias ISM. Información adaptada de [34, 38, 39].

Banda de Frecuencia	Observaciones
6.765 – 6.795 kHz	Frecuencia central: 6.780 kHz. De uso global. [33, 39]

Tabla 1-1: (Continuación)

Banda de Frecuencia	Observaciones
13.553 – 13.567 kHz	Frecuencia central: 13.560 kHz. De uso global. Posee alta interferencia en servicios de radiocomunicaciones. [33, 39]
26.957 – 27.283 kHz	Frecuencia central: 27.120 kHz. De uso global. Posee alta interferencia en servicios de radiocomunicaciones. [33, 39]
40,66 – 40,70 MHz	Frecuencia central: 40.68 MHz. De uso global. Posee alta interferencia en servicios de radiocomunicaciones. [33, 39]
433,05 – 434,79 MHz	Frecuencia central: 433,92 MHz. Principalmente usada en Europa, África y algunos países asiáticos, excepto en: Alemania, Austria, Bosnia y Herzegovina, Croacia, Macedonia, Liechtenstein, Montenegro, Portugal, Serbia, Eslovenia y Suiza donde se necesita autorización para ser usada en aplicaciones ISM por posibles interferencias en servicios de radiocomunicaciones. [33, 39]
863 - 870 MHz	Frecuencia central: 868 MHz. Principalmente usada en Europa. Es una banda poco congestionada y ofrece menos interferencia en servicios de radiocomunicaciones. [38].
902-928 MHz	Frecuencia central: 915 MHz. Utilizada principalmente en América y Oceanía. Posee alta interferencia en servicios de radiocomunicaciones. [33, 39]
2,4 – 2,5 GHz	Frecuencia central: 2,45 GHz. De uso global. Hay alta interferencia en servicios de radiocomunicaciones. [33, 39]
5,725 – 5,875 GHz	Frecuencia central: 5,8 GHz. De uso global. Hay alta interferencia en servicios de radiocomunicaciones. [33, 39]
24 – 24,25 GHz	Frecuencia central: 24,125 GHz. De uso global. Hay alta interferencia en servicios de radiocomunicaciones. [33, 39]
61 – 61,5 GHz	Frecuencia central: 61,25 GHz. De uso global. [33, 39]
122 – 123 GHz	Frecuencia central: 122,5 GHz. De uso global. [33, 39]
244 – 246 GHz	Frecuencia central: 245 GHz. De uso global. [33, 39]

1.1.3 Protocolo de comunicación LoRaWAN

Para conseguir un mejor funcionamiento de una red de sensores, se han desarrollado varios tipos de protocolos de comunicación: ZigBee, Bluetooth, DASH7 (protocolo usado en RFID), SigFox y LoRaWAN (LoRaWAN, por sus siglas en inglés de *Long Range*

Wireless Area Network). Entre ellos destacan los dos últimos para una comunicación inalámbrica para larga distancia [40]. En la Tabla 1-2 se pueden observar algunos datos sobresalientes de cada protocolo y que son de ayuda para definir qué tipo de protocolo usar dependiendo de la aplicación que se desee realizar.

Tabla 1-2: Comparación de protocolos de comunicación inalámbrica para una WSN.

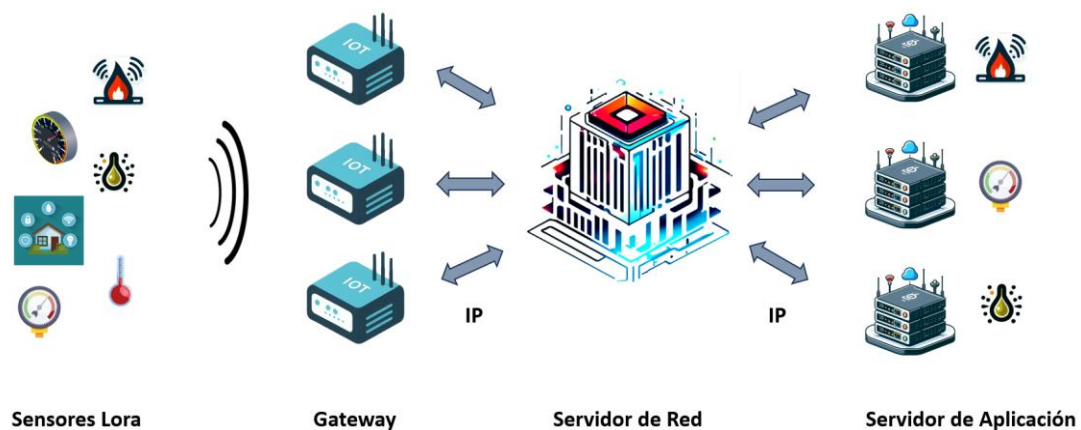
Características	ZigBee	Bluetooth	RFID	SigFox	LoRaWAN
Alcance máximo	Entre 10 a 100 m [40].	Entre 15 a 30 m [40].	200 m [40].	10 km en zona urbana y 50 km en zona rural [40].	5 km en zona urbana, 15 en zona sub urbana y 45 km en zona rural [41].
Consumo	30 mA [40].	30 mA [40].	Potencia ultra baja [40].	10 mW – 100 mW [40].	44mA [42]
Velocidad de datos	250 kbps [40].	1 Mbps [40].	4 Mbps [40].	100 bps <i>uplink</i> - 600 bps <i>downlink</i> [40].	290 bps – 50 kbps [41].
Topología	Estrella, Mesh [40].	Estrella, Bus [40].	P2P [40].	Estrella [40].	Estrella [41].

En [41], se detalla la tecnología LoRaWAN, un protocolo que facilita una comunicación de largo alcance hasta 45 km con bajo consumo de energía, integrándose dentro de la tecnología LP-WAN (LP-WAN, por sus siglas en inglés de *Low Power Wide Area Network*), como informan [42, 43]. El consumo típico es de 44 mA durante la comunicación entre dispositivos. Esta eficiencia se logra configurando el protocolo para utilizar la mínima energía necesaria para transmitir, evitando el uso constante de máxima potencia. Además, LoRaWAN ofrece la capacidad de monitorear el estado de la batería y permite una comunicación bidireccional entre el sensor y el dispositivo final [41].

LoRaWAN utiliza una topología tipo estrella y puede integrarse con otras tecnologías y estándares de comunicación como Ethernet, satélites, 3G, 4G, 5G y wifi [41, 44, 45]. Este

protocolo asegura una alta confiabilidad en la transmisión y recepción de paquetes mediante la verificación de la comunicación y la integridad de los datos. Además, permite una comunicación sin interferencias con velocidades de datos variables, que van desde 300 bps hasta 5 kbps, utilizando un ancho de banda de 125 kHz. Los paquetes son enviados por diversos canales para facilitar la comunicación entre dispositivos y Gateways. LoRaWAN también opera en bandas de frecuencia ISM, como la frecuencia de 915 MHz utilizada en Colombia [39, 41, 43]. Además, esta tecnología también permite la conexión de múltiples Gateways. La Figura 1-2 ilustra su arquitectura.

Figura 1-2: Arquitectura de red de LoraWAN. Adaptado de [41].



LoRaWAN además de ser confiable, también brinda buena seguridad para que los paquetes no sean afectados por un agente externo. Posee 2 capas de seguridad: Una de la red y otra de las aplicaciones. Ambas poseen un sistema de encriptación basado en el AES-128 (AES por sus siglas en inglés de *Advanced Encryption Standard*), el cual consiste en encriptar los datos para mantener la confidencialidad y adicionalmente genera un código de integridad del mensaje (MIC por sus siglas en inglés de *Message Integrity Code*) para integrarlo nuevamente y poder leer la información [41].

Por otro lado, existen diferentes clases de dispositivos finales que utilizan el protocolo LoRaWAN: clase A, clase B y clase C. En la Tabla 1-3 se muestra una tabla comparativa entre las diferentes clases de LoRaWAN. Sin embargo, la clase base es la clase A, es decir, clase B y clase C son derivaciones de la clase A [43].

A pesar de que hay diferencias entre las clases de LoRaWAN como en su consumo de energía y alcance, todos son dispositivos de bajo consumo energético y largo alcance. Por lo anterior la clase de LoRaWAN usada en este proyecto es la clase A. La clase A es la que tiene menor consumo de energía, sin embargo, esto también afecta el alcance de la comunicación siendo menor a las clases B y C, no obstante, esta clase cubre un área suficiente para el trabajo realizado debido a que el proyecto está desarrollado para bosques los cuales dificultan la línea de vista entre nodos y a mayor distancia hay menor línea de vista.

Tabla 1-3: Tabla comparativa entre clase A clase B clase C. Información adaptada de [43].

CARACTERÍSTICA	CLASE A	CLASE B	CLASE C
Consumo de energía	Menor que clase B y C	Menor que clase C y mayor que clase A	Mayor que clase A y B
Alcance	Menor que clase B y C	Menor que clase C y mayor que clase A	Mayor que clase A y B
Comunicación	Bidireccional	Bidireccional	Bidireccional
Protocolo de comunicación	ALOHA	ALOHA	ALOHA
Trasmisión de datos	En el tiempo programado.	En el tiempo programado.	En el tiempo programado.
Recepción de datos	Abre la ventana de recepción solo en el tiempo predeterminado	En el tiempo programado. Adicionalmente, abre una ventana extra en un tiempo establecido para verificar si el Gateway tiene información para estos dispositivos	Siempre tiene una ventana abierta, solo se cierra cuando el dispositivo va a transmitir
Tiempo de espera en comunicación	Bajo	Intermedio	Alto

Adicionalmente, LoRaWAN posee dos métodos de activación para sus dispositivos finales conocidos como OTAA (OTAA, por sus siglas en inglés de *Over The Air Activation*) y ABP (ABP, por sus siglas en inglés de *Activation by Personalization*). Para ello, es necesario que cada dispositivo esté registrado en una red antes de enviar y recibir mensajes [46]. Los autores [43] indican que el registro es realizado por medio de la información con la que se identifica el dispositivo final: dirección de dispositivo (DevAddr, por sus siglas en inglés de *Device Address*), identificador de la aplicación (AppEUI, por sus siglas en inglés de *Application Identifier*), llave de sesión de red (NwkSKey, por sus siglas en inglés de *Network Session Key*), llave de sesión de la aplicación (AppSKey, por sus siglas en inglés de *ApplicationSessionKey*) [46]. La Tabla 1-4 muestra diferencias entre ambos tipos de activación.

Tabla 1-4: Diferencias entre OTAA y ABP.

CARACTERÍSTICA	OTAA	ABP
Seguridad	Posee 6 identificadores: DevAddr, AppEUI, DevEUI, AppKey (<i>join request, join accept</i>) [43].	Posee 3 identificadores: DevAddr, NwkSKey, AppSKey [43].
Flexibilidad	Permite la reconexión automática, aunque se presenten eventos en que se pierda la comunicación. Ejemplo: desconexión eléctrica, cambio de servidor [47].	Cada vez que se presentan eventos en que se necesite reestablecer conexión, debe ser reprogramado [47].
Escalabilidad	Además de trabajar en la banda regional programada, el dispositivo puede trabajar en bandas definidas por los operadores del servidor de red [47].	Solo trabaja correctamente en la red predeterminada [46].
Cantidad de bits	64 bit [46].	32 bit [46].
Envío múltiple de mensajes o <i>multicast</i>	Sí [46].	No [46].

Así mismo, una fallida transmisión en OTAA evita que el dispositivo no cambie de estado activo a uno inactivo, por lo que se consume más potencia intentando conectarse nuevamente a la red. ABP por el contrario permite que, aunque no exista una conexión con la red al realizar la transmisión el dispositivo cambie a un estado inactivo [46]. Aun cuando OTAA posee mejor seguridad y es más versátil, en este proyecto se consideró trabajar con ABP debido a que al transmitir menor cantidad de bits y a que garantiza que permanece en un estado inactivo después de transmitir, su consumo de energía es menor que OTAA.

A pesar de las ventajas que proporciona LoRaWAN, el problema de la batería sigue persistiendo en las redes WSN. El uso de paneles solares, por ejemplo, ha permitido solucionar en gran parte este inconveniente. Sin embargo, no siempre logra cumplir los requerimientos porque pueden existir nodos a los cuales la luz solar no llega [21, 48]. Para ayudar a solucionar este inconveniente de una manera menos invasiva, se ha venido implementando una tecnología conocida como transferencia de energía inalámbrica que utiliza antenas para transmitir y/o recibir energía y así realizar la alimentación de los nodos sin necesidad de cableado o conexión alámbrica con la fuente de suministro energético[48].

1.2 Transferencia Inalámbrica de Energía

La tecnología WPT, como su nombre lo indica, permite que uno o más dispositivos se energicen sin necesidad de utilizar cableado. Este tipo de tecnología se basa en el principio de funcionamiento de un transformador, a través de inducción electromagnética, como lo indican [24]. Además, ellos explican que existen 2 tipos de transferencia: La transferencia no radiativa y la radiativa. La transferencia no radiativa también es conocida como transferencia de campo cercano y la radiativa como campo lejano. En la Tabla 1-5, se indican las técnicas utilizadas más comunes para llevar a cabo esta transmisión energética tanto para campo cercano como campo lejano.

Tabla 1-5: Transmisiones de campo cercano y campo lejano. Información adaptada de [49].

Campo cercano	- Transferencia de energía inductiva (IPT por sus siglas en inglés de <i>Inductive Power Transfer</i>)
----------------------	---

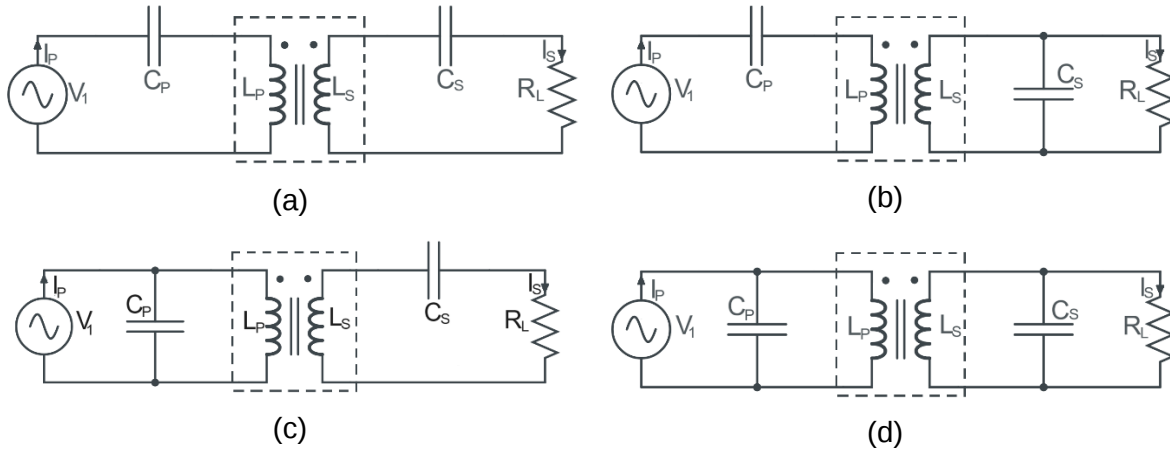
Tabla 1-5: (Continuación)

Campo cercano	- Transferencia de energía por resonancia inductiva (RIPT por sus siglas en inglés de <i>Resonant Inductive Power Transfer</i>) - Transferencia de energía capacitiva (CPT por sus siglas en inglés de <i>Capacitive Power Transfer</i>)
Campo lejano	- Radiación de radiofrecuencia (RF) - Transferencia de energía por microondas (MPT por sus siglas en inglés de <i>Microwave Power Transfer</i>) - Transferencia de energía por láser (LPT por sus siglas en inglés de <i>Laser Power Transfer</i>)

En la transferencia de campo cercano se lleva a cabo entre dispositivos cercanos. En [49] indican que el campo cercano es el que está en un rango de distancia de hasta 2 m entre transmisor y receptor, y el campo lejano es el que supera los 2 m entre los dispositivos. En la transferencia de campo cercano se genera entonces un campo en el cual los dispositivos se acoplan. Este acoplamiento se realiza con inducción en un campo magnético o por acople capacitivo. Generalmente se usa una bobina y una placa metálica para generar este acople y a través de un coeficiente de acoplamiento (que es máximo 1) se puede calcular qué tanto disminuye este acople según se van distanciando los dispositivos.

Además, hay que considerar que el diámetro de la antena debe ser mayor a la distancia entre los dispositivos para que haya mayor eficiencia en la transmisión, por lo que esto implicaría un problema en nuestro caso, así que podría determinarse que utilizar las técnicas de campo cercano no es una buena opción para este proyecto. También se puede mejorar la eficiencia logrando disminuir las pérdidas; esto se consigue agregando a las bobinas algunos elementos capacitivos. Hay cuatro formas de hacerlo como se ilustra en la Figura 1-3, estas tipologías son: serie-serie (SS), serie-paralelo (SP), paralelo-serie (PS) y paralelo-paralelo (PP) [24].

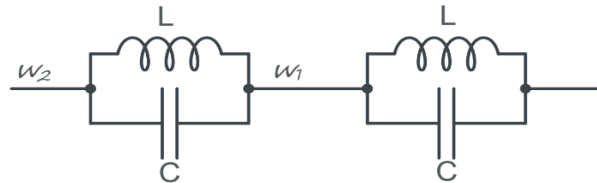
Figura 1-3: Redes de compensación. (a). Serie – serie (SS). (b). Serie – paralelo (SP). (c). Paralelo – serie (PS). (d). Paralelo – paralelo (PP). Adaptado de [24].



En cada sección de la Figura 1-3 se puede observar al lado izquierdo el circuito transmisor y al lado derecho el receptor, siendo V_1 el voltaje primario, I_p corriente primaria, C_p condensador primario y L_p bobina primaria; L_s bobina secundaria, C_s capacitor secundario, I_s corriente secundaria y R_L resistencia de la carga.

La transferencia de campo lejano se lleva a cabo con dispositivos que estén alejados entre ellos. Para este caso, la antena debe ser más grande que la longitud de onda con la que se transmitirá. Complementariamente, en [50] se explica que, en temas relacionados con la comunicación se puede transmitir datos a mayor distancia inyectando mayor voltaje. En este caso particular, el voltaje extra es eliminado por el receptor a través de un filtro pasa banda LC el cual se encarga de eliminar el voltaje que llegue en exceso como se puede ver en Figura 1-4.

Figura 1-4: Filtro pasa banda en receptor. Adaptado de fig. 5 en [50].



Este tipo de transferencia se hace comúnmente por los métodos indicados en la Tabla 1-5. Aunque en [24] explican que es posible transmitir 10,3 W alrededor de 7 m en 20 kHz

con el método de transferencia de energía por inductancia (IPT), este método es más común en la transferencia de campo cercano porque si hay una distancia mayor a 2 m la eficiencia de transmisión se reduce. Los autores señalan que, de acuerdo con los resultados obtenidos, a una distancia entre 2 a 12 m, el coeficiente de acople entre las bobinas puede disminuirse a 0,01 o alcanzar valores menores según se incrementa la distancia entre ellas.

La transferencia por RF logra distancias desde 1 m hasta varios kilómetros, pero se logró observar en un experimento que su eficiencia de transmisión es de 1% a 30 cm de distancia como lo indican en [49] y además necesita línea de vista para poder transmitir la energía. Debido a esto, es usada para la transmisión en áreas que necesiten baja potencia. Con la transmisión MPT la eficiencia mejora con un disco parabólico que enfoca las microondas. Sin embargo, esta técnica requiere complejos mecanismos de rastreo y por ello mayor cantidad de dispositivos. Aunque la transferencia LPT presenta las mismas dificultades que MPT, esta técnica es una evolución de la RF que transmite a una frecuencia cercana a la infrarroja.

En la transferencia de energía se puede incluir también la transmisión de datos. En [22] explican la técnica de transferencia inalámbrica simultánea de información y energía (SWIPT por sus siglas en inglés de *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*) destacando beneficios respecto a la eficiencia espectral, retardos en la transmisión, manejo de interferencia y consumo energético. Además, describen diferentes protocolos desarrollados para la transmisión inalámbrica en WSN: Control de acceso al medio adaptativo de energía (EA-MAC por sus siglas en inglés de *Energy Adaptive Medium Access Control*), que controla el ciclo de trabajo de los nodos; ODMAC (ODMAC por sus siglas en inglés de *On Demand MAC*), que ajusta el ciclo de trabajo para lograr que la energía recolectada sea mayor a la consumida; ERI-MAC (ERI-MAC por sus siglas en inglés de *Energy harvested Receiver-Initiated MAC*), donde el nodo receptor detecta el canal adecuado para la recepción, previniendo colisiones, mientras que el transmisor utiliza el canal cuando recibe la señal del receptor; el MAC de máquina a máquina (M2M por sus siglas en inglés de *Machine to Machine*) en el que el nodo base emite un mensaje de notificación para que los dispositivos se preparen para recolectar energía; y finalmente, el protocolo MAC de radiofrecuencia (RF – MAC), que cuando un nodo necesita energía, transmite un paquete de solicitud de energía y el transmisor comienza a proveer pulsos de

energía. Estos protocolos no solo aumentan la vida útil de la batería, sino que pueden incluso eliminar la necesidad de usarla [22].

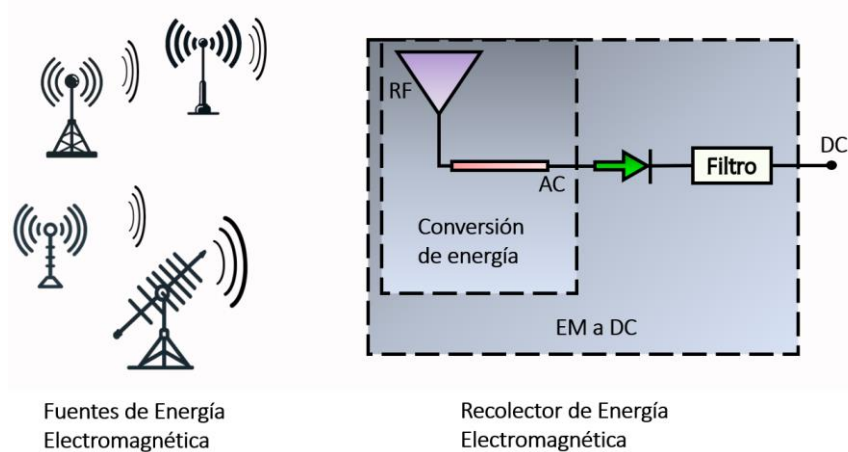
Conocidas las diversas técnicas de transferencia de energía, es fundamental recordar que se puede generar energía eléctrica a partir de distintas fuentes ambientales. Estas incluyen energía solar, eólica, térmica, de vibración y radiofrecuencia, como se detalla en [22, 48]. Sin embargo, este proyecto se centra en la transferencia de potencia mediante MPT debido a su capacidad para operar eficientemente en condiciones adversas y para captar energía desde múltiples dispositivos. Esta técnica se destaca por permitir la conexión de una mayor cantidad de dispositivos que otras tecnologías, aprovechando las frecuencias de microondas. MPT opera en bandas de radio de uso libre, como las bandas ISM, lo que facilita la comunicación por radio entre estaciones fijas, móviles, sistemas de radiolocalización y comunicaciones aficionadas [39].

1.2.1 Recolección de energía

Debido a que la transmisión de energía en campo lejano disminuye a una mayor distancia, se desarrolló un nuevo concepto conocido como recolección de energía (EH por sus siglas en inglés de Energy Harvesting) que permite obtener energía y almacenarla para luego ser transmitida a los dispositivos que vayan necesitando energía adicional. Para lograr un EH es necesario enfocarse en el desarrollo del receptor. Como se mencionó antes, la energía se transmite y recibe a través de antenas. Sin embargo, [23]., explican que en la recolección de energía estas generalmente están acompañadas de un rectificador y de este modo se forma una rectena la cual genera un voltaje DC en su salida. Además, los autores revelan que las antenas se usan en arreglos para captar más energía. El arreglo se realiza en un material artificial plano conocido como meta-superficie, el cual ayuda a igualar impedancias sin necesidad de circuitos adicionales además de poder incluirle características como flexibilidad que permiten la adaptación de este según vaya a ser su uso. A través de los arreglos, es posible maximizar la recolección de energía electromagnética (EM) vía microondas para así poder utilizar la energía en alguna carga. Este desarrollo implementado en un nodo es conocido también como un nodo absorbedor [23]. La Figura 1-5 muestra el funcionamiento del EH.

El sistema de recolección de energía implementado en este proyecto se basa en una rectena, compuesta por una antena receptora y un rectificador. A continuación, se presenta una introducción a las antenas y luego a los rectificadores.

Figura 1-5: EH por microondas. Adaptado de [23].



1.2.2 Antenas

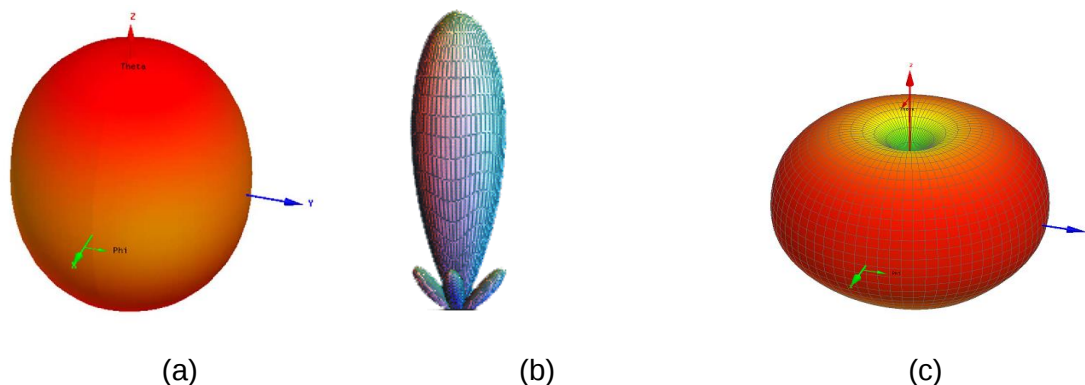
Una antena es conocida como dispositivo metálico que puede ser una varilla o un cable que puede radiar o recibir ondas de radio. En [51] una antena es definida como una estructura de transición entre un espacio libre y un dispositivo guía, y es utilizada para transmitir o recibir energía electromagnética.

Existen varios tipos de antenas. Las antenas de alambre, como las dipolo, espiral, apertura y helicoidal, son las más comunes [51]. Las antenas de apertura están diseñadas para trabajar en alta frecuencia y se utilizan generalmente en aplicaciones aeroespaciales. Las antenas de cinta, parche o microstrip, que se utilizan frecuentemente en comunicaciones, consisten en un parche metálico sobre un sustrato aterrizado y pueden adoptar diversas formas [51]. Estas son relevantes para este proyecto debido a su capacidad para tomar diferentes formas, tamaños pequeños y su bajo costo, como se puede ver en [52, 53, 54]. Además, existen los arreglos de antenas, y se emplean cuando una sola antena no puede radiar suficiente energía. Las antenas de cinta, parche o microstrip, que se utilizan frecuentemente en comunicaciones, consisten en un parche metálico sobre un sustrato aterrizado y pueden adoptar diversas formas [51].

La variedad de tipos de antenas ofrece varias opciones para escoger en diferentes aplicaciones. Seleccionar la que mejor se acople a las necesidades depende del funcionamiento de cada una de ellas y este es determinado por sus parámetros: patrón de radiación, densidad de potencia de radiación, intensidad de radiación, amplitud del haz, directividad, eficiencia de la antena, ganancia, eficiencia del haz, ancho de banda, polarización, impedancia de entrada, eficiencia de radiación de la antena, vector de longitud efectiva de la antena, máxima directividad y área efectiva, ecuación de transmisión de Friis y ecuación de alcance de radar, temperatura de la antena [51]. Balanis además indica que no siempre todos los parámetros mencionados anteriormente pueden ser investigados analíticamente debido a la complejidad de la estructura de la antena y por el método de estimulación. Los parámetros analizados en este trabajo se describen a continuación:

- **Patrón de radiación:** Indica matemáticamente o gráficamente en dos o tres dimensiones la distribución de la energía radiada en función de la posición en que se encuentre el observador. Existen tres tipos de patrón de radiación: patrón isotrópico, direccional y omnidireccional, presentados en la Figura 1-6. El **isotrópico** es el patrón ideal ya que no tiene pérdidas e irradia en todas las direcciones por igual, pero no es realizable físicamente; sin embargo, es necesario para los cálculos analíticos ya que todos parten de él como punto de referencia. El patrón **direccional** indica que la energía radiada es más fuerte en una dirección que en otras. Por último, la antena **omnidireccional** es aquella que irradia en todas las direcciones, pero sobre la superficie [51].

Figura 1-6: Tipos de patrones de radiación. (a). Isotrópico [55] (b). Direccional [56] (c). Omnidireccional [57].



- **Ganancia:** Está definida como la relación de la intensidad en una dirección con la intensidad radiada que es obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada isotrópicamente. La ganancia está relacionada entonces con la directividad, sin embargo, la directividad indica las propiedades directivas de la antena y es controlada por el patrón de radiación [51].

- **Eficiencia de radiación de la antena:** Es la relación entre la potencia entregada a la resistencia de radiación (R_r) y la potencia entregada a R_r y a la resistencia de carga (R_L). La resistencia de radiación es aquella presente en la antena. [51]:

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_L + R_r} \right] \quad (1.1)$$

Adicionalmente a estos parámetros, es importante tener en cuenta a qué frecuencia la antena va a trabajar y su ancho de banda.

- **Impedancia:** La impedancia se encuentra presente en las terminales de una antena. Es conocida como la relación entre voltaje y corriente en un par de terminales o la relación adecuada entre componentes de un campo eléctrico y magnético en un punto determinado. Por lo cual la impedancia es un componente requerido para la alimentación de la antena [58]. Como fue mencionado al inicio, las antenas tienen una impedancia en sus terminales, el no adaptar estas impedancias a la impedancia de la fuente de transmisión o recepción genera pérdidas para el proceso y la señal no es transmitida o recibida eficientemente. Al no tener un acople debido, solamente se logra transmitir el 50 % de la señal y el otro 50 % se dispersa en forma de calor en el sistema de transmisión o recepción [51]. La impedancia es posible analizarla gráficamente con la carta de Smith [59] la cual es explicada en el Anexo A.

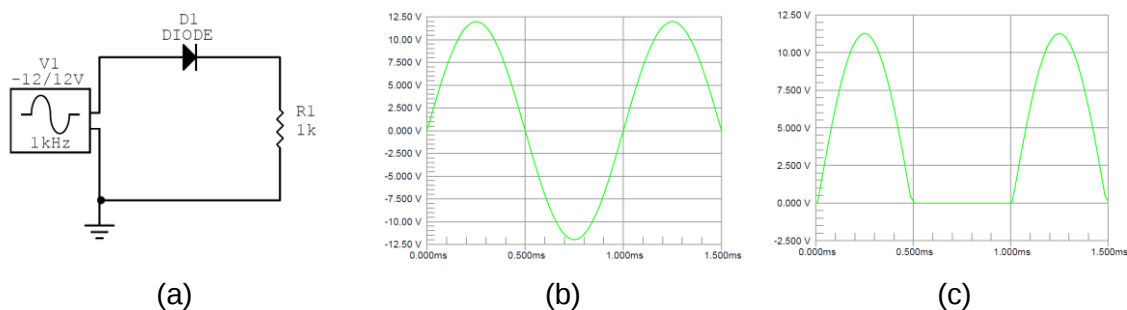
1.2.3 Rectificador

Los rectificadores son circuitos que convierten la corriente alterna en corriente continua [60] y en aplicaciones de recolección de energía son indispensables debido a la naturaleza senoidal de las ondas EM. Comparten los principios de funcionamiento de los rectificadores AC-DC y su eficiencia en la conversión de RF a DC depende en gran medida del diseño del rectificador, donde los diodos son los componentes principales [61, 62, 63]. Existen dos

tipos principales de rectificadores: de media onda y de onda completa [60], cada uno de los cuales puede emplearse para generar multiplicadores de voltaje y que serán explicados a continuación. Sin embargo, el voltaje de la señal de salida no alcanza el valor exacto esperado debido a las pérdidas de voltaje que tienen los elementos que conforman el circuito.

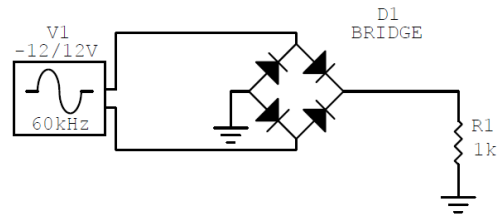
- **Rectificador de media onda:** Está conformado por un solo diodo y una resistencia de carga conectada en serie, como se ilustra en la Figura 1-7 (a). Por otro lado, las figuras (b) y (c) muestran una pérdida de voltaje de 0,7 V, que corresponde al voltaje de activación del diodo. Este rectificador solamente permite el paso del semiciclo positivo de una onda senoidal [60].

Figura 1-7: Rectificador de media onda. (a). Circuito. (b). Señal de entrada. (c). Señal de salida

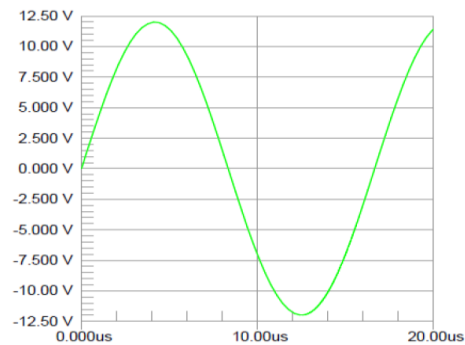


- **Rectificador de onda completa:** Es empleado si se desea utilizar la energía completa de la señal senoidal, tanto en su ciclo positivo como negativo. Su circuito base es el puente de diodos [60]. La Figura 1-8 muestra un ejemplo de rectificador de onda completa. En este caso, debido a que la señal atraviesa dos diodos, se pierde un voltaje de 1,4 V por los componentes involucrados.

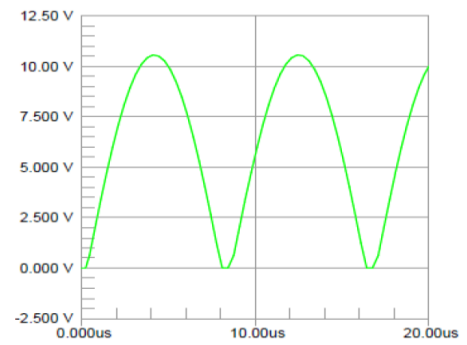
Figura 1-8: Rectificador de onda completa. (a). Circuito. (b). Señal de entrada. (c) Señal de salida.



(a)



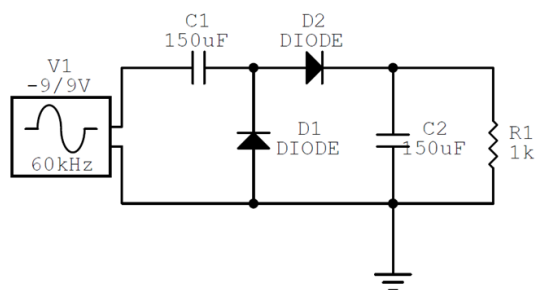
(b)



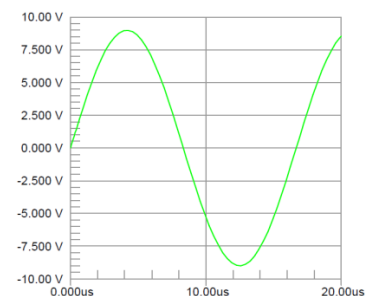
(c)

- **Multiplicador de voltaje:** Este circuito permite mantener el máximo de voltaje de una señal a través de los condensadores y lo elevan según esté diseñado. El multiplicador puede incrementar dos, tres, cuatro o más veces el voltaje de la señal [60]. Las Figuras 1-9 y 1-10 presentan ejemplos de multiplicadores de voltaje. En las figuras (c) de ambas, se observa que el voltaje de la señal de salida se duplica y triplica, respectivamente, aunque con un valor inferior al esperado.

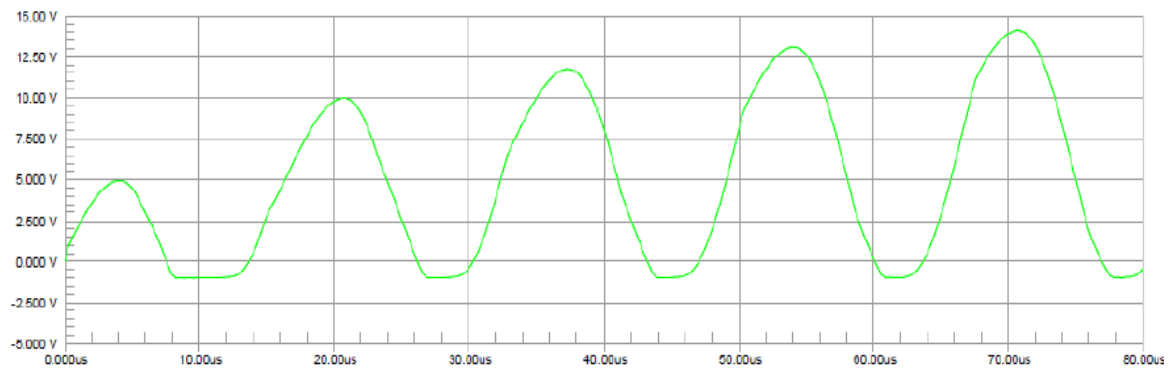
Figura 1-9: Doblador de voltaje. (a). Circuito. (b). Señal de entrada. (c). Señal de salida.



(a)

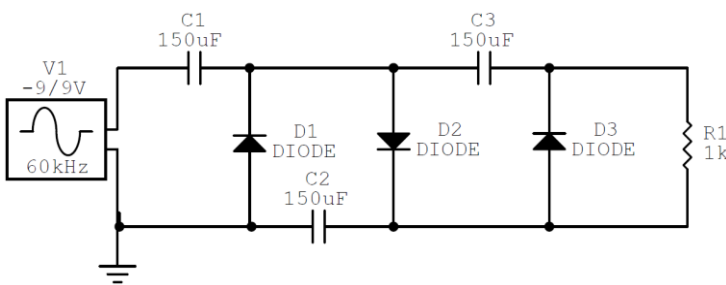


(b)

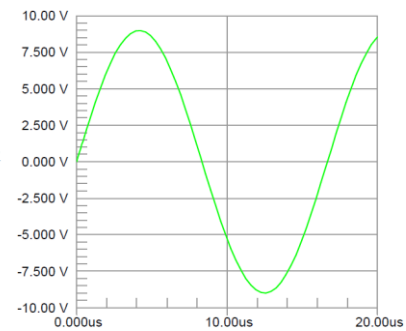


(c)

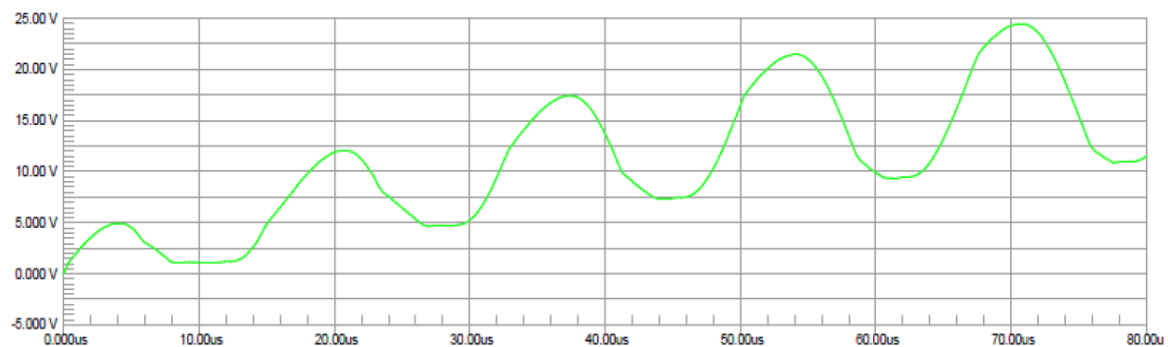
Figura 1-10: Triplicador de voltaje. (a) Circuito. (b). Señal de entrada. (c). Señal de salida.



(a)



(b)



(c)

En este proyecto se trabajará con un circuito rectificador doblador de voltaje para aprovechar la mayor cantidad de energía de la señal electromagnética recibida. Adicionalmente, se hará uso de capacitores que permiten evitar que la señal tenga caída de voltaje y se realizará un multiplicador de voltaje. No se utiliza un multiplicador de voltaje

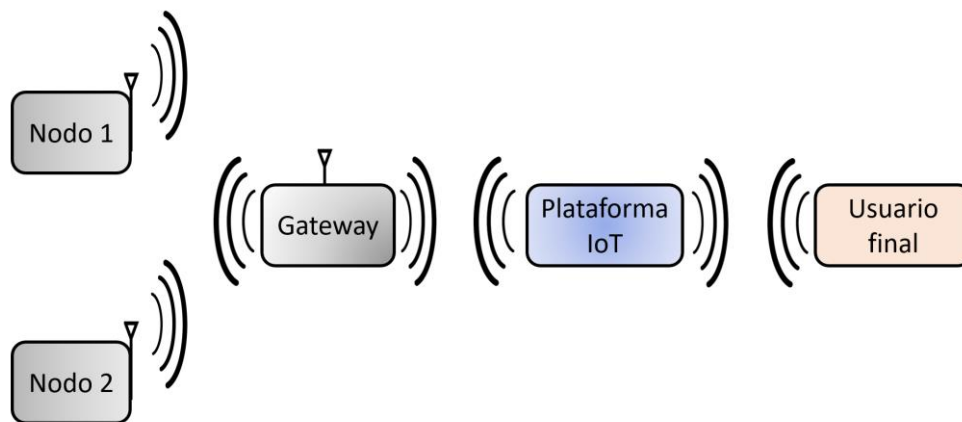
mayor debido a que al incrementar la cantidad de elementos el circuito tiende a consumir más energía y al recibir una baja señal EM allí se perdería energía [64].

2. Diseño y Validación WSN

2.1 Descripción general

El prototipo para la detección temprana de incendios forestales se realizó mediante una red inalámbrica de sensores compuesta por dos nodos. Para garantizar la operatividad de estos nodos, en esta etapa del proyecto se implementó una batería recargable de litio. La Figura 2-1 muestra el diagrama de bloques del proceso de comunicación entre los nodos y el usuario final. En el diagrama se aprecia que se utilizó una topología en estrella para la conexión de los nodos con el Gateway. El Gateway, a su vez, se conecta con la plataforma IoT, lo que permite al usuario final visualizar los datos recopilados de manera efectiva.

Figura 2-1: Diagrama de bloques comunicación WSN.

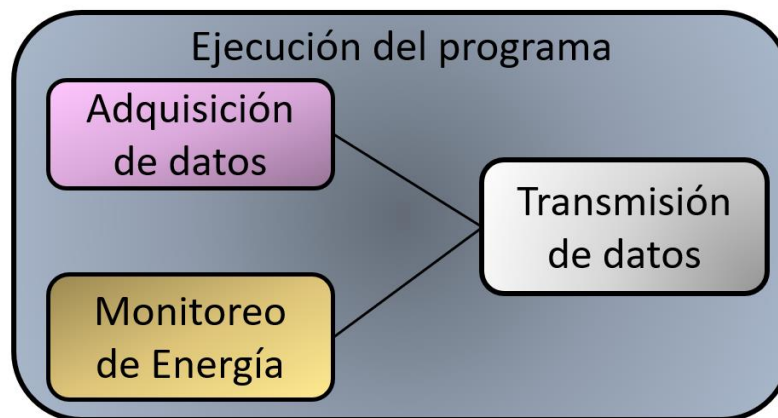


El desarrollo de la red inalámbrica de sensores se detalla en este capítulo. Inicialmente, se describen los nodos, el Gateway y la plataforma IoT. Después, se aborda el diseño del prototipo, seguido de la arquitectura de la red y de la parte experimental para validar el sistema y el diseño del prototipo para finalizar con las conclusiones.

2.2 Nodos

Los nodos utilizados en el proyecto están diseñados de manera uniforme, por lo que se describirá un solo nodo a modo de ejemplo. En la selección de los componentes del nodo, se priorizó que fueran de bajo consumo energético (menor a 120 mA [42, 65, 66]) y que fueran compatibles entre sí. Además, se buscó que el nodo pudiera recopilar información sobre las variables escogidas en este trabajo para detectar incendios forestales, ofrecer datos sobre el estado de la batería, procesar la información de manera eficiente y trabajar con el protocolo de comunicación LoRaWAN. En base a estas características, el nodo fue dividido y analizado en cuatro secciones para realizar su selección: adquisición de datos, monitoreo de energía, transmisión de datos y tiempo de ejecución del programa, como se muestra en la Figura 2-2.

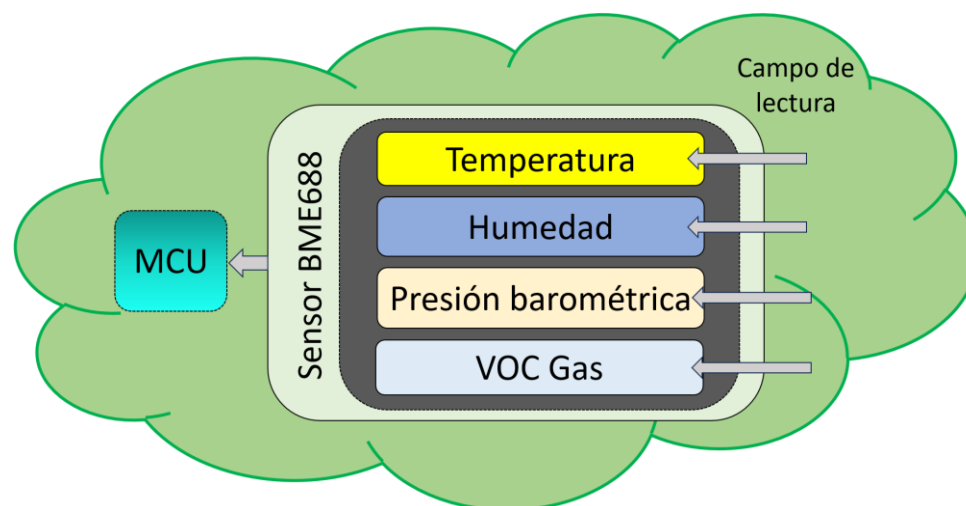
Figura 2-2: Esquema de funcionamiento del nodo.



Inicialmente, se determinaron las variables a medir en este proyecto: temperatura ambiente, humedad relativa y concentración de gases. Esta última es utilizada para detectar la presencia de humo. Las variables seleccionadas son las más significativas, como se indica en el capítulo 1 de este trabajo, y también las más comúnmente utilizadas en aplicaciones comerciales similares, según se observa en [67, 68, 69, 70]. Una vez definidas las variables a medir, se procedió a la búsqueda de sensores que pudieran satisfacer estos requisitos y ser implementados en los nodos del sistema.

El sensor BME688 integrado por Adafruit fue el seleccionado para el proceso de **adquisición de datos**, este dispositivo permite medir temperatura ambiente, humedad relativa, VOC Gas (VOC, por sus siglas en inglés de *Volatile Organic Compound*) y presión barométrica. Sin embargo, esta última no es tomada en cuenta para el desarrollo del proyecto ya que no es un parámetro esencial para la detección temprana de incendios forestales. En Figura 2-3 se logra observar gráficamente la función del sensor y las variables que puede medir.

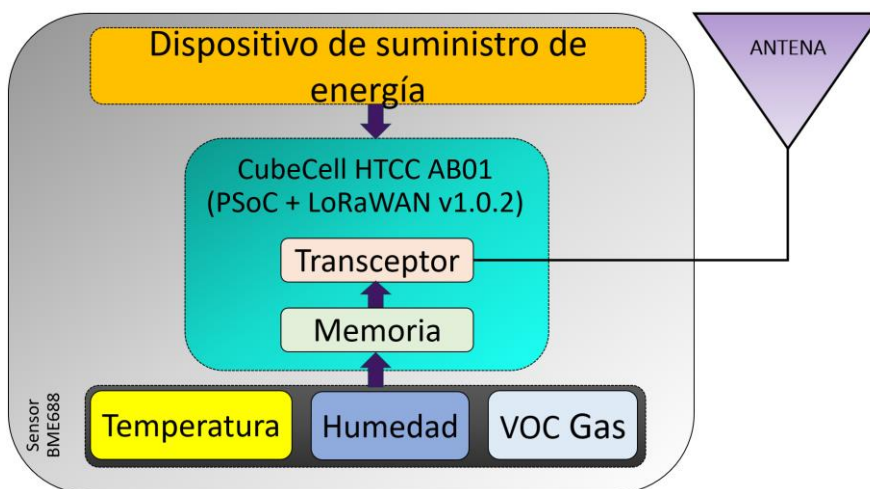
Figura 2-3: Diagrama de bloques sensor BME688



Como se observa en la imagen anterior, el sensor está conectado a un microcontrolador. Para este proyecto se utilizó el microcontrolador CubeCell HTCC AB01 de Heltec. Este microcontrolador, entre sus múltiples ventajas, permite leer el nivel de voltaje del dispositivo de almacenamiento de energía a través del pin ADC, lo que facilita el monitoreo continuo del suministro de energía necesario para el nodo. El **monitoreo de energía** se programó para que de forma periódica el usuario final pudiera visualizar el voltaje del dispositivo de almacenamiento de energía. Además, al ser un dispositivo PSoC (PSoC, por sus siglas en inglés de *Programmable System on Chip*), el CubeCell HTCC AB01 incluye un transceptor que permite **la transmisión de datos** mediante el protocolo de comunicación LoRaWAN 1.0.2, que fue el protocolo elegido para el proyecto. También permite controlar el **tiempo de ejecución del programa**, permitiendo la reducción del tiempo de operación del algoritmo y activando el modo de bajo consumo de energía cuando

no se ejecutan instrucciones. La Figura 2-4 muestra el diagrama de bloques de la arquitectura del nodo.

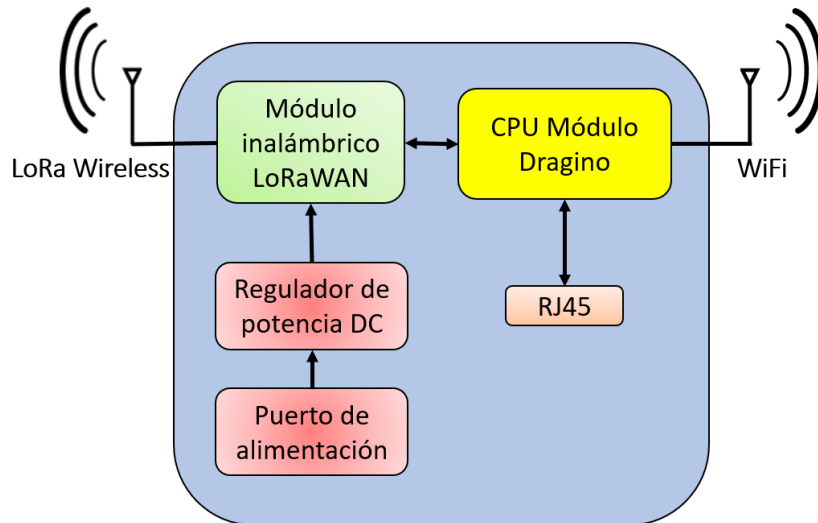
Figura 2-4: Arquitectura del nodo.



2.3 Gateway

El Gateway recibe las lecturas de los nodos y las transmite posteriormente a un servidor o, en este caso, a la plataforma IoT designada para que el usuario final pueda visualizar la información recopilada [41]. Inicialmente, se utilizó el dispositivo LPS8 de Dragino como Gateway debido a su capacidad para recibir y procesar información transmitida con el protocolo LoRaWAN, retransmitiéndola a través de conexiones WIFI o Ethernet [71]. Sin embargo, para ampliar el alcance de la WSN, se incorporaron dos Gateways adicionales: un segundo Gateway LPS8 y el dispositivo DLOS8N de Dragino. Este último, además de las características del LPS8, puede operar en exteriores, está equipado con GPS y soporta conexión Ethernet mediante el estándar 802.3af [72]. En la Figura 2-5, se puede observar la arquitectura básica de ambos tipos de Gateways mediante un diagrama de bloques. Aunque se encuentre dentro del estándar, una ventaja de la plataforma IoT TTN V3 (TTN, por sus siglas en inglés *The Things Network*) utilizada en este proyecto es que permite que los nodos se comuniquen en cualquier Gateway configurado en ella. Esto se debe a que es una red abierta y colaborativa que posibilita la interacción con otros Gateways pertenecientes a la misma [73].

Figura 2-5: Arquitectura de Gateways Dragino empleados en la WSN. Adaptada de [71, 72].

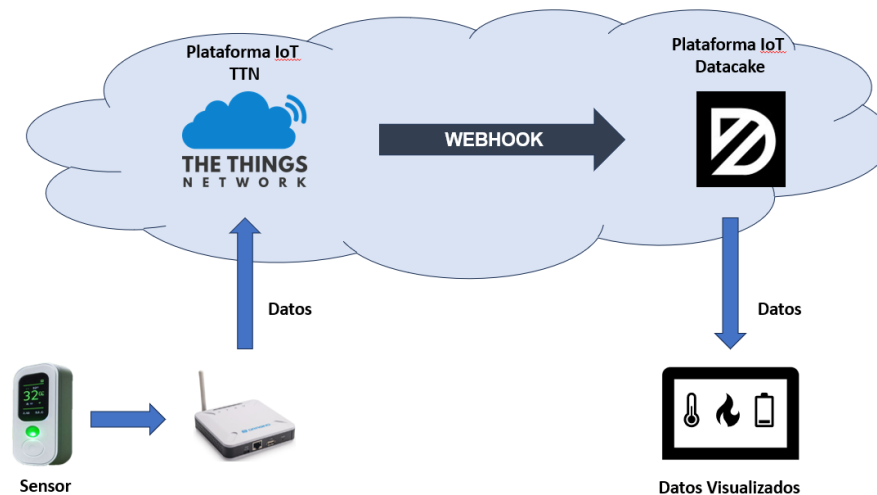


2.4 Plataforma IoT

La plataforma IoT tiene la responsabilidad de presentar al usuario final los datos obtenidos de la lectura del nodo. Como se mencionó anteriormente, en este proyecto, se ha empleado TTN en su tercera versión (V3) como la plataforma IoT principal, soportada por *The Things Stack*, un servidor LoRaWAN gratuito que facilita la recepción y la visualización de los datos transmitidos por el Gateway [74].

Es importante tener en cuenta que TTN ofrece un servicio de visualización de los datos más recientes, pero no almacena un histórico si la ventana del navegador se cierra. Para abordar esta dificultad, se establece una conexión con otra plataforma IoT llamada Datacake integrándolas a través de un Webhook. Esto se hizo ya que Datacake permite al usuario final acceder tanto a los datos recientes como al histórico, que abarca hasta los últimos 12 meses [75]. La integración de TTN y Datacake es esencial debido a que Datacake requiere estar enlazado a un servidor LoRaWAN, lo que hace que la comunicación directa entre el nodo y la plataforma no sea posible [76]. La Figura 2-6 muestra un esquema general de la arquitectura IoT implementada utilizando un webhook.

Figura 2-6: Arquitectura IoT implementada.



2.5 Diseño y fabricación del prototipo

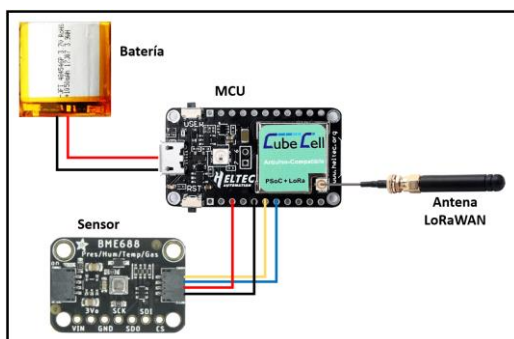
El prototipo del nodo para la detección temprana de incendios forestales fue diseñado utilizando el software Autodesk Inventor y fabricado con ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés de Polylactic Acid) mediante la impresora 3D Creality Ender 5 Pro. Este nodo se destaca por su reducido tamaño y diseño robusto: mide 56 mm de alto, 67 mm de ancho y 44 mm de profundidad, sin incluir la antena de 50 mm de longitud. El nodo está encapsulado en un estuche resistente a la intemperie, protegiendo los componentes internos de agua, polvo y otros elementos ambientales adversos, lo que garantiza su funcionamiento continuo y seguro durante largos periodos. Este diseño es poco invasivo siendo ideal para entornos exteriores y remotos, como los ecosistemas forestales.

La Figura 2-7 muestra el proceso de desarrollo del prototipo, donde (a) presenta los componentes del nodo conectados para un funcionamiento correcto, mientras que (b) ilustra el diseño del prototipo, destacando los elementos principales. Finalmente, (c) muestra el prototipo final con todos los componentes integrados y operando. A continuación, se explican los elementos indicados en la Figura 2-7 (b).

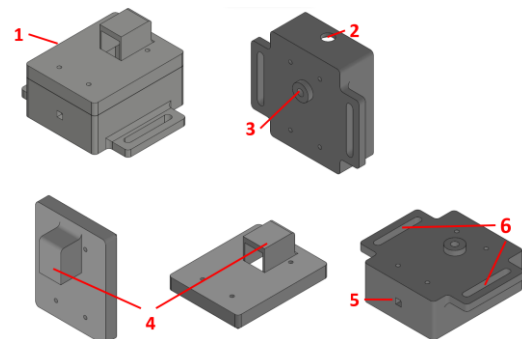
1. Prototipo completo, diseñado para alojar todos los componentes del nodo.
2. Orificio destinado a la conexión de la antena.

3. Tapa inferior con una abertura que permite verificar la iluminación de los leds del microcontrolador para comprobar su funcionamiento.
4. Tapa superior con una extensión y un orificio que permiten la circulación constante de aire, lo que facilita la detección de humo y cambios de la temperatura ambiente y la humedad relativa en caso de incendio.
5. Orificios laterales diseñados para sujetar el nodo a una superficie mediante una correa u otro medio de sujeción.
6. Espacio destinado para la conexión del dispositivo de almacenamiento de energía.

Figura 2-7: Diseño y fabricación del prototipo. (a). Componentes y conexiones del nodo. (b) Diseño en Inventor. (b). Prototipo físico.



(a)



(b)



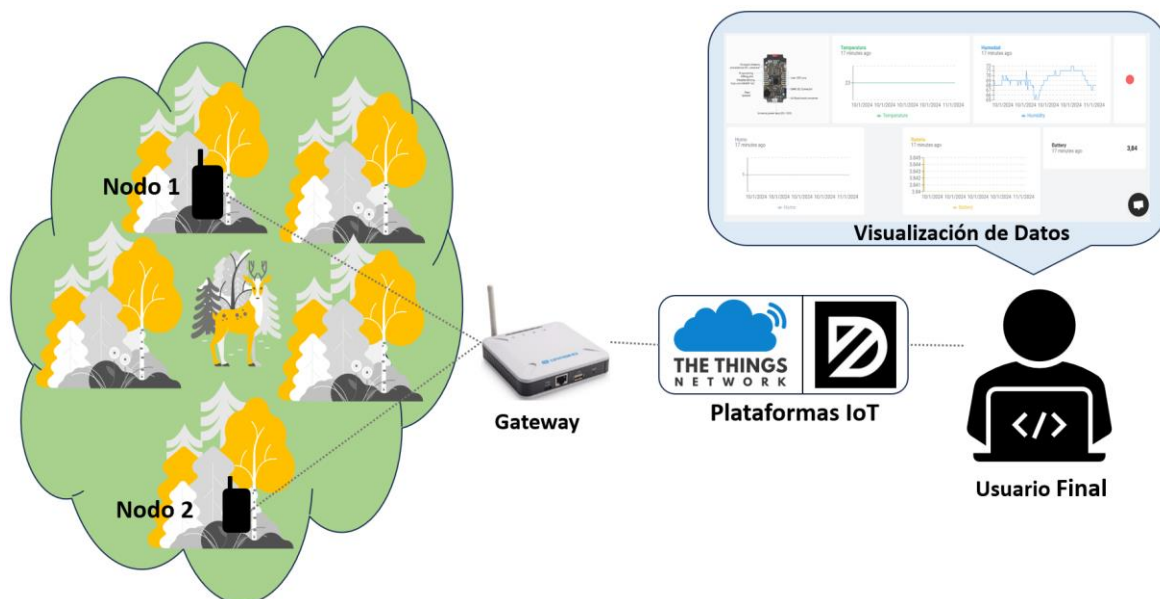
(c)

El prototipo desarrollado es compacto y resistente además garantiza una operación confiable y continua del nodo logrando cumplir con los requerimientos para monitoreo de las variables seleccionadas en entornos boscosos.

2.6 Arquitectura de la red

La arquitectura de la red implementada para el proyecto de detección temprana de incendios forestales se diseñó para asegurar la recolección, transmisión y supervisión confiable de los datos ambientales requeridos. Esta estructura se compone de dos nodos de sensores distribuidos en el área de interés, conectados a través de una red inalámbrica LoRaWAN al Gateway correspondiente. El Gateway actúa como punto de acceso central dentro de la red, recolectando los datos de los nodos y transmitiéndolos hacia la plataforma TTN, la cual está integrada con Datacake para centralizar y procesar los datos recibidos. Esta plataforma ofrece una interfaz amigable para que los usuarios finales visualicen y analicen los datos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas y una respuesta rápida ante condiciones ambientales anómalas, como la detección de un posible incendio forestal. La Figura 2-8 muestra la arquitectura de la red inalámbrica de sensores diseñada, la cual se basa en una topología estrella.

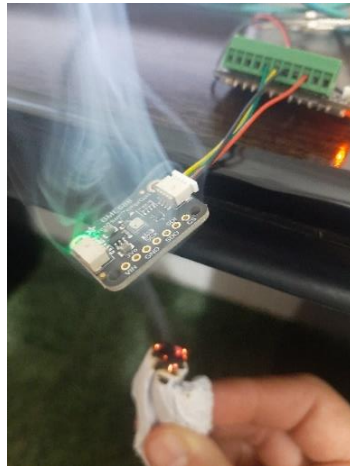
Figura 2-8: Arquitectura WSN desarrollada.



2.7 Validación de WSN

La verificación del funcionamiento completo del nodo se realizó en 2 etapas. La primera consistió realizar un experimento varias veces en un ambiente controlado para comprobar los cambios en las variables y la segunda en la verificación del alcance con el diseño mostrado en la Figura 2-7. Antes de continuar la explicación del experimento, es importante entender los datos que brinda el sensor. Las lecturas de temperatura y la humedad relativa que el sensor ofrece tienen una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ para la temperatura y $\pm 3\%$ para la humedad; por otro lado, la concentración de gases muestra una lectura de resistencia la cual ayuda a establecer si hay o no presencia de humo [77]. Para determinar si hay existencia de humo se realizaron diferentes ensayos que consistían en tomar la lectura del sensor en un ambiente sin humo y posteriormente se realizaba el proceso de combustión sobre un papel para generar el humo. Teniendo en cuenta cómo variaba la medida de la resistencia se identificó un límite para establecer la existencia de humo, siendo en este caso cuando se obtenga valores menores o iguales a 6 k Ω . La Figura 2-9 muestra imágenes del experimento.

Figura 2-9: Experimento detección de humo. (a). Experimento. (b). Datos ofrecidos por el monitor serial de Arduino.



(a)

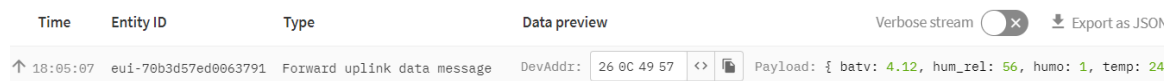
```
LoRaWAN US915 Class A start!
- Temperatura ambiente = 27.48 *C
- Humedad relativa = 61.02 %
Gas = 26.27 KOhms
No hay humo
- Estado de Batería = 4.10 V
1
unconfirmed uplink sending ...
- Temperatura ambiente = 39.56 *C
- Humedad relativa = 7.86 %
Gas = 5.68 KOhms
Hay humo
- Estado de Batería = 4.10 V
2
unconfirmed uplink sending ...
☒ Autoscroll ☐ Mostrar marca temporal
```

(b)

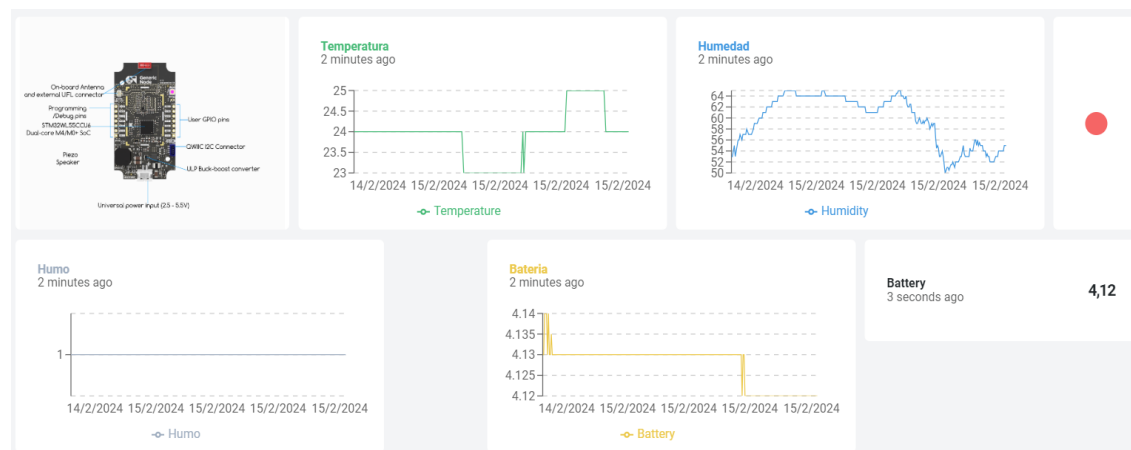
Posteriormente, se procedió a verificar la llegada de los datos a las plataformas TTN y Datacake. En la Figura 2-10 (a), se observa que los datos llegan correctamente a la

plataforma TTN con los siguientes parámetros: “batv” para el estado de la batería, “hum_rel” para la humedad relativa, “humo” como una bandera que indica la presencia de humo (1 para presencia de humo y 0 para ausencia), y “temp” para la temperatura ambiente. Por otro lado, la Figura 2-10 (b) muestra los mismos datos, pero presentados en la plataforma Datacake, tanto numéricamente como gráficamente: “Temperatura” para la temperatura ambiente, “Humedad” para la humedad relativa, “Humo” para indicar la presencia de humo (con 1 para presencia y 0 para ausencia), y “Batería” para indicar el estado de la batería.

Figura 2-10: Vista de datos en plataformas IoT. (a). TTN. (b). Datacake



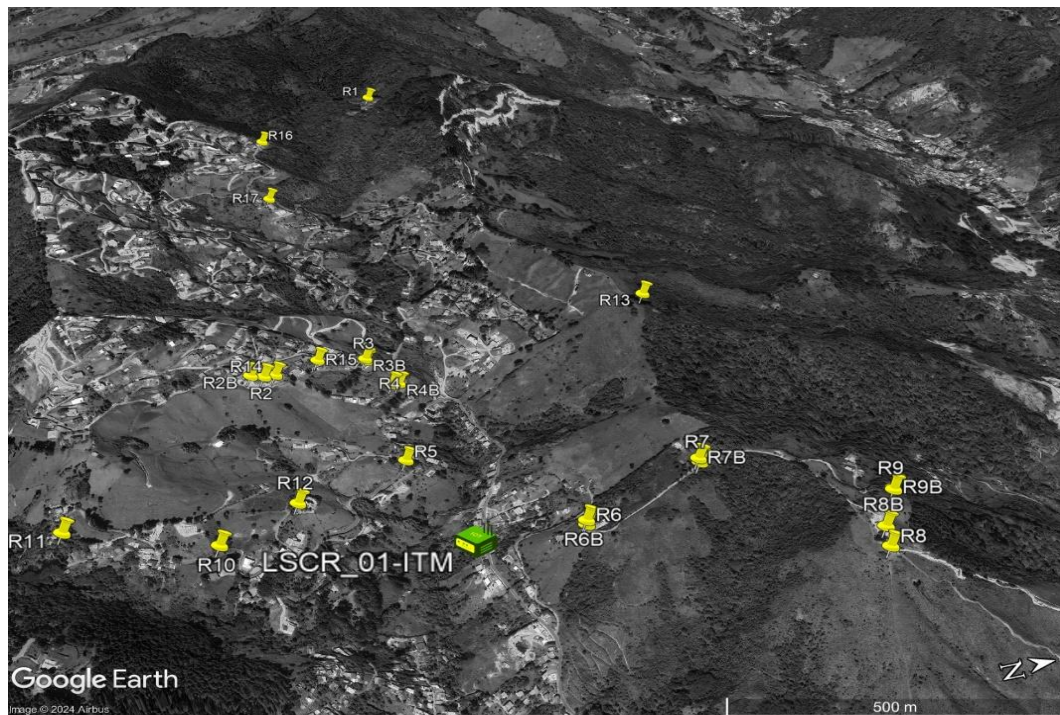
(a)



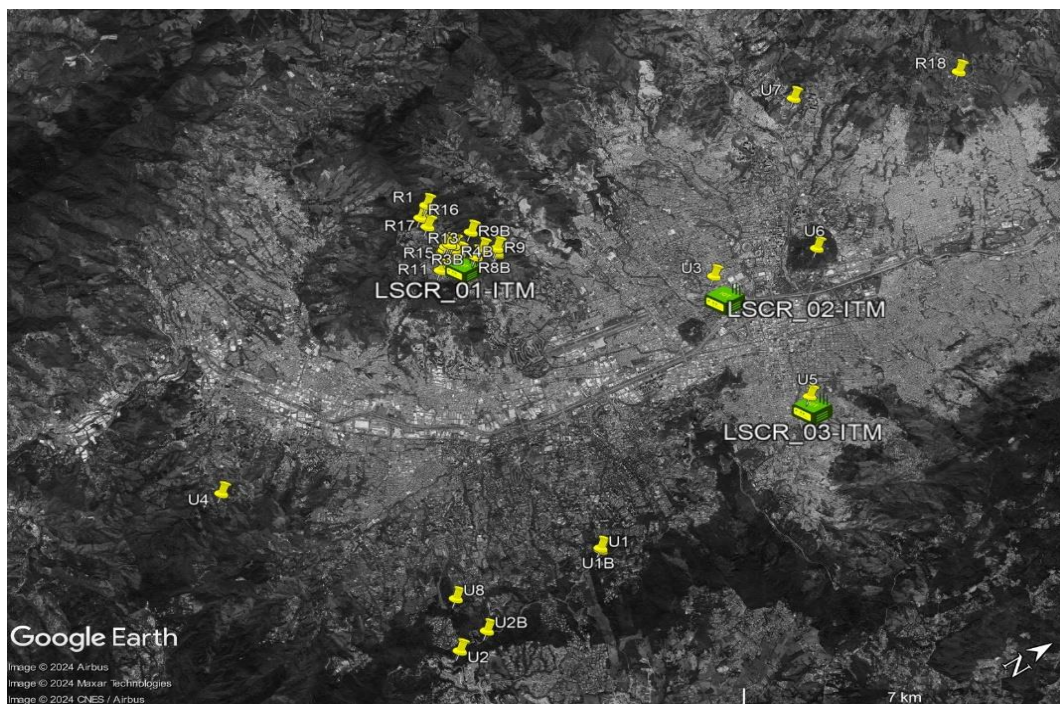
(b)

En la segunda etapa, se procedió a verificar las distancias entre las ubicaciones de los nodos y los Gateways, utilizando un total de 35 ubicaciones, como se muestra en la Figura 2-11. En estas pruebas, se incluyeron algunas ubicaciones con mediciones repetidas para evaluar el impacto de las condiciones climáticas en las lecturas. Las mediciones repetidas están identificadas con la letra "B" en la figura. Además, para identificar el tipo de zona donde se realizaron las mediciones, se utilizan las indicaciones R# para puntos en zonas rurales y U# para puntos en zonas urbanas.

Figura 2-11: Verificación distancias. (a) Ubicación en zona rural. (b) Ubicación en zona urbana.



(a)



(b)

Para las pruebas en zona rural, se priorizó el corregimiento de Altavista, específicamente la vereda El Jardín (Figura 2-11 (a)), como área principal de observación del nodo. Además, se realizaron pruebas en entornos boscosos como el cerro de las 3 Cruces, el cerro El Volador y áreas cercanas al municipio de San Félix. En la zona urbana, se seleccionaron la avenida Las Palmas y el barrio La Aurora como puntos principales de referencia (Figura 2-11 (b)).

Asimismo, la Tabla 2-1 presenta los resultados de las distancias entre el nodo y el Gateway, utilizando las ubicaciones de los puntos de lectura de las variables mediante Google Earth. Para evaluar la calidad de la señal, se registraron los parámetros de relación señal – ruido (SNR, por sus siglas en inglés) e indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés). Estos parámetros no solo ayudan a determinar la calidad de la señal, sino que también son fundamentales para definir el alcance efectivo de la red. Los valores de SNR y RSSI se ven influenciados por la distancia entre el nodo y el Gateway, por interferencias en la misma frecuencia y obstáculos como edificios, montañas, árboles, neblina, lluvia, alta humedad relativa y bruma, entre otros [44, 78].

Además, como se mencionó previamente, se midieron las condiciones climáticas de los diferentes días en que se realizaron las lecturas, utilizando datos de las estaciones cercanas a las ubicaciones proporcionados por el SIATA. Se encontró que, con mayor precipitación y humedad, las medidas de la calidad de la señal tienden a disminuir, dificultando la comunicación. Esto se puede observar en las comparaciones R2 - R2B, R3 - R3B, R4 - R4B, R6 - R6B, y R7 - R7B. En los casos de R8 y R8B, se evidencia que la precipitación influye más en el RSSI. En U1 y U1B, también se puede ver que la velocidad del viento afecta las variables de calidad de la señal. A pesar de que U1B presenta mejores condiciones de temperatura, humedad y precipitación, la diferencia notable en la velocidad del viento impacta negativamente en la calidad de la señal.

Por otro lado, en aquellas ubicaciones donde no se obtuvo información, se escribió "----" en sus casillas, indicando que no se logró comunicación con ningún Gateway de la red. Esto puede deberse a la distancia (como en U4) o a obstáculos en la línea de vista, como montañas (R9, R9B, U2 y U2B) o estructuras como edificios o casas (R15 y R17). Aunque haya una línea de vista compleja como en R1, R11, R14, U6 y U8, o nula como en R13,

R16, U3 y U5, si el nodo no está lejos del Gateway al que está conectado, esto no interrumpe la comunicación entre los dispositivos.

Además, en la ubicación R18 se obtiene el mejor resultado con 9,11 km respecto al Gateway LSCR_03-ITM (GW3) pese a su poca línea de vista debido a algunos árboles y condiciones climáticas. No obstante, cabe resaltar que las ubicaciones R5, R10, R12, U1, U1B y U7 obtienen mejores resultados en la calidad de la señal que el promedio, ya que la línea de vista está libre con su Gateway. Sin embargo, U7 posee unos parámetros de calidad menores a sus pares de línea de vista libre debido a la distancia y condiciones climáticas.

Tabla 2-1: Ubicación y calidad de la señal.

Nodo	Distancia (km - GW#)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	L. V.	T (°C)	H (%)	V (m/s)	P (mm)
R1	1,6 - GW1	-0,2	-98	Poca	27,2	57,31	0,87	16,6
R2	0,6 - GW1	0,8	-102	Poca	23,309	48,919	3,96	16,6
R2B	0,59 - GW1	-5,5	-104	Poca	22,25	75,5	2,81	17,5
R3	0,6 - GW1	8,5	-94	Poca	26,35	50,16	0,36	16,47
R3B	0,56 - GW1	5	-97	Poca	22,4	74,2	1,81	17,5
R4	0,5 - GW1	-8,8	-107	Poca	26,27	51	4,19	16,47
R4B	0,48 - GW1	-14,8	-120	Poca	22,5	73,87	1,94	17,5
R5	0,3 - GW1	1,2	-99	Libre	26,18	54,21	2,15	20,2
R6	0,2 - GW1	-0,2	-101	Poca	21,209	72,83	0,37	20,7
R6B	0,2 - GW1	-6,8	-108	Poca	19,5	74,04	0,57	26,6
R7	0,4 - GW1	-4,2	-103	No	21,61	71,17	0,64	20,7
R7B	0,4 - GW1	-11,8	-116	No	19,53	83	0,46	26,6
R8	0,67 - GW1	-2,8	-103	No	22,18	69	1,66	20,7
R8B	0,7 - GW1	-2	-113	No	20,13	67,62	1,24	26,6
R9	----	----	----	No	----	----	----	----
R9B	----	----	----	No	----	----	----	----

Tabla 2-1: (Continuación)

Nodo	Distancia (km - GW#)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	L. V.	T (°C)	H (%)	V (m/s)	P (mm)
R10	0,44 - GW1	6,2	-96	Libre	21,17	72	0,3	22,6
R11	0,7 - GW1	-2,2	-115	Poca	22,1	69,93	0,44	22,6
R12	0,35 - GW1	0,5	-101	Libre	22,54	69	0,71	22,6
R13	0,71 - GW1	-0,5	-113	No	21,25	76,94	0,65	26,6
R14	0,57 - GW1	-7	-103	Poca	22,34	74,91	2,97	17,5
R15	----	----	----	No	----	----	----	----
R16	1,48 - GW1	4	-111	No	25,3	61,35	1,33	17,5
R17	----	----	----	No	----	----	----	----
R18	9,11 - GW3	-6,8	-128	Poca	21,8	79,8	4	26,6
U1	8,1 - GW1	6	-105	Libre	22,3	65	0,99	15,2
U1B	8,1 - GW1	3,2	-109	Libre	27,21	54,46	3,75	10,2
U2	----	----	----	No	----	----	----	----
U2B	----	----	----	No	----	----	----	----
U3	0,5 - GW2	2,2	-111	No	24,82	63,27	0,34	16,7
U4	----	----	----	No	----	----	----	----
U5	0,2 - GW3	1,2	-112	No	22,4	62,8	0,26	22,6
U6	3,99 - GW3	-4,2	-119	Poca	22,3	71	4,5	20,9
U7	7,88 - GW3	-4	-120	Libre	22,5	70,5	4,8	18,4
U8	9,41 - GW3	-6,5	-120	Poca	22,3	71	4,5	20,9

Una medida negativa del parámetro SNR indica que la potencia de la señal es menor que la potencia del ruido por lo que no se garantiza que la señal siempre sea recibida. El límite inferior SNR hasta que la comunicación puede ser exitosa es de -20 dB. Por otro lado, una medida RSSI cercana a cero indica que la señal llega con buena potencia [78]. De este modo, en la Tabla 2-1 se puede ver que al existir línea de vista entre los nodos y el Gateway se puede obtener mayor distancia en la comunicación y asimismo se asegura la comunicación entre los dispositivos. Sin embargo, en distancias cortas, no es necesario un campo despejado completamente siempre y cuando no exista obstáculos de gran tamaño la comunicación es posible.

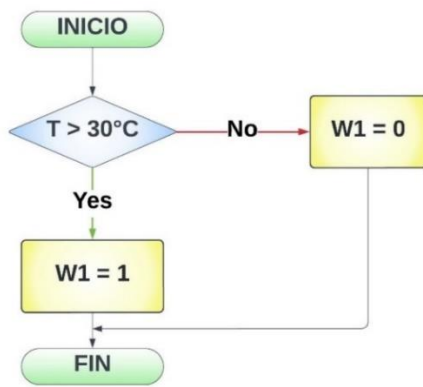
Finalmente, después de verificar el funcionamiento de los nodos, se procedió a la creación de alarmas.

2.8 Alarmas

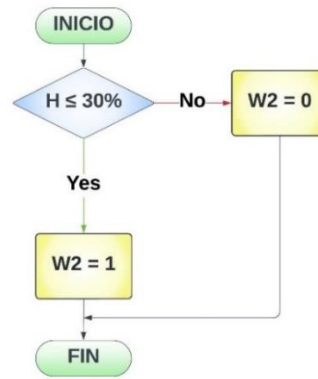
Después de confirmar el funcionamiento continuo y estable de los nodos, se exploró la posibilidad de alertar al usuario final sobre posibles anomalías en el sistema. Para ello, se adoptó la teoría de la regla del 30, mencionada en la introducción, adaptándola al contexto de este trabajo. En lugar de la velocidad del viento, se consideró la presencia o ausencia de humo como un elemento fundamental. Según esta regla modificada, si la temperatura supera los 30°C, la humedad desciende por debajo del 30%, y se detecta humo, se activa la alerta de incendio.

Además, el sistema está diseñado para notificar al usuario final el estado de carga del dispositivo de almacenamiento de energía cuando su nivel de energía está disminuyendo a niveles de baja potencia. Los diagramas de flujo presentados en la Figura 2-12 detallan la programación de estas alertas. Estas notificaciones se realizan en la plataforma Datacake, la cual ofrece este servicio, y donde se ha configurado el sistema para enviar una notificación de alerta por correo electrónico cada vez que se cumple de forma independiente alguna de las condiciones mencionadas anteriormente. Cuando se cumplen las tres condiciones de la regla del 30, se activa una alarma más urgente. Para esta última, la configuración incluye el envío de un correo electrónico cada minuto, así como el envío de mensajes de texto. Esto facilita una respuesta más rápida y efectiva ante situaciones críticas, permitiendo una mejor gestión ante eventos relacionados con la seguridad del entorno forestal.

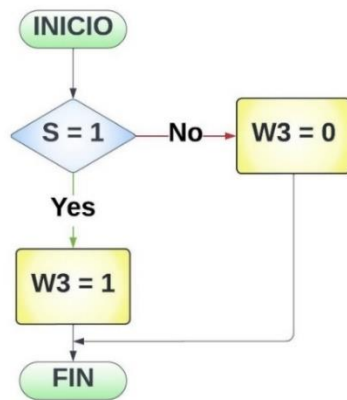
Figura 2-12: Alarmas. (a). Temperatura alta. (b). Humedad relativa baja. (c). Presencia de humo. (d). Batería baja. (e). Posible incendio.



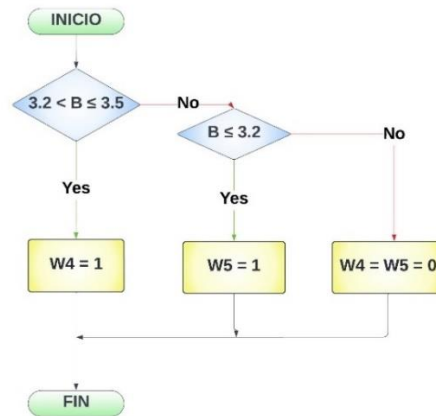
(a)



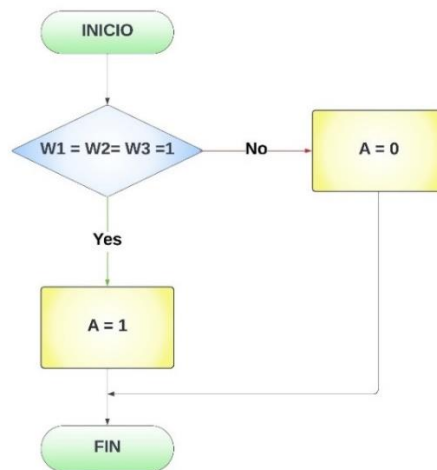
(b)



(c)



(d)



(e)

3. Diseño y Validación WPT

3.1 Preámbulo

En el capítulo previo, se implementó una red inalámbrica de sensores diseñada para monitorear cambios significativos en la temperatura del ambiente, la humedad relativa, y la presencia de humo de forma simultánea. Para asegurar su funcionamiento continuo y la ejecución de pruebas de campo, se incorporaron baterías como dispositivos de almacenamiento de energía en los nodos. Sin embargo, es importante destacar que en este proyecto se desarrolló otra forma alternativa de energizar los nodos, la cual consiste en la implementación de tecnología de transferencia inalámbrica de energía a través de antenas y así reforzar su autonomía energética.

El desarrollo e implementación del sistema de transferencia de energía inalámbrica se llevó a cabo en el laboratorio de conmutación y en el laboratorio de óptica, fotónica y visión artificial, ambos ubicados en el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) debido a que estos contaban con las adecuaciones físicas y presentan menos contaminación de señales de dispositivos, lo cual facilitó la línea de vista y minimizó las interferencias entre el sistema transmisor y el sistema receptor. Para el sistema de transmisión se empleó un generador de señales de radiofrecuencia (SMBV100A, *Rhode & Schwartz*), el cual es conectado a una antena directiva con el fin de controlar la frecuencia y potencia de entrada del sistema de transmisión. Para la recepción como se mostrará más adelante en este capítulo se empleó una rectena (rectificador + antena) la cual se encarga de captar la energía transmitida y posteriormente convertirla en un voltaje DC que puede ser empleado en la alimentación de los nodos.

La recolección de energía se realiza en la banda de 2,4 GHz la cual está comprendida entre 2,3 GHz y 2,45 GHz, esto debido a que a esta frecuencia trabajan muchos

dispositivos móviles, lo cual puede contribuir a que haya una mayor captación de energía de diferentes fuentes empleando el sistema de recolección de energía basado en la rectena propuesto. Según el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF), se puede observar que en la banda a la que pertenece la frecuencia de 2,4 GHz es una banda que se puede utilizar libremente para estudios ya que también pertenece a las bandas de radio ISM. Entre los servicios que operan en esta banda se encuentran la radiocomunicación entre estaciones fijas o móviles, la radiolocalización y las comunicaciones de aficionados, este último enfocado en el aprendizaje individual y estudios técnicos [39].

El capítulo explica los principales recursos utilizados para las pruebas en laboratorio, el proceso de diseño e implementación de la rectena, iniciando con el análisis del comportamiento del rectificador y continuando con la selección y caracterización de las antenas. Adicionalmente, se describen los experimentos realizados para analizar la operatividad de la rectena y su factibilidad para integrarse a un sistema de transferencia inalámbrica de energía. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados.

3.2 Descripción de equipos

En esta sección, proporcionamos una descripción general de los equipos utilizados en esta fase del proyecto. Cada uno desempeña un papel fundamental en la recopilación y análisis de datos, así como en la ejecución de experimentos. Además, detallamos cómo estos equipos se integran para facilitar el flujo de trabajo y garantizar la precisión de los resultados obtenidos.

3.2.1 Máquina CNC (LPKF ProtoMat D104, LPKF Laser & Electronics AG, Hannover, Alemania)

Es una máquina que combina fresado de alta precisión con una herramienta láser para fabricar circuitos impresos y otros componentes electrónicos. Destaca por su capacidad para lograr detalles finos en materiales como FR4 y cerámica, su alta velocidad de husillo, su precisión en los movimientos y características avanzadas como el cambio automático de herramientas y el ajuste automático de la profundidad. Su software y sistema de visión

lo hacen versátil para tareas complejas de fabricación electrónica [79]. En este caso fue empleada para la fabricación de antenas microcinta y circuitos impresos.

3.2.2 Analizador de espectros vectorial (FSH4, Rohde & Schwarz)

Este equipo se utiliza en el análisis de radiofrecuencia (RF), destacándose por su aplicabilidad en tareas comunes como el mantenimiento e instalación de sistemas de transmisión, verificación de cables y antenas, así como la evaluación de la calidad de la señal en distintos contextos de comunicación [80]. Dada su amplia gama de aplicaciones, en este proyecto se utilizó para el análisis y caracterización de antenas, así como para verificar la potencia recibida por la rectena. Este equipo permite hacer la caracterización de componentes RF en el rango 100 kHz hasta 8 GHz. Así mismo, permite caracterizar parámetros tales como parámetros S, carta de Smith, VSWR, longitud eléctrica, entre otros.

3.2.3 Generador de radiofrecuencia (SMBV100A, Rhode & Schwartz)

Equipo utilizado para la generación y análisis de señales de microondas destacado por su alto rendimiento, convirtiéndose en una opción valiosa para una amplia variedad de aplicaciones. Este instrumento es idóneo para su implementación en actividades de desarrollo, producción y servicio, especialmente cuando se necesita una señal de microondas analógica, razón por la cual fue empleado en el proyecto. Además, posee un amplio rango de frecuencias, que va desde los 9 kHz hasta los 3,2 GHz, incluyendo algunas de las bandas ISM [81].

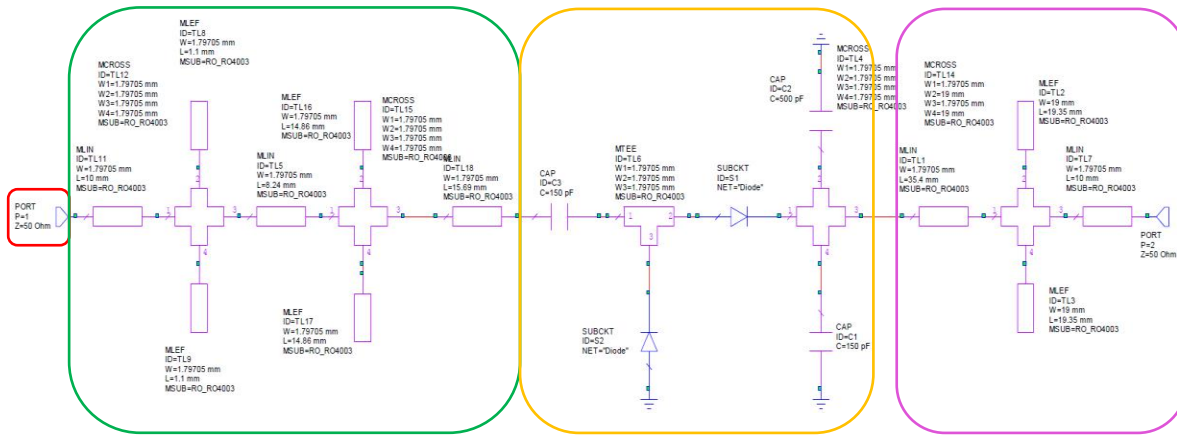
3.2.4 Multímetro Test Bench 390A (BK Precision)

El multímetro modelo 390A no se limita a medir solo voltaje y corriente; también tiene la capacidad de medir capacitancia, frecuencia y temperatura, y ofrece funciones de prueba de componentes, diodos e indicador lógico. Garantizando una precisión básica del 0,1%. Además, cuenta con selección de rango automático/manual, apagado automático y protección de fusibles en todos los rangos de corriente. Este multímetro ha sido evaluado y certificado para cumplir con los estándares de seguridad establecidos por *Underwriters Laboratories* [82]

3.3 Diseño de la rectena

Inicialmente se diseñó un circuito de rectificación de radiofrecuencia empleando el software AWR Design Environment. Este permitió realizar las simulaciones de la rectena y de esta manera predecir el posible comportamiento de esta cuando es usada para al captar ondas electromagnéticas a una frecuencia central de 2,45 GHz. El esquema básico de la rectena se ilustra en la Figura 3-1. Para el diseño se seleccionó el sustrato dieléctrico comercial RO4003C de la marca Roger Corporation [83], el cual posee una permitividad dieléctrica (ϵ_r) igual a 3,38, unas pérdidas tangenciales ($\tan \delta$) de 0,0021, y un espesor de 0,81 mm. Estas características son fundamentales en aplicaciones de alta frecuencia, como en circuitos de microondas y radiofrecuencia, donde se requiere una alta estabilidad de señal y una baja atenuación.

Figura 3-1: Esquema del circuito rectificador modelado empleando AWR.

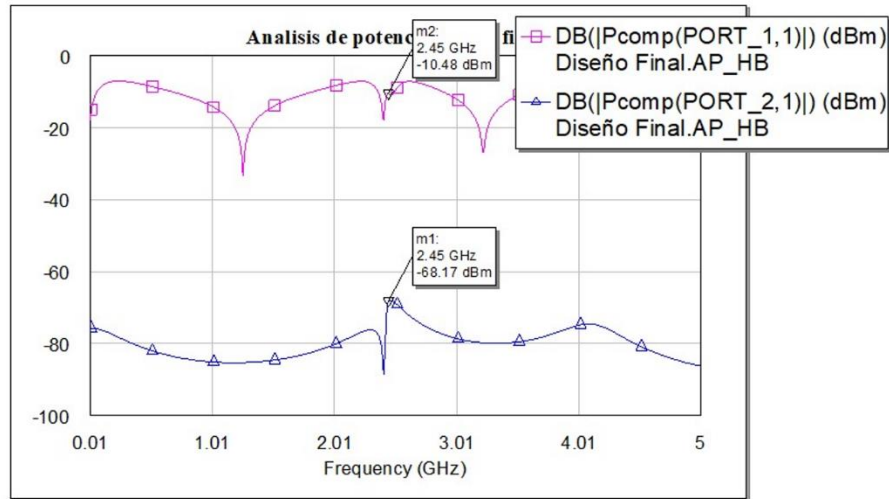


El diseño del circuito propuesto (ver Figura 3-1) consta de 4 partes fundamentales: recepción de la energía EM (recuadro rojo), acople de impedancia (recuadro verde), la rectificación de la señal (recuadro amarillo) y carga empleada (recuadro fucsia). La recepción de la señal está compuesta por un generador de señales (*PORT P=1* en Figura 3-1) que simula la antena receptora con una impedancia de 50 Ω conectado al acople de impedancia representado por los bloques *MLIN* y *MLEF*. El circuito rectificador es un circuito doblador de voltaje de media onda Cockcroft-Walton compuesto por 2 capacitores de 150 pF y diodos Schottky MA4E2200A1-1141T, los cuales están conectados al acople. La elección de los diodos Schottky se debe a su alta velocidad de conmutación y su

capacidad para operar a un voltaje más bajo que los diodos convencionales, lo que los hace ideales para aplicaciones de bajo consumo y alta frecuencia [84, 85, 86]. Para la carga, se ha añadido un capacitor de 500 pF conectado en paralelo a la carga, esto con el fin de implementar un filtro pasa bajo que ayude a reducir las no-linealidades de los diodos. Sin embargo, se agregó un acople de impedancia de 50 Ω entre la carga, representada en la Figura 3-1 como Port 2, y el capacitor de 500 pF para asegurar que las pérdidas sean mínimas al conectar la carga. Esto último es de vital importancia, ya que como se mencionó en el capítulo 1 para garantizar una máxima transferencia de energía es necesario que la impedancia de cada componente sea la misma o tener acoples que ayuden a minimizar las pérdidas.

Para evaluar la capacidad del circuito propuesto se evaluó la respuesta de los parámetros S desde 0.01 hasta 5 GHz empleando el software AWR. Los resultados obtenidos son ilustrados en la Figura 3-2. Allí, se analizaron los parámetros S_{11} y S_{21} , conocidos como los coeficientes de reflexión y transmisión, respectivamente. De los resultados mostrados en la Figura 3-2 se puede observar que la magnitud del parámetro S_{11} es de -10,48 dBm lo que indica que el rectificador resuena correctamente a la frecuencia de 2,45 GHz. Adicionalmente, se puede observar a través del coeficiente de transmisión (línea azul) que a 2,45 GHz es donde menos pérdida de transmisión existe para este diseño, obteniendo una amplitud para el parámetro S_{21} igual a -68,17 dBm a 2,45 GHz. Como se puede observar el dispositivo propuesto presenta un funcionamiento acorde a la necesidad. Por ello, se procede con el proceso de fabricación y pruebas de validación.

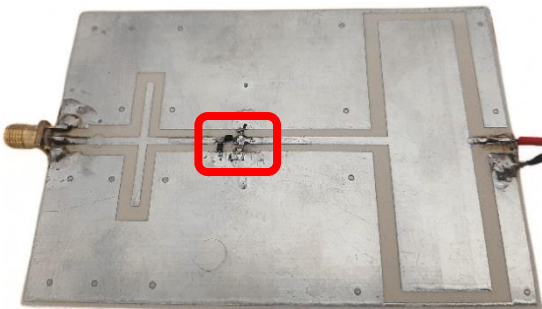
Figura 3-2: Valores de parámetros S_{11} y S_{21} del rectificador propuesto modelado usando la herramienta AWR.



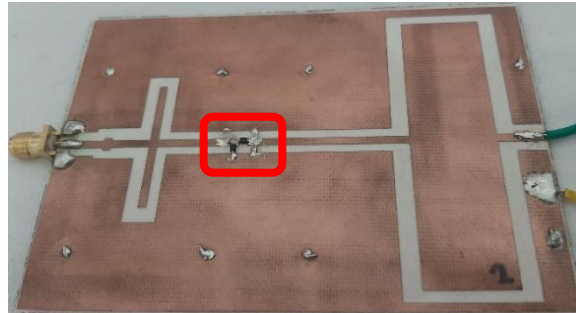
3.4 Fabricación del rectificador propuesto

La fabricación del rectificador se llevó a cabo en dos lugares distintos: la empresa Microcircuitos SAS, especializada en la producción de PCB y la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta, Colombia). Ambas entidades emplearon una máquina CNC de perforación, corte y enrutado de PCB de alta precisión para fabricar el dispositivo. Sin embargo, existe una diferencia en el proceso: Microcircuitos aplica una fina capa de estaño sobre el cobre del material RO4003C, mientras que la universidad opta por mantener un estilo convencional, es decir, solo cobre. La Figura 3-3 muestra una comparación entre los dos rectificadores fabricados en ambos lugares.

Figura 3-3: Rectificadores fabricados. (a). Rectificador estañado. (b) Rectificador sin estañar.



(a)



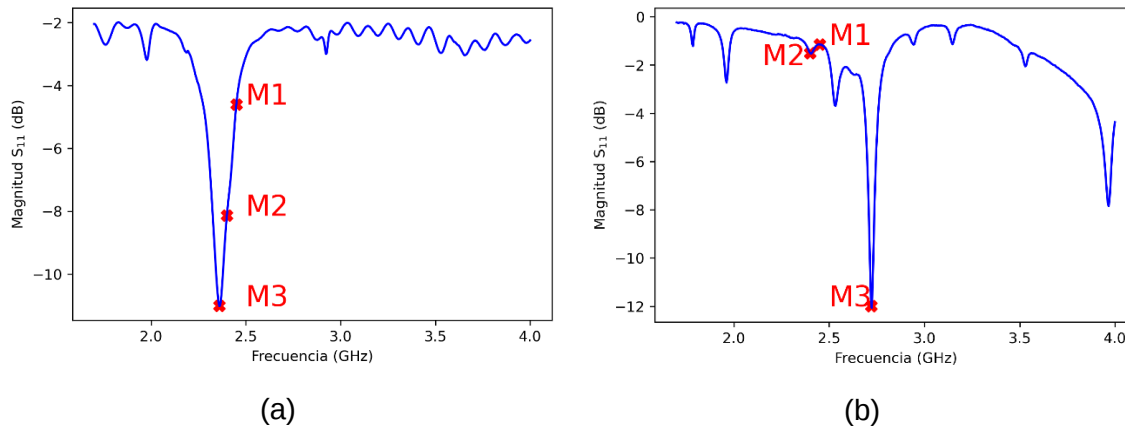
(b)

Adicionalmente, en la imagen anterior se puede observar los elementos que componen este diseño. Señalado en rojo está zona de rectificación y duplicador de voltaje: diodos schottky MA4E2200A1-1141T, capacitores TaiyoYuden MAASE063SB7151KFCA01 de 500 pF y el capacitor Kyocera AVX C0GNP0 de 150 pF. Los elementos que lo componen son de montaje superficial y fueron seleccionados por la capacidad de operación en alta frecuencia [87, 88, 89], mientras que sus equivalentes genéricos solamente registran que operan de manera correcta hasta 1 GHz [89]. Por otro lado, la parte que no está señalada hace referencia a los acoples de impedancia. En ambas imágenes al lado izquierdo se puede observar un conector SMA de 50 Ω en donde se conecta la antena receptora y en el extremo derecho los cables que conectan la carga.

3.5 Validación experimental del rectificador

Para verificar la respuesta de la rectena fabricada, se empleó el analizador de espectros vectorial (FSH4, *Rohde & Schwarz*). Este equipo fue empleado para realizar la caracterización del parámetro S_{11} y la carta de Smith entre 1,7 y 4 GHz de ambos rectificadores ilustrados en la Figura 3-3. Los resultados presentados en la Figura 3-4 (a) demuestran que el rectificador estañado a una frecuencia de 2,45 GHz (M1), obtuvo una magnitud del S_{11} de -4,6 dB, mientras que para 2,4 GHz (M2) la magnitud de este mismo parámetro fue de -8,14 dB, mostrando que existe un mejor comportamiento del dispositivo a 2.4 GHz. Sin embargo, a 2,36 GHz (M3) se consiguió un mejor registro de la magnitud del S_{11} con -11,01 dB. La Figura 3-4 (b) ilustra los resultados del rectificador sin estañar, indicando que para la frecuencia de 2,45 GHz (M1), el parámetro S_{11} alcanzó una magnitud de -1,15 dB, mientras que en la frecuencia de 2,4 GHz (M2) obtuvo una magnitud -1,51 dB de este mismo parámetro. La mayor magnitud del parámetro S_{11} fue medida en a 2,72 GHz (M3), alcanzando un valor de -11,99 dB indicando que este rectificador opera mejor a esta frecuencia.

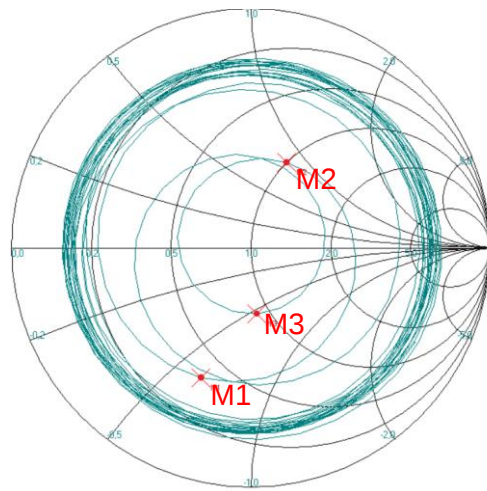
Figura 3-4: Parámetro S_{11} de la rectena obtenida de forma experimental con el analizador de redes vectorial. (a) Parámetro S_{11} del rectificador estañado. (b) Parámetro S_{11} del rectificador sin estañar.



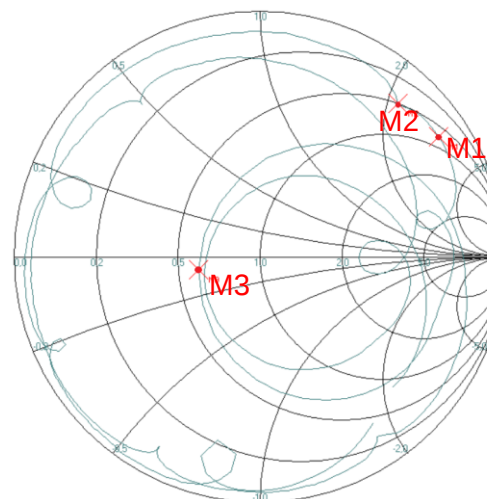
Posteriormente, se midieron las cartas de Smith para evaluar la impedancia de los rectificadores como se muestra en la Figura 3-5. En la Figura 3-5 (a) se pueden identificar tres marcadores, correspondientes a las siguientes frecuencias: 2,45 GHz (M1), 2,4 GHz (M2) y 2,36 GHz (M3). A 2,45 GHz se tiene un valor de impedancia igual a $17,3 \Omega - j27,8 \Omega$, mientras que a 2,4 GHz se registró una impedancia de $47,2 \Omega + j40,3 \Omega$. Sin embargo, 2,36 GHz que fue la frecuencia que poseía un mejor coeficiente de reflexión, alcanzó una impedancia $46,7 \Omega - j27,8 \Omega$. De igual manera, la Figura 3-5 (b) presenta el marcador M1 para la frecuencia de 2,45 GHz, M2 para 2,4 GHz y M3 para 2,72 GHz. En la frecuencia de 2,45 GHz se presenta una impedancia de $32,2 \Omega + j152 \Omega$, para 2,4 GHz se tiene una impedancia de $25,2 \Omega + j107 \Omega$ y para 2,72 GHz la impedancia leída fue de $29,5 \Omega - j1,46 \Omega$.

Es importante destacar que la frecuencia de 2,4 GHz presenta una impedancia más cercana al valor teórico esperado de 50Ω en el rectificador estañado, lo cual indica una buena adaptación con antenas que tengan la misma impedancia y operen en la misma frecuencia. Esto sugiere que esta frecuencia es la más adecuada para el acoplamiento óptimo entre la antena receptora y el rectificador, lo que maximizará la transferencia de energía electromagnética al circuito rectificador. Por otro lado, el rectificador sin estañar no presenta impedancias cercanas a los 50Ω , lo que implica mayor pérdida al momento de recibir la energía EM. Sin embargo, M3 se acerca al eje horizontal implicando mayor adaptabilidad de impedancia que los demás marcadores y una mayor transferencia de energía en la frecuencia de 2,72 GHz.

Figura 3-5: Carta de Smith de la rectena obtenida de forma experimental con el analizador de redes vectorial. (a) Carta de Smith del rectificador estañado. (b) Carta de Smith del rectificador sin estañar.



(a)



(b)

A partir de lo mencionado anteriormente, se confirma que el rectificador con estaño opera dentro de la banda de frecuencia de 2,4 GHz, mientras que el rectificador sin estaño funciona mejor a 2,72 GHz. Con esta información establecida, se procedió a verificar operativamente la frecuencia en la que los rectificadores alcanzan su mejor funcionamiento.

3.5.1 Verificación de la frecuencia de resonancia

El siguiente paso consistió en montar un experimento que permitiera verificar el rendimiento de la rectena a diferentes frecuencias comprendidas en el rango de 1,65 GHz y 3,2 GHz obteniendo 21 datos. Para ello, los rectificadores fueron conectados directamente al generador de radiofrecuencia (SMBV100A, Rhode & Schwartz) y se midió el voltaje DC de la salida de cada rectificador empleando un multímetro (Test Bench 390A, BK Precision) perteneciente al laboratorio de óptica, fotónica y visión artificial como se observa en la Figura 3-6. El generador se programó para que suministrara una señal RF con la máxima potencia que puede transmitir, es decir +30dBm.

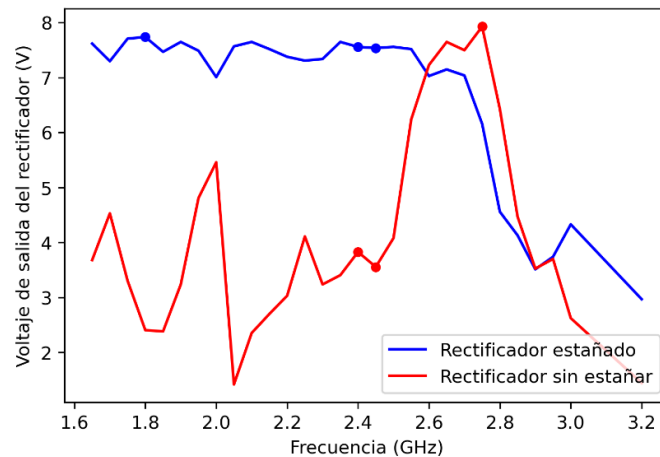
Figura 3-6: Montaje de verificación de la frecuencia de resonancia.



El voltaje de la salida de cada rectificador es ilustrado en la Figura 3-7, comprobando lo expuesto previamente donde el rectificador estañado presenta mejor resultado en la frecuencia de 2,4 GHz que el no estañado, razón por la que se decide continuar las siguientes pruebas utilizando solamente el rectificador estañado. El rectificador sin estañar ofrece un voltaje de salida máximo de 7,93 V en la frecuencia de 2,75 GHz y registra 3,828 V a 2.4 GHZ, mientras que el rectificador estañado muestra un mejor comportamiento en la frecuencia de 2,4 GHz ofreciendo un voltaje de salida de 7,56 V. Sin embargo, su voltaje de salida es de 7,74 V en la frecuencia de 1,8 GHz. Aunque el mayor voltaje se obtiene a 1,8 GHz, se continuó trabajando a 2,4 GHz porque la diferencia entre ambos voltajes no es relevante. Además, en la cotidianidad se encuentran más dispositivos que operan a esta banda, lo cual beneficiaría en aplicaciones reales, ya que tendrían más fuentes de energía. La variación de las medidas entre ambos rectificadores se pudo presentar debido

a factores ambientales, manipulación del producto y/o proceso de producción que tuvo cada uno porque no se fabricaron en el mismo lugar. Adicionalmente, como lo indican en [90, 91] en su investigación, la aleación entre cobre y estaño proporciona características que hace de un PCB más resistente a la oxidación y mejora la calidad de la señal al ofrecer menores pérdidas.

Figura 3-7: Gráfica del voltaje de salida del rectificador respecto a la frecuencia.



Tras haber definido el rectificador a emplear se continuaron los experimentos. Se realiza el montaje físico mostrado en la Figura 3-8 midiendo de nuevo el voltaje DC existente a la salida del rectificador con el fin de evaluar el comportamiento cuando se añade una carga. Después de pasar por el rectificador, la señal pasa a través de una resistencia de carga en donde se realiza la medición del voltaje DC con diferentes condiciones de carga.

Figura 3-8: Montaje de verificación del funcionamiento del rectificador con conexión directa.



El experimento previo permitió verificar y definir la frecuencia de operación del rectificador propuesto. Para este segundo experimento, nuevamente la frecuencia del generador RF fue variada desde 1,65 GHz hasta 3,2 GHz tomando muestras a 21 frecuencias diferentes y así evaluar la importancia de la resistencia de carga. Esta prueba fue realizada en cuatro escenarios diferentes con resistencias de carga de 220 Ω , 5,1 k Ω , 22 k Ω y sin resistencia de carga. Para llevar a cabo la medición del voltaje DC generado a la salida del rectificador se empleó el multímetro Test Bench 390A.

La Figura 3-9 muestra los resultados obtenidos con este experimento. En primer lugar, se llevaron a cabo las mediciones sin una resistencia de carga, con ello se obtienen mediciones de la salida del circuito en condiciones de circuito abierto. Esto significa que la salida del circuito no está conectada a ningún dispositivo que absorba o disipe la energía suministrada. Como era de esperar, los niveles de voltaje obtenidos son los más altos en todas las frecuencias evaluadas debido principalmente a que la energía suministrada por el circuito no se está utilizando completamente y la corriente de salida del circuito puede ser muy baja o incluso nula, ya que no hay carga para consumirla. Por otro lado, con la resistencia de carga de 220 Ω los voltajes a la salida son más bajos, en comparación a cuando se usan resistencias de carga de 5,1 k Ω y 22 k Ω . De los resultados se evidencia como claramente los voltajes son máximos para las frecuencias 1,8 GHz, 2,4 GHz y 2,45 GHz. Por ello, en la Tabla 3-1 se analizan los voltajes a estas frecuencias.

Figura 3-9: Voltaje de salida del rectificador según la frecuencia con conexión directa.

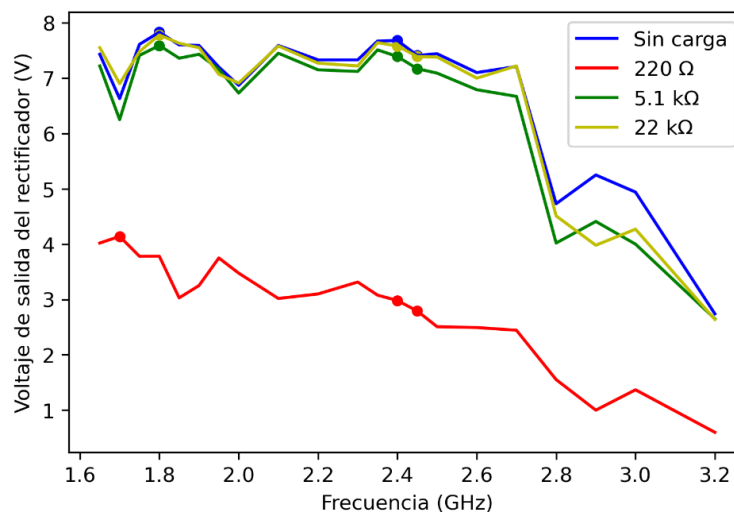


Tabla 3-1: Voltajes máximos con frecuencias de mayor transferencia.

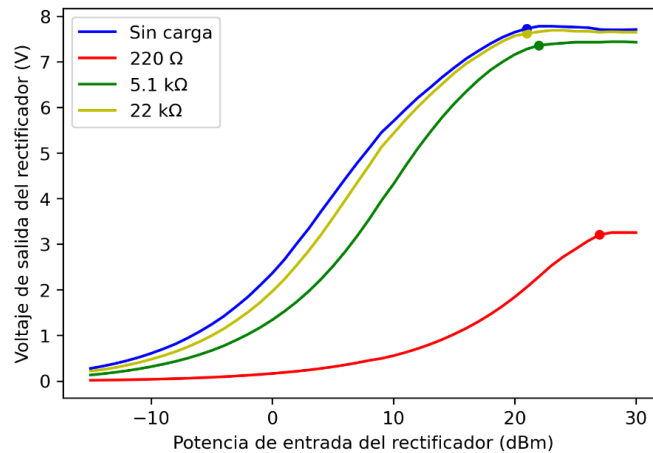
Sin carga		220 Ω		5,1 k Ω		22 k Ω	
F (GHz)	V	F (GHz)	V	F (GHz)	V	F (GHz)	V
1,8	7,83	1,7	4,14	1,8	7,59	1,8	7,78
2,4	7,68	2,4	2,981	2,4	7,39	2,4	7,58
2,45	7,41	2,45	2,792	2,45	7,17	2,45	7,39

Según lo mostrado en la Tabla 3-1, se observa que el voltaje de salida máximo se registra en la banda de 1,8 GHz cuando no hay carga, así como para las cargas de 5,1 k Ω y 22 k Ω . En contraste, para la carga de 220 Ω , el voltaje de salida más alto se alcanza a una frecuencia de 1,7 GHz. Además, se evidenció un rendimiento superior del rectificador a 2,4 GHz en comparación con 2,45 GHz. Por esta razón, se decidió continuar los experimentos a 2,4 GHz, dado que esta frecuencia no alteraba la banda de frecuencia para la cual el rectificador fue diseñado.

Las frecuencias de 1,8 GHz y 2,36 GHz fueron descartadas debido a que las antenas comerciales suelen operar en el rango de 2,4 GHz a 2,45 GHz. Este estudio se enfoca en capturar la mayor energía electromagnética disponible en el medio, por lo que se optó por centrarse en la banda de frecuencia donde se encuentran las antenas comerciales para garantizar una mejor captación de la señal.

3.5.2 Verificación de la potencia de trabajo

Al igual que en el experimento anterior, el rectificador fue conectado directamente al generador de radiofrecuencia SMBV 100A como se muestra en la Figura 3-8. La validación de la potencia de trabajo del rectificador se llevó a cabo configurando el generador de señales a una frecuencia constante igual a 2,4 GHz, mientras la potencia de entrada al rectificador era ajustada desde -15 dBm hasta 30 dBm con pasos de 1 dBm. Esta prueba tenía como objetivo determinar el punto de estabilidad del sistema de rectificación propuesto. Adicionalmente, estos experimentos fueron repetidos empleando diferentes resistencias de carga: 220 Ω , 5,1 k Ω y 22 k Ω , con el fin de analizar el comportamiento del sistema frente a diferentes cargas. El comportamiento obtenido con este experimento se puede observar en la Figura. 3-10.

Figura 3-10: Voltaje de salida del rectificador según la potencia de entrada.

Los datos presentados en la Figura 3-10 muestran una tendencia clara en la relación entre el voltaje de salida y la potencia de entrada en diferentes condiciones de carga. Cuando se observa el caso del circuito abierto, es decir, sin ninguna resistencia de carga, se nota que el voltaje de salida alcanza su máximo de 7,73 V alrededor de los 21 dBm de potencia de entrada. Este resultado indica una cierta estabilización del voltaje a partir de este punto.

Al introducir una carga de 220 Ω , el voltaje de salida disminuye a 3,206 V cuando la potencia de entrada es cercana a los 27 dBm. Esto sugiere una influencia significativa de la resistencia de carga en la salida de voltaje, con una reducción considerable en comparación con el caso sin carga. Contrario a la resistencia de carga previa, la adición de una resistencia de carga de 5,1 k Ω en la salida del circuito rectificador produjo un incremento en el voltaje máximo de salida, llegando a 7,36 V con una potencia de entrada de 22 dBm. Este comportamiento sugiere que existe una relación directa entre la resistencia de carga y voltaje de salida. Por otro lado, al utilizar una resistencia de carga de 22 k Ω se obtiene un voltaje máximo de 7,62 V a una potencia de entrada de 21 dBm. Esta configuración muestra un comportamiento similar al caso sin carga, aunque con una ligera disminución en el voltaje máximo alcanzado.

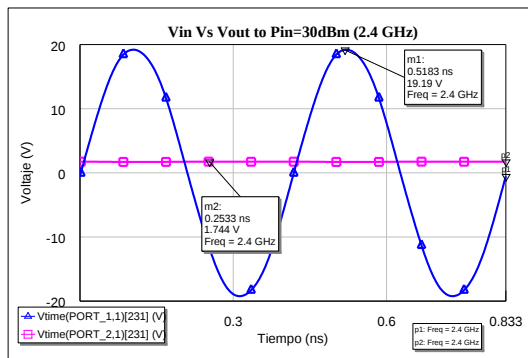
Estos resultados indican que la presencia de una resistencia de carga afecta significativamente el voltaje de salida del sistema. Además, se observa que a medida que aumenta la resistencia de carga, el voltaje de salida tiende a estabilizarse más

rápidamente, aunque no supera el voltaje máximo obtenido en ausencia de carga. Este comportamiento puede atribuirse a las características de impedancia del circuito y la forma en que interactúa con la potencia de entrada.

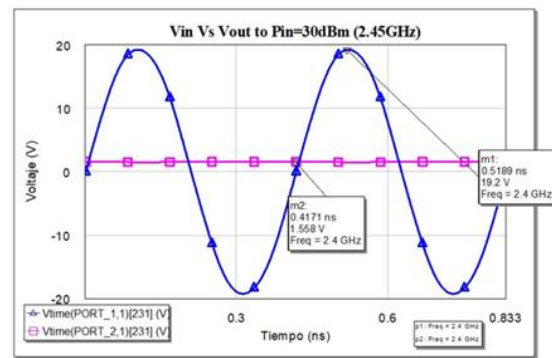
Para validar los resultados obtenidos experimentalmente, un análisis similar fue llevado a cabo empleando la herramienta computacional AWR Design Environment. Los resultados computacionales ilustrados en Figura 3-11 revelan que, en ausencia de carga, el voltaje registrado es de 1,744 V. Cuando se introduce una carga de $220\ \Omega$, este voltaje disminuye ligeramente a 1,568 V. Por otro lado, al emplear una resistencia de $5,1\ \text{k}\Omega$, se observa un incremento en el voltaje de salida, alcanzando 2,036 V. Sorprendentemente, con una carga de $22\ \text{k}\Omega$, el voltaje alcanza un valor muy similar, situándose en 2,057 V.

Este análisis comparativo indica que los resultados experimentales muestran una discrepancia significativa en relación con los simulados. Específicamente, se observa que los valores de voltaje obtenidos en la práctica son considerablemente mayores que aquellos predichos por la simulación computacional. Estas diferencias pueden atribuirse a diversas fuentes de error en el experimento real, como imperfecciones en los componentes, variaciones en las condiciones ambientales o limitaciones en la precisión de las mediciones. Además, las simulaciones pueden simplificar ciertos aspectos del sistema o no capturar completamente todas las variables involucradas, lo que también contribuye a las discrepancias observadas.

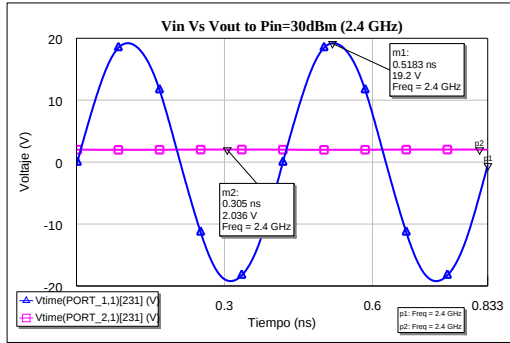
Figura 3-11: Voltajes alcanzados según la carga. (a). Sin carga. (b). $220\ \Omega$. (c). $5,1\ \text{k}\Omega$. (d). $22\ \text{k}\Omega$.



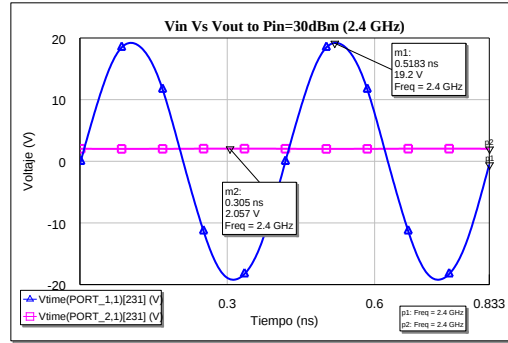
(a)



(b)



(c)



(d)

Una vez verificada y validado el funcionamiento del rectificador, se procedió a diseñar, implementar y seleccionar las antenas idóneas para el experimento.

3.6 Diseño de antena Yagi microcinta

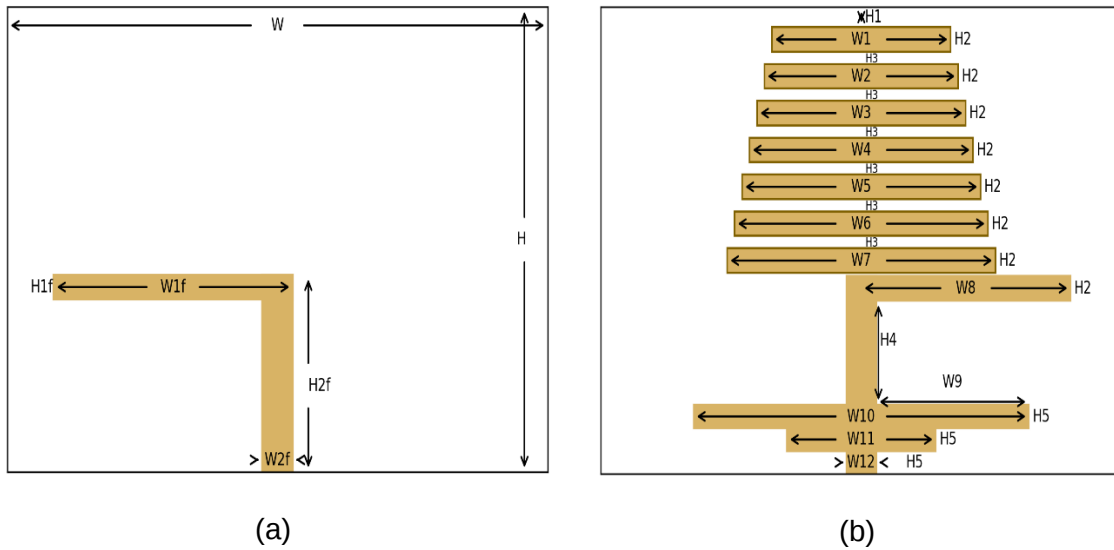
Las antenas desempeñan un papel crucial en el sistema de transferencia de energía inalámbrico propuesto ya que de ellas dependerá que se capte mayor energía en los nodos de sensado. Las características eléctricas de las antenas tales como la frecuencia de resonancia, el ancho de banda, la impedancia y el patrón de radiación, están influenciadas por una variedad de factores, como los materiales utilizados, el tamaño y la geometría. Esta sección, está enfocada en el diseño y la caracterización de una antena Yagi de microcinta, diseñada específicamente para lograr tener mayor ganancia en el sistema de transmisión y tratar de mejorar su distancia. De hecho, se optó por una antena microcinta debido a que estas son más económicas, compactas y fácilmente pueden ser integradas en sistemas electrónicos [54, 92, 93, 94, 95, 96]. Además, en secciones posteriores, se realiza una comparación del rendimiento de la antena propuesta y el de varias antenas comerciales, así como otras desarrolladas en el laboratorio de óptica, fotónica y visión artificial.

Para llevar a cabo la simulación de esta antena, se utilizó CST Microwave Studio. La estructura propuesta consta de una antena Yagi-Uda de microcinta compuesta de un reflector y un conjunto de siete directores, diseñados para operar a una frecuencia de 2,4 GHz para que pueda ser integrado con el rectificador mostrado en la sección anterior y conformar la rectena. La elección de este tipo de antena se basa en investigaciones previas

que han demostrado mejoras en la directividad al incluir elementos directores. La impedancia de entrada de la antenna está influenciada por la distancia H_4 (entre el dipolo y el reflector) y el ancho de la línea de alimentación, cuyo cálculo se realiza utilizando un modelo analítico de línea de impedancia para lograr un acoplamiento adecuado [51, 97]. La Figura 3-12 presenta un esquema bidimensional de la antenna, donde en (a) se puede observar el parche frontal, mientras que en la parte posterior (b) se encuentran el reflector y el conjunto de directores. Además, se ha observado que el ancho de los directores se reduce de 36 a 24 mm para evitar interacciones no deseadas con el campo eléctrico, lo que podría generar nuevas bandas de resonancia. La separación entre los directores es periódica, lo que permite generar corrientes inducidas. La antenna propuesta tiene un área total de 5.320 mm^2 ($70 \times 76 \text{ mm}$), lo que la hace compacta y portátil.

Los valores específicos de las dimensiones de la antenna son los siguientes: $W = 70 \text{ mm}$, $H = 76 \text{ mm}$, $W_1 = 24$, $W_2 = 26$, $W_3 = 28 \text{ mm}$, $W_4 = 30 \text{ mm}$, $W_5 = 32 \text{ mm}$, $W_6 = 34 \text{ mm}$, $W_7 = 36 \text{ mm}$, $W_8 = 28,1 \text{ mm}$, $W_9 = 20,5 \text{ mm}$, $W_{10} = 45 \text{ mm}$, $W_{11} = 20 \text{ mm}$, $W_{12} = 4 \text{ mm}$, $W_{1f} = 31 \text{ mm}$, $W_{2f} = 4 \text{ mm}$, $H_1 = 3,25 \text{ mm}$, $H_2 = 4 \text{ mm}$, $H_3 = 2 \text{ mm}$, $H_4 = 21 \text{ mm}$, $H_5 = 3,75 \text{ mm}$, $H_{1f} = 4$, $H_{2f} = 28,25 \text{ mm}$.

Figura 3-12: Esquema de la antenna Yagi-Uda de microcinta utilizada con un conjunto de directores. (a). Vista frontal. (b). Vista posterior.

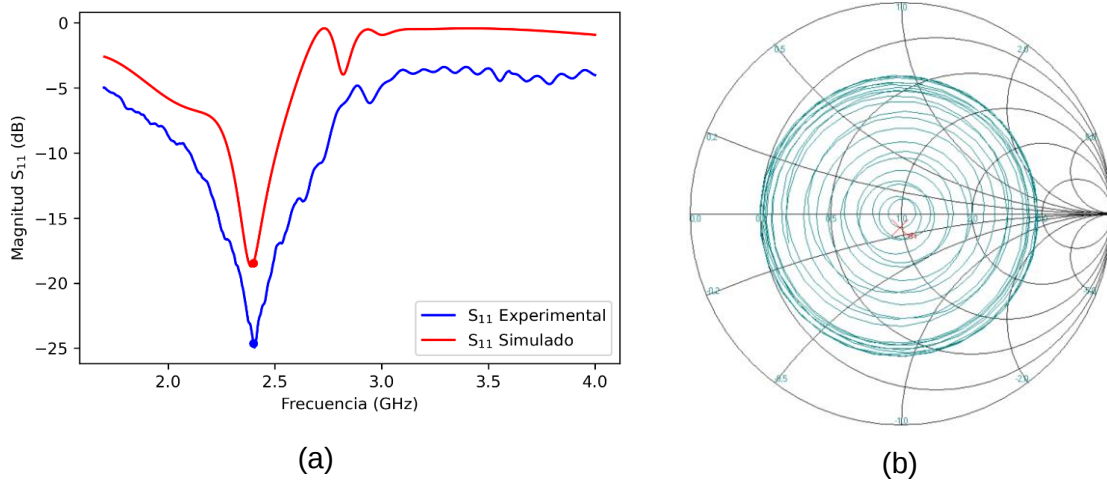


Para la fabricación de la antena, se empleó una máquina CNC especializada en la elaboración de placas de circuito impreso (LPKF ProtoMat D104, LPKF Laser & Electronics AG, Hannover, Alemania). La antena se construye sobre un sustrato dieléctrico comercial FR4, que presenta una permitividad relativa (ϵ_r) de 4,4, una tangente de pérdida ($\tan \delta$) de 0,019, y tiene un grosor de 1,6 mm, con una capa de cobre de 35 μm . Además, se soldó un conector macho SMA de 50 Ω en la entrada de la antena para facilitar su conexión con los equipos del sistema de transferencia de energía inalámbrica.

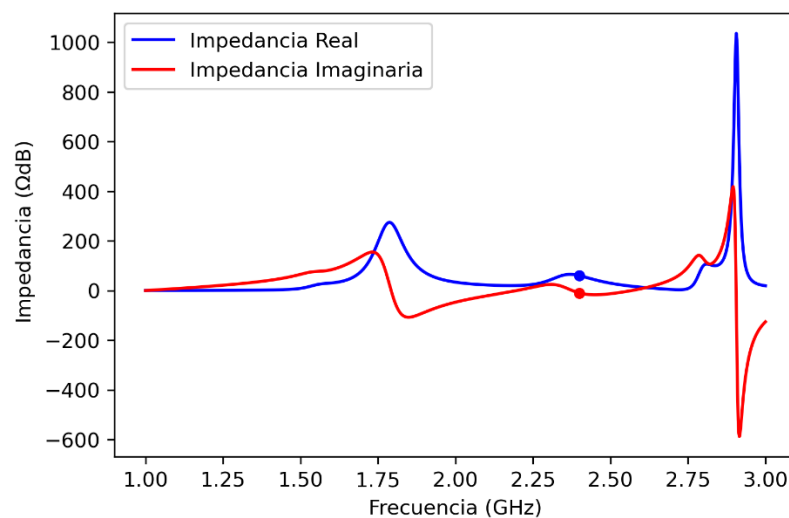
3.7 Análisis de la antena propuesta

Una vez fabricada la antena propuesta para el sistema de transferencia de energía inalámbrica, esta fue caracterizada empleando el analizador de redes vectorial desde 1,7 GHz hasta 4 GHz. La Figura 3-13 (a) muestra una comparación de la magnitud del parámetro S_{11} simulado y experimental en función de la frecuencia. Los resultados obtenidos en la simulación muestran que la antena opera a 2,4 GHz con una magnitud del S_{11} igual a -18,46 dB. Por otro lado, los resultados experimentales revelan que la antena también presenta un comportamiento óptimo en la frecuencia de 2,4 GHz, con una magnitud del parámetro S_{11} de -24,63 dB, mostrando un funcionamiento similar a la predicción simulada. Además, se observa una buena concordancia entre los resultados simulados y experimentales dentro del rango de operación del sistema. Esta consistencia entre la simulación y la medición valida la precisión del modelo teórico utilizado y confirma el rendimiento satisfactorio de la antena en diferentes condiciones de frecuencia.

La impedancia de la misma también fue analizada. La Figura 3-13 (b) muestra la carta de Smith obtenida experimentalmente con el analizador de redes vectorial, revelando una impedancia de 49,2 Ω - j6,75 Ω a 2,4 GHz, cercana al eje horizontal y próxima al valor deseado de 50 Ω , lo que facilita su acople al rectificador y evita pérdidas de energía electromagnética. De forma análoga, la impedancia real e imaginaria fue calculada empleando CST STUDIO.

Figura 3-13: Parámetro S_{11} y carta de Smith. (a). Parámetro S_{11} . (b). Carta de Smith.

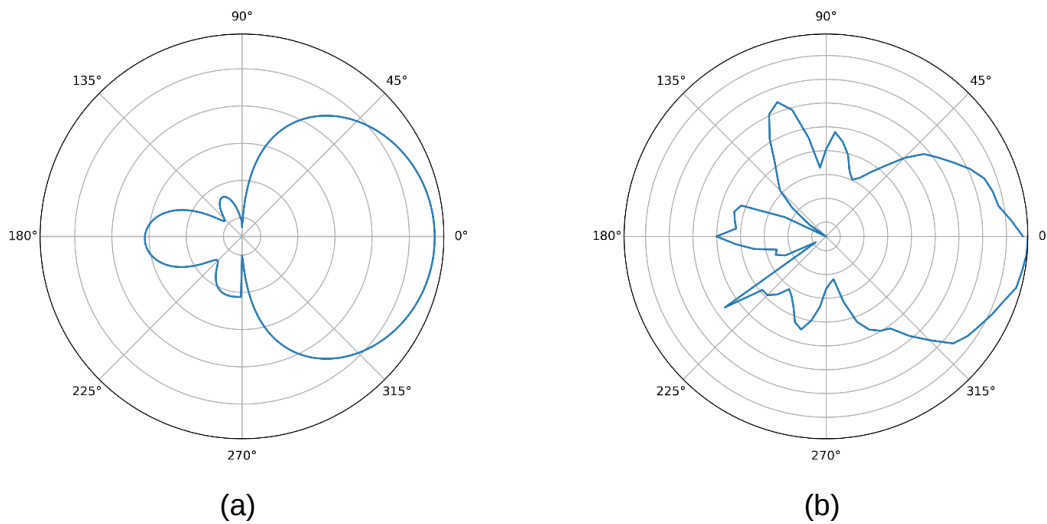
Por otro lado, la Figura 3-14 muestra los resultados obtenidos de dichas simulaciones y se evidencia que la impedancia de la antenna simulada es de $60,181 \Omega - j9,77 \Omega$. Con ello se destaca una vez más que los resultados teóricos y experimentales presentan un comportamiento semejante, lo cual permite validar nuevamente la metodología empleada.

Figura 3-14: Gráfica de la impedancia de la antenna Yagi en función de la frecuencia.

Además de las características presentadas anteriormente, se complementó el análisis hallando el patrón de radiación de la antenna, con el propósito de validar su comportamiento

en un entorno real y contrastarlo con la información proporcionada por la simulación. La Figura 3-15 muestra el patrón de radiación de la antena, tanto el simulado como el obtenido experimentalmente, confirmando que el patrón es directivo. Los datos experimentales se recopilaban manualmente, abarcando un rango de 0° a 360° , con intervalos de 5° y utilizando el generador de radiofrecuencia (SMBV100A, Rhode & Schwartz) configurado en su máxima potencia, 30 dBm.

Figura 3-15: Patrón de radiación Plano XY. (a). Patrón simulado. (b). Patrón experimental.



Estos resultados confirman que la antena ha sido diseñada y fabricada de manera adecuada, cumpliendo con los requisitos del proyecto.

3.8 Comparación con antenas comerciales

Se llevó a cabo una comparación entre la antena desarrollada en este estudio y varias soluciones comerciales disponibles en el mercado operando a 2.4 GHz. Este análisis fue crucial para evaluar el rendimiento de nuestra antena en comparación con las antenas comerciales, dado que la eficacia en la transmisión inalámbrica a largas distancias depende en gran medida de estos elementos.

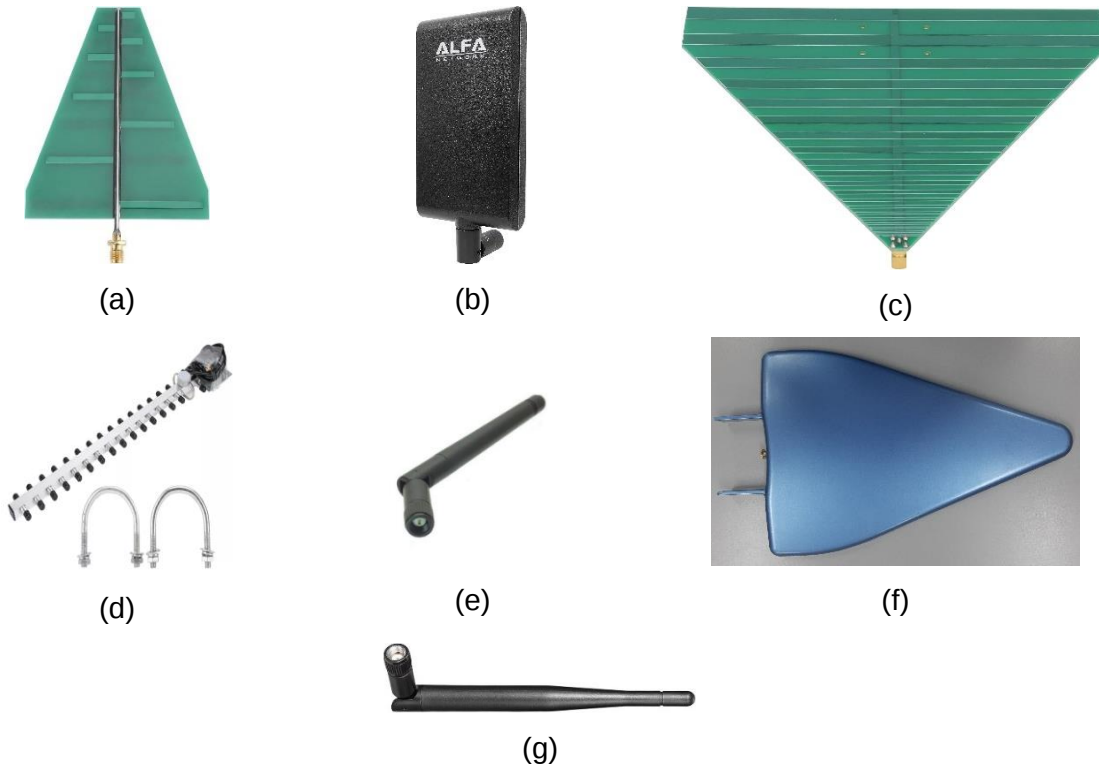
El objetivo de seleccionar antenas comerciales fue maximizar la capacidad de nuestro sistema para la transmisión de energía inalámbrica. Esta elección nos permitió comparar de manera equitativa la capacidad de nuestra antena desarrollada para igualar o superar el rendimiento de las antenas comerciales establecidas en el mercado. A través de este proceso, obtuvimos una evaluación objetiva del desempeño de nuestra antena en comparación con las soluciones disponibles comercialmente, lo cual es esencial para validar su viabilidad técnica y su potencial de aplicación práctica. La información detallada sobre las antenas seleccionadas y sus características proporcionadas por los fabricantes se presenta en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Lista de antenas comerciales analizadas.

Antena	Principales Características	Fuente
Antena Log – periódica UWB 1,35GHz-9,5GHz	Frecuencia: 1,35 – 9,5 GHz Ganancia: 5 – 6 dBi	http://surl.li/trsck
Antena Alfa APA-M25	Frecuencia: 2,4 – 2,5 GHz 5,150 – 5,875 GHz Ganancia: 8 dBi @ 2,4 GHz 10 dBi @ 5 GHz	http://surl.li/trscz
Antena Log – periódica UWB 600-6000MHz	Frecuencia: 600 – 6.000 MHz Ganancia: 6 – 7 dBi	http://surl.li/trsco
Antena Yagi	Frecuencia: 2,4 GHz Ganancia: 18 dBi	http://surl.li/trsdg
Dipolo	Frecuencia: 2,4 GHz Ganancia: 3 dBi	http://surl.li/trsdr
Antena log – periódica Aaronia	Frecuencia: 600 MHz – 10 GHz Ganancia: 5 dBi	http://surl.li/trsek
Dipolo Vert2450	Frecuencia: 2,4 – 2,48 GHz 4,9 – 5,9 GHz Ganancia: 3 dBi	http://surl.li/trsis

La Figura 3-16 presenta las antenas comerciales seleccionadas, las cuales fueron sometidas a ensayos y combinaciones para seleccionar el conjunto óptimo que minimizara las pérdidas en la transmisión y recepción de energía electromagnética que serán explicadas en las siguientes secciones.

Figura 3-16: Antenas comerciales utilizadas en WPT. (a) Antena Log – periódica UWB 1,35GHz-9,5GHz. (b) Antena Alfa APA-M25. (c) Antena Log – periódica UWB 600-6000MHz. (d) Antena Yagi. (e) Dipolo – 10 cm. (f) Antena log – periódica Aaronia. (g) Dipolo Vert2450.



Una vez adquiridas las antenas, procedimos a su caracterización, que incluyó la medición de la magnitud del S_{11} y la carta de Smith de cada una. Esta fase fue crucial para evaluar su desempeño y determinar su idoneidad para su aplicación en sistemas de transmisión de energía inalámbrica. Con los datos obtenidos de la caracterización, buscamos identificar la combinación óptima de antenas para garantizar la eficiencia del sistema en la transmisión de energía inalámbrica.

3.8.1 Caracterización de las antenas

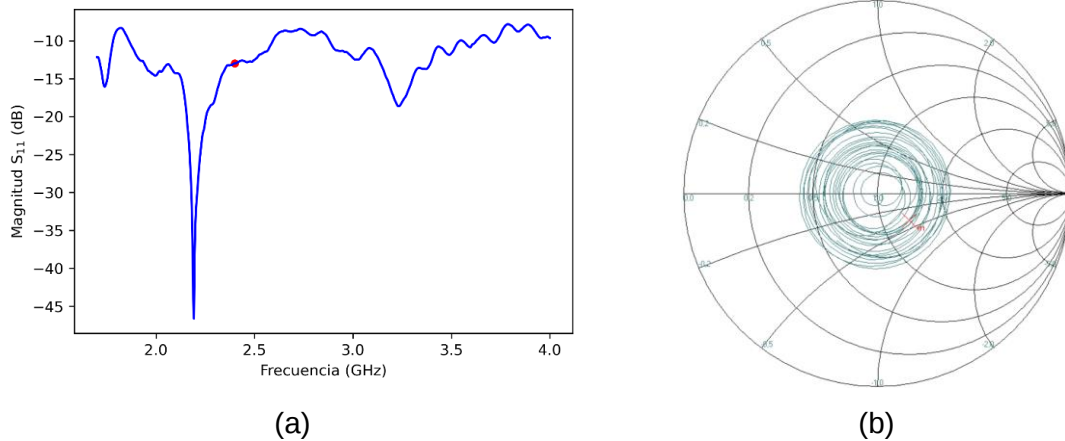
Las antenas fueron caracterizadas mediante pruebas en las que se validó la magnitud del parámetro S_{11} e impedancia a 2,4 GHz ilustrados en las subsecciones siguientes. Para ello se empleó el analizador de espectros vectorial (FSH4, Rohde & Schwarz) midiendo en un

rango de frecuencias comprendido entre 1,7 y 4 GHz. En cada gráfica está señalado en rojo los datos obtenidos a frecuencia de 2,4 GHz de cada antenna debido a que es la frecuencia en que se va a trabajar.

3.8.1.1 Antena Log – periódica UWB 1,35 – 9,5 GHz

Esta antena log-periódica (Walfronthmyzuw34f2, Walfront) es una antena directiva UWB (UWB por sus siglas en inglés de Ultra Wide Band), capaz de operar en un rango de frecuencia que va desde 1,35 GHz hasta 9,5 GHz. El fabricante sugiere una ganancia entre 5 y 6 dBi. En la Figura 3-17 (a), se observa que a 2,4 GHz, la antena registra una amplitud de -13 dB en su coeficiente de reflexión, indicando una notable capacidad para captar la energía electromagnética presente en el medio a esta frecuencia. Sin embargo, su punto máximo de amplitud se sitúa en 2,2 GHz, con -34,35 dB, sugiriendo un rendimiento óptimo a esta frecuencia. La Figura 3-17 (b) muestra que, a 2,4 GHz, la antena presenta una impedancia de $68,5 \Omega - j18,6 \Omega$, aproximándose al eje horizontal, lo que sugiere una adaptabilidad adecuada a la impedancia del rectificador. Estas características indican que la antena es una opción viable para su implementación en el proyecto.

Figura 3-17: Parámetro S_{11} y carta de Smith. (a). Parámetro S_{11} . (b). Carta de Smith.

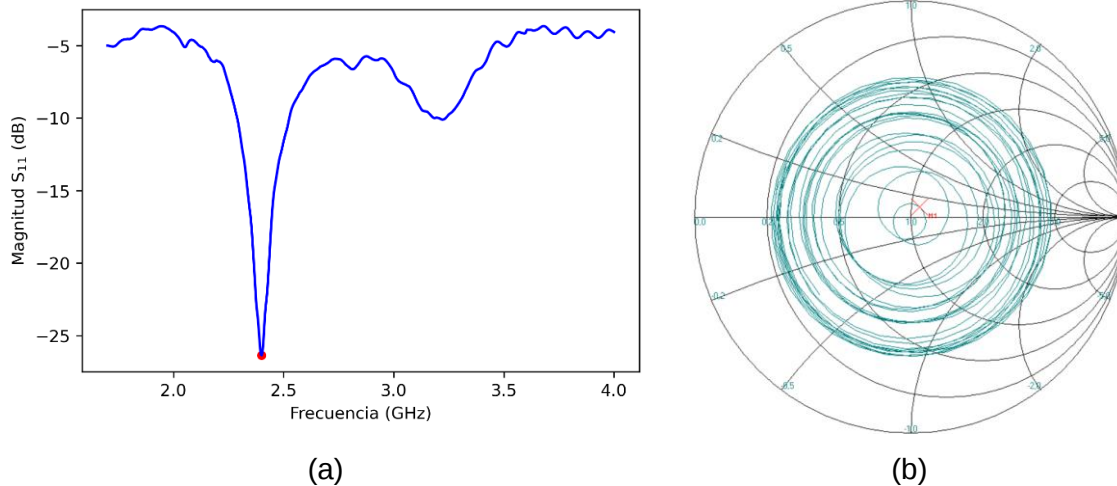


3.8.1.2 Antena Alfa APA-M25

La antena Alfa APA-M25 (APA-M25, Alfa Network) es una antena microcinta directiva con una ganancia de 8 dBi en el rango de frecuencias de 2,4 GHz a 2,5 GHz, y 10 dBi en frecuencias de 5,150 GHz a 5,875 GHz, según lo especificado por el fabricante. Sin embargo, estas últimas no fueron registradas ya que no son relevantes para el proyecto

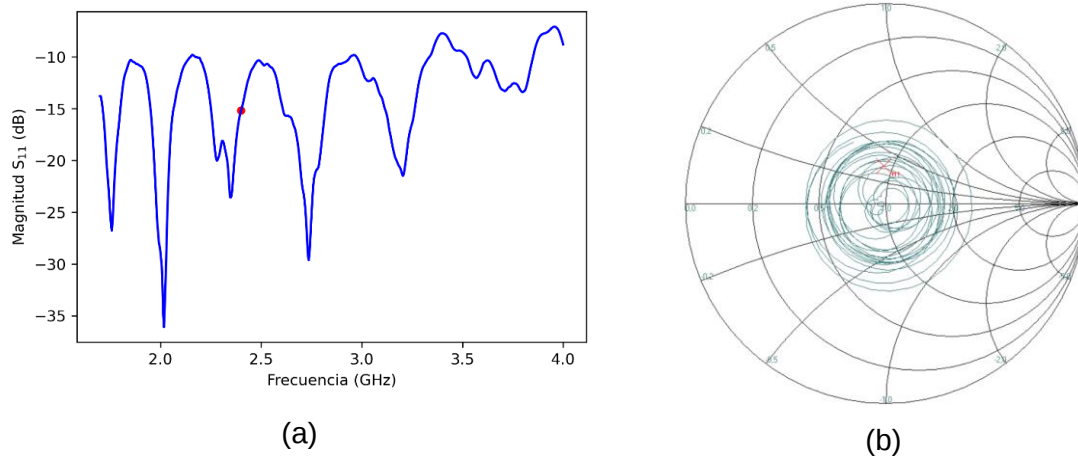
en cuestión. En la Figura 3-18 (a), se observa que, al igual que la antena Yagi microcinta, su rendimiento óptimo y menor pérdida de reflexión se alcanzan en la frecuencia de 2,4 GHz, con una amplitud del parámetro S_{11} de -26,34 dB. Por otro lado, la Figura 3-18 (b) muestra que su impedancia a 2,4 GHz, de $53,5 \Omega + j5,35 \Omega$, se aproxima al eje horizontal y al valor teórico de 50Ω . Además, la reactancia inductiva es mínima, lo que la hace adecuada para adaptarse a la impedancia del rectificador y aprovechar mejor la energía electromagnética del entorno.

Figura 3-18: Parámetro S_{11} y carta de Smith. (a). Parámetro S_{11} . (b). Carta de Smith.



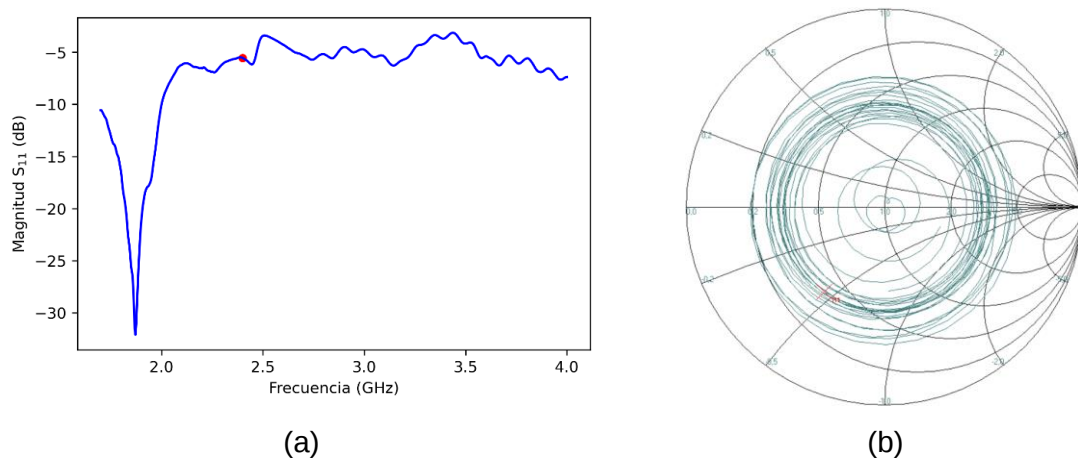
3.8.1.3 Antena Log – periódica UWB 600-6000MHz

La antena log-periódica de banda ultraancha (Yoidesu9bpwqaf3n1305, Yoidesu) es una antena directiva que cubre un amplio rango de frecuencias, desde los 600 MHz hasta los 6.000 MHz. Según el fabricante, tiene una ganancia entre 6 y 7 dBi. En la Figura 3-19 (a), se observa que, a una frecuencia de 2,012 GHz, la antena alcanza su máxima magnitud del parámetro S_{11} , registrando -35,43 dB. A 2,4 GHz, su magnitud es de -15,23 dB, lo que la hace adecuada para captar la energía electromagnética del entorno con pérdidas reducidas en este proyecto. Además, en la Figura 3-19 (b), se muestra una impedancia de $44,6 \Omega + j17 \Omega$ a 2,4 GHz, que está cerca del eje horizontal. Aunque podría ser utilizada en el proyecto, existe la posibilidad de que no haya un acople adecuado de impedancias.

Figura 3-19: Parámetro S_{11} y carta de Smith. (a). Parámetro S_{11} . (b). Carta de Smith.

3.8.1.4 Antena Yagi

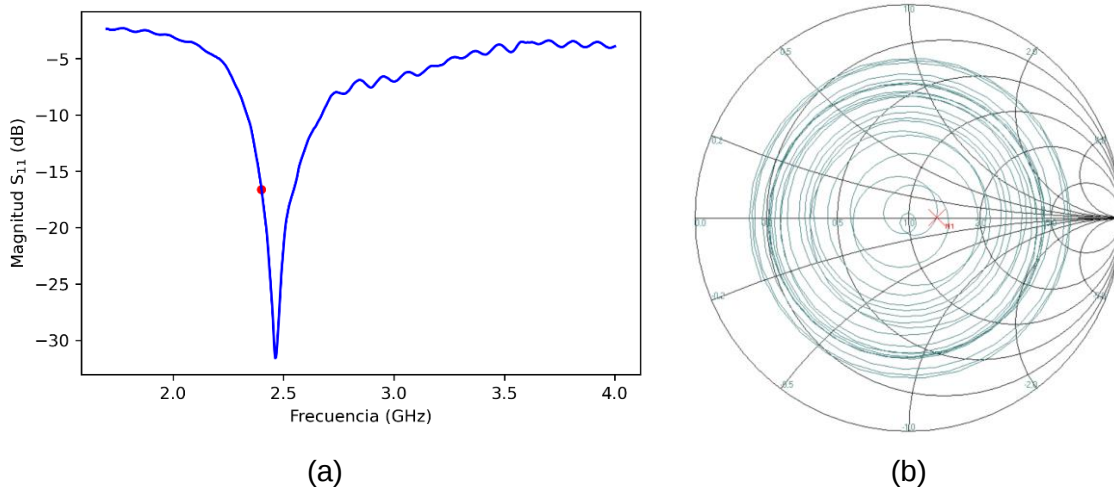
Es una antena direccional tipo Yagi (STKA-YA24-18SM, Techtoo), diseñada para operar a 2,4 GHz y con una ganancia de 18 dBi según el fabricante. En la Figura 3-20 (a), se observa que a 2,4 GHz, el parámetro S_{11} tiene un valor de -5,54 dB, mientras que su rendimiento óptimo se alcanza a 1,87 GHz, donde este parámetro alcanza un valor de -31,97 dB. Por otro lado, en la Figura 3-20 (b), se muestra la impedancia medida de la antena a 2,4 GHz, registrando $19,6 \Omega - j 24,4 \Omega$. Esta discrepancia con los 50Ω esperados, además de estar ubicada por debajo del eje horizontal, sugiere una reactancia capacitiva. Esto indica poco aprovechamiento y una pérdida de energía electromagnética al utilizarla en la frecuencia requerida para el proyecto.

Figura 3-20: Parámetro S_{11} y carta de Smith. (a). Parámetro S_{11} . (b). Carta de Smith.

3.8.1.5 Dipolo

Es una antena dipolo omnidireccional de 10 cm de longitud (ANT-3DBI-SMA-M, Didácticas Electrónicas I+D) apta para operar a 2,4 GHz. De acuerdo con sus especificaciones técnicas, posee una ganancia de 3 dBi. Su mejor punto de operación se destaca en la frecuencia de 2,46 GHz, como muestra la Figura 3-21 (a), con un coeficiente de reflexión de -30,81 dB. Del mismo modo, en la misma gráfica, se aprecia que a 2,4 GHz este parámetro registra una magnitud de -16,47 dB, lo que indica pérdidas por reflexión insignificantes. Por otro lado, la Figura 3-21 (b) revela que su impedancia de $65,3 \Omega + j1,66 \Omega$ se sitúa sobre el eje horizontal, sugiriendo una posible adaptabilidad al rectificador y un acoplamiento aceptable, a pesar de no alcanzar los 50Ω teóricos esperados. Estos resultados generan confianza en la viabilidad de emplear esta antena en el proyecto.

Figura 3-21: Parámetro S_{11} y carta de Smith. (a). Parámetro S_{11} . (b). Carta de Smith.

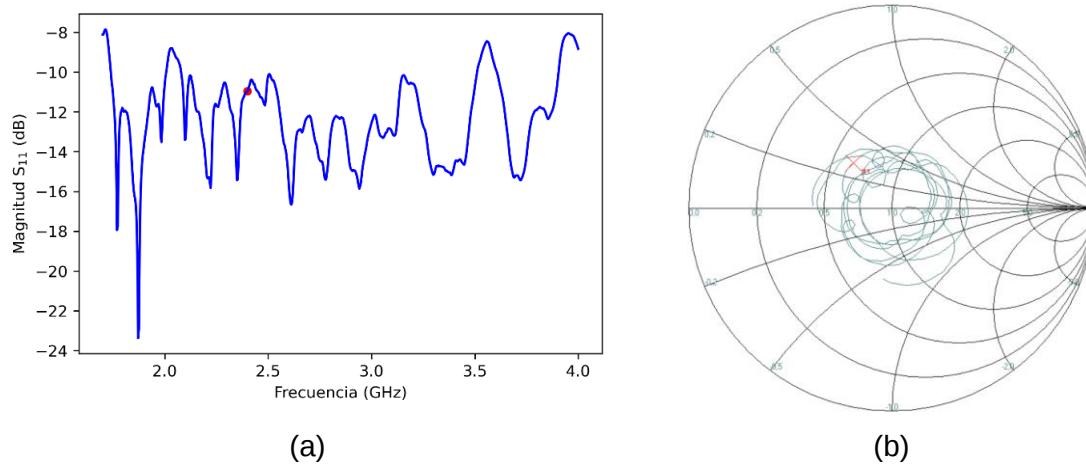


3.8.1.6 Antena log – periódica Aaronia

La antena log – periódica Aaronia (Hyper LOG 60100, Aaronia), es una antena UWB directiva que opera en el rango de frecuencias comprendido entre 680 MHz y 10GHz, con una ganancia de 5 dBi según las especificaciones del fabricante. En la Figura 3-22 (a) registra -10,97 dB de medida del parámetro S_{11} posibilitando su utilización en este proyecto. Sin embargo, el valor máximo del parámetro se ubica en la frecuencia de 1,875 GHz con un valor medido de -22,92 dB. En contraste, su carta de Smith mostrada en Figura 3-22 (b), la impedancia difiere de los 50Ω requeridos indicando $30,8 \Omega + j14,9 \Omega$ en 2,4

GHz proporcionando dudas en su funcionamiento a dicha frecuencia ya que sugiere un acople no apto con el rectificador generando pérdida de energía EM.

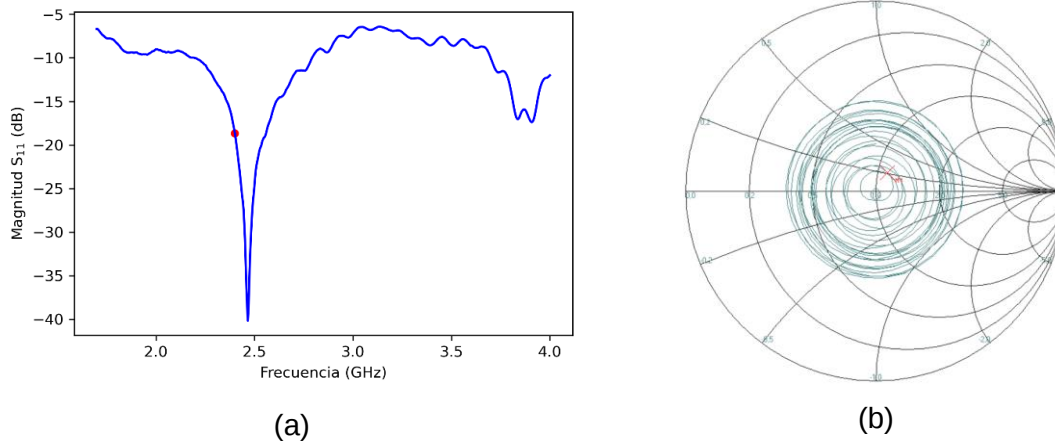
Figura 3-22: Parámetro S_{11} y carta de Smith. (a). Parámetro S_{11} . (b). Carta de Smith.



3.8.1.7 Dipolo Vert2450

La antena dipolo Vert2450 (Vert2450, National Instruments) es la última antena en esta selección. Es omnidireccional y está diseñada para operar a 2,4 GHz, con una ganancia de 3 dBi según los datos técnicos proporcionados. Presenta un coeficiente de reflexión de -18,54 dB en la frecuencia de 2,4 GHz, pero alcanza un punto máximo de -38,86 dB a 2,46 GHz, como se muestra en la Figura 3-23 (a), lo que la convierte en otra alternativa viable para este proyecto. Además, su impedancia medida es de $54,7 \Omega + j11,6 \Omega$ y está ubicada gráficamente en su carta de Smith cerca del eje horizontal (ver Figura 3-23 (b)), lo que sugiere que el acople de impedancia con el rectificador podría ser exitoso.

Después de caracterizar las antenas, se procede a realizar pruebas con el fin de determinar qué combinación de ellas y en conjunto con el rectificador ofrece el mejor resultado y así seleccionar las de mejor rendimiento. Aunque los datos obtenidos sugieren descartar la antena Yagi STKA-YA24, se consideró incluirla en las pruebas con la esperanza de obtener mejores resultados.

Figura 3-23: Parámetro S_{11} y carta de Smith. (a). Parámetro S_{11} . (b). Carta de Smith.

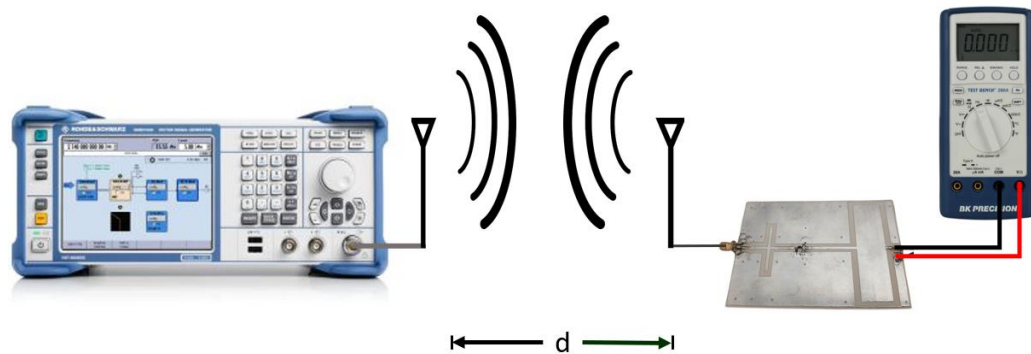
3.8.2 Selección de antenas

La selección de antenas implicó la evaluación de los 8 modelos distintos que incluyen los comerciales y la antenna diseñada como es mostrado en la Figura 3-24, buscando la mejor combinación entre la transmisión y la recepción de energía electromagnética a una distancia d . Dado que se disponía de 2 antenas de cada referencia, se generaron un total de 64 combinaciones para su análisis y evaluación.

El experimento se realizó aplicando una distancia d igual a 30 cm entre la antenna transmisora y la receptora. El procedimiento consistió en conectar la antenna transmisora al generador de radiofrecuencia (SMBV100A, Rhode & Schwartz) configurado a 2,4 GHz, variando la potencia de transmisión desde -15 dBm hasta 30 dBm, con incrementos de 1 dBm. Adicionalmente, la antenna receptora fue conectada al rectificador para conformar la rectena, y se midieron los voltajes y corrientes existentes a la salida del rectificador con el multímetro Test Bench 390A.

El orden de las antenas transmisora y receptora se seleccionó aleatoriamente para garantizar la confiabilidad de los datos. Durante las pruebas, no se conectó carga alguna con el fin de obtener el mejor resultado entre las diversas combinaciones de antenas.

Figura 3-24: Montaje para la verificación de transferencia de energía. Lado izquierdo: Transmisión. Lado derecho: Recepción.



La Tabla 3-3 presenta las 8 combinaciones más destacadas de voltaje y corriente en la salida del rectificador.

Tabla 3-3: Mejores 8 combinaciones de antenas.

Transmisión (Tx)	Recepción (Rx)	V_{Rx} (V)	I_{Rx} (mA)
Yagi microcinta	Alfa APA-M25	4,87	2.164
Dipolo	Alfa APA-M25	4,77	1.971
Alfa APA-M25	Log – periódica Aaronia	4,71	2.307
Log – periódica UWB 1,35 – 9,5 GHz	Alfa APA-M25	4,68	2.024
Log – periódica Aaronia	Alfa APA-M25	4,62	2.020
Alfa APA-M25	Yagi microcinta	4,43	1.774
Alfa APA-M25	Log – periódica UWB 1,35 – 9,5 GHz	4,38	1.828
Dipolo Vert2450	Alfa APA-M25	4,38	1.747

Posteriormente, se seleccionaron los 4 resultados más sobresalientes basados en la cantidad de voltaje transmitido para realizar el mismo experimento, pero esta vez a 1 m de distancia. Las antenas Yagi microcinta, dipolo con longitud de 10 cm, log – periódica 1, alfa APA-M25 y log – periódica Aaronia fueron las más destacadas. Sin embargo, a pesar de que la antena log–periódica Aaronia está entre las mejores combinaciones en la distancia de 30 cm, se optó por descartarla debido a su alto costo, lo que aumentaría el presupuesto del proyecto. Además, su peso y tamaño dificultan su manipulación y adecuada

orientación. Con base en esta información, en la Tabla 3-4 se presentan los 3 mejores datos de las combinaciones del experimento a una distancia de 1 m.

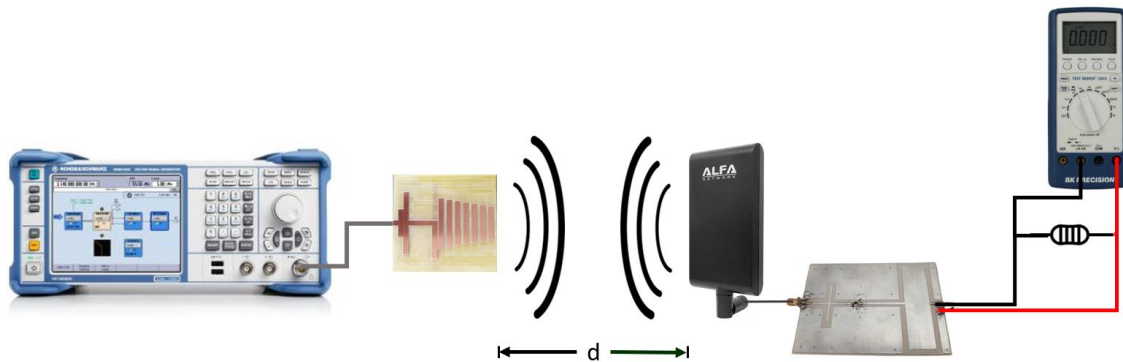
Tabla 3-4: Resultados: $d = 1\text{m}$, con las 3 mejores combinaciones de antenas.

Tx	Rx	V_{Rx} (V)	I_{Rx} (mA)
Yagi microcinta	Alfa APA-M25	2,023	0,75
Dipolo – 10cm	Alfa APA-M25	1,934	0.69
Loperiodica UWB 1,35 – 9,5 GHz	Alfa APA-M25	1,73	0.526

La Tabla 3-4 resalta que la interacción más destacada entre las antenas transmisora y receptora se alcanza con la antena Yagi microcinta diseñada en esta tesis de maestría para la transmisión, y la antena comercial microcinta Alfa APA-M25 para la recepción, conllevando un mayor alcance. Tras haber definido la selección para el resto del proyecto, se procedió a experimentar el sistema de transferencia de energía inalámbrica.

3.9 Sistema WPT

Figura 3-25: Montaje sistema WPT. Lado izquierdo: Transmisión de señal. Lado derecho: Recepción de señal.

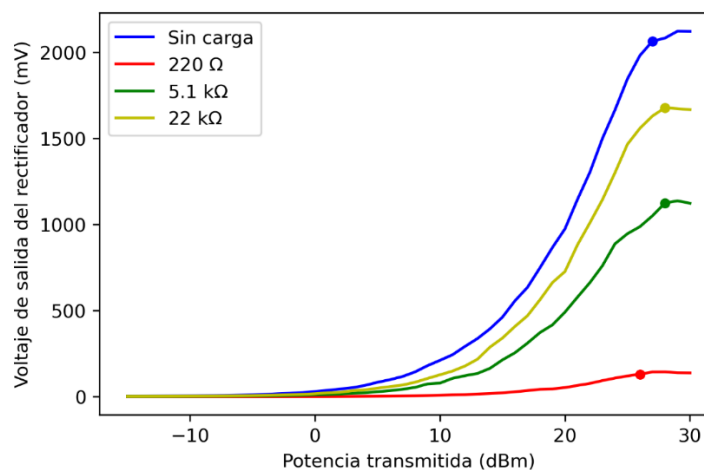


La experimentación del funcionamiento del sistema WPT se continuó a una distancia de 1 m. Se tomaron las medidas con las diferentes cargas mencionadas anteriormente como se muestra en la Figura 3-25 donde d indica la distancia. El orden de las cargas fue seleccionado aleatoriamente. Se realiza la transmisión de energía a 2,4 GHz iniciando con

una mínima potencia de -15 dBm que varía de a 1 dBm hasta llegar a la potencia máxima, 30 dBm, midiendo primero el voltaje y luego la corriente por facilidad en la toma de datos.

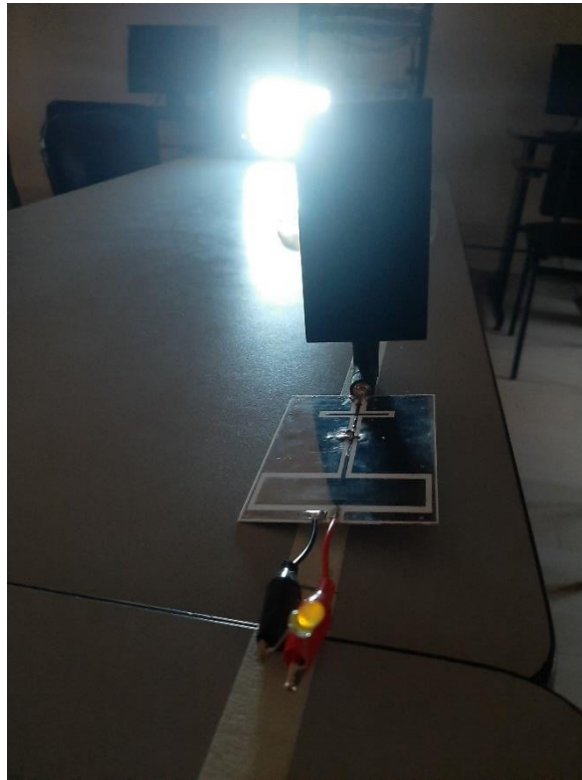
El comportamiento del voltaje a la salida de la rectena en función de la potencia de entrada es mostrado en la Figura 3-26. Los puntos señalados en la gráfica indican donde comienza a estabilizarse el voltaje. A partir de 26 dBm, el voltaje se mantiene aproximadamente en 136 mV con la carga de 220 Ω . A partir de 28 dBm, el voltaje se estabiliza alrededor de 1.125 mV para la carga de 5,1 k Ω y 1.679 mV para 22 k Ω . El mejor resultado se obtiene cuando no hay carga establecida, donde el voltaje empieza a estabilizarse a partir de los 2 V, valor que se alcanza al transmitir a partir de los 27 dBm, obteniendo 2.066 mV.

Figura 3-26: Voltaje de salida de la rectena según variación de potencia de transmisión y carga.



Después de observar los valores alcanzados a una distancia de un metro, se decidió utilizar un LED como carga. Utilizando el analizador de espectros vectorial para identificar la potencia recibida por la antena, se determinó que el LED debe recibir una potencia mínima de 18,6 dBm y obtener un voltaje de salida en el rectificador de 1,588 V para mostrar una leve iluminación, como se observa en la Figura 3-27. Sin embargo, a una distancia mayor el led no enciende.

Figura 3-27: Led encendido a 1 m de distancia.

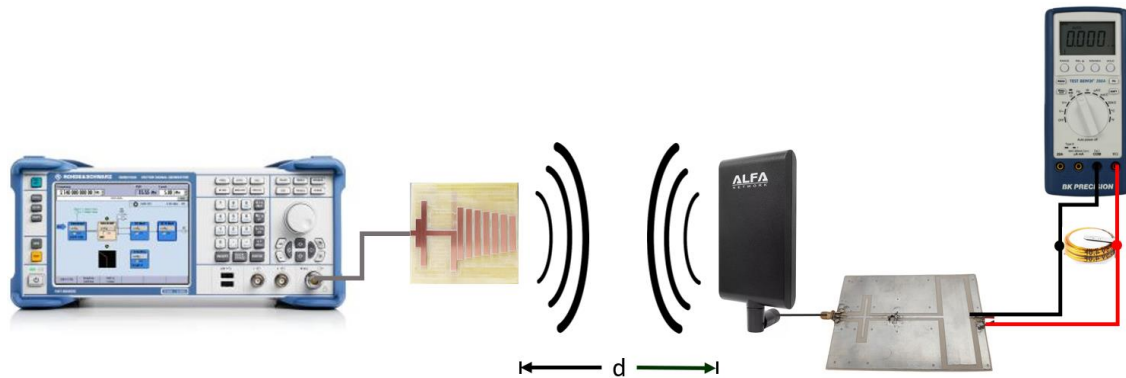


Posteriormente, a la rectena conformada por la antena Alfa y el circuito rectificador fabricado le es conectada un supercapacitor de 4 F como carga eliminando las resistencias utilizadas de carga para no tener elementos pasivos que consumieran energía, con el fin de almacenar la mayor cantidad de energía obtenida a través de WPT. La Figura 3-28 ilustra el montaje del sistema WPT desarrollado. La elección de emplear supercapacitores se basa en su preferencia en sistemas de recolección de energía debido a su alta densidad de potencia, su capacidad de carga y descarga más rápida, mayor número de ciclos de carga y descarga, ciclo de vida más prolongado y menor tamaño en comparación con las baterías [30, 98, 99, 100].

Por último, se procedió a verificar la capacidad de carga del supercondensador a una distancia de 1 metro. El sistema se mantuvo en funcionamiento ininterrumpido durante 24 horas en el laboratorio de conmutación del ITM, lo que dificultó determinar el momento preciso en que se alcanzó una carga de 1,8 V. Sin embargo, al volver a medir el voltaje después de 16 horas, se constató que ya había alcanzado dicho valor. A pesar de terminar de esperar las 24 horas completas, no se observó ningún cambio en el valor del voltaje

almacenado. En el próximo capítulo se profundizará en este tema y se describirá el funcionamiento integrado del sistema WPT y WSN, así como las pruebas realizadas para verificar su desempeño.

Figura 3-28: Montaje sistema WPT con supercapacitor. Lado izquierdo: Transmisión de señal. Lado derecho: Recepción de señal.

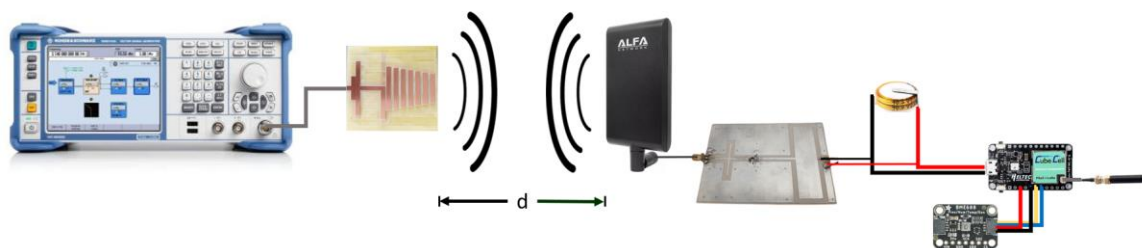


4. Integración de Sistemas WSN y WPT

4.1 Preámbulo

Una vez definida la composición del nodo y el montaje WPT, mostrados en las Figuras 3-7 y 3-29 respectivamente, se procedió a la integración de ambos sistemas. La Figura 4-1 ilustra el montaje del sistema y sus conexiones. A la izquierda se encuentra el sistema de transmisión, que incluye el generador de radiofrecuencia (SMBV100A, Rhode & Schwartz) y la antena Yagi microcinta diseñada específicamente para este proyecto. A la derecha, se ubica el sistema de recepción, que comienza con la rectena, compuesta por la antena Alfa y el rectificador. La salida de voltaje DC del rectificador se conecta a un supercapacitor Farah doble capa de 5,5 V y 4 F, el cual está en paralelo con el nodo. Finalmente, la distancia entre el sistema de transmisión y el de recepción está representada por d .

Figura 4-1: Montaje del sistema integrado – Nodo y WPT.



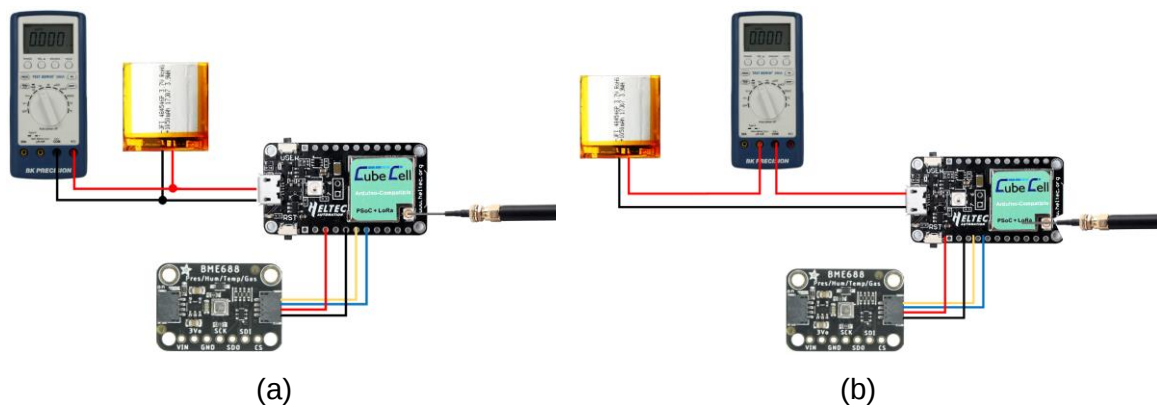
Sin embargo, el proceso de integración de la rectena y el nodo se llevó a cabo por partes, permitiendo evaluar y analizar diferentes condiciones de funcionamiento para determinar la distancia más lejana que pudiera garantizar la potencia suficiente de operación que el nodo requiere.

Este capítulo detalla los experimentos realizados para establecer los parámetros operativos de los sistemas integrados. En primer lugar, se identifica el consumo típico del nodo y se determina la potencia mínima requerida para su funcionamiento. Luego, se examina el comportamiento de la carga del supercapacitor y se establece la distancia máxima a la que puede mantener el nodo en operación continua. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas de estos experimentos.

4.2 Consumo de potencia del nodo

Antes de iniciar los experimentos, se midió el consumo típico del nodo, como se muestra en la Figura 4-2. Se conectó una batería como fuente de energía y se determinó que el voltaje típico de operación del nodo es de 3,303 V, permaneciendo constante tanto en estado activo como en reposo. Sin embargo, la corriente varía: cuando se envía información, el consumo del mismo oscila entre 13 mA y 26 mA, mientras que, en estado de reposo, el consumo es de 193 μ A. Así, se identificó que el nodo consume una potencia máxima de 85,9 mW al enviar datos y un mínimo de 0,64 mW en reposo, bajo condiciones normales.

Figura 4-2: Medición de potencia del nodo. (a). Medición de voltaje. (b). Medición de corriente.

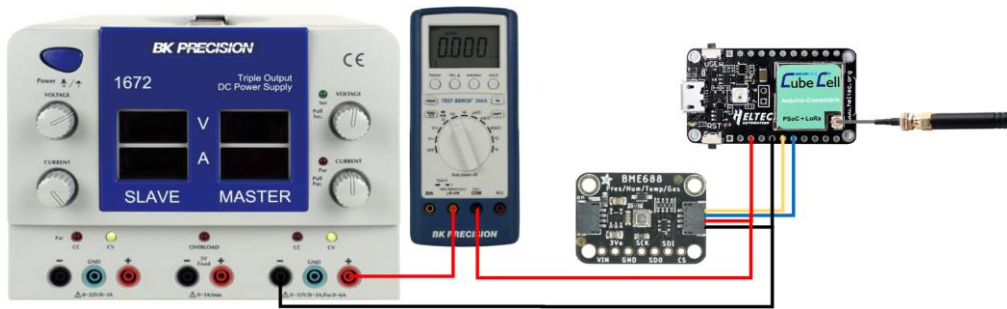


Conociendo el consumo típico del nodo, se realizaron experimentos que permitieron identificar las condiciones mínimas de operación, asegurando que podía desempeñarse con la menor cantidad de energía posible.

4.2.1 Consumo mínimo

Este experimento se llevó a cabo utilizando el montaje ilustrado en la Figura 4-3. Se empleó una fuente de voltaje DC variable (modelo 1672, BK Precision) como suministro de energía y un multímetro (modelo Test Bench 390A, BK Precision) para medir la corriente. Se realizaron dos ensayos bajo las mismas condiciones. La fuente de voltaje se ajustó desde 2 V hasta 3,7 V en incrementos de 0,1 V, obteniendo 18 datos para cada variable: voltaje, corriente en reposo y corriente durante la transmisión de información.

Figura 4-3: Montaje de medición de consumo del nodo.



Los datos registrados se presentan en la Figura 4-4. En esta figura se destaca el punto correspondiente a 2,1 V, donde el nodo se activa en ambos ensayos, pero no alcanza la potencia necesaria para la transmisión de datos. Además, se señala el valor de 2,9 V, donde se logra la transmisión de datos en ambos ensayos.

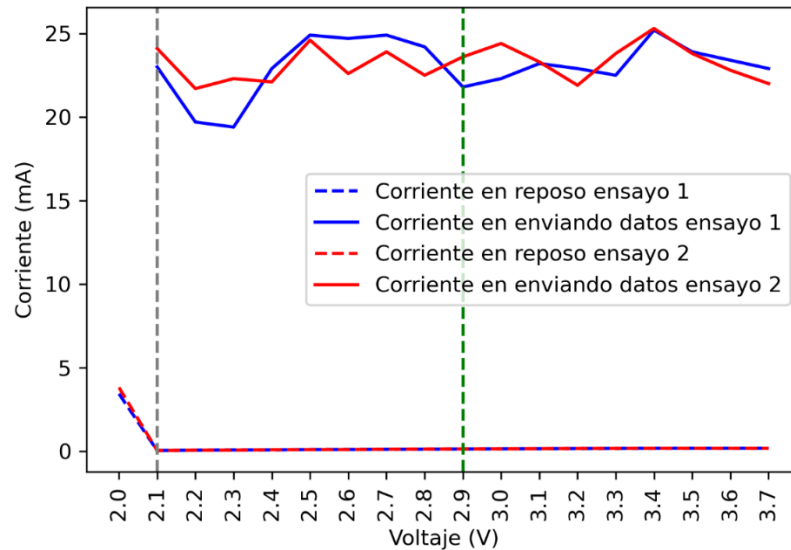
Es importante resaltar que las corrientes varían ligeramente en ambos ensayos, manteniéndose dentro de un rango estrecho entre 19,4 mA y 25,3 mA, dado que la escala de medición está en miliamperios. Sin embargo, el consumo de potencia no es constante, ya que depende de la sincronización de los tiempos entre el Gateway y el nodo para la transmisión y recepción de datos. En ocasiones, la comunicación puede ser más rápida, reduciendo el consumo de potencia debido a tiempos de espera más cortos. En otras, se requiere más tiempo, lo que resulta en un mayor consumo de potencia.

Además, se observa en la Figura 4-4 que en estado de reposo, el consumo de corriente es cercano a 0 mA, lo que representa un consumo mínimo de potencia. La corriente

máxima medida en este estado de reposo es de 0,192 mA, alcanzada a partir de los 3,4 V. Sin embargo, a 2,9 V, se registra una corriente de 21,8 mA durante la transmisión de datos, lo que indica que se requiere una potencia mínima de 63,22 mW para que el nodo funcione correctamente.

Aunque el voltaje ofrecido por la fuente era controlado y confiable, las plataformas utilizadas presentan una pequeña discrepancia entre la medida tomada con equipos de medida y la mostrada en ellas. La diferencia era de 0,1 V, ya que cuando se alcanzó la medida mínima de transmisión que fue 2,9 V la plataforma registró 2,8 V.

Figura 4-4: Relación entre el consumo de corriente del nodo y el voltaje.



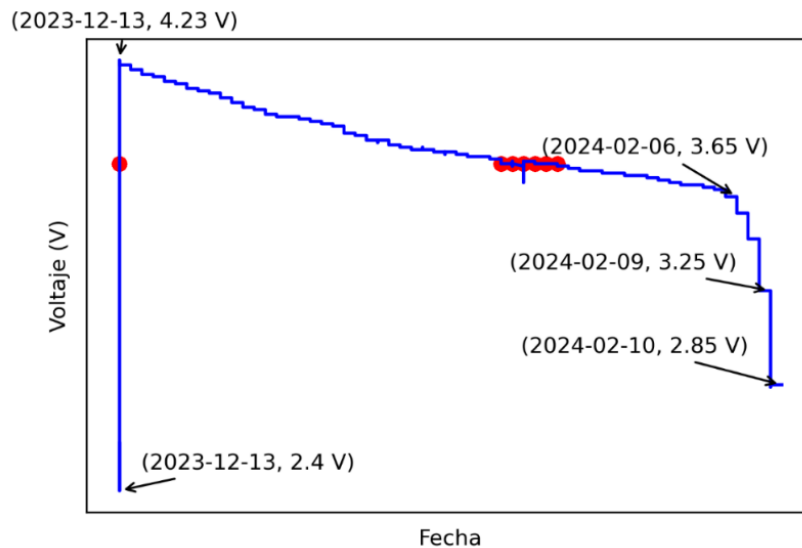
Considerando el valor mínimo de voltaje al que el nodo puede funcionar, se procedió a medir el tiempo de descarga de la batería utilizada en este trabajo, tal como se mencionó en el capítulo 2, con el fin de verificar los valores y los momentos adecuados para programar la alarma.

4.2.2 Descarga de batería

La batería, inicialmente cargada a 4,23 V, se conectó al nodo con el objetivo de realizar una recopilación de datos más precisa para determinar el tiempo en el que el nodo deja de operar debido al agotamiento de la batería. Se llevaron a cabo mediciones programando

el microcontrolador para recopilar datos de temperatura, humedad relativa, concentración de gases y voltaje. Para acelerar este proceso, se ajustó la frecuencia de envío de datos del microcontrolador a cada 3 minutos en lugar de cada 30 minutos, como es la configuración final. Esta modificación se debió a que el nodo consume poca energía y la descarga de la batería es muy gradual. Posteriormente, los datos recopilados fueron transmitidos a las plataformas de IoT, donde se visualizaron para su análisis. La gráfica de la Figura 4-5 muestra la curva de descarga de voltaje del nodo a lo largo del tiempo.

Figura 4-5: Tiempo de descarga de la batería.



En la gráfica previa, se puede observar que la batería inicialmente muestra una descarga lenta, manteniendo un voltaje predominante de 3,79 V, indicado en rojo. Sin embargo, cuando el voltaje desciende a 3,65 V, comienza una descarga acelerada, evidenciando que a partir de este punto la velocidad de descarga es más rápida que al inicio. Este proceso se intensifica aún más al llegar a 3,25 V, momento en el cual la descarga se acelera significativamente. Finalmente, al alcanzar los 2,85 V, se interrumpe el funcionamiento del nodo debido a la pérdida de energía.

Aunque inicialmente se había planeado generar una alarma cuando la batería alcanzara el 50% de su capacidad, es decir, alrededor de 3,515 V, y un aviso adicional al llegar al 20% (aproximadamente 3,086 V), se modificaron estos umbrales de alarma a 3,65 V para

indicar una advertencia de descarga rápida y a 3,25 V para informar que queda poco tiempo de carga. Estos nuevos valores se seleccionaron porque representan los puntos en los que se observa un cambio marcado en la velocidad de descarga, lo que indica que el nodo está a punto de dejar de enviar datos.

El experimento, que se llevó a cabo desde el 13 de diciembre de 2023 hasta el 10 de febrero, tuvo una duración de aproximadamente 2 meses, en los cuales se recopilaban un total de 22,717 datos. Si extrapolamos esta recopilación de datos cada 30 minutos, podemos estimar cuánto tiempo habría tomado recopilar la misma cantidad de datos. Esta estimación resulta en aproximadamente 1 año y 3 meses. Siguiendo el mismo razonamiento, al llegar a 3,25 V, la batería tiene alrededor de 4 días de carga restante.

Con los datos de consumo del nodo confirmados, se verificó en el laboratorio que, por debajo de 2,9 V, el nodo deja de funcionar y no se registran datos en la plataforma. Una vez clarificados estos datos, se procedió a sustituir la batería por un supercondensador y a cargarlo para verificar que el nodo pueda funcionar sin necesidad de utilizar una batería, retomando el montaje mostrado en la Figura 3-29.

4.3 Análisis de la carga del supercapacitor

En esta sección, se llevará a cabo un análisis de los escenarios en los que el supercondensador muestra un mejor rendimiento como fuente de alimentación para el nodo. Estas pruebas se realizaron en condiciones controladas, específicamente en el laboratorio de óptica, fotónica y visión artificial del ITM, así como en el laboratorio de conmutación. Principalmente se utiliza el generador de radiofrecuencia (SMBV100A, Rhode & Schwarz) para garantizar una transmisión constante de ondas electromagnéticas a la potencia y frecuencia requeridas, lo que proporciona una base sólida para los experimentos. Además, se emplea un multímetro (Test Bench 390A, BK Precision) para llevar a cabo las mediciones necesarias durante las pruebas.

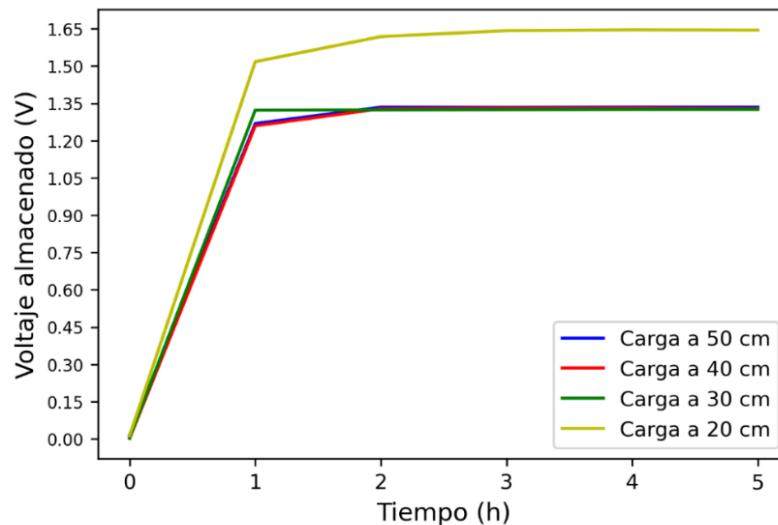
4.3.1 Carga del supercapacitor

Inicialmente, se puso en marcha el sistema de recepción representado en la Figura 4-1 para calcular el tiempo necesario para cargar el supercondensador. Este último se encuentra inicialmente descargado por completo y se conecta en paralelo tanto a la salida de la rectena para permitir su proceso de carga como a los pines de alimentación del

microcontrolador, funcionando así como fuente de energía para el nodo. Se seleccionaron distancias específicas para medir el voltaje DC del supercondensador: 50 cm, 40 cm, 30 cm y 20 cm.

Las pruebas de validación del sistema WPT se llevaron a cabo en el laboratorio de óptica, fotónica y visión artificial. Se utilizó la potencia máxima de transmisión de las ondas de radiofrecuencia a una frecuencia de 2,4 GHz, establecida en 30 dBm, y se registraron datos cada hora. La Figura 4-6 ilustra gráficamente los datos recolectados durante estas pruebas.

Figura 4-6: Tiempo de carga del supercapacitor con el nodo conectado.



La gráfica previa ilustra el tiempo necesario para cargar el supercondensador. En distancias de 50 cm y 40 cm, se observa un patrón similar: la velocidad de carga disminuye después de una hora. Además, alcanzan un voltaje máximo muy cercano, 1,35 V y 1,31 V respectivamente, después de dos horas de carga. En una distancia de 30 cm, el supercondensador alcanza su máximo de almacenamiento (1,326 V) después de una hora, manteniéndose estable durante el resto del tiempo. A una distancia de 20 cm, se registra un voltaje recolectado mayor, alcanzando un máximo de 1,646 V después de 3 horas. En todos los ensayos, se cargó el supercondensador durante 5 horas para evaluar cualquier cambio. Sin embargo, una vez alcanzado el máximo valor, los voltajes no mostraron

cambios adicionales. No se repitieron las mediciones debido a que todos los experimentos mostraron una tendencia a estabilizarse después de alcanzar cierto valor, siendo este insuficiente para encender el nodo. Además, no se realizaron experimentos con distancias menores a 20 cm, ya que se consideraron cortas para la carga inalámbrica del supercondensador.

Dado que el supercondensador no cargó cuando estuvo completamente descargado y conectado al nodo, se exploró la posibilidad de proporcionarle una carga inicial para que el nodo funcione y posteriormente encontrar una distancia en la que pueda mantenerse esa carga.

4.3.2 Distancia de operación

Para mejorar el rendimiento del supercondensador y explorar su comportamiento en distancias mayores, estos nuevos experimentos se llevan a cabo con intervalos de transmisión de datos de 30 minutos, coincidiendo con el tiempo de operación del nodo en este proyecto. Esto proporciona un mayor tiempo de carga al supercondensador y permite un análisis más exhaustivo. El objetivo es alcanzar una distancia mayor mientras se mantiene el voltaje deseado de operación del nodo, que es de 3,303 V. Además, se proporciona una carga inicial al supercondensador para asegurar su funcionamiento continuo. La transmisión se realiza a 30 dBm, que es la potencia máxima ofrecida por el generador de radiofrecuencia, utilizando una frecuencia de 2,4 GHz.

La primera prueba se realiza a 60 cm de distancia entre la transmisión y la recepción, la carga inicial del supercapacitor es de 3,567 V. Sin embargo, al cabo de dos horas, el supercapacitor disminuyó su voltaje a 2,984 V, por lo que se puede decir que la potencia que es ofrecida al supercapacitor a esa distancia no es suficiente para mantener los 3,303 V deseados. Es por ello por lo que se verificó qué voltaje había a la salida de la rectena y este estaba en este caso 3,02 V, razón por lo que no podría mantener un voltaje superior al recibido.

Posteriormente, se buscó una distancia más corta donde el voltaje a la salida de la rectena fuera igual o superior al voltaje deseado. Se probó a una distancia de 57 cm, donde el voltaje de la rectena alcanzó 3,767 V. El supercondensador inicialmente tenía una carga de 3,535 V y luego se conectó a la rectena y al nodo. Después de 3 horas, el voltaje del

supercondensador había disminuido a 3,062 V, lo que no cumplía con el voltaje deseado. Por lo tanto, se procedió a verificar una distancia aún más cercana.

La siguiente distancia fue de 50 cm, el voltaje a la salida de la rectena era de 4,14 V. El supercapacitor inicia con 3,337 V. Al cabo de dos horas el supercapacitor había aumentado su voltaje, alcanzando 3,413 V. El experimento se detuvo en ese tiempo debido a su tendencia de incrementar el voltaje, por lo que se procedió a ensayar con otra distancia mayor.

En esta ocasión se probó a 53 cm, donde el voltaje de salida de la rectena alcanzó 4,09 V. El supercondensador tenía una carga inicial de 3,391 V. Después de una hora, el voltaje había disminuido ligeramente a 3,386 V. Sin embargo, tras esperar una hora adicional, el voltaje se mantuvo constante. Dado que la carga tiende a estabilizarse, se decidió probar otra distancia mayor para confirmar si esta es la distancia máxima alcanzable.

Se aumentaron 2 cm más, quedando con una distancia de 55 cm. El voltaje a la salida del rectificador fue de 4,01 V, mientras que el supercondensador inició con 3,367 V. Después de una hora, el voltaje del supercondensador disminuyó a 3,340 V, y tras otra hora de espera, disminuyó a 3,317 V. Aunque la tendencia era a disminuir, aún se mantenía dentro del rango deseado. Sin embargo, dos horas después, el voltaje cayó a 3,247 V, por debajo del valor deseado, lo que llevó a descartar esta distancia y detener las mediciones.

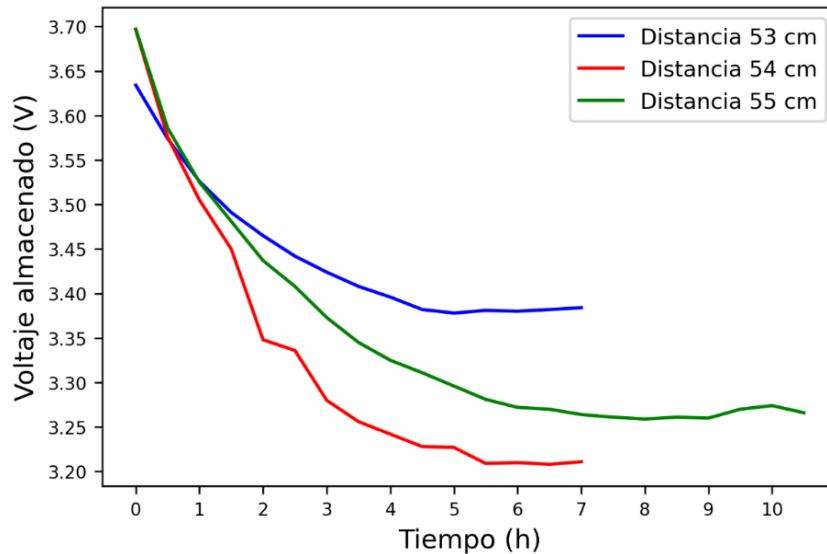
Basándonos en los experimentos anteriores, parece que la mejor distancia alcanzada para la operación del nodo es de 53 cm. Sin embargo, para verificar su repetibilidad y precisión, se realizó una serie de ensayos adicionales en las distancias de 55, 54 y 53 cm para determinar la distancia máxima en la que se puede mantener un voltaje de 3,303 V o superior, pero esta vez en el entorno del laboratorio de conmutación.

Se comenzó con la distancia de 55 cm, donde la rectena proporcionaba un voltaje de 3,890 V y el supercondensador tenía una carga inicial de 3,697 V. Después de 7 horas, el voltaje tendía a estabilizarse en un valor cercano a 3,264 V. Por otro lado, en la distancia de 54 cm, el supercondensador inició con una carga de 3,696 V, mientras que la rectena ofrecía un voltaje ligeramente superior, 3,920 V. Se observó que el tiempo necesario para la

estabilización del voltaje fue más corto, alrededor de 5,5 horas en este caso, con un voltaje estabilizado en aproximadamente 3,209 V, sorprendentemente menor que en la distancia de 55 cm.

A una distancia de 53 cm, la rectena proporcionaba un voltaje de 4,03 V y el supercondensador tenía una carga inicial de 3,634 V. Aunque no logró mantener el voltaje inicial, después de alrededor de 4,5 horas, el supercondensador logró estabilizar su voltaje aproximadamente en 3,382 V y mantenerlo durante otras 2,5 horas antes de concluir la prueba. La Figura 4-7 ilustra el comportamiento del voltaje del supercapacitor con el tiempo para las diferentes distancias.

Figura 4-7: Voltaje del supercapacitor en función del tiempo y distancia.



Estas pruebas permitieron validar lo analizado durante esta sección, demostrando que la mejor distancia para alcanzar el voltaje típico del nodo es de 53 cm. Adicionalmente, se evidenció que es posible mantener la carga del supercapacitor y evitar su completa descarga.

4.3.2.1 Distancia máxima de operación

Una vez establecida la distancia de 53 cm como aquella en la que se logra mantener el voltaje de operación deseado, se llevó a cabo la verificación de la distancia máxima en la

que el nodo podría operar de manera continua con un voltaje mínimo, en este caso, de 2,9 V, como se explica en la Figura 4-4.

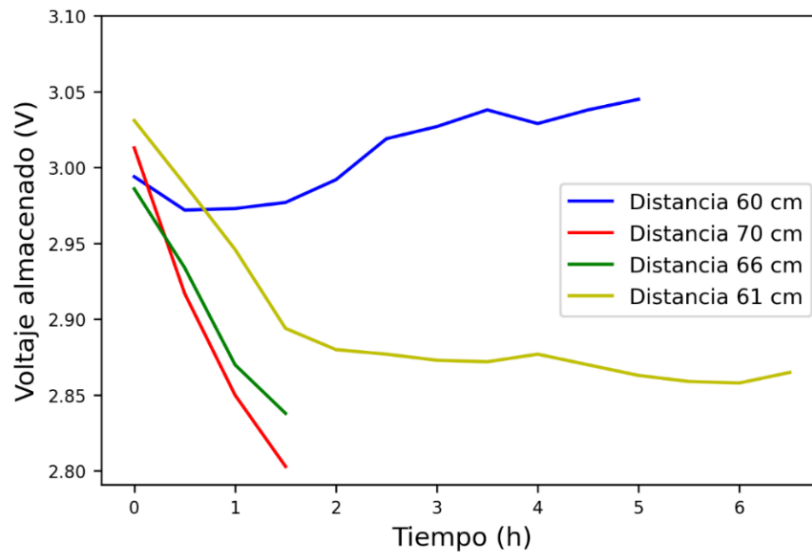
Las pruebas se realizaron en las mismas condiciones que las anteriores, dentro del laboratorio de conmutación, utilizando el generador de radiofrecuencias configurado a 2,4 GHz y operando a su máxima potencia de 30 dBm. Además, el nodo transmitió los datos cada media hora, y los datos de voltaje se registraron también cada media hora. No obstante, en estos ensayos, el voltaje inicial del supercondensador se mantuvo cerca de los 3 V para todas las distancias probadas. La Figura 4-8 presenta gráficamente el comportamiento de descarga del supercondensador en función del tiempo de operación y la distancia. Las distancias utilizadas para este experimento fueron 60 cm, 61 cm, 66 cm y 70 cm. Los datos correspondientes a las distancias de 66 cm y 70 cm se tomaron solo durante 1,5 horas, ya que por su tendencia decreciente no se justificaba seguir tomando datos, pues los valores alcanzados estaban por debajo del punto de operación mínimo del nodo.

Se comenzó con una distancia de 60 cm, donde la rectena suministraba un voltaje de 3,453 V y el supercondensador estaba inicialmente en 2,994 V. La Figura 4-8 muestra que después de media hora se alcanzó el valor más bajo de 2,972 V. Sin embargo, a partir de ese punto, el voltaje comenzó a aumentar y a las 3,5 horas, se estabilizó alrededor de los 3,040 V. Luego, se aumentó la distancia a 70 cm. Aquí, el supercondensador comenzó con 3,013 V, similar al suministrado por la rectena, 3,017 V. Sin embargo, solo se recopilaron 4 datos en 1,5 horas, como se muestra en la Figura 4-8, ya que después de una hora el voltaje del supercondensador disminuyó a 2,850 V y dejó de transmitir datos, lo que indica una velocidad de descarga más rápida que la de carga.

Se continuó con una distancia de 66 cm, donde el supercondensador tenía un voltaje inicial de 2,986 V y la rectena proporcionaba 3,194 V. Sin embargo, esto no fue suficiente para evitar la descarga; al igual que a 70 cm, el supercondensador cayó por debajo de 2,9 V, alcanzando 2,870 V después de una hora, lo que impidió su correcto funcionamiento y continuó descargándose. Finalmente, se realizó una prueba a 61 cm, con 3,231 V a la salida de la rectena y un voltaje inicial de 3,031 V en el supercondensador como se muestra en la Figura 4-8. A pesar de que después de 1,5 horas también cayó por debajo de los 2,9 V deseados, llegando a 2,894 V, se decidió prolongar el tiempo de análisis. Sin embargo,

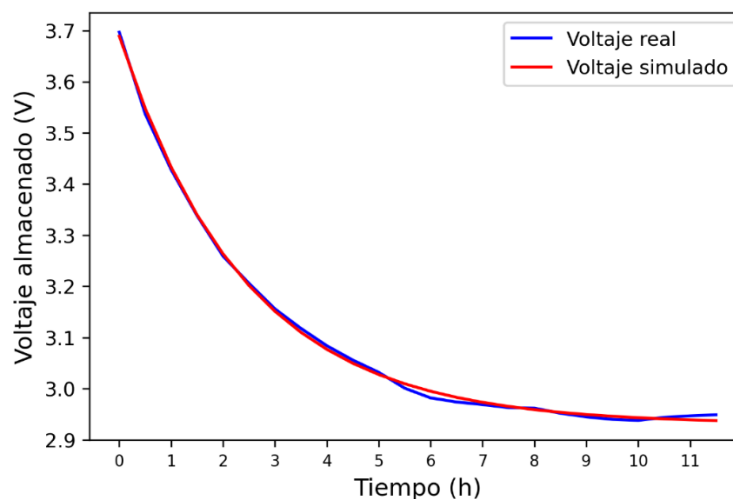
no fue hasta después de 5,5 horas que pudo estabilizarse en un voltaje aproximado de 2,865 V, valor insuficiente para el funcionamiento del nodo.

Figura 4-8: Voltaje del supercapacitor en función del tiempo y distancia.



A partir de los datos previos, se sospechaba que la distancia máxima para que el sistema de recepción de energía inalámbrica proporcionara el voltaje necesario al supercondensador para alimentar el nodo era de 60 cm. No obstante, se volvieron a validar los datos a esta distancia y, a pesar de que esta vez hubo una descarga ligeramente mayor como se aprecia en la Figura 4-9, el nodo continuó operando correctamente.

Figura 4-9: Voltaje del supercapacitor en función del tiempo a 60 cm.



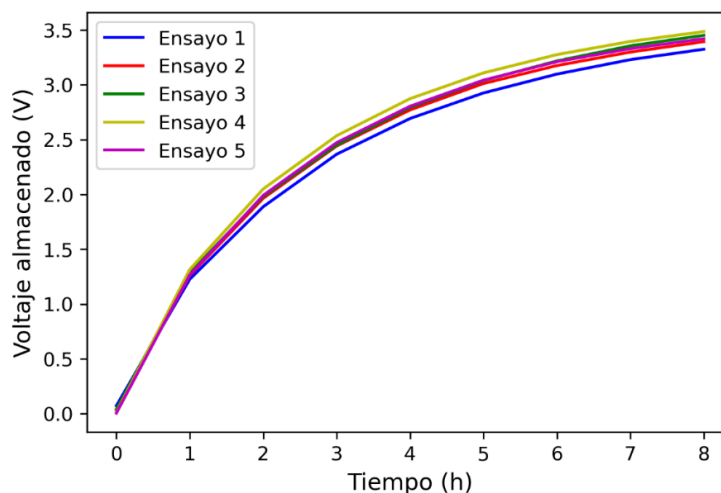
Además, en la misma figura, se puede apreciar que la respuesta del voltaje con el tiempo sigue un patrón exponencial decreciente. Este comportamiento puede ser representado matemáticamente mediante la siguiente función, donde $f(t)$ indica el valor del voltaje según el tiempo t :

$$f(t) = 0,758 \cdot e^{-0,412 \cdot t} + 2,931 \quad (4.1)$$

4.3.3 Tiempo de carga de supercapacitor

Las pruebas se realizaron a una distancia de 53 cm, siendo esta la máxima distancia alcanzada para obtener un voltaje igual o superior a 3,3 V, requerido para el funcionamiento del nodo. El objetivo principal fue determinar el tiempo necesario para cargar el supercondensador cuando no estaba conectado a ningún otro elemento, con el fin de conocer cuánto tiempo tardaba en alcanzar un voltaje adecuado. Se empleó el montaje mostrado en la Figura 3-29, con la transmisión configurada a 30 dBm, que representa el valor máximo de transmisión, y a una frecuencia de 2,4 GHz. En la etapa receptora, se utilizó la rectena conectada al supercondensador para registrar los datos de voltaje en intervalos de una hora, comenzando con el supercondensador completamente descargado. La Figura 4-10 ilustra cómo varía el voltaje a lo largo del tiempo. Sin embargo, los valores se registraron únicamente hasta que se registró el tiempo necesario para alcanzar el voltaje típico de funcionamiento del nodo.

Figura 4-10: Voltaje del supercapacitor en función del tiempo a 53 cm.



Los cinco ensayos se llevaron a cabo para garantizar la consistencia de los datos registrados. Es importante destacar que el ensayo 2 reveló que el supercapacitor alcanzó la carga necesaria una hora antes que en el ensayo 1; específicamente, en la hora 7, alcanzó un voltaje de 3,299 V, mientras que en el ensayo 1 se logró en la hora 8. Este hallazgo motivó la realización de los ensayos restantes. Además, los ensayos 3, 4 y 5 lograron alcanzar el voltaje esperado en la hora 7 de carga, con valores de 3,356 V, 3,396 V y 3,330 V respectivamente. Aunque se observaron variaciones entre los ensayos, estas se consideraron insignificantes ya que en todos se logró el objetivo de cargar el supercapacitor. Además, Considerando también la información proporcionada en la Figura 5-4, que detalla el consumo del nodo y confirma que este requiere una potencia mínima de 2,9 V, se puede observar en la Figura 5-10 que tras 5 horas de carga, el supercondensador logra alcanzar el voltaje necesario para cubrir esta necesidad.

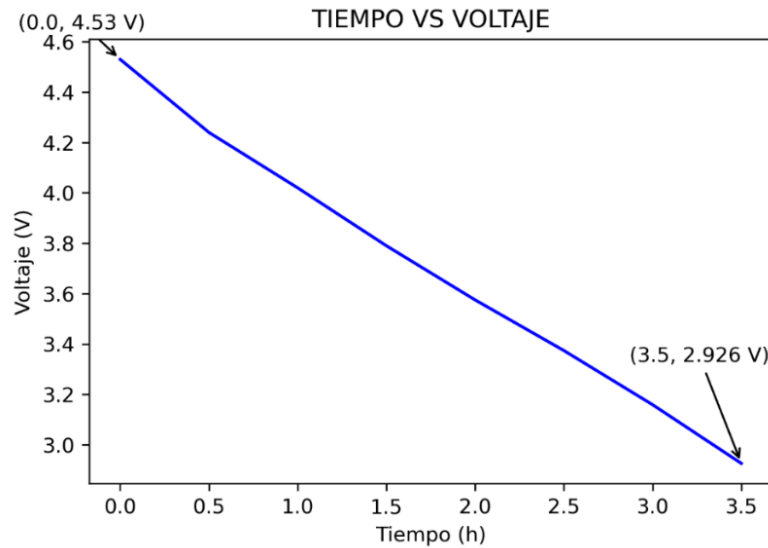
Una vez determinado el tiempo de carga del supercondensador, se pasó a analizar el tiempo que tarda en descargarse hasta que deja de enviar datos.

4.3.4 Descarga de supercapacitor

Este experimento se llevó a cabo de manera similar al realizado para medir el tiempo de descarga de la batería, como se explica en el numeral 4.2.2 del capítulo. Se comenzó con un valor inicial de voltaje del supercapacitor con el nodo completamente conectado de 4,53 V, y se envían los datos cada 3 minutos para acelerar el proceso de registro.

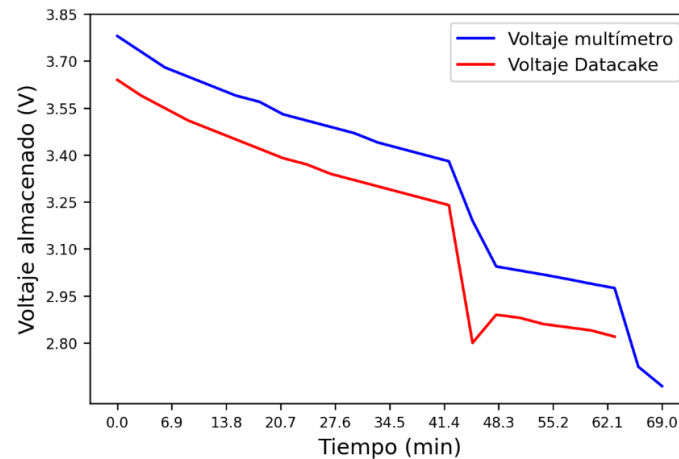
La Figura 4-11 exhibe los datos obtenidos en la plataforma Datacake, utilizados para analizar el proceso de descarga del supercondensador. Se destaca una tendencia lineal en este proceso, con una duración aproximada de 3,5 horas antes de completar su descarga. Si se extrapolan estos resultados a un escenario donde los datos se envían cada 30 minutos, se estima que el supercondensador puede mantener el sistema alimentado durante aproximadamente 35 horas.

Figura 4-11: Tiempo de descarga del supercapacitor.



Adicionalmente, se llevó a cabo un experimento destinado a contrastar las mediciones de voltaje proporcionadas por la plataforma Datacake con las obtenidas mediante el multímetro utilizado (Test Bench 390A, BK Presicion). La Figura 4-12 muestra estas discrepancias. El voltaje de inicio es de 3,64 V registrado en Datacake, mientras que el medido refleja un valor 3,78 V. Aunque, no es el máximo que soporta el nodo, el voltaje inicial es suficiente ya que lo que se quiere es conocer el límite inferior en que el nodo no envía más información. Además, se observa que la plataforma deja de recibir datos cuando el voltaje alcanza alrededor de 2,83 V en Datacake, mientras que la medición tomada con el multímetro es de 2,975 V. Asimismo, se aprecia una diferencia de aproximadamente 0,14 V entre la mayoría de las mediciones. También se destaca que, en el minuto 42, ambas mediciones disminuyen rápidamente. En ese momento, se registra un voltaje de 3,24 V en Datacake, lo cual respalda lo observado con la batería en la Figura 4-5, donde se muestra que a 3,25 V se acelera la velocidad de descarga.

Figura 4-12: Comparación de medidas de voltaje entre Datacake y multímetro.



4.4 Experimento de campo

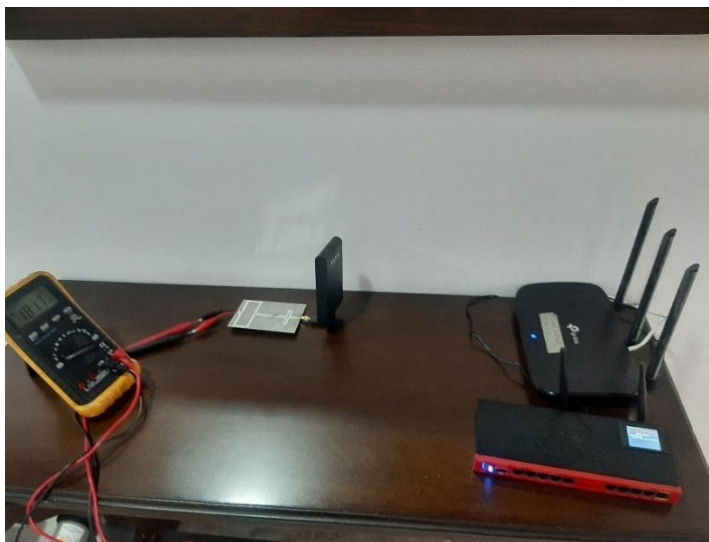
El proyecto tiene como objetivo capturar la mayor cantidad posible de energía inalámbrica disponible en la banda de frecuencia de 2,4 GHz del entorno. Para lograrlo, se realizó un experimento en un ambiente más realista, utilizando equipos industriales y domésticos para verificar la eficiencia del resultado. La Figura 4-13 ilustra el montaje final realizado, en el cual se observa la rectena capturando energía electromagnética de dos enrutadores. Sin embargo, es importante destacar que el experimento se llevó a cabo de forma gradual.

Inicialmente, se utilizó un enrutador comercial (WR940N, TP-LINK), adecuado tanto para entornos industriales como domésticos. Este enrutador posee tres antenas que ofrecen acceso a internet a 2,4 GHz. Con este equipo, la rectena alcanzó a suministrar un voltaje comprendido entre 30 mV y 52 mV a una distancia de 22 cm. A distancias mayores, el voltaje recibido era significativamente menor, por lo que se optó por mantener la distancia de 22 cm. El supercondensador se mantuvo cargando durante una semana y logró alcanzar una carga de 0,742 V.

Posteriormente, se ensayó con un enrutador rompemuros (RB2011, Routerboard MicroTik), utilizado industrialmente debido a su potente señal. Con este enrutador, la rectena lograba suministrar entre 107 mV y 115 mV también a una distancia de 22 cm. Luego, se procedió a utilizar ambos enrutadores conjuntamente, como se muestra en la Figura 4-13. De esta manera, se logró recibir aproximadamente 181,7 mV y, tras cinco días, el supercapacitor se cargó a 2,2 V. Aunque se mantuvo cargando por un día adicional, no hubo cambios en el voltaje medido.

Debido a que este voltaje no era suficiente para que el nodo operara, se probó un amplificador de voltaje (NCP1402, Sparkfun), que aumenta voltajes DC desde 0,9 V hasta 3,3 V. A pesar de que el amplificador lograba elevar el voltaje y aumentar ligeramente la corriente, solo permitía enviar datos de manera inconstante. Además, al ser un circuito energizado continuamente, el supercapacitor se descargaba rápidamente, impidiendo mantener la carga necesaria para el funcionamiento del nodo.

Figura 4-13: Ensayos de transferencia inalámbrica con ruteadores.



4.5 Análisis general

El sistema WPT utilizó un supercapacitor como dispositivo de almacenamiento de energía para alimentar el nodo y se identificó que, aunque el supercapacitor no logra cargarse a una distancia de 60 cm teniendo el nodo conectado, al iniciar con un voltaje mínimo de 3 V se evita su descarga, garantizando así la operación del nodo a 60 cm de distancia. Este uso del supercapacitor se dio como respuesta a la necesidad de que la batería tampoco carga bajo las condiciones dadas y también requiere una mayor potencia. La batería de litio de 3,7 V y 1050 mAh empleada en este proyecto necesita 4,2 V y una corriente mínima de 190 mA para cargarse correctamente, según las especificaciones de fabricantes [101, 102], valores que no se alcanzan a 60 cm, donde solo se logra un voltaje entre 3,4 y 3,5 V, insuficiente para cargar la batería. Aunque la Tabla 3-1 indica un voltaje de 7,68 V a la

salida del rectificador a una frecuencia de 2,4 GHz, la corriente máxima obtenida es de 22,3 mA, lo cual sigue siendo insuficiente para la carga. Sin embargo, se realizaron investigaciones adicionales sobre otras baterías recargables, utilizando las plataformas de compra online *Mouser Electronics* (<https://co.mouser.com/>) y *Digikey* (<https://www.digikey.es/>) para buscar productos con las especificaciones adecuadas. Allí se encontró que las baterías con valores inferiores a 3,6 V no ofrecían suficiente potencia para el funcionamiento del nodo, mientras que aquellas con un valor igual o superior requerían al menos 60 mA y 4,2 V para ser cargadas, algo que no es posible alcanzar en el momento con este proyecto a través de WPT.

Tras realizar los experimentos y obtener los parámetros típicos y mínimos de operación del nodo y al integrarlo con el sistema WPT desarrollado conectándolo a la rectena, se estableció que la distancia máxima en la que el nodo pudo mantenerse en operación continua fue de 60 cm. Esto imposibilita realizar un experimento de campo en el bosque debido a las dificultades para transportar y conectar el generador de señales. No obstante, en los ensayos de laboratorio, el nodo obtuvo los datos de temperatura, humedad relativa, presencia de humo y estado de carga a esa distancia, los resultados fueron visualizados a través de la plataforma Datacake, donde se observó el comportamiento de las variables en la interfaz gráfica sin ningún inconveniente.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El sistema de monitoreo y alerta temprana propuesto, basado en redes de sensores inalámbricas y transferencia de energía inalámbrica, ha logrado cumplir su objetivo al proporcionar una solución en la recolección de datos sobre el estado de salud de los ecosistemas de bosques a través de las variables de temperatura ambiente, humedad relativa y concentración de gases. Esta orientación no solo permite una monitorización y procesamiento de datos, sino que también ofrece el servicio de alertas ante la detección de cambios en las variables, lo cual es fundamental para identificar riesgos potenciales de incendios. Además, la integración con la tecnología de recolección de energía inalámbrica asegura un suministro energético sostenible, reduciendo la dependencia de baterías y aumentando la viabilidad del sistema en entornos remotos. Esto contribuye a la preservación y protección de los ecosistemas forestales, facilitando la intervención oportuna y la toma de decisiones informadas para mitigar los impactos negativos. A largo plazo, esta solución tecnológica tiene el potencial de ser escalada y adaptada a otros tipos de ecosistemas, fortaleciendo los esfuerzos globales de conservación ambiental.

Los nodos establecieron una comunicación eficaz utilizando LoRaWAN para la transmisión de información de temperatura, humedad relativa y detección de humo. Esto permite que al menos un usuario pueda acceder y visualizar la información en tiempo real y recibir alertas ante anomalías a través de la plataforma. Esto representa un progreso en la capacidad de monitoreo y control, brindando una solución accesible y robusta para la adquisición de variables ambientales.

La implementación exitosa de redes inalámbricas de sensores requiere una evaluación del entorno físico y las características del terreno ya que el entorno físico influye en la

propagación de señales, con obstáculos que pueden interrumpir la línea de vista y afectar la estabilidad de la conexión. Esto implica considerar la topografía, obstáculos naturales y artificiales, clima y distancia entre nodos para que los nodos maximicen la cobertura de la red y aseguren una comunicación confiable.

La existencia de una línea de vista directa entre los nodos y el Gateway ayuda a mejorar la eficiencia y la fiabilidad de la comunicación inalámbrica. La presencia de esta línea de vista no solamente facilita la transmisión de datos a distancias más largas, sino que también establece una conexión más robusta y estable entre los dispositivos. Aunque la línea de vista es un factor importante para la comunicación, en distancias cortas, la presencia de obstáculos no necesariamente impide la transmisión de datos, siempre y cuando estos no sean de gran tamaño y no interfieran significativamente con la señal.

Las diferencias en las medidas del rectificador entre la simulación y los resultados experimentales se deben a las condiciones ideales y los modelos matemáticos utilizados en la simulación, que intentan representar el comportamiento de los elementos de manera más realista. Sin embargo, la simulación no toma en cuenta factores ambientales como la interferencia electromagnética o los procedimientos de fabricación y soldadura de los componentes, que pueden afectar las características del sistema de manera diferente a la que se modeló inicialmente.

El supercapacitor se implementó como alternativa a las baterías para el almacenamiento de energía debido a la baja potencia que necesita para alcanzar su carga respecto a una batería. Además, características como su mayor número de ciclos de carga y descarga y su capacidad de carga y descarga más rápida, lo hace una solución ideal para dispositivos de bajo consumo de energía. El supercondensador también tiene un tamaño más pequeño y un ciclo de vida más largo, lo que ayuda a proteger el medio ambiente. A pesar de que su descarga rápida puede ser un inconveniente, se puede superar utilizando energías renovables como la solar y la eólica, e incluso combinándola con una batería para prolongar la vida útil de esta última.

El sistema de transferencia de energía inalámbrica se compone de un generador de señales, una antena Yagi microcinta y una rectena para recibir. La rectena está formada por la antena Alfa y el sistema de rectificación diseñado funciona correctamente para

transferir energía. Además, al usar un supercondensador de 4 F como carga en la salida de la rectena, se puede almacenar energía. Esto demuestra una solución para el aprovechamiento de energía. Sin embargo, debido a las limitaciones del diseño actual, actualmente no es posible realizar pruebas de campo. No obstante, existe la posibilidad de mejorar el diseño en el futuro trabajo, lo que podría conducir a un mejor rendimiento del sistema. Lo que podría mejorar la captura de señales sería agregar una antena receptora UWB de alta ganancia, un arreglo de antenas o trabajar con otro dispositivo de captación de señales EM como un absorbedor [25]. Esto podría mejorar la eficiencia del sistema y aumentar su capacidad para recibir señales en un rango más amplio de frecuencias.

La integración de los sistemas de redes inalámbricas de sensores y transferencia de energía inalámbrica resultó exitosa, logrando una distancia máxima de 60 cm para mantener el correcto funcionamiento del nodo y transmitir la información recolectada a las plataformas IoT empleadas en este proyecto. Sin embargo, se encontró que si el supercapacitor carece de una carga inicial al ser conectado al nodo, no se logra obtener la carga requerida para su funcionamiento. Afortunadamente, se descubrió una alternativa viable: mantener la carga del supercondensador. Este detalle destacó la importancia de pre-cargar el supercapacitor con al menos 3 V para asegurar su correcto funcionamiento. Aunque el enfoque inicial de carga directa del supercondensador no arrojó los resultados esperados, el descubrimiento de la viabilidad de mantener su carga ofrece una base para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la transferencia inalámbrica de energía y las aplicaciones de redes inalámbricas de sensores.

A diferencia de la red inalámbrica de sensores, que permitió la realización de ensayos en diversos entornos, la transferencia de energía inalámbrica y la integración del sistema se trabajaron en ambientes controlados para minimizar las pérdidas y asegurar resultados más precisos. Sin embargo, las pruebas realizadas con enrutadores de uso industrial y doméstico demostraron que estas fuentes no son adecuadas para suministrar la energía necesaria en este momento. Por lo tanto, para lograr una transferencia de energía inalámbrica más eficiente, es importante utilizar un generador de señales, lo que permitiría obtener una mayor distancia de transmisión y mejorar la eficiencia del sistema. Estos hallazgos indican que, como trabajo futuro, es fundamental optimizar el sistema de recepción de energía para garantizar una mayor recolección y así lograr un suministro

constante y adecuado para el funcionamiento de los nodos de una red inalámbrica de sensores.

5.2 Recomendaciones

Es importante resaltar que es posible perfeccionar el sistema. El circuito rectificador puede mejorarse para incrementar su eficiencia y se pueden desarrollar antenas más eficientes que las utilizadas. Considerar el uso de arreglos de antenas puede aumentar la capacidad de recolección de energía, y la implementación de absorbedores de energía electromagnética también contribuirá a la eficiencia del sistema. Para mejorar el rendimiento general, se recomienda fabricar los rectificadores en el mismo lugar, minimizando así las variaciones en las medidas debido a factores ambientales y de producción. Además, trabajar con PCBs estañadas es beneficioso, ya que la aleación de cobre y estaño proporciona una mayor resistencia a la oxidación y ayuda a mantener la calidad de la señal, reduciendo las pérdidas. No obstante, es importante considerar también otros materiales que ofrezcan una mejor conducción. Finalmente, complementar el sistema con energías alternativas, como la solar y la eólica, proporcionará fuentes adicionales de energía que mejorará la sostenibilidad de energía del sistema.

A. Anexo: Carta de Smith

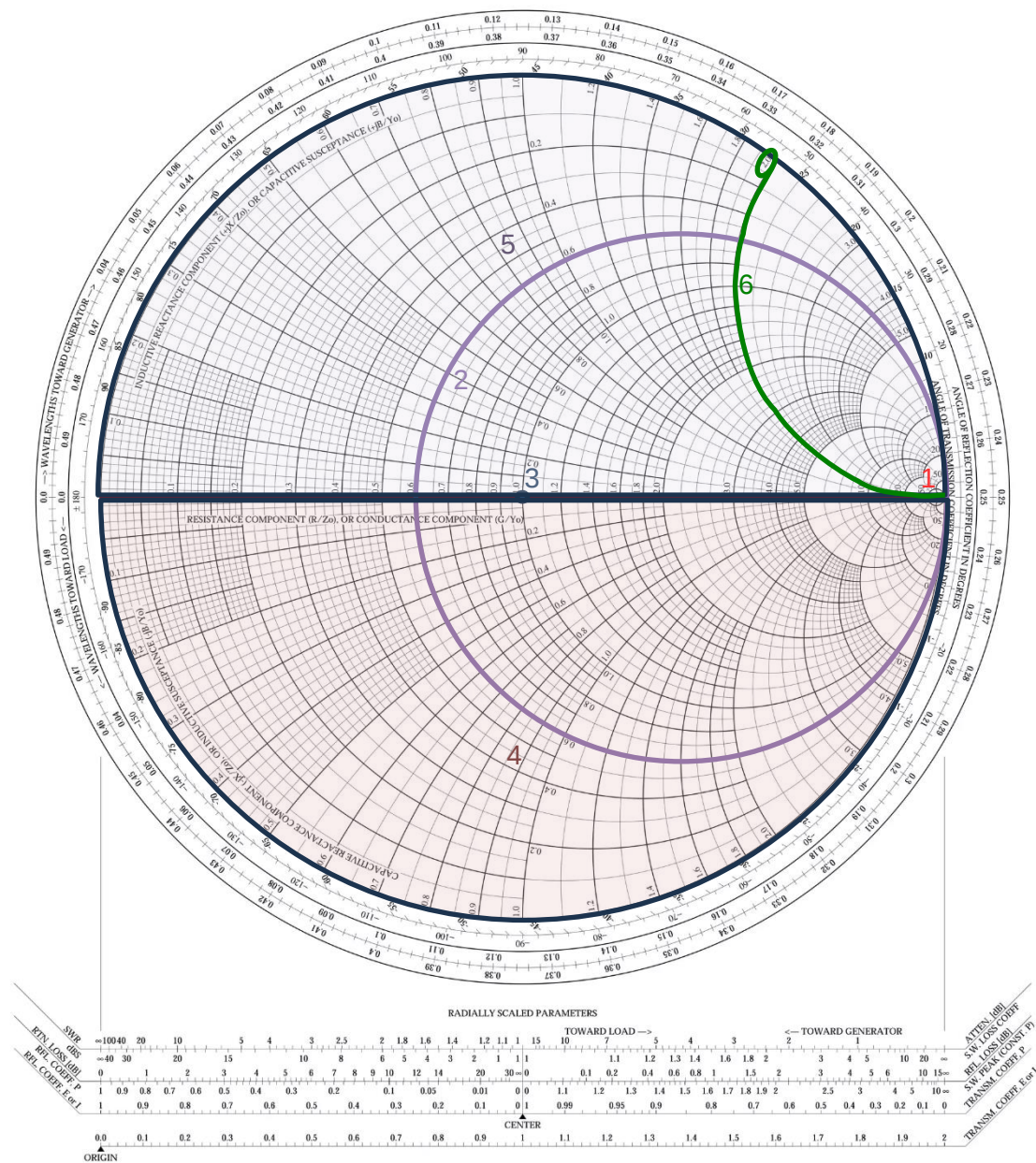
La carta de Smith es una herramienta gráfica que utiliza el plano complejo del coeficiente de reflexión, lo que permite ubicar resistencias y reactancias normalizadas para determinar una impedancia [59]. A continuación, se explica cómo interpretar una carta de Smith típica, como se muestra en la Figura A-1.

En la imagen, se observa una línea roja marcada con el número 1, que representa el eje horizontal o eje de resistencia normalizada, indicando la parte real de la impedancia de una carga. Además, se pueden ver círculos de resistencia normalizada, como el ejemplo señalado en amarillo con el número 2, cuyo centro está sobre este eje. Estos círculos son útiles para identificar la parte real de la impedancia al proyectar su circunferencia hacia el eje horizontal y determinar su intersección. A medida que el valor de la resistencia aumenta a lo largo del eje horizontal, comenzando con el círculo exterior más grande que tiene un valor de 0, los círculos se hacen más pequeños y se desplazan hacia la derecha. Adicionalmente, cuando la impedancia de una carga coincide exactamente con el eje horizontal, significa que no tiene componente imaginaria. Del mismo modo, si la resistencia se encuentra en el punto azul marcado con el número 3 en este eje, la impedancia es ideal y no hay pérdida [59, 97, 104, 105].

La parte imaginaria de una impedancia indica la naturaleza de la reactancia asociada, que puede ser inductiva o capacitiva. Cuando la reactancia es negativa, se representa gráficamente debajo del eje horizontal (área marcada como punto 4), lo cual indica que la impedancia tiene una componente capacitiva. Por el contrario, una reactancia positiva se encuentra por encima del eje horizontal (área marcada como número 5), indicando una componente inductiva [59, 97, 104, 105]. Por otro lado, las curvas que parten desde el extremo derecho del eje horizontal y se proyectan hacia el primer círculo exterior permiten determinar los valores de la parte imaginaria de la impedancia. En el ejemplo señalado en

verde como número 6, se puede observar el punto de intersección de la curva con el círculo exterior, obteniendo así el valor correspondiente, que también está encerrado en verde para mayor claridad. Para ajustar la impedancia de una carga hacia una configuración más cercana a la ideal, es esencial incorporar inductores y capacitores [105, 106]

Figura A-1: Carta de Smith. Imagen adaptada de [103]



La carta de Smith también incluye dos escalas circulares exteriores: una dividida en grados y la otra en fracciones de longitud de onda (λ). La escala de grados facilita la lectura del ángulo del coeficiente de reflexión, mientras que la escala de fracciones de λ permite la localización de un punto a lo largo de una línea de transmisión, en relación con la longitud de onda de la señal que se está transmitiendo. Es importante destacar que una vuelta completa en la carta, en cualquiera de las dos direcciones, equivale a avanzar media longitud de onda, siguiendo el principio de las ondas estacionarias según la teoría [59].

Bibliografía

- [1] A. Lausch *et al.*, “Understanding Forest Health with Remote Sensing, Part III: Requirements for a Scalable Multi-Source Forest Health Monitoring Network Based on Data Science Approaches,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 10, no. 7, p. 1120, Jul. 2018, doi: 10.3390/rs10071120.
- [2] S. Ecke *et al.*, “UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 13, p. 3205, Jul. 2022, doi: 10.3390/rs14133205.
- [3] J. S. Estrada, A. Fuentes, P. Reszka, and F. Auat Cheein, “Machine learning assisted remote forestry health assessment: a comprehensive state of the art review,” *Front Plant Sci*, vol. 14, Jun. 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1139232.
- [4] IDEAM, “Bosques y Recurso Forestal.” Accessed: Aug. 28, 2022. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/bosques-y-recurso-forestal>
- [5] H. M. Hernández Barrios, “Lo que usted debe saber sobre incendios de cobertura vegetal,” Bogotá, 2019.
- [6] R. V. Hurzhii, S. H. Sydorenko, and Y. I. Andrusyak, “Approaches to research and classification of forest fuel,” *Folia Forestalia Polonica, Series A*, vol. 65, no. 3, pp. 127–135, Sep. 2023, doi: 10.2478/ffp-2023-0013.
- [7] D. R. Amol, “Prediction of Fire Propagation in Forest Areas using Genetic Algorithm,” *ITM Web of Conferences*, vol. 32, p. 03046, 2020, doi: 10.1051/itmconf/20203203046.
- [8] I. Zacharakis and V. A. Tsihrintzis, “Environmental Forest Fire Danger Rating Systems and Indices around the Globe: A Review,” Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/land12010194.

- [9] RAE, “Combustible,” <https://dle.rae.es/combustible>.
- [10] Q. Meng, H. Lu, Y. Huai, H. Xu, and S. Yang, “Forest Fire Spread Simulation and Fire Extinguishing Visualization Research,” *Forests*, vol. 14, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/f14071371.
- [11] J. R. Molina, M. Ortega, and F. Rodríguez y Silva, “Fire ignition patterns to manage prescribed fire behavior: Application to Mediterranean pine forests,” *J Environ Manage*, vol. 302, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114052.
- [12] Ministerio de Ambiente and IDEAM, “Estrategia Integral de Control a la Deforestación: Actualización de cifras de monitoreo de bosques 2016,” 2016.
- [13] Ministerio de Ambiente and IDEAM, “Estrategia Integral de Control a la Deforestación y Gestión de Los Bosques en Colombia,” 2018.
- [14] H. Ponce, S. Gutiérrez, J. Botero-Valencia, D. Marquez-Viloria, and L. Castano-Londono, “An intelligent climate monitoring system for hygrothermal virtual measurement in closed buildings using Internet-of-things and artificial hydrocarbon networks,” *Heliyon*, vol. 10, no. 11, p. e31716, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31716.
- [15] J. Botero-Valencia, A. Martinez-Perez, R. Hernández-García, and L. Castano-Londono, “Exploring Spatial Patterns in Sensor Data for Humidity, Temperature, and RSSI Measurements,” *Data (Basel)*, vol. 8, no. 5, p. 82, Apr. 2023, doi: 10.3390/data8050082.
- [16] J. S. Botero-Valencia, C. Barrantes-Toro, D. Marquez-Viloria, and J. M. Pearce, “Low-cost air, noise, and light pollution measuring station with wireless communication and tinyML,” *HardwareX*, vol. 16, p. e00477, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.ohx.2023.e00477.
- [17] Y. M. Liu, S. C. Wu, and X. H. Nian, “The architecture and characteristics of wireless sensor network,” in *ICCTD 2009 - 2009 International Conference on Computer Technology and Development*, IEEE, 2009, pp. 561–565. doi: 10.1109/ICCTD.2009.44.

- [18] D. Kanellopoulos, V. K. Sharma, T. Panagiotakopoulos, and A. Kameas, "Networking Architectures and Protocols for IoT Applications in Smart Cities: Recent Developments and Perspectives," Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/electronics12112490.
- [19] F. Cui, "Deployment and integration of smart sensors with IoT devices detecting fire disasters in huge forest environment," *Comput Commun*, vol. 150, pp. 818–827, 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2019.11.051.
- [20] A. E. Marcu, G. Suciu, E. Olteanu, D. Miu, A. Drosu, and I. Marcu, "IoT system for forest monitoring," in *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2019*, IEEE, 2019, pp. 629–632. doi: 10.1109/TSP.2019.8768835.
- [21] H. Wang, W. Li, D. Xu, and J. Kan, "A hybrid microenergy storage system for power supply of forest wireless sensor nodes," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.3390/electronics8121409.
- [22] M. R. U. Rehman *et al.*, "A design of adaptive control and communication protocol for swipt system in 180 nm cmos process for sensor applications," *Sensors*, vol. 21, no. 3, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/s21030848.
- [23] A. A. Eteng, H. H. Goh, S. K. A. Rahim, and A. Alomainy, "A Review of Metasurfaces for Microwave Energy Transmission and Harvesting in Wireless Powered Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 27518–27539, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058151.
- [24] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, and C. Cecati, "Wireless Power Transfer - An Overview," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1044–1058, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2835378.
- [25] F. Umaña-Idarraga, D. Cataño-Ochoa, S. Montoya-Villada, C. Valencia-Balvin, and E. Reyes-Vera, "Design of a perfect and multi-resonant metamaterial absorber for electromagnetic energy harvesting applications," *J Phys Conf Ser*, vol. 2118, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2118/1/012005.

- [26] O. O. I. Orimoogunje, "Forest cover changes and land use dynamics in oluwa forest reserve, Southwestern Nigeria," *Journal of Landscape Ecology*, vol. 7, no. 2, pp. 25–44, 2014, doi: 10.2478/jlecol-2014-0014.
- [27] Toshiba News and Highlights, "Toshiba Wireless Power Transfer." Accessed: Jun. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=rG0pXv9WTUQ>
- [28] M. Wang *et al.*, "Broadband Implantable Antenna for Wireless Power Transfer in Cardiac Pacemaker Applications," *IEEE J Electromagn RF Microw Med Biol*, vol. In press, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1109/JERM.2020.2999205.
- [29] S. Trevisani and P. D. Omodeo, "Earth Scientists and Sustainable Development: Geocomputing, New Technologies, and the Humanities," *Land (Basel)*, vol. 10, no. 3, pp. 1–17, 2021.
- [30] M. R. Sarker, M. H. M. Saad, J. L. Olazagoitia, and J. Vinolas, "Review of power converter impact of electromagnetic energy harvesting circuits and devices for autonomous sensor applications," May 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/electronics10091108.
- [31] S. W. Nourildean, M. D. Hassib, and Y. A. Mohammed, "Internet of things based wireless sensor network: a review," Jul. 01, 2022, *Institute of Advanced Engineering and Science*. doi: 10.11591/ijeecs.v27.i1.pp246-261.
- [32] Manisha, R. Kaur, D. Kaur, and R. Kaur, "An Overview on Network Topologies," *International Journal of Modern Developments in Engineering and Science*, vol. 2, no. 4, pp. 40–43, Apr. 2023, [Online]. Available: <https://www.ijmdes.com>
- [33] International Telecommunication Union, "Impact of industrial, scientific and medical (ISM) equipment on radiocommunication services - ITU-R SM.2180," Geneva, Sep. 2011.
- [34] International Telecommunication Union, "Acerca de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)," <https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx#/es>.
- [35] International Telecommunication Union, "Resolutions and Opinions," <https://www.itu.int/pub/T-RES>.

- [36] E. Ikechukwu H. and I. A. Ezenugu, "Challenges of Bandwidth and Power Limitations in Cellular Communication: A Review," *Journal of Mobile Computing & Application* , pp. 1–11, Jul. 2020.
- [37] LoRa Alliance, "Security FAQ," Fremont.
- [38] A. Kumbhar, "Overview of ISM bands and Software-defined Radio Experimentation," *Wirel Pers Commun*, vol. 97, no. 3, pp. 3743–3756, 2017.
- [39] Agencia Nacional de Espectro, "Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias," 2022.
- [40] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) communication protocols: Review," in *ICIT 2017 - 8th International Conference on Information Technology, Proceedings*, 2017, pp. 685–690. doi: 10.1109/ICITECH.2017.8079928.
- [41] J. De Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, and A. L. L. Aquino, "LoRaWAN - A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities," in *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science, SpliTech 2017*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [42] H. H. R. Sherazi, L. A. Grieco, M. A. Imran, and G. Boggia, "Energy-Efficient LoRaWAN for Industry 4.0 Applications," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 17, no. 2, pp. 891–902, 2021, doi: 10.1109/TII.2020.2984549.
- [43] O. H. N. Sornin, M. Luis , T. Eirich, T. Kramp, "LoRaWAN TM Specification," 2016, *LoRa Alliance, Inc, San Ramon*.
- [44] S. Sendra, L. García, J. Lloret, I. Bosch, and R. Vega-Rodríguez, "LoRaWAN network for fire monitoring in rural environments," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/electronics9030531.
- [45] J. R. Cotrim and J. H. Kleinschmidt, "LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4273, Jul. 2020, doi: 10.3390/s20154273.
- [46] The Things Stack, "ABP vs OTAA," The things [ack. [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/devices/abp-vs-otaa/>

- [47] The Thinnngs Network, "Device Activation." Accessed: Sep. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/devices/bestpractices/>
- [48] B. K. Kanaujia, N. Singh, and S. Kumar, "Rectenna: Wireless Energy Harvesting System," 2021. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/16477>
- [49] T. Helgesen and M. Haddara, "Wireless Power Transfer Solutions for 'Things' in the Internet of Things," in *Proceedings of the Future Technologies Conference*, Springer International Publishing, 2018, pp. 92–103. doi: 10.1007/978-3-030-02686-8.
- [50] Y. Fan, Y. Sun, X. Dai, Z. Zuo, and A. You, "Simultaneous Wireless Power Transfer and Full-Duplex Communication with a Single Coupling Interface," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 36, no. 6, pp. 6313–6322, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3035782.
- [51] C. A. Balanis, *Antenna Theory*. 2010. doi: 10.1002/9780470661369.ch4.
- [52] D. Catano-Ochoa, D. E. Senior, F. Lopez, and E. Reyes-Vera, "Performance analysis of a microstrip patch antenna loaded with an array of metamaterial resonators," in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, IEEE, Jun. 2016, pp. 281–282. doi: 10.1109/APS.2016.7695849.
- [53] S. Rana and M. Rahman, "Study of Microstrip Patch Antenna for Wireless Communication System," *International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, pp. 1–4, 2022.
- [54] O. Ossa-Molina, J. Duque-Giraldo, and E. Reyes-Vera, "Strain Sensor Based on Rectangular Microstrip Antenna: Numerical Methodologies and Experimental Validation," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 20, pp. 22908–22917, Oct. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3107136.
- [55] P. Guoping, L. Yue, Z. Zhijun, and F. Zhenghe, "Isotropic Radiation From a Compact Planar Antenna Using Two Crossed Dipolese," Semantic Scholar. Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Isotropic-Radiation-From-a-Compact-Planar-Antenna-Pan-Li/b0c4188dfb4f1f772bd19a32d2569d85d788a399>

- [56] Universitat Politècnica de València, "Diagramas de Radiación." Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: http://www.upv.es/antenas/Tema_1/diagramas_de_radiacion.htm
- [57] BaertMaarten, "Radiation Pattern," Maarten Baert's website. Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.maartenbaert.be/quadcopters/antennas/directivity/>
- [58] A. Elrashidi, K. Elleithy, and H. Bajwa, "Performance analysis of a microstrip printed antenna conformed on cylindrical body at resonance frequency 4.6 GHz for TM01 mode," *Procedia Comput Sci*, vol. 10, pp. 775–784, 2012, doi: 10.1016/j.procs.2012.06.099.
- [59] R. Neri Vela and L. H. Porragas Beltrán, *Líneas de transmisión*. Universidad Veracruzana, 2012. doi: 10.25009/uv.1998.124.
- [60] Betty Espinel, *Electrónica Análoga*. Soledad - Atlántico: Instituto Tecnológico de Soledad Atlántico - ITSA, 2007.
- [61] Md. A. Halimi, T. Khan, Nasimuddin, A. A. Kishk, and Y. M. M. Antar, "Rectifier Circuits for RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer Applications: A Comprehensive Review Based on Operating Conditions," *IEEE Microw Mag*, vol. 24, no. 1, pp. 46–61, Jan. 2023, doi: 10.1109/MMM.2022.3211594.
- [62] A. C. C. Chun, H. Ramiah, and S. Mekhilef, "Wide Power Dynamic Range CMOS RF-DC Rectifier for RF Energy Harvesting System: A Review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 23948–23963, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3155240.
- [63] S. Hemour and K. Wu, "Radio-Frequency Rectifier for Electromagnetic Energy Harvesting: Development Path and Future Outlook," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 11, pp. 1667–1691, Nov. 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2358691.
- [64] S. Ciccia, A. Scionti, G. Franco, G. Giordanengo, O. Terzo, and G. Vecchi, "A Multi-Tone Rectenna System for Wireless Power Transfer," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 9, p. 2374, May 2020, doi: 10.3390/en13092374.

- [65] R. K. Singh, P. P. Puluckul, R. Berkvens, and M. Weyn, "Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application," *Sensors*, vol. 20, no. 17, p. 4794, Aug. 2020, doi: 10.3390/s20174794.
- [66] D. Tchuani Tchakonté, E. Simeu, and M. Tchuente, "Lifetime optimization of wireless sensor networks with sleep mode energy consumption of sensor nodes," *Wireless Networks*, vol. 26, no. 1, pp. 91–100, Jan. 2020, doi: 10.1007/s11276-018-1783-3.
- [67] Milesight, "Achieve Early Forest Fire Detection by Carbon Dioxide Monitoring with Milesight EM500-CO2 Carbon Dioxide Sensor." Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.milesight.com/company/blog/co2-monitoring-forest-fire-detection>
- [68] Rima Sabina Aouf, "'The trees themselves' raise wildfire alarm in ForestGuard detection system." Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.dezeen.com/2023/11/06/forestguard-wildfire-detection-system-design/>
- [69] Dryad Networks GmbH, "SILVANET WILDFIRE SENSOR." Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.dryad.net/wildfiresensor>
- [70] Nick He, "How to use IoT fire detector sensor for forest fire detection?" Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.mokosmart.com/use-iot-fire-detector-sensor/>
- [71] Dragino, "LPS8 LoRaWAN Gateway User Manual." [Online]. Available: www.dragino.com
- [72] K. Cao, "DLOS8N - Outdoor LoRaWAN Gateway User Manual," <http://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20All%20Gateway%20models/DLOS8N/#H1.1WhatistheDLOS8N>.
- [73] The Things Network Global Team, "9 reasons why you should move from The Things Network to The Things Industries," <https://www.thethingsnetwork.org/article/9-reasons-why-you-should-move-from-the-things-network-to-the-things-industries>.

- [74] The Things Industries, "The Things Stack." Accessed: Feb. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/the-things-stack-basics/>
- [75] Datacake, "Pricing Options", Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://datacake.co/pricing>
- [76] Datacake, "Get Started." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://docs.datacake.de/lorawan/get-started>
- [77] Adafruit, "Adafruit BME680 - Temperature, Humidity, Pressure and Gas Sensor - STEMMA QT." Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/3660>
- [78] The Things Network, "RSSI and SNR." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>
- [79] J. Bartling, "Mechanical and Laser Machining in One System - LPKF ProtoMat D104," *LPKF Laser & Electronics AG*. [Online]. Available: www.jenko-sternberg.de
- [80] Rohde and Schwarz, "R&S®FSH HANDHELD SPECTRUM ANALYZER," Nov. 2022, *Rohde & Schwarz GmbH & Co., Munich*.
- [81] Rohde and Schwarz, "R&S®SMB100A MICROWAVE SIGNAL GENERATOR," Nov. 2023, *Rohde & Schwarz, Munich*.
- [82] BK Precision, "Handheld Digital Multimeters Test Bench ®," 2017, *BK Precision Corp*. [Online]. Available: www.bkprecision.com
- [83] C. Rogers, "RO4000 (RO4350B RO4003C) Series High Frequency Circuit Materials Data Sheet," 2022. [Online]. Available: <http://www.rogerscorp.com>.
- [84] M. Wagih, A. S. Weddell, and S. Beeby, "Rectennas for RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer: a Review of Antenna Design," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 62, no. 5, pp. 95–107, 2020, doi: 10.1109/MAP.2020.3012872.
- [85] M. Pizzotti *et al.*, "A long-distance RF-powered sensor node with adaptive power management for IoT applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 8, Aug. 2017, doi: 10.3390/s17081732.

- [86] R. Mendes, S. Goncalves, R. Silva, C. G. Rego, and G. L. Ramos, "Analysis of High-efficiency Rectenna models at 2.45 GHz using Meandered Printed Dipole Antenna," in *2019 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, ISEF 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2019. doi: 10.1109/ISEF45929.2019.9097081.
- [87] Kyocera AVX, "C0G (NP0) Dielectric," *Mouser Electronics*. Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.kyocera-avx.com/products/ceramic-capacitors/surface-mount/c0g-np0-dielectric/>
- [88] Macom Tm, "Surface Mount Zero Bias Schottky Diodes," *Mouser Electronics*. Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: www.macom.com
- [89] Taiyo Yuden, "Multilayer Ceramic Capacitors (High dielectric type) for Automotive Powertrain and Safety (Cu external electrode products)," *Mouser Electronics*. Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <http://www.ty-top.com>
- [90] P. Nothdurft, G. Riess, and W. Kern, "Copper/Epoxy Joints in Printed Circuit Boards: Manufacturing and Interfacial Failure Mechanisms," *Materials*, vol. 12, no. 3, p. 550, Feb. 2019, doi: 10.3390/ma12030550.
- [91] Y. Chen *et al.*, "Investigation on Cu–Sn intermetallic compounds growth and signal transmission loss of the diverse copper lines after soldering in printed circuit board," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, no. 17, pp. 22372–22386, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10854-021-06723-7.
- [92] S. M. Villada, E. Reyes-Vera, and M. Arias-Correa, "AnIMAGE: A MATLAB-based tool for generating microstrip antennas with complex shapes," *SoftwareX*, vol. 23, p. 101502, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.softx.2023.101502.
- [93] S. Montoya-Villada, J. Morales-Guerra, D. Catano-Ochoa, J. Zapata-Londono, J. Botero-Valencia, and E. Reyes-Vera, "Design and Implementation of a 2.4-GHz Fully Integrated Butler Matrix for Smart Antenna System," *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, vol. 13, no. 1, p. 1, Feb. 2023, doi: 10.15866/irecap.v13i1.22234.

- [94] J. Zapata-Londoño, F. Umaña-Idárraga, J. Morales-Guerra, S. Arias-Gómez, C. Valencia-Balvin, and E. Reyes-Vera, "Differential microwave sensor based on microstrip lines loaded with a split-ring resonator for dielectric characterization of materials," *J Phys Conf Ser*, vol. 2118, no. 1, p. 012004, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2118/1/012004.
- [95] J. Morales-Guerra, F. Umana-Idarraga, W. Giraldo-Escobar, E. Gonzalez-Valencia, and E. Reyes-Vera, "Performance analysis of a Compact, Flexible and Biodegradable UHF RFID Tag Antenna," in *2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, IEEE, Aug. 2021, pp. 357–360. doi: 10.1109/ICEAA52647.2021.9539617.
- [96] E. Reyes-Vera, M. Arias-Correa, A. Giraldo-Muno, D. Catano-Ochoa, and J. Santa-Marin, "DEVELOPMENT OF AN IMPROVED RESPONSE ULTRA-WIDEBAND ANTENNA BASED ON CONDUCTIVE ADHESIVE OF CARBON COMPOSITE," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 79, pp. 199–208, 2017, doi: 10.2528/PIERC17091809.
- [97] D. Prozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed. New York - Chichester - Winheim - Brisbane - Singapore - Toronto: John Wiley & Sons, INC, 1997.
- [98] A. Riaz, M. R. Sarker, M. H. M. Saad, and R. Mohamed, "Review on comparison of different energy storage technologies used in micro-energy harvesting, wsns, low-cost microelectronic devices: Challenges and recommendations," Aug. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s21155041.
- [99] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, and N. L. Narasamma, "Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1137–1144, Oct. 2014, doi: 10.1109/TSTE.2014.2336896.
- [100] H. H. Ibrahim *et al.*, "Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications," Jun. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/s22114144.

- [101] L. TODO EN UNO Battery Technology Co., “Batería recargable LiPO 603048 3.7V 850mAh,” <https://es.ainbattery.com/lipo-rechargeable-battery-603048-3-7v-850mah-3-7v-1700mah-7-4v-850mah.html>.
- [102] Ltd. Shenzhen A&S Power Technology Co., “Batería recargable de polímero de litio UL/CB/Kc/Un38,3/CE certificada 603450 3,7V 1050mAh Lipo Batería,” https://es.made-in-china.com/co_szaspower/product_UL-CB-Kc-Un38-3-CE-Certified-Rechargeable-Lithium-Polymer-Battery-603450-3-7V-1050mAh-Lipo-Battery_rehgoglog.html?pv_id=1i74ja8gs508&faw_id=1i74jfqvi3cc.
- [103] C. E. Corporación Eléctrica del Ecuador, “Carta de Smith,” <https://www.slideshare.net/slideshow/carta-de-smith-5244155/5244155>.
- [104] S. Choudhury and N. Kataki, “AN INNOVATIVE WAY FOR COMPUTERIZED SMITH CHART GENERATION AND TRANSMISSION LINE PROBLEM SOLVING,” *Int J Res Eng Technol*, vol. 03, no. 09, pp. 290–295, Sep. 2014, doi: 10.15623/ijret.2014.0309045.
- [105] Rohde & Schwarz Latin America, “¿Cómo comprender la carta de Smith?”
- [106] V. T. Rathod, “A Review of Electric Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors, Actuators and Transducers,” *Electronics (Basel)*, vol. 8, no. 2, p. 169, Feb. 2019, doi: 10.3390/electronics8020169.