



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E

INDUSTRIAL

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

Tema:

SISTEMA DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON SISTEMAS DE RECTENNAS Y CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA DISPOSITIVOS INALÁMBRICOS IOT DE BAJA POTENCIA.

Trabajo de Titulación Modalidad: Proyecto de Investigación, Presentado previo a la Obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

Área: Electrónica

Línea de Investigación: Sistemas Electrónicos

Autor: Milton Palmiro Valle Muñoz

Tutor: Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD.

Ambato – Ecuador

septiembre - 2022

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación con el tema: SISTEMA DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON SISTEMAS DE RECTENNAS Y CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA DISPOSITIVOS INALÁMBRICOS IOT DE BAJA POTENCIA, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor: Valle Muñoz Milton Palmiro, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 15 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y el numeral 7.4 del respectivo instructivo.

Ambato, septiembre 2022.

Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD.

TUTOR

AUTORÍA

El presente Proyecto de Investigación titulado: SISTEMA DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON SISTEMAS DE RECTENNAS Y CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA DISPOSITIVOS INALÁMBRICOS IOT DE BAJA POTENCIA, es absolutamente original, auténtico y personal. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, septiembre 2022.



Milton Palmiro Valle Muñoz

CC: 1805227921

AUTOR

APROBACIÓN TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del Informe Final del Trabajo de Titulación presentado por el señor Milton Palmiro Valle Muñoz, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON SISTEMAS DE RECTENNAS Y CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA DISPOSITIVOS INALÁMBRICOS IOT DE BAJA POTENCIA, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 17 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y al numeral 7.6 del respectivo instructivo. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con la señora Presidenta del tribunal.

Ambato, septiembre 2022.

Ing. Pilar Urrutia, Mg.
PRESIDENTA DEL TRIBUNAL

Ing. Giovanni Brito, Mg
PROFESOR CALIFICADOR

Ing. Julio Cuji
PROFESOR CALIFICADOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.



Valle Muñoz Milton Palmiro

CC: 1805227921

AUTOR

DEDICATORIA

A mis hermanos, por el apoyo que me han brindado durante toda mi carrera universitaria.

A mi madre que siempre ha estado conmigo en los momentos que más la necesitaba, y ha sido mi fuente de ejemplo y superación

A mi tutor, Ing. Carlos Gordón, PhD. por toda la ayuda y apoyo que me ha brindado durante todo el proceso de desarrollo del presente proyecto.

“Lo mejor que podemos ser, es ser nosotros mismos, y lo mejor que podemos hacer, es ser mejores que lo que fuimos ayer”

Natalia Mayner.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre y a mis hermanos que con amor y paciencia han estado conmigo ayudándome en toda mi carrera estudiantil.

A mi tutor, Ing. Carlos Gordón, PhD. por guiarme durante todo el proyecto, y por todos los conocimientos que me ha brindado durante el desarrollo del mismo.

A la Universidad Técnica de Ambato en la cual he adquirido una gran cantidad de conocimientos que me servirán en mi vida profesional.

A todos mis amigos que han sido de apoyo y superación tanto personal como profesional.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA.....	iii
APROBACIÓN TRIBUNAL DE GRADO	iv
DERECHOS DE AUTOR	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Tema de investigación.....	1
1.2. Antecedentes investigativos.....	1
1.2.1. Contextualización del problema.....	5
1.2.2. Fundamentación teórica	7
1.3. Objetivos	24
1.3.1. Objetivo general	24
1.3.2. Objetivos específicos	24
Capitulo 2.....	25
Metodología	25
2.1. Materiales.....	25
2.1.1. Cosecha de energía en la frecuencia RF.	25
2.1.2. Multiplicador rectificador de voltaje.....	27
2.1.3. Cosecha de energía solar.....	28
2.1.4. Regulador conversor de voltaje.....	32
2.1.5. Almacenamiento de energía.....	34

2.2. Métodos.....	36
2.2.1. Modalidad de investigación	36
2.2.2. Recolección de información.....	37
2.2.3. Procesamiento y análisis de datos	37
2.2.4. Propuesta de solución.....	38
2.2.5. Desarrollo del proyecto	39
Capítulo 3.....	40
Resultados y discusión	40
3.1. Análisis y discusión de resultados.....	40
3.1.1. Desarrollo de la propuesta de solución	40
3.1.2. Sistema de cosecha de energía RF	41
3.1.3. Sistema multiplicador rectificador de voltaje	50
3.1.4. Sistema para cosecha de energía solar	53
3.1.5. Sistema convertidor - regulador de voltaje	54
3.1.6. Sistemas de almacenamiento.....	55
3.1.7. Implementación del sistema de cosecha de energía electromagnética.....	56
3.2. Costo de elaboración del sistema.....	58
3.3. Resultados obtenidos	59
Capítulo 4.....	66
Conclusiones y recomendaciones	66
4.1. Conclusiones	66
4.2. Recomendaciones.....	67
Bibliografía	68
Anexos	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Voltajes cosechados a diferentes frecuencias [3]	3
Figura 2.	Dispositivos Wearables [12].....	9
Figura 3.	Duplicadores de voltaje de Cockcroft-Walton. [17].....	12
Figura 4.	Circuito Multiplicador de Dickson [19].....	13
Figura 5.	Partes de un capacitor	14
Figura 6.	Batería de iones de litio [22].....	15
Figura 7.	Partes de una antena Microstrip [24]	16
Figura 8.	Diagrama de radiación en coordenadas polares y cartesianas [25]	19
Figura 9.	Directividad de una antena [26].....	19
Figura 10.	Fractal Curva de Koch [29].....	21
Figura 11.	Proceso de diseño de un triángulo de Sierpinski [29].....	22
Figura 12.	Fractal alfombra de Sierpinski [29].....	23
Figura 13.	Estructura de una rectenna [31].....	24
Figura 14.	Tipos de paneles Solares. [34], [35].....	29
Figura 15.	Convertidor DC-DC Boost MT 3608. [36].....	34
Figura 16.	Diseño de la Propuesta de Solución	38
Figura 17.	Diagrama de desarrollo del proyecto	40
Figura 18.	Antena Fractal “Alfombra de Sierpinski”	43
Figura 19.	Parámetros de la baquelita FR4	43
Figura 20.	Diseño de la antena en 3D.....	44
Figura 21.	Coefficiente de reflexión de la antena	45
Figura 22.	Diagrama de radiación de campo lejano	45
Figura 23.	SWR de la antena	46
Figura 24.	Antena fractal, Alfombra de Sierpinski simulada vs implementada.	46
Figura 25.	Analizador de red vectorial Nano VNA V2.2. [38]	47
Figura 26.	Parámetro S11 de la antena medido con el Nano VNA.....	48
Figura 27.	Parámetro S11 simulado	49
Figura 28.	Parámetro S11 Simulado vs Implementado	49
Figura 29.	Circuito multiplicador de voltaje de Cockcroft-Walton de 5 etapas	50
Figura 30.	Diodo schottsky 286C y diagrama de pines [39]	51

Figura 31.	Placa del circuito multiplicador rectificador de voltaje de dos etapas	51
Figura 32.	Diseño de las pistas. Simulado vs Implementado.	52
Figura 33.	Placa del circuito multiplicador de voltaje. Simulado vs implementado ...	52
Figura 34.	Elección del panel solar	54
Figura 35.	Convertidor Boost MT3608 [40]	55
Figura 36.	Sistemas de almacenamiento [41].....	55
Figura 37.	Sistema Implementado en protoboard.....	56
Figura 38.	Sistema de recolección de energía electromagnética implementado.	57
Figura 39.	Carga realizada por el sistema en una batería de 3.7V	62
Figura 40.	Antenas investigadas por los Ingenieros: Criollo Walter [43], Félix Reinoso [44], Ernesto Escobar [45], Evelyn Freire [46].....	63
Figura 41.	Voltajes recolectados de los diferentes estudios en un capacitor.....	63
Figura 42.	Voltajes recolectados de los diferentes estudios en una batería de 9V, tiempo de 90 Minutos	64
Figura 43.	Voltajes captados en cada uno de los diferentes sistemas.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Valores adquiridos en las diferentes condiciones de luz [1].....	2
Tabla 2.	Aportes de los antecedentes investigativos al proyecto de titulación.	5
Tabla 3.	Tecnologías utilizadas en dispositivos IoT según su alcance	9
Tabla 4.	Espectro electromagnético [13]	10
Tabla 5.	Ecuaciones de diseño de una curva de koch [29]	21
Tabla 6.	Ecuaciones de diseño de un triángulo de Sierpinski [29]	22
Tabla 7.	Ecuaciones de diseño de la alfombra de Sierpinski [29]	23
Tabla 8.	Tipos de antenas microstrip	26
Tabla 9.	Eficiencia de un multiplicador de 5 etapas [33]	28
Tabla 10.	Tipos de paneles solares.....	30
Tabla 11.	Costos de paneles solares	31
Tabla 12.	Tipos de convertidores dc.	33
Tabla 13.	Tipos de baterías	35
Tabla 14.	Costo de elaboración del sistema	58
Tabla 15.	Resultados obtenidos en la recolección de energía de WIFI, solo con la antena.	59
Tabla 16.	Resultados obtenidos del sistema de recolección de energía solar	59
Tabla 17.	Carga del sistema en diferentes bancos de almacenamiento.....	60
Tabla 18.	Carga realizada por el sistema en un día soleado.....	60
Tabla 19.	Carga realizada por el sistema en un día nublado.	61
Tabla 20.	Carga realizada con el sistema por la noche en un tiempo de 90 minutos.	61

RESUMEN EJECUTIVO

Debido al avance de la tecnología ha sido notorio el incremento de dispositivos IoT, dispositivos que permiten al usuario tener un control y monitoreo constante sobre parámetros como temperatura, presión, estado en el que se encuentra un equipo o salud de una determinada persona, también ha sido notorio que debido al reducido tamaño de las baterías estas no logran mantener al dispositivo funcionando por tiempos prolongados y se requiere que sean removidos de sus puestos de trabajo constantemente para recargar la batería, actividad que genera un deterioro del equipo por movilidad y reducción de ciclos de carga.

En el presente proyecto se desarrolló un sistema que permitió cosechar la energía electromagnética existentes en la ondas de RF del WIFI, sumar a la energía cosechada de la luz solar y posteriormente almacenarla en una batería de litio, para esto se ha implementado un sistema de cuatro etapas, en la primera etapa se capta la energía RF por medio de una antena Fractal conocida como alfombra de Sierpinski y se multiplica por dos utilizando el circuito de Cockcroft Walton para lograr incrementar la tensión adquirida, en la segunda etapa, se utiliza un panel solar mono cristalino para cosechar energía solar, en la tercera etapa se utiliza una conexión en serie para sumar los voltajes adquiridos de las dos etapas previas y la última etapa es la encargada de regular el voltaje y almacenarlo en una batería de litio.

El proyecto está diseñado con el objetivo de dotar de energía auxiliar a los dispositivos IoT de baja potencia, logrando reducir los gastos por consumo de energía eléctrica y aumentando la durabilidad de las cargas de las baterías en los equipos IoT, el presente trabajo también forma parte del proyecto de investigación: Sistema de Captación de Energía Electromagnética para Abastecimiento de Energía en Terminales de Internet de las Cosas (IoT) en entornos de Quinta Generación (5G)” aprobado mediante Resolución Nro. UTA-CONIN-2020-0299-R de fecha 21 de septiembre de 2020

Palabras clave: Antena fractal, energía electromagnética, Dispositivo IoT.

ABSTRACT

Due to the advancement of technology, the increase in IoT devices has been notorious, devices that allow the user to have constant control and monitoring of parameters such as temperature, pressure, the state of a piece of equipment or the health of a certain person, has also It has been notorious that due to the small size of the batteries, they cannot keep the device working for long periods of time and they are required to be constantly removed from their jobs to recharge the battery, an activity that generates a deterioration of the equipment due to mobility and reduction of load cycles.

In this project, a system was developed that allowed harvesting the existing electromagnetic energy in the RF waves of Wi-Fi, adding to the energy harvested from sunlight and later storing it in a lithium battery, for this a system of 4 stages, in the first stage the RF energy is captured by means of a Fractal antenna known as a Sierpinski carpet and is multiplied by 2 using the Cockcroft Walton circuit to increase the acquired voltage, in the second stage, a solar panel is used mono crystalline to harvest solar energy, in the third stage a series connection is used to add the voltages acquired from the two previous stages and the last stage is in charge of regulating the voltage and storing it in a lithium battery.

The project is designed with the aim of providing auxiliary power to low-power IoT devices, reducing costs for electrical energy consumption and increasing the durability of battery charges in IoT equipment, this work is also part of the research project: "Electromagnetic Energy Collection System for Energy Supply in Internet of Things (IoT) Terminals in Fifth Generation (5G) environments" approved by Resolution No. UTA-CONIN-2020-0299-R dated August 21, 2020

Key words: Fractal antenna, electromagnetic energy, IoT Device.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Tema de investigación

SISTEMA DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON SISTEMAS DE RECTENNAS Y CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA DISPOSITIVOS INALÁMBRICOS IOT DE BAJA POTENCIA.

1.2. Antecedentes investigativos

En la búsqueda de artículos referentes al tema mencionado se filtraron en la revisión de las que hayan sido publicados a partir del 2020 y que puedan brindar las experiencias en trabajos similares realizados previamente, se hallaron los siguientes casos.

En un artículo publicado el 6 de febrero del 2020, titulado “An efficient solar energy harvesting system for wireless sensor network nodes”, elaborado por los autores, Saji M. Antony, S. Indu & Rajeshwari Pandey, implementan un sistema de cosecha de energía solar como soporte para alargar la durabilidad de las baterías de las redes de sensores inalámbricos. Para esto primero utilizan un panel solar poli cristalino para cosechar la energía solar que en promedio en los interiores de las oficinas fue 2.8 V, seguido de un DC - DC boost convertidor para elevar el voltaje logrando obtener 22 V a la salida , posteriormente utilizan un regulador de voltaje para controlar la carga en la batería, y finalmente ponen a prueba el correcto funcionamiento del sistema conectando un arduino uno junto con el sensor de Humedad SHT11, un sensor de temperatura LM36 y un módulo Bluetooth HC05. En la Tabla (1) se indican los resultados de los valores medidos en cada una de las etapas según las diferentes condiciones de luz a las cuales fue sometido el sistema. [1]

Tabla 1. Valores adquiridos en las diferentes condiciones de luz [1]

S No	Condition	Panel output	Boost output	Battery output	Ac output	Input to dth-11 and lm36	Input to blue-tooth
1	NORMAL	2.8V	22V	11.96	96.5V	4.51V	4.9V
2	2FLASH LIGHT	3.5V	22V	11.96	95V	4.5V	4.9V
3	4FLASH LIGHT	3.7V	22V	11.96V	95V	4.5V	4.9V
4	AT SUNLIGHT	5.88V	21.49V	11.96V	96V	4.51V	4.9V

En una conferencia brindada el 4 de julio del 2020 por los señores Anand Trikolikar y Swapnil Lahudkar, con el tema “A Review on Design of Compact Rectenna for RF Energy Harvesting”, se enfocan en que a medida que los dispositivos IoT van avanzando son cada vez más pequeños por lo que las rectennas que van a proveer de energía auxiliar a estos dispositivos también deben reducirse, así dan a conocer diferentes técnicas de reducción del tamaño de las antenas utilizadas para la cosecha de energía electromagnética, entre las cuales la primera que mencionan es utilizar una figura fractal en el diseño de la antena ya que está provee de un rendimiento multibanda logrando con una sola antena cosechar energías en diferentes frecuencias como 900 MHz, 1800 MHz, y 2,42 GHz, como ejemplo en la conferencia se utilizó una antena fractal con la geometría de alfombra de Sierpinski la cual lograba trabajar en las frecuencias mencionadas anteriormente y con un gran espacio reducido, otra técnica que indican, es el uso de líneas meandro o también se puede agregar un ranurado para incrementar el ancho de banda, y eliminar las coincidencias de red logra crear un emparejamiento de red compacta y eficiente. [2]

En 2020, en un artículo realizado por los señores, Akshaj Arora, Sahitya Singh, Manoj Kumar Pandey, Saket Kumar y Sujata Pandey, publicado en la revista IEEE titulado “Experimental Investigation of a Novel MultiPatch Fractal Antenna for Radio Frequency Energy Harvesting”, realizaron un estudio de cosecha de energía electromagnética utilizando una antena de tipo fractal, aprovechando las características que este tipo de

antenas como: mayor directividad, gran ancho de banda y capacidad de trabajar en frecuencias multibanda. El prototipo fue implementado en una baquelita FR4 con 1.6 mm de espesor, una permitividad relativa de 4.3 y una tangente de pérdida de 0,02, la cual fue diseñada para trabajar en la bandas de frecuencia de GSM y WI-MAX , la simulación fue realizada en el software HFSS y los resultado se presentan en la figura 1, en la evaluación experimental obtuvieron, bajas pérdidas de retorno, buenas características de radiación y una excelente ganancia, además de que puede obtener energía de las bandas GSM y WI-MAX también presenta grandes perspectivas de ser utilizada para la cosecha de energía electromagnética. [3]

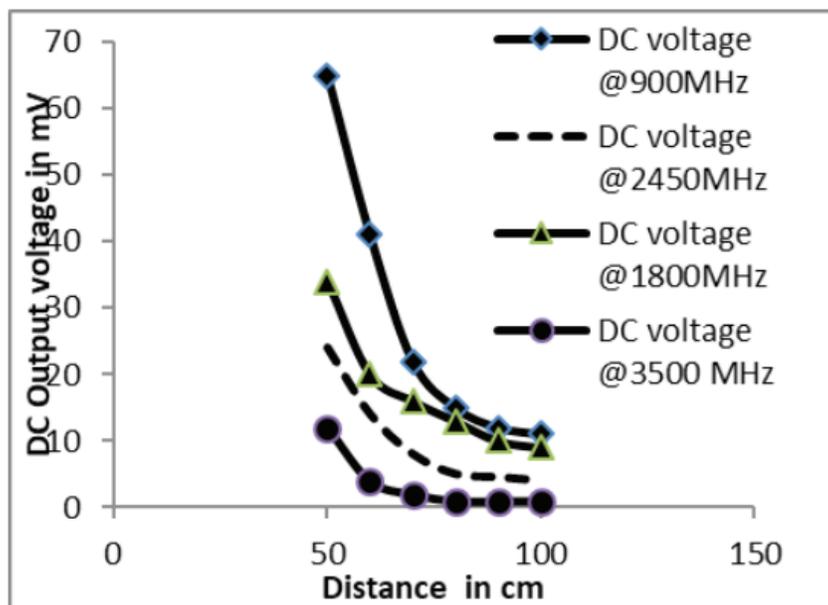


Figura 1. Voltajes cosechados a diferentes frecuencias [3]

El 5 de octubre de 2020, F. Harerimana, H. Peng, M. Otopo, F. Luo, M. N. Gikunda, J. M. Mangum, V. P. La Bella, and P. M. Thibado en su artículo realizado en el Departamento De Ingeniería Eléctrica En la Universidad de Arkansas titulado “Efficient circuit design for low power energy harvesting” publicado en la revista AIP Advances, se enfocan en analizar la eficiencia que tienen los circuitos cosechadores de energía electromagnética, esto debido a que con el avance de la tecnología cada vez hay dispositivos que requieren menos energía para poder trabajar llegando incluso a necesitar solo pico vatios o nano

varios, en dispositivos que consumen una energía tan pequeña como esta es posible que funcionen solo con la energía captada del medio ambiente, para esto diseñan 3 circuitos, el primer circuito tiene un capacitor variable con una fuente de voltaje DC para convertir la energía mecánica en energía eléctrica, el segundo circuito utiliza un capacitor fijo con una fuente de corriente alterna variable que les permite medir la eficiencia del mismo y finalmente el tercer circuito utiliza dos transistores como rectificadores de corriente y dos capacitores para almacenar la energía, implementando y simulando estos circuitos lograron obtener un 15, 25 y 50% de eficiencia respectivamente. [4]

El 8 de marzo del 2021, Mahmoud Wagih, Nicholas Hiller, Sheng Yong, Alex S y Steve Beeby miembros de la escuela de electrónica y ciencias de la computación de la universidad de Southampton en su artículo publicado en scopus “RF-Powered Wearable Energy Harvesting and Storage Module Based on E-Textile Coplanar Waveguide Rectenna and Supercapacitor” realizaron un sistema de cosecha de energía electromagnética en la frecuencia de 915 MHz como soporte de energía para los sensores de seguimiento de actividad que llevan incluidas las prendas textiles usadas en pacientes que requieren un monitoreo constante, sistema en el cual se utilizó una antena omnidireccional monopolo diseñada y simulada en CST MicroWave Studio e implementada en un sustrato de cobre de poliimida flexible con un espesor inferior a 50 μm , la antena fue capaz de mantener un $S_{11} < -6\text{dB}$ dentro y fuera de la tela con presencia y ausencia del cuerpo humano, en la rectificación de corriente se utilizó un duplicador de voltaje y como sistema de almacenamiento de energía utilizan un super capacitor diseñado con electrodos de carbono y recubiertos por pulverización sobre algodón convencional logrando obtener 2,9 V en un tiempo de carga de 180 segundos o 31,5 mJ en 37 segundos. [5]

Tabla 2. Aportes de los antecedentes investigativos al proyecto de titulación.

Artículo	Año de publicación	Aporte
An efficient solar energy harvesting system for wireless sensor network nodes	2020	Materiales para la cosecha de energía solar
Review on Design of Compact Rectenna for RF Energy Harvesting	2020	Métodos de reducción del tamaño de la antena
Experimental Investigation of a Novel Multipath Fractal Antenna for Radio Frequency Energy Harvesting	2020	Antecedentes de la energía que se puede captar en las diferentes bandas de frecuencia.
Efficient circuit design for low power energy harvesting	2020	Circuito con más eficiencia para la cosecha de energía.
RF-Powered Wearable Energy Harvesting and Storage Module Based on E-Textile Coplanar Waveguide Rectenna and Supercapacitor	2021	Los super capacitor son mejores para cosecha de energía ya que no existen pérdidas por reacciones químicas.

Fuente: Elaborado por el investigador

1.2.1. Contextualización del problema

Desde 1992 ya existían alrededor de un millón de computadores en el mundo, la necesidad de métodos tecnológicos que permitan la comunicación inmediata entre distintos lugares ha ido incrementando hasta llegar a implementar la tecnología inalámbrica en la mayoría de los dispositivos industriales u hogareños, siendo así que desde aproximadamente 2009 que se introdujo el concepto de “Internet Of things (IoT)” para referirse a dispositivos que son capaces de compartir sus datos como por ejemplo la temperatura de un horno o el nivel de enfriamiento de una nevera,

dispositivos que son capaces de tener una base de datos de sus sensores para posteriormente enviarlos por medio de una red inalámbrica que generalmente es WIFI, el incremento de estos dispositivos IoT se los puede graficar como una línea exponencial ya que solo desde 2019 que existían 1,9 millones de dispositivos IoT en los hogares hasta el 2020 hubo un incremento que llegó hasta los 30700 millones de dispositivos conectados y según las predicciones del portal de estadísticas estatista [6] se prevé que para el 2025 existirá alrededor de 75000 millones de dispositivos conectados en todo el mundo. [7]

Por otra parte, la gran mayoría de estos dispositivos IoT son inalámbricos lo que requiere el uso de baterías para su funcionamiento, por lo que los sensores IoT inalámbricos son constantemente removidos de sus puestos de operación para recargarlos, lo que genera pérdidas durante el tiempo de inactividad de la empresa o fabrica debido a la interrupción del sensor por estar en carga y también pérdidas por coste eléctrico, según un estudio experimental realizado por xataka en el que recargaron una batería de litio de 3400 mAh y midieron el voltaje, la corriente y el tiempo necesario para ponerla a plena carga, en tal experimento concluyeron que para poner a carga la batería se necesitó de 15 W de energía y el tiempo de carga fue de hora y cincuenta minutos, lo que tendría un costo de 18,3 ctvs. por carga, también en un trabajo de grado realizado en 2019 por la Mg.Ing Ana Claudia Fattori de Andrade para la Pontificia Universidad Javeriana en la facultad de Maestría e Ingeniería en sistemas y computación, en el cual realizaron un análisis de consumo energético de dispositivos IoT de baja potencia, determinaron que el consumo promedio de estos dispositivos va desde los 0,86 hasta los 2,5 mW/h lo que viene a generar un gasto de \$2,19 al año por cada dispositivo IoT de baja potencia instalado en el hogar. [8]

Es importante también considerar la contaminación ambiental que se requiere realizar para conseguir la energía para los dispositivos, en las grandes compañías incluso se tiene generadores de voltaje para asegurarse que los dispositivos se encuentren con corriente eléctrica todo el tiempo, solo un generador eléctrico de 7,5 kWh es capaz de generar 0,8 kg de CO₂ por hora, además en un estudio realizado por el ministerio de energía y recursos no renovables del Ecuador determinaron que el 7% de la energía

eléctrica consumida en el país proviene de fuentes de energía térmica así también en el programa de naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA) indico que el sector energético mundial es el responsable del 25% de las emisiones totales de los Gases de efecto Invernadero (GEI) y el BID (Desarrollo y Cambio Climático) en un informe menciona que al quemar un galón de gasolina se emiten 10 kg de CO₂ y se consumen 11m³ de oxígeno, para el caso del sector eléctrico en Ecuador el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) menciona que en un día laborable que operen todas las unidades de generación térmica se emiten en promedio 18500 Toneladas de CO₂ [9]

1.2.2. Fundamentación teórica

Sistema IoT

El internet de las cosas hace referencia a la capacidad de objetos cotidianos como sensores o equipos de uso diario pueden tener acceso a la red para realizar operaciones de cómputo, brindar, intercambiar o subir información a la nube sobre el estado de los mismos de forma automática y con una mínima interacción humana (<https://www.internetsociety.org/es/resources/doc/2015/iot-overview/>). La IEEE definió la IoT como “ un sistema de entidades (incluidos dispositivos ciber físicos, recursos de información y personas) que intercambian información e interactúan con el mundo físico mediante la detección, el procesamiento de información y la actuación” (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9082794>) , los conceptos de un sistema IoT han estado cambiando según ha ido evolucionando la tecnología IoT, pero en esencia un sistema IoT es un conjunto de dispositivos interconectados a la red que comparten información, realizan operaciones y toman decisiones en base a los resultados obtenidos para cumplir una determinada función, por ejemplo en una casa domótica se encuentran dispositivos IoT como: sensores de temperatura, sensores de presencia, sensores de incendio y actuadores como el sistema anti incendios, sistemas de alarma, etc. que se encuentran instalados en el hogar y juntos toman decisiones como cuando activar una alarma o enviar la información sobre algún evento o el estado del sistema al usuario a través de la red. [10]

Dispositivos IoT

según lo argumentado en el anterior párrafo “sistema IoT” se puede definir a un “dispositivo IoT” como un dispositivo que tiene acceso a la red y por medio de sus sensores, actuadores y su programación cuenta con cierta inteligencia, lo que le permite medir parámetros y actuar a consecuencia de manera automática. Los mecanismos más utilizados para la comunicación en un sistema IoT son: [10]

- WIFI
- Bluetooth
- Zigbee
- LTE
- GSM
- GPRS
- Lora
- 3G, 4G y 5G
- NB IoT

Dispositivo IoT Wearable

Son dispositivos inalámbricos de uso personal que generalmente miden de manera continua los signos vitales del usuario [11] , en su mayoría se comunican por bluetooth y suben los datos a la red con ayuda de un Smartphone son dispositivos IoT de baja potencia y tienen aplicaciones como:

- monitoreo de procesos remotos
- control de actividad física
- monitoreo de signos vitales

Algunos de estos dispositivos se pueden apreciar en la siguiente figura.

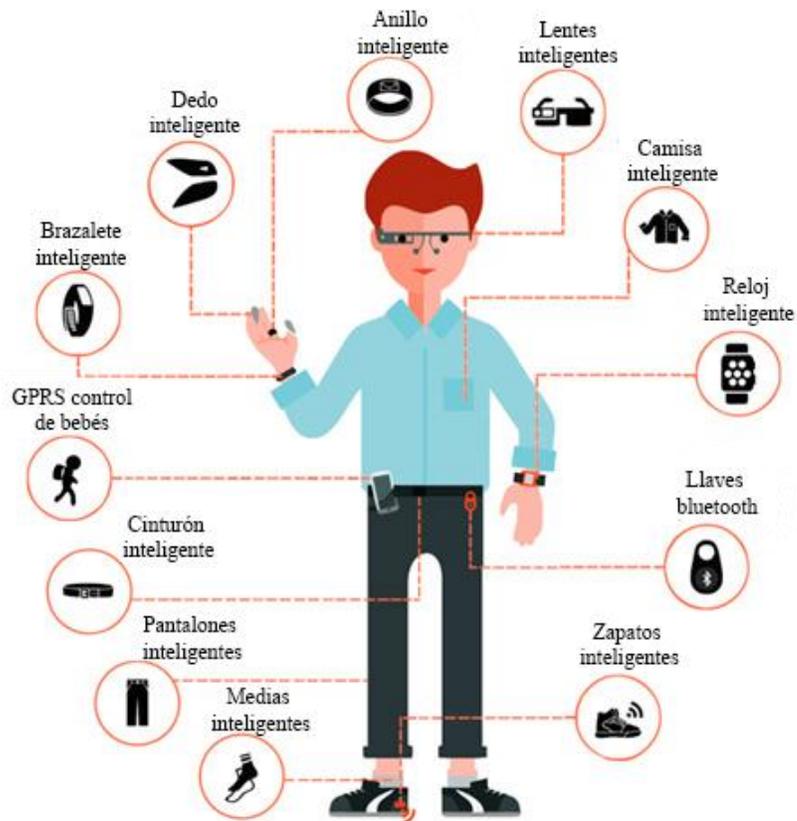


Figura 2. Dispositivos Wearables [12]

Tabla 3. Tecnologías utilizadas en dispositivos IoT según su alcance

	Red personal	Red local	Red grande
rango	Menor a 10 m	Menor a 100 m	Mayor a 1 km
Tecnología	Bluetooth	WIFI Zigbee	Lte GPRS 3G, 4G, 5G
Aplicaciones típicas	Aplicaciones personales - conteo de pasos - monitoreo del ritmo cardiaco - control de temperatura - etc.	- internet - email - teléfonos - monitoreo - etc.	- ciudad inteligente - industria 4.0 - agricultura - etc.

Fuente: Elaborado por el investigador

Energía electromagnética

Es la cantidad de energía en una región del espacio debida a la presencia de un campo electromagnético [13], esta energía está compuesta por campos eléctricos y magnéticos, la radiación producto de estos campos pueden manifestarse de diversas maneras entre las cuales se encuentran las siguientes: radiofrecuencia, rayos x, luz visible, calor, etc. las cuales se expresan de diferentes maneras debida a la variación de frecuencia, esta variación se puede clasificar en diferentes rangos de frecuencia y a esto se le conoce como espectro electromagnético, en telecomunicaciones estos rangos de frecuencias reciben nombres de acuerdo a su aplicación en las comunicaciones, lo cual se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 4. Espectro electromagnético [13]

Denominación	frecuencia	Longitud de onda	de Aplicación
VLF	3 – 30 KHz	10 -100 km	SONAR
LF	30 - 300 KHz	1 - 10 km	Navegación
MF	0,3 - 3 MHz	100 - 1000 m	Radio de media onda
HF	3 - 30 MHz	10 - 100 m	Radio de onda corta
VHF	30 - 300 MHz	1 – 10 m	TV, Radio
UHF	0,3 - 3 GHz	0,1 – 1 m	Radar, TV, comunicación satelital
SHF	3 - 30 GHz	1 - 10 cm	Radar, WLL, LMDS
EHF	30 - 300 GHz	1 - 10 mm	MVDS, Radar

Energy Harvesting

Energy harvesting hace referencia a captar la energía presente en la naturaleza y convertirla en energía eléctrica, la energía captada regularmente es almacenada en baterías o supe condensadores para posteriormente servir como fuente de alimentación para sensores de baja potencia, generalmente equipos wearable, en la naturaleza existen diversas fuentes de donde captar la energía como por ejemplo: diferentes fuentes de calor, vibración, luz solar o radio frecuencia, de entre todas las mencionadas

anteriormente las que más energía proveen y las más aplicadas en los proyectos de energy harvesting son la luz solar y la de radio frecuencias, dependiendo de la aplicación para la cual va a servir se escogen unas de otras como por ejemplo, para una aplicación de una teclado se puede aprovechar la energía por vibración ya que se puede captar la energía que existe al presionar las teclas, para una aplicación en el exterior se puede aprovechar la luz solar o para aplicaciones dentro de estructuras, casas inteligentes o fabricas se prefiere aprovechar la energía electromagnética pues la existencia de muchos dispositivos inalámbricos hace que esta fuente sea más eficiente además de que siempre estará presente, tanto en el día como en la noche, ya que solo depende de la cantidad de redes inalámbricas que existan a su alrededor.

En todo proceso de recolección de energía existen 3 etapas que son las encargadas de llevar a cabo el energy harvesting, en la primera etapa se encuentra un transductor el cual es el encargado de convertir la energía existente en la naturaleza en energía eléctrica, posteriormente viene el circuito regulador de corriente, en esta etapa generalmente se hallan circuitos rectificadores de corriente y circuitos multiplicadores de voltaje, finalmente se halla el circuito de carga o almacenamiento, el cual por lo regular suele ser en condensadores o baterías, dependiendo la aplicación. [14]

Transductores

son dispositivos que convierten una energía en otra, por lo general se utiliza para convertir una energía existente en la naturaleza en energía eléctrica, es aplicada principalmente en sistemas de automatización, sistemas de sonorización, y en cosecha de energía ambiental, existen varios tipos de transductores entre los cuales se puede hallar, transductores electromagnéticos, transductores capacitivos, transductores de temperatura, transductores de presión, transductores fotoeléctricos y transductores de fuerza. [15]

Circuito Rectificador multiplicador de voltaje

El circuito multiplicador de voltaje se encarga de convertir el voltaje de corriente alterna recibida de la fuente, rectificarla e incrementar el valor de la tensión dependiendo de las etapas con las que esté diseñado para entregar a la salida un voltaje de corriente continua mucho mayor al voltaje de entrada, a continuación, se realiza una

descripción del funcionamiento de los circuitos multiplicadores de voltaje de Cockcroft-Walton y Dickson. [16]

Circuito multiplicador de voltaje de Cockcroft-Walton.

Es un circuito doblador de voltaje el cual consta de dos capacitores y dos diodos, el circuito se indica en la figura 3a, una ventaja que presente este circuito es que se puede agregar fácilmente cuantas etapas se desee figura 3b, por cada etapa agregada se multiplica el voltaje de la entrada por dos, es decir que, en un circuito de tres etapas, se obtiene un voltaje de seis veces la entrada a su salida.

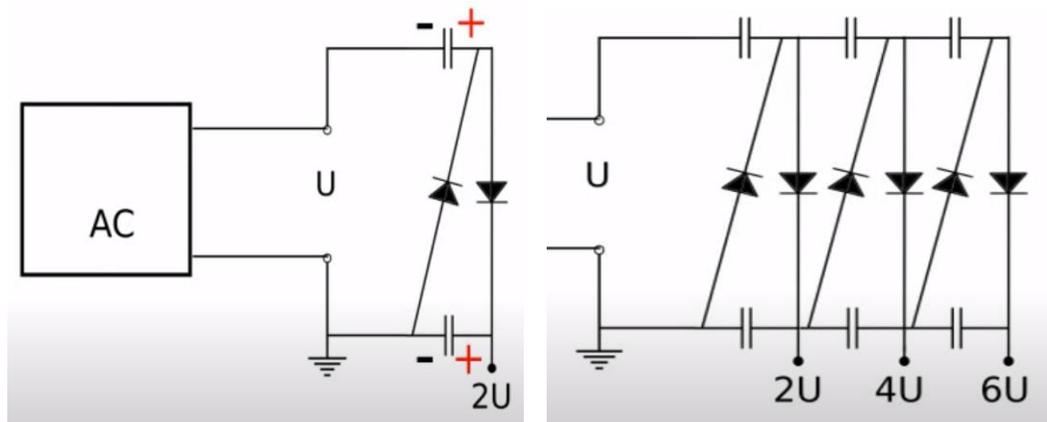


Figura 3a

Figura 3b

Figura 3. Duplicadores de voltaje de Cockcroft-Walton. [17]

Circuito Multiplicador de voltaje Dickson.

Como se puede apreciar en la figura 4 el circuito no tiene mucha diferencia del doblador de Cockcroft-Walton, en ambos circuitos se puede ir agregando etapas que van doblando el voltaje de la salida anterior. Según un artículo realizado por Diana Magally Barrón Longoria en la Universidad Autónoma de México el 28 de octubre de 2020 [18], en el cual realizaron diversas prácticas y comparaciones entre estos dos circuitos, determinaron que los dos dan resultados parecidos y no existe mucha diferencia entre ellos por lo que recomiendan utilizar cualquiera de las dos. También argumentan que en cuestión de diseño el circuito Cockcroft-Walton es más fácil y en cuestión de cálculo el circuito Dickson es más sencillo.

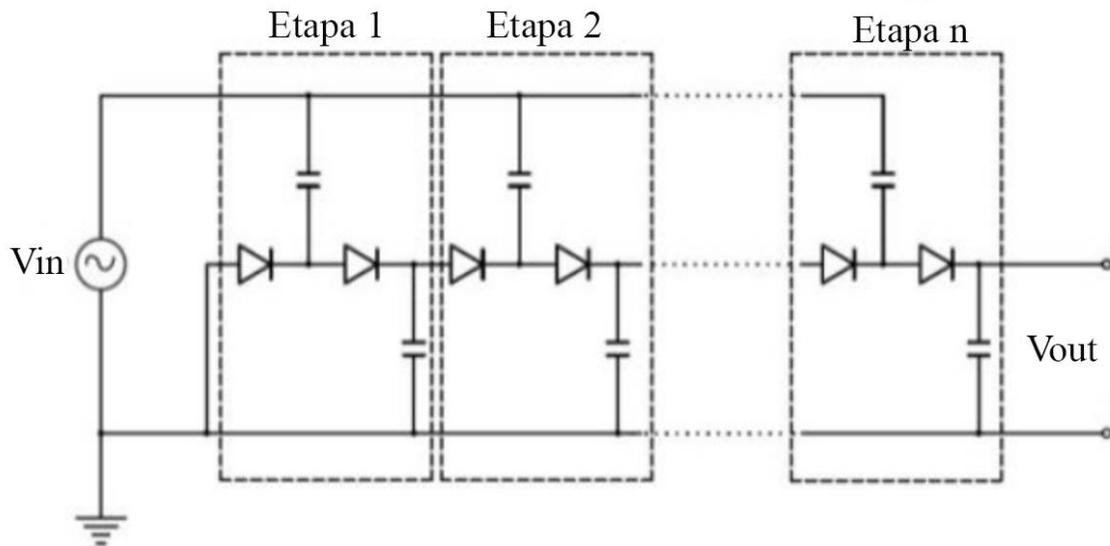


Figura 4. Circuito Multiplicador de Dickson [19]

El funcionamiento de los dos circuitos es similar, en el primer semiciclo negativo se carga el condensador 1 por medio del diodo 1 y en el segundo semiciclo se carga el condensador 2 como consecuencia de la suma del voltaje almacenado en el condensador 1 y la fuente, por lo que a la salida del condensador 2 se tiene una tensión igual al doble de la tensión en la entrada, si se agrega más etapas al circuito el funcionamiento es igual solo se debe tomar en cuenta la salida de la anterior etapa como la nueva fuente.

Almacenamiento

Principalmente existen dos opciones las cuales son más utilizadas en los sistemas de cosecha de energía estudiados en la revisión de antecedentes investigativos, estos son el uso de baterías y condensadores, en los dos párrafos siguientes se describe a detalle el funcionamiento de cada uno de ellos.

Condensadores.

Los condensadores están diseñados con pares de placas conductoras aisladas por un medio dieléctrico figura 5 y al igual que las baterías las celdas de los condensadores tienen un electrodo negativo y uno positivo separados por un electrolito y el almacenamiento de energía ocurre en forma estática esto significa que las cargas

positivas son almacenadas en uno de los electrodos y las cargas negativas en el otro, éstas se colocan en cada electrodo simplemente por la presencia de campo eléctrico. Lo que significa que dentro de las mismas no se producen reacciones químicas lo que les permite tener una cantidad de ciclos de carga y descarga mucho más rápida que las baterías, lo que les da una gran ventaja contra las baterías de iones de litio [20]

Características de los capacitores.

- puede usarse junto con baterías
- más amigables con el medio ambiente
- capacidad de energía alta
- trabaja en un amplio rango de temperatura
- poca necesidad de mantenimiento
- trabaja con corriente altas
- capacidad de carga y descarga, básicamente instantánea

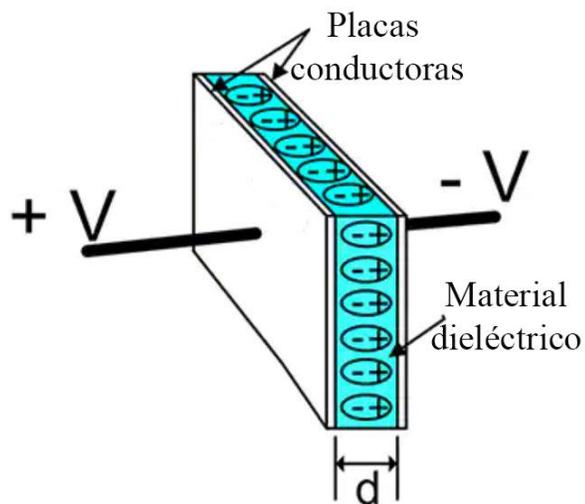


Figura 5. Partes de un capacitor

Fuente: Elaborado por el investigador

Baterías de Iones de litio.

la empresa Sony en 1991 comercializó la primera batería de litio recargable, desde entonces las baterías de litio han estado en la mayoría de dispositivos electrónicos que cuentan con baterías en su interior desde un Smartphone hasta las baterías de los vehículos eléctricos en la actualidad, estas baterías emplean como electrolito una sal de litio la cual es necesaria para la reacción reversible que sucede entre el ánodo (fabricado de óxido de litio) y el cátodo (fabricado de carbono) figura 6, al cargar la batería, los iones de litio se mueven del electrodo positivo al negativo a través del electrolito mientras que los electrones son movidos del polo positivo al negativo por acción de la fuente de carga y en el proceso de descarga los iones de litio regresan a su celda original a través del electrolito mientras que los electrones deben hacerlo a través de un circuito externo lo que genera la electricidad. [21]

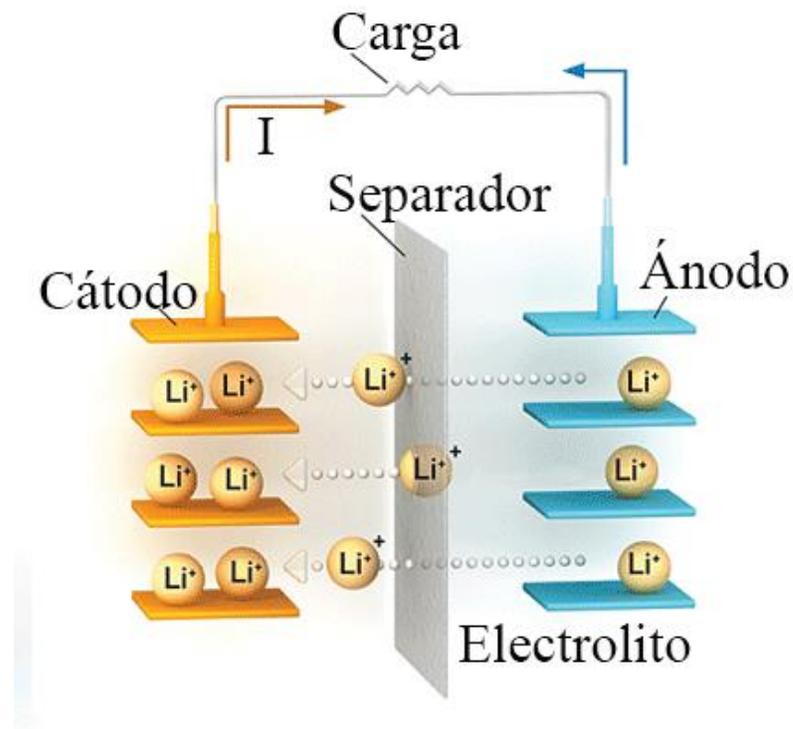


Figura 6. Batería de iones de litio [22]

Antenas Microstrip

las antenas microstrip o antenas tipo parche son antenas impresas en un circuito, las cuales constan de una superficie radiante que puede ser cualquier figura geométrica diseñada por el Diseñador (parte metálica) frente a otra que actúa como plano de tierra y separadas por un dieléctrico (sustrato con cierta permitividad dieléctrica) de un grosor muy pequeño, estas antenas son diseñadas generalmente para implementarse en equipos de comunicación muy pequeños como los dispositivos wearables, celulares, etc. a continuación en la figura 7 se indican las partes de una antena microstrip. [23]

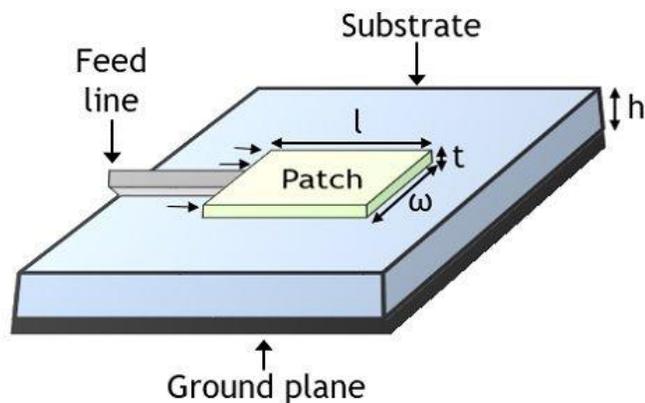


Figura 7. Partes de una antena Microstrip [24]

Donde:

L = Longitud del parche

W = Ancho del parche

h = Grosor del sustrato

t = Grosor del parche

También es importante saber ϵ_r = permitividad del parche y τ_p = tangente de pérdida del parche.

Cálculos de una antena microstrip rectangular

Las longitudes de los lados están en cm, la frecuencia en GHz y la velocidad de la luz como 30.

$$w = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \text{ cm}$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}}$$

$$z_s = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \text{ ohmios}$$

$$\lambda_s = \frac{\lambda}{\epsilon_{ef}} \text{ cm}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{ef}} = \frac{2\pi}{\lambda_s}$$

$$L_{ef} = \frac{\lambda_s}{2} \text{ cm}$$

$$L_{ef} = \frac{15}{f \sqrt{\epsilon_{ef}}} \text{ cm}$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ef} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{ef} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \text{ cm}$$

$$L = L_{ef} - 2\Delta L$$

$$f_r = \frac{30}{2L_{ef}(\text{cm})\sqrt{\epsilon_{ef}}} \text{ GHz}$$

Donde:

ϵ_{ef} = Permitividad dieléctrica efectiva

z_s = Impedancia característica

λ_s = Longitud de onda en el sustrato

β = Constante de fase

L_{ef} = Longitud eléctrica del parche

ΔL = Diferencial de longitud debida a la corriente en el parche

f_r = Frecuencia de resonancia

Parámetros de antenas

- Impedancia: La impedancia de entrada de una antena está en dependencia de la frecuencia en que trabaja y es la relación entre la tensión y la corriente de la antena a su entrada.
- Intensidad de radiación: se trata de la potencia que radia la antena en una determinada dirección, su unidad de medida es los vatios por estereorradián.
- Diagrama de radiación: es la representación gráfica generalmente en tercera dimensión de las propiedades de radiación de una antena se expresa en decibelios, en la mayoría de casos para realizar el estudio del diagrama de radiación es más conveniente realizar un corte bidimensional de diagrama de radiación figura 8a y representarlo en coordenadas cartesianas o polares figura 8b, el diagrama polar suministrar información de la distribución de potencia en las diferentes direcciones del espacio mientras que representarlo en coordenadas cartesianas puede ser de mayor eficiencia para apreciar los detalles en una antena directiva, de esta gráfica se puede obtener parámetros importantes de la radiación de la antena como: Ancho de Haz y la relación del lóbulo principal y secundario.

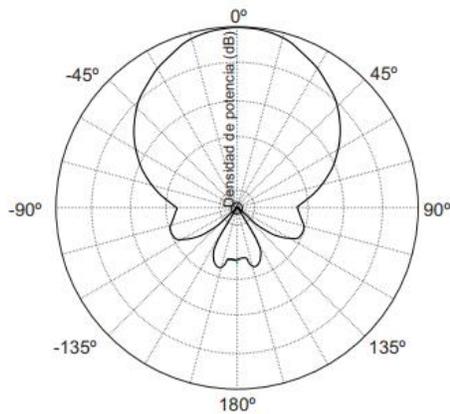


Figura 8a

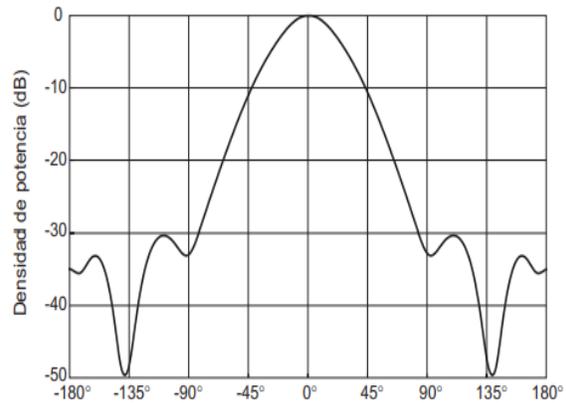


Figura 8b

Figura 8. Diagrama de radiación en coordenadas polares y cartesianas [25]

- Directividad: relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección dada con la densidad de potencia que radiaría en esa misma distancia una antena isotrópica figura 9 que estuviese radiando la misma potencia.

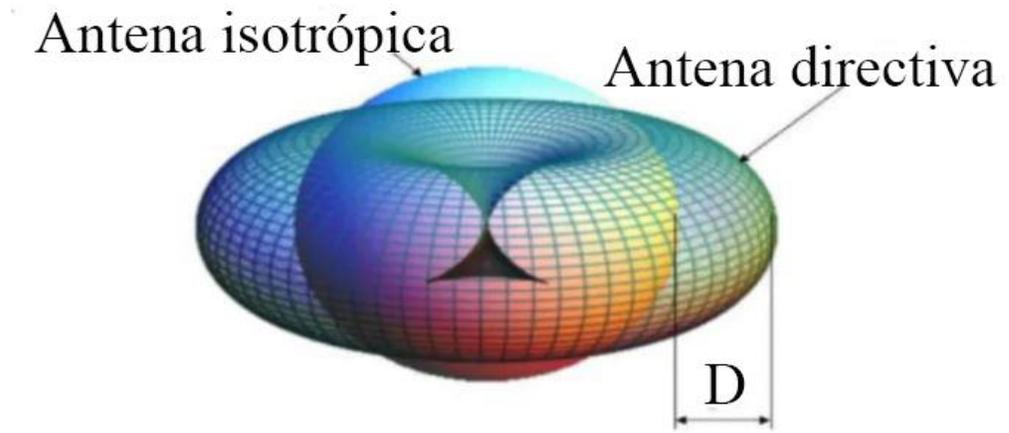


Figura 9. Directividad de una antena [26]

- Polarización: es la figura geométrica descrita a través del tiempo por el vector que representa al campo eléctrico en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Según la figura trazada se dice que la onda está linealmente polarizada o circularmente polarizada. [27]

Ventajas de antenas microstrip

- Ocupa espacio reducido
- fácil fabricación
- facilidad de fabricación a gran escala
- fácil de implementar en dispositivos pequeños
- facilidad de agrupamiento y arrayas

Desventajas

- alta Q, por lo tanto, muy poco ancho de banda
- no permite mucha potencia

Antena microstrip Tipo Fractal

El fractal hace referencia a un objeto geométrico que cuya estructura básica se repite muchas veces en diferentes escalas y diferentes direcciones, en la naturaleza existen muchos tipos de fractales tales como: el brócoli, un helecho, un caracol, un girasol y como no en las comunicaciones también existe el diseño de antenas con geometría fractal ya que el proceso interactivo de repetir una estructura básica a diferentes escalas permite también que la antena pueda trabajar a múltiples frecuencias, tener un mayor ancho de banda que las antenas microstrip convencionales, mayor ganancia y diseño más compacto, esto ha permitido que en las comunicaciones las antenas de tipo fractal hayan tenido un gran desarrollo e investigación a los mismos, pudiéndose utilizar en aplicaciones como: sistemas celulares y aplicaciones de microondas, algunas figuras fractales básicas y sus ecuaciones de diseño se detallan a continuación. [28]

Curva de Koch

Para diseñar este fractal se inicia con un segmento de recta el cual se divide en tres partes para luego en el segmento del centro dibujar un triángulo equilátero sin su base “esta es la primera interacción”, posteriormente se va repitiendo el proceso con cada segmento de recta que se encuentra en la figura, de acuerdo con el número de repeticiones que se realice el proceso se denomina la curva de Koch con N

interacciones. En la figura 10 se puede apreciar el proceso de creación de una curva de Koch y una curva de Koch con N=6

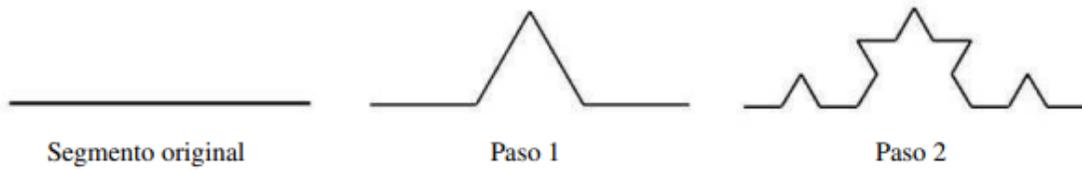


Figura 10. Fractal Curva de Koch [29]

Tabla 5. Ecuaciones de diseño de una curva de Koch [29]

Paso	ecuación
Número de segmentos	4^k
Longitud de cada segmento	$\frac{1}{3^k}$
Longitud total	$\left(\frac{4}{3}\right)^k$

Triángulo de Sierpinski

Fue diseñado por Waclaw Sierpinski en 1915 y para diseñar este fractal se inicia con un triángulo equilátero posteriormente se une los puntos medios de cada lado para formar otro triángulo equilátero dentro del mismo, luego ese triángulo es eliminado, si se desea proceder a la segunda interacción se deberá de igual manera dividir cada triángulo existente en tres partes igual para formar un nuevo triángulo equilátero en su interior, posteriormente se borrarán los triángulos formados como se adjunta en la figura 11 se indica el proceso de diseño de una triángulo de Sierpinski con segunda interacción.

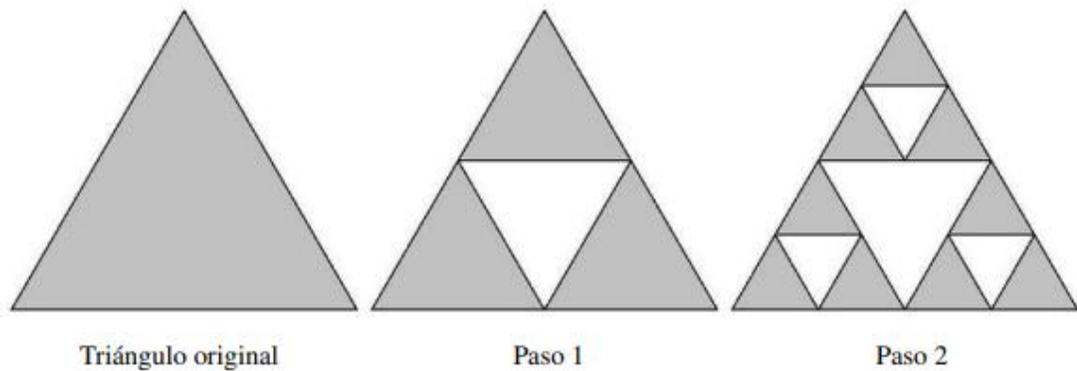


Figura 11. Proceso de diseño de un triángulo de Sierpinski [29]

Consideración: no es necesario diseñar exclusivamente con triángulos equiláteros, siempre que para la siguiente interacción se tome los puntos medios de cada lado para crear los siguientes triángulos, se obtendrá resultados idóneos para cualquier tipo de triángulo.

Tabla 6. Ecuaciones de diseño de un triángulo de Sierpinski [29]

Detalle (si se diseña con triángulos equiláteros)	Ecuación
Perímetro	3l
Área	$\frac{l^2\sqrt{3}}{4}$
paso	k
Número de triángulos	3^k
Perímetro total	$3\left(\frac{3}{2}\right)^k$
Área total	$\frac{\sqrt{3}}{4} \left(\frac{3}{4}\right)^k$

Alfombra de Sierpinski.

Para diseñar una alfombra de Sierpinski se inicia con una figura cuadrada, a la cual se procede a dividir cada lado en 3 partes iguales, posteriormente se unen esas líneas y se quita el cuadrado interior que se forman por la unión de las líneas trazadas, si se desea proseguir con otra interacción se realizará lo mismo con cada cuadrado que se encuentre formado como consecuencia del paso anterior. De igual manera en la figura

12 se indica el proceso de diseño de una alfombra de Sierpinski, y también cabe mencionar que no es necesario crear una alfombra de Sierpinski con un cuadrado, sino que puede ser cualquier figura rectangular, siempre que se divida cada lado en tres partes igual y se sigan los pasos mencionados anteriormente. [29]

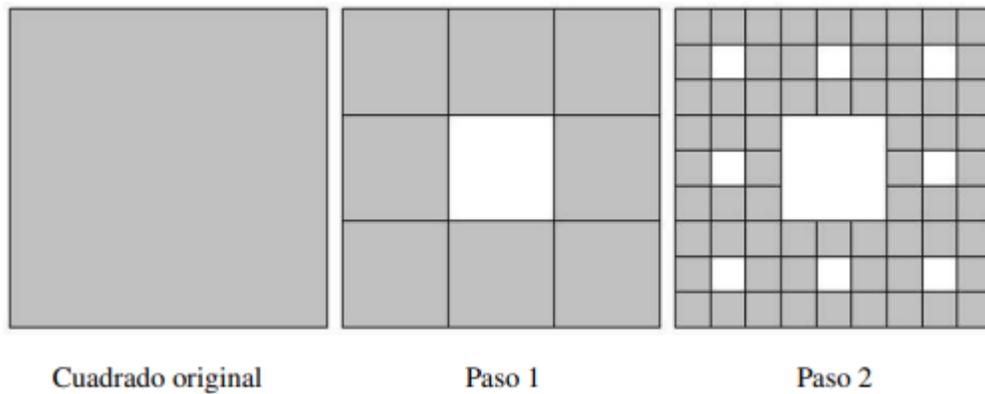


Figura 12. Fractal alfombra de Sierpinski [29]

Tabla 7. Ecuaciones de diseño de la alfombra de Sierpinski [29]

Detalle (si se realiza con un cuadrado)	Ecuación
Paso	K
Número de cuadrados	8^k
Lado de cada cuadrado	$\frac{1}{3^k}$
Área total	$\left(\frac{8}{9}\right)^k$

Rectenna:

Se trata de una antena seguida de un rectificador de onda, lo que permite convertir la energía alterna recibida por la antena en energía continua. En la figura 13 se puede apreciar el circuito de una rectenna microstrip. [30]

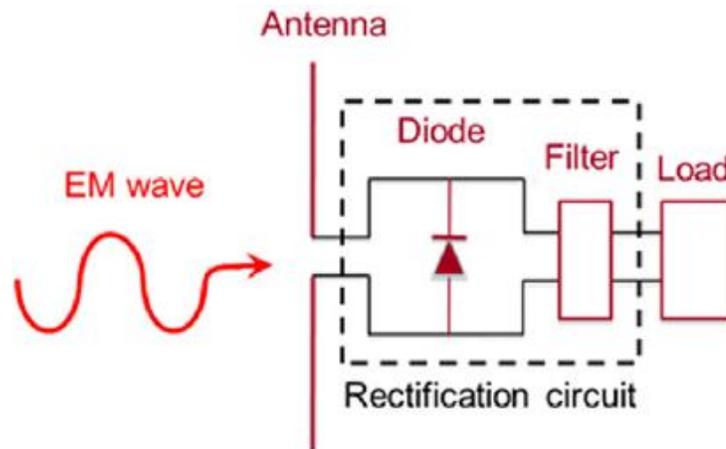


Figura 13. Estructura de una rectenna [31]

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Desarrollar un Sistema de Cosecha y Almacenamiento de Energía Electromagnética con Sistemas de Rectennas y Celdas Fotovoltaicas para Dispositivos Inalámbricos IoT de Baja Potencia.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar el funcionamiento de un sistema de cosecha de energía electromagnética con sistema de Rectennas y celdas fotovoltaicas.
- Realizar el estudio de factibilidad de acoplamiento de cosecha de energía con sistema de rectennas y celdas fotovoltaicas.
- Diseñar un dispositivo que permita captar la energía electromagnética con sistema Rectennas y celdas fotovoltaicas.
- Implementar el dispositivo y realizar una tabla que indique los voltajes almacenados y los tiempos de carga realizados por el sistema.

CAPITULO 2

METODOLOGÍA

2.1. Materiales

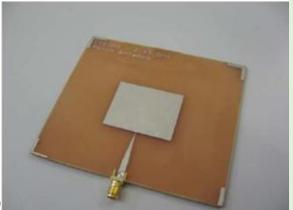
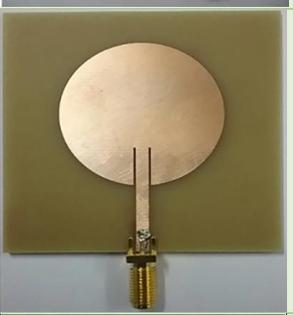
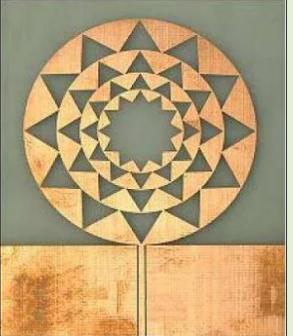
El sistema de cosecha de energía electromagnética se desarrolló con los siguientes materiales.

- Antena de 2.4 GHz.
- Panel fotovoltaico
- Convertidor dc.
- Circuito multiplicador rectificador de voltaje.
- Baterías de 3.7 y 9 V

2.1.1. Cosecha de energía en la frecuencia RF.

La frecuencia que más está presente a nuestro alrededor es la de WIFI debido al avance y gran utilidad que van teniendo los dispositivos IoT cada año, como se analizó en los antecedentes investigativos y en la fundamentación teórica, actualmente existe un promedio de siete dispositivos IoT por hogar todos operando en las frecuencias de WIFI y bluetooth, se sabe además que los servidores de estas redes trabajan con antenas sectoriales es decir que la señal es emitida en todas direcciones por lo que los dispositivos IoT que se hallan en el hogar no son capaces de captar toda la energía que envía el servidor desperdiciándose así la mayoría de la energía que es emitida de los dispositivos IoT, para aprovechar esta energía se pretende diseñar e implementar una antena tipo patch que opere en las banda de 2.4 GHz, existen algunos tipos de antena los cuales se pueden implementar para el presente proyecto, algunas de estas son: antenas log-periódicas, antenas espirales, antena rectangular, antena circular y antenas con diseños fractales, las características de las antenas mencionadas se detallan en la tabla [8] y la antena se implementará en una baquelita de fibra de vidrio FR4 con permitividad relativa de 4,3 un grosor del sustrato de 1.6 mm y una tangente de pérdida de 0,02.

Tabla 8. Tipos de antenas microstrip

Diseño	Antena	Características
	Log- periódica	<ul style="list-style-type: none"> - Alta ganancia - Gran directividad - Se utiliza en bandas de HF, VHF, UHF.
	Espiral	<ul style="list-style-type: none"> - Amplio rango de frecuencias - Baja ganancia - Tamaño reducido - Transmite ondas polarizadas circularmente
	Microstrip	<ul style="list-style-type: none"> - Ancho de banda reducido - Polarización lineal - Sistemas GPS
	Circulares	<ul style="list-style-type: none"> - Trabajan en bandas VHF y UHF - Alta ganancia - Tamaño reducido
	Fractal	<ul style="list-style-type: none"> - Gran reducción de tamaño - Patrón de radiación estable - Fácil integración con circuitos - Multibanda - Gran ancho de banda.

Fuente: Elaborado por el investigador

De todas las antenas anteriormente mencionadas la antena con diseño fractal es la que presenta mayores ventajas para la cosecha de energía gracias a su gran ancho de banda, capacidad de trabajar en diferentes frecuencias simultáneamente y su principal característica, con una antena de diseño fractal se logra trabajar a 2.4 GHz con dimensiones mucho más pequeñas, aproximadamente la mitad de una antena log-periódica que trabaje para la misma frecuencia, Razón por la cual en el presente proyecto se diseñará e implementará una antena con diseño fractal para la recolección de energía. [32]

2.1.2. Multiplicador rectificador de voltaje

El voltaje que se logra obtener con el sistema de cosecha de energía mencionado anteriormente está en el rango de los mili-V, voltaje que aún no es suficiente para alimentar un procesador, ya que actualmente los microprocesadores operan con al menos 1.5 V, por lo tanto, es necesario incrementar el voltaje cosechado con el sistema de recolección de energía RF, en el capítulo 1 se indicó los dos multiplicadores de voltaje existentes, el de Cockcroft-Walton y el de Dickson de los cuales el circuito de Cockcroft-Walton tiene mayor facilidad de implementación en cascada, por lo en el presente proyecto se ha optado por utilizar su circuito.

En el artículo “Optimized Process Design of RF Energy Harvesting Circuit for Low Power Devices” realizado por Nahida Akter, realizaron una investigación para determinar el número de etapas óptimo para un circuito multiplicador de voltaje aplicado a la recolección de energía y llegaron a la conclusión que un circuito multiplicador de voltaje de 5 etapas es el más adecuado para esta aplicación, esto debido a que a partir de la quinta etapa el voltaje que se obtiene a la salida del multiplicador no presenta gran diferencia con el voltaje obtenido de las anteriores etapas. La tabla realizada en dicha investigación se presenta a continuación. [33]

Tabla 9. Eficiencia de un multiplicador de 5 etapas [33]

Numero de etapas	Voltaje de entrada [V]	Voltaje de salida [V]	Eficiencia
1	0.7	1.33	95%
2	1.33	1.72	64%
3	1.72	2	58%
4	2	2.22	55%
5	2.22	2.56	57%

En la anterior tabla se puede notar que a la salida de la primera etapa se consigue casi el doble del voltaje mientras que la salida de la segunda etapa la eficiencia del circuito va disminuyendo y así consecutivamente hasta que a partir de la quinta etapa el circuito ya no presenta gran eficiencia por lo que para el presente proyecto se realizó un circuito multiplicador de Cockcroft-Walton de cinco etapas.

2.1.3. Cosecha de energía solar

Como se indica en los párrafos anteriores la energía captada de las ondas WIFI no brindan mucha energía, además de que están limitadas a lugares donde existan dispositivos IoT, es decir zonas urbanas, para solucionar esto se agregará al sistema, una etapa adicional que pueda convertir la energía solar en eléctrica. Existen tres tipos de paneles solares los cuales se detallan a continuación.

Paneles monocristalinos. – estos paneles solares están formados por un solo cristal de silicio de alta pureza por lo que presentan mayor eficiencia en la recolección de energía logrando con paneles solares de tamaño reducido conseguir la misma cantidad de energía que con paneles solares más grandes policristalinos, entre las principales desventajas de los paneles solares monocristalinos se halla en que en situaciones en las cuales la luz no les incide directamente no presentan gran eficiencia en comparación con otros tipos de paneles solares.

Paneles policristalinos. – estos paneles solares están hechos por múltiples cristales de Silicio no alineados lo que resulta en una gran facilidad de fabricación y una reducción de eficiencia en recolección de energía en condiciones en las cuales la luz les incide

directamente, pues al estar hechos por múltiples cristales de Silicio, el vacío dejado por los mismos dificulta el movimiento de los electrones, por otra parte estos pequeños cristales de Silicio pueden aprovechar la luz proveniente de cualquier dirección consiguiendo que estos paneles solares presenten mayor eficiencia al momento de cosechar energía en lugares con poca luz o lugares donde la luz no incide directamente en el panel solar.

Paneles de película delgada. – son paneles solares en los cuales se coloca una muy delgada capa de material fotovoltaico en un sustrato el cual puede ser plástico, vidrio o metal, las principales ventajas de este tipo de paneles solares es que al ser delgadas presentan mayor flexibilidad y una gran facilidad de integración en dispositivos de tamaño reducido. Por otra parte, la desventaja de estos paneles solares es que presentan una menor eficiencia en la recolección de energía.

Los tres diferentes tipos de paneles solares que se han descrito anteriormente se pueden ver en la figura 14, y posteriormente en la tabla 10 se indican las principales características de cada uno de ellos.

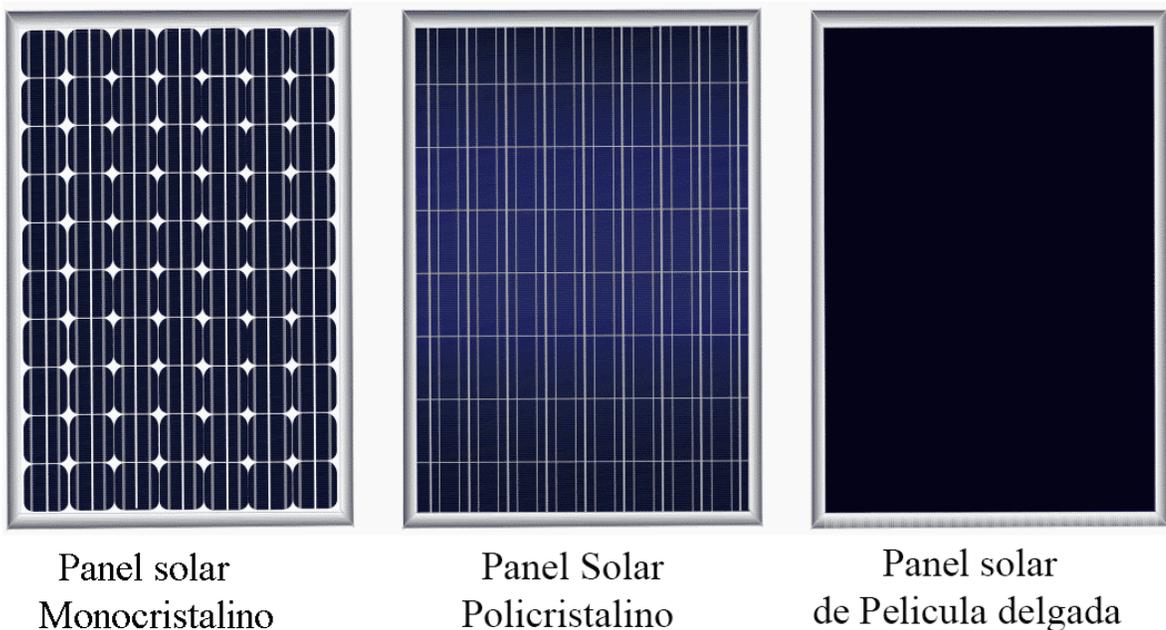


Figura 14. Tipos de paneles Solares. [34], [35]

Tabla 10. Tipos de paneles solares

Tipo de panel solar	Monocristalino	Policristalino	Panel de película delgada
Color del panel	negro	azul	Café, gris y negro
Eficiencia	20%	16%	10%
Tiempo de vida	25 años	25 años	15 -20 años
Fabricación	Un cristal de Silicio.	Varios cristales de Silicio.	Finas películas de cristales de Silicio.
Ventaja	Alta eficiencia energética.	En comparación con el monocristalino, presenta alta eficiencia en condiciones en las que la luz no les incide directamente.	Fácil implementación en espacios reducidos ya que son muy delgados y flexibles.
Desventaja	Baja eficiencia en condiciones en las que la luz no les incide directamente.	Baja eficiencia energética.	Baja eficiencia en recolección de energía.

Fuente: elaborado por el investigador

Como se indica en la tabla 8 la mejor opción para recolección de energía es el panel solar monocristalino gracias a que presenta mayor eficiencia. Para el desarrollo de proyectos se tiene básicamente tres opciones de paneles solares, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 11. Costos de paneles solares

Panel solar	Voltaje [V]	Corriente [mA]	Costo
	2	200	4\$
	5	200	5\$
	6	150	7\$

Fuente: elaborado por el investigador

De las tres opciones presentadas en la anterior tabla el panel solar de menor voltaje no es una opción apta para la presente investigación por que el voltaje que brinda es muy poco y en condiciones de escasa luz no es capaz de entregar los 2 V que necesita el circuito para funcionar, por lo que solo queda a elección los dos paneles restantes, de

los cuales el panel de 6 V a 150 mA es la mejor opción para el proyecto ya que brinda mayor voltaje en condiciones de poca luz.

2.1.4. Regulador conversor de voltaje

Son dispositivos que almacenan la energía de entrada en forma de campo magnético o eléctrico para posteriormente entregar esa energía en la salida con un nivel de voltaje diferente al de la entrada, existen convertidores reductores o “convertidor buck”, los cuales entregan a la salida un voltaje inferior el voltaje de entrada, pudiendo entregar incluso 0 V a la salida, también existen los convertidores elevadores llamados “convertidor boost”, los cuales pueden entregar a la salida un voltaje mucho mayor al voltaje de entrada y finalmente los convertidores reductores elevadores “ Convertidor buck - boost”, el objetivo de estos es poder brindar a la salida un voltaje mayor o menor al voltaje de entrada. A continuación, en la tabla 12 se indican algunos convertidores que se hallan comercialmente en el mercado, las características de ellos y el tipo de convertidor que son.

Tabla 12. Tipos de convertidores dc.

	Tipo	V _{int} [V]	V _{out} [V]	I _{máx} [A]	Datasheet	Costo [\$]
	Convertidor boost	3-30	4-35	5	Datasheet	32.00
	Convertidor buck - boost	3.8-32	1.25-35	3	Datasheet	16.00
	Convertidor Buck	5-32	0.8-24	5	Datasheet	32.00
	Convertidor boost	2-24	Hasta 27	2	Datasheet	3.00
	Convertidor buck - boost	5-32	1-30	5	Datasheet	27.00
	Convertidor Buck	8-36	1.25-32	5	Datasheet	9.50

Fuente: Elaborado por el investigador

Con el sistema a implementarse se cosechará un promedio de 5 V por lo que es de vital importancia utilizar un convertidor boost para poder tener a la salida del sistema un voltaje lo suficientemente alto como para poder cargar una batería de 9 V, utilizar un convertidor Buck-boost no sería muy optimo en el proyecto ya que no se pretende cargar baterías inferiores a 3.7 V, de igual manera utilizar un convertidor Buck sería ineficiente ya que con el sistema se cosechará un promedio de 5 V lo cual permite cargar una batería de 3.5 V pero no es posible con esto cargar una batería de voltaje mayor al cosechado por el sistema.

De todos los convertidores que se han detallado en la anterior tabla se ha optado por utilizar el MT3608 esto debido a que es más económico y puede trabajar hasta con 2

amperios lo cual es suficiente para el sistema a implementarse, con el presente proyecto se pretende lograr cosechar al menos 2 V en condiciones de poca luz como interiores o por el atardecer y al utilizar el MT3608 (figura 15) con 2 V son suficientes para lograr tener a la salida al menos 11 V que permiten cargar una batería de 3.7 V y una de 9 V sin ningún problema.

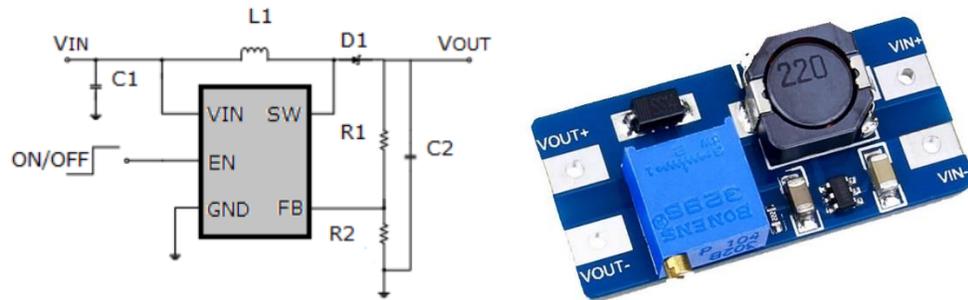


Figura 15. Convertidor DC-DC Boost MT 3608. [36]

2.1.5. Almacenamiento de energía

Son dispositivos que utilizando procedimientos electroquímicos más conocidos como procesos de oxidación reducción (redox) pueden acumular energía para posteriormente devolverla, dependiendo del material con el que estén hechos pueden repetir este ciclo un número determinado de veces a los cual se le llama ciclos de carga-descarga, en la actualidad existen baterías de diferentes materiales como: baterías de plomo ácido, baterías de níquel hierro, baterías de níquel cadmio, baterías de níquel-hidruro metálico, baterías de iones de litio (Li-ion) y baterías de polímero de litio (Lipo), [37] los cuales se detallan a continuación:

Tabla 13. Tipos de baterías

baterías	Ciclos de carga/descarga	Voltajes típicos	Densidad de energía	ventajas
Plomo-ácido	1500-2000	2 V	30 Wh/kg	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo costo ✓ Fácil de fabricar
Níquel-hierro (Ni-Fe)	3000-4000	1.2-1.4 V	40Wh/kg	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite sobre cargas ✓ Admite descargas totales sin perder su capacidad
Níquel-cadmio (Ni-Cd)	1000-1500	1.2V	50Wh/kg	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Admiten sobrecarga ✓ Alto rango de temperatura de funcionamiento
Níquel hidruro metálico (Ni-MH)	500-2000	1.2V	60-120 Wh/kg	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mejor rendimiento
Iones de litio (Li-ion)	400-1200	3.7 V	100 Wh/kg	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tamaño reducido
Polímero de litio (LiPo)	>1000	3.7 V	130 -200 Wh/kg	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tasa de descarga superior ✓ Tamaño reducido ✓ Menor peso

Fuente: Elaborado por el investigador.

De todas las baterías indicadas anteriormente, la más óptima para el proyecto es la batería de polímero de litio (LiPo), pero estas baterías requieren de un cargador especial y en el presente proyecto no se incluirá de un cargador especial ya que representaría una carga más para el sistema lo que lo volvería también menos eficiente, razón por la cual se ha escogido la batería de Níquel hidruro (Ni-MH) gracias que pueden almacenar el doble de energía que las de níquel cadmio con una batería con las mismas dimensiones, posteriormente se realiza medidas de carga con el sistema implementado cuyos resultados obtenidos son expuestos en el capítulo 3.

Factibilidad de implementación del sistema.

Después de haber realizado todas las investigaciones pertinentes para cada uno de los componentes que lleva un sistema recolector de energía RF y solar, se ha visto que para la recolección de energía RF se utiliza una antena que en el presente proyecto tiene un diseño fractal y trabaja a los 2.4 GHz con el cual es posible cosechar energía en la frecuencia de WIFI, también para incrementar el valor del voltaje cosechado es necesario un multiplicador de voltaje de cinco etapas que como se analizó en el artículo [33] presenta una eficiencia superior al 50%, por otro lado para la recolección de energía solar se implementa un panel solar monocristalino, posteriormente se conectan estos dos sistemas de recolección de energía en serie para que actúen como sumadores de voltaje, seguidamente el voltaje obtenido de los sistemas mencionados pasan por un convertidor boost MT3608 que permite tener una voltaje de entre 5 a 27 V en la salida siempre que a la entrada se logre cosechar al menos 2 V, finalmente estos voltajes cosechados son almacenados en 2 baterías de níquel metal hidruro (Ni.MH) de 3.7 y 9 V a 300mA cuyos resultados de las pruebas de carga son indicados en tablas del capítulo 3.

2.2. Métodos

2.2.1. Modalidad de investigación

Investigación Aplicada

El presente proyecto involucra una investigación aplicada al poner en práctica todos los conocimientos adquiridos durante los años de aprendizaje en la Universidad, mismos que son de gran utilidad en la comprensión de los circuitos electrónicos en los artículos revisados y en el diseño de los sub sistemas que conforman el presente proyecto.

Investigación Bibliográfica.

La investigación bibliográfica es llevada a cabo en el desarrollo del proyecto para la búsqueda de información previa existente sobre trabajos relacionados que se hayan investigado anteriormente, información que fue útil para definir los componentes y los circuitos que mejor eficiencia presentan en los proyectos de recolección de energía.

Investigación de Campo.

La investigación de campo es llevada a cabo una vez desarrollado el prototipo ya que es necesario conocer la cantidad de energía que es capaz de recolectar el sistema en diversos sectores de la ciudad, entre ellos deben ser al menos una zona rural y una urbana.

Investigación Experimental.

La investigación experimental es llevada a cabo al momento de analizar la eficiencia que presenta el sistema con los dos dispositivos de almacenamiento mencionados en la metodología de la investigación, para ello se toman datos de la cantidad de almacenamiento que se logra obtener después de dos horas en una zona urbana y en una zona rural utilizando como almacenamiento las baterías de iones de litio, el mismo proceso es llevado a cabo después con un capacitor como dispositivo de almacenamiento, para finalmente realizar una tabla en la que indique con cual se logra obtener una mayor eficiencia del sistema.

2.2.2. Recolección de información

Durante el desarrollo del presente proyecto se ha obtenido información de las diferentes fuentes bibliográficas como journal ranks, repositorio de la Facultad de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, E-books y base de datos libres que ofrece biblioteca de la Universidad técnica de Ambato.

También se ha obtenido información de los diferentes libros que se han estudiado en el transcurso de la carrera, especialmente han sido de gran utilidad el libro de electromagnetismo, antenas y diseño de circuitos estudiados en las asignaturas de circuitos eléctricos, antenas y teoría electromagnética respectivamente.

2.2.3. Procesamiento y análisis de datos

Para el análisis de los datos adquiridos en la recolección de información se llevó a cabo los pasos mencionados a continuación.

- Lectura y extracción de la información requerida de las diferentes fuentes mencionadas anteriormente.

- Investigación de los materiales tanto en hardware como en software que fueron de mejor eficiencia en el desarrollo de proyectos similares, publicados en las diferentes revistas científicas.
- Investigación de los circuitos implementados en proyectos similares y revisión de cuales brindaron mejores resultados.
- Análisis de resultados que lograron obtener en los proyectos.

2.2.4. Propuesta de solución

Realizar un sistema que permita recolectar la energía existente en las ondas RF y luz solar, utilizando una antena que resuene a la frecuencia de WIFI y un panel solar monocristalino de 6 V, sumar los voltajes recolectados y enviarlos a un convertidor boost dc-dc MT3608 para tener una salida regulada que permita recargar las baterías de forma segura.

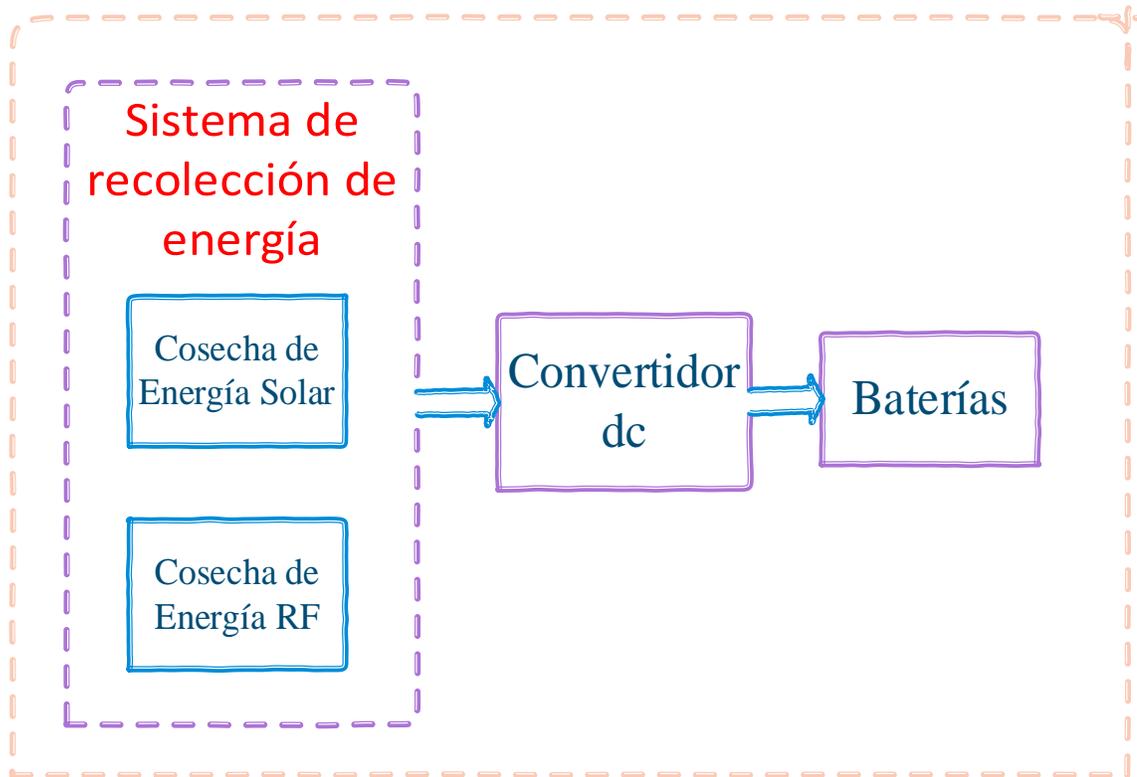


Figura 16. Diseño de la Propuesta de Solución

Fuente: Elaborado por el investigador

2.2.5. Desarrollo del proyecto

El desarrollo del proyecto es llevado a cabo según el orden mencionado a continuación:

- Revisión de artículos científicos que hayan investigado sistemas de cosecha de energía electromagnética.
- Extracción de información relevante para el desarrollo del sistema de cosecha de energía solar y de la energía electromagnética existente en las ondas RF en la frecuencia de WIFI.
- Diseño esquemático del funcionamiento del sistema a desarrollar
- Adquisición del software con el que se llevará a cabo el diseño y la simulación de la antena con la cual se implementará el sistema.
- Implementación de la antena.
- Adquisición de software de diseño y simulación de circuitos electrónicos.
- Diseño y simulación del circuito multiplicador rectificador de voltaje
- Implementación y prueba del circuito multiplicador rectificador de voltaje.
- Implementación y prueba del correcto funcionamiento de todo el sistema de cosecha de energía.
- Desarrollo de la investigación de campo para evaluar los resultados que brinda el sistema.
- Realización de tablas de resultados obtenidos con el sistema implementado.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de resultados

3.1.1. Desarrollo de la propuesta de solución

El desarrollo de la propuesta de solución está compuesto por cinco etapas que permiten obtener la mayor eficiencia del sistema al momento de captar la energía RF existente en el medio ambiente, el diagrama del sistema (figura (17)) se puede ver la etapa de recolección de energía RF con la antena y el circuito multiplicador, el sistema de recolección de energía solar con el panel solar monocristalino de 6 V a 150 mA, el convertidor boost MT3608 y las baterías para el almacenamiento de la carga, posteriormente en los siguientes ítems se detalla la fabricación de cada una de las etapas mencionadas.

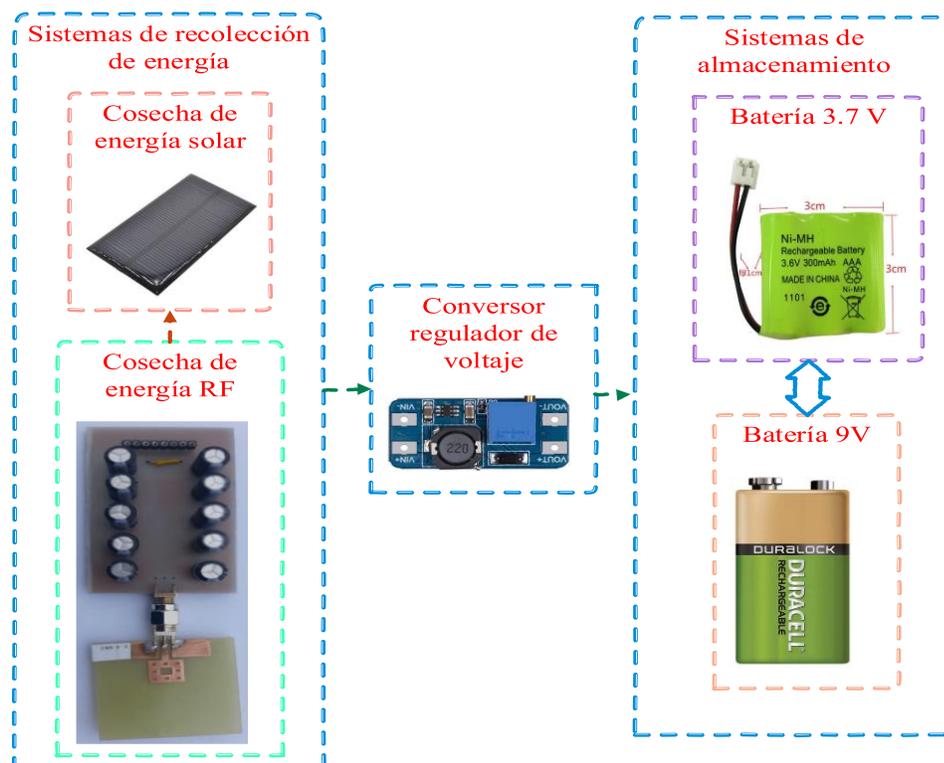


Figura 17. Diagrama de desarrollo del proyecto

Fuente: Elaborado por el investigador

3.1.2. Sistema de cosecha de energía RF

Como se mencionó en el capítulo 2, la implementación de este proyecto se desarrolla con una antena de parche realizada con un diseño fractal específicamente la alfombra de Sierpinski aplicando hasta la segunda interacción, las medidas base para el diseño de la antena se evalúan a partir de las fórmulas brindadas en el libro cálculos de antenas de Armando García las cuales se indican a continuación y también cada uno de sus parámetros fue detallado en la fundamentación teórica del presente proyecto.

Lo primero que se realiza es evaluar la longitud de onda con la cual trabajará la antena, como se desea realizar una antena que resuene a la frecuencia de WIFI, la longitud de onda es de 125 mm como se indica en la siguiente ecuación.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{30}{2.4} = 12,5 \text{ cm}$$

Para el cálculo de los demás parámetros cabe mencionar que la antena es implementada en una baquelita FR4 la cual tiene una permitividad relativa de 4.3, un grosor del sustrato de 1.6 mm y una tangente de pérdida de 0,02, cabe también recordar que la velocidad de la luz se toma como 30 y la frecuencia debe ir en GHz para que la longitud de onda tenga como unidad de medida [cm].

Con los datos mencionados se procede a calcular los siguientes parámetros de la antena.

El ancho del parche.

$$w = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{12.5}{2} \sqrt{\frac{2}{4.3 + 1}} = 3.8 \text{ [cm]}$$

La permitividad efectiva

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} = \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2 \sqrt{1 + 12 \frac{0.16}{3.8}}} = 4.08$$

El incremento ΔL del parche

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{ef} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{ef} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} = 0.412(0.16) \frac{(4.08 + 0.3) \left(\frac{4.08}{0.16} + 0.264\right)}{(4.08 - 0.258) \left(\frac{4.08}{0.16} + 0.8\right)}$$

$$= 0.13 \text{ cm}$$

La longitud del parche

$$L = L_{ef} - 2\Delta L \text{ [cm]}$$

$$L_{ef} = \frac{15}{f\sqrt{\varepsilon_{ef}}} = \frac{15}{2.4\sqrt{4.08}} = 3.09 \text{ cm}$$

$$L = L_{ef} - 2\Delta L = 3.09 - 2 * 0.13 = 2.83 \text{ [cm]}$$

Los cálculos realizados anteriormente son los brindados para el diseño de una antena rectangular, como se indicó en la propuesta de solución para la implementación del proyecto se diseña una antena de parche tipo fractal, por lo cual los cálculos fueron realizados como parámetros de inicio ya que la antena a realizar es una alfombra de Sierpinski y esta antena parte de una geometría rectangular, a partir de ese diseño básico se va realizando las diferentes interacciones para la creación de la alfombra de Sierpinski mencionadas en la fundamentación teórica y cuyas formulas se hallan en la tabla 7.

Una vez realizadas las dos interacciones y agregado un plano de tierra, la antena presenta un diseño fractal como se indica en la figura 18.

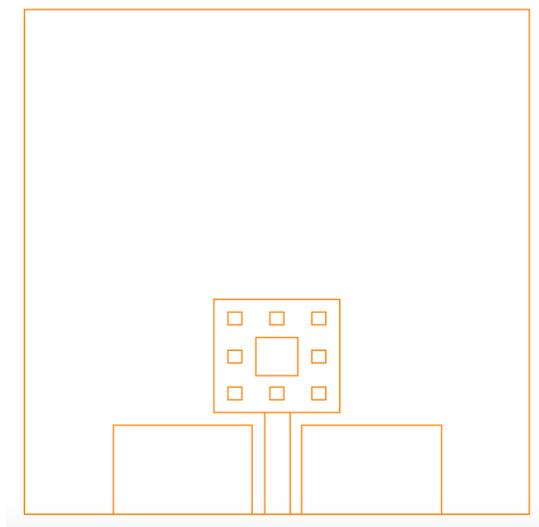


Figura 18. Antena Fractal “Alfombra de Sierpinski”

Fuente: elaborada por el investigador

Posteriormente se implementó el diseño en el software para poder realizar la simulación y obtener los parámetros de la antena, como su impedancia, coeficiente de reflexión diagrama de radiación etc. primero se inició configurando la permitividad relativa del sustrato, la cual es igual a 4,4. Ver figura 19.

Name	Location	Origin	Relative Permittivity	Relative Permeability	Bulk Conductivity
Material1	Project		4.4	1	0
Megtron2_R1577	SysLibrary	Materials	4.1	1	0

Figura 19. Parámetros de la baquelita FR4

Fuente: Elaborado por el investigador

En el software es necesario declarar un campo de radiación “fronteras de radiación”, los elementos radiantes y la fuente o puerto de excitación, los cuales están compuestos por el GND, la línea de transmisión y la antena de parche como conductor de cobre, finalmente como puerto de excitación se utilizó un puerto de onda o “Wave Port” que se encuentra disponible en el software y los datos para calcular las dimensiones del mismo las brinda el propio software.

Para tener una simulación con una exactitud muy acercada a la realidad es necesario indicar los parámetros característicos del material con el cual se pretende implementar la antena. En el presente proyecto la antena es implementada en una baquelita FR4 la cual tiene un grosor del cobre de 35 μm , altura de 1,6 mm, tangente de pérdida de 0.02, y permitividad relativa de 4.4, datos que son incluidos en la simulación y el diseño final de la antena se puede ver en la figura 20.

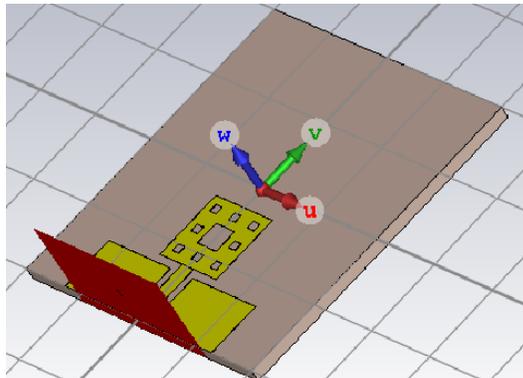


Figura 20. Diseño de la antena en 3D

Fuente: Elaborado por el investigador

Luego de realizados los cálculos por el software se obtuvo como resultado un coeficiente de reflexión de la antena de -24 dB en una frecuencia central de 2.4 GHz y un ancho de banda con un coeficiente de reflexión por debajo de los -10 dB que va desde 2.37 GHz hasta los 2.43 GHz como se puede apreciar en la figura 21.

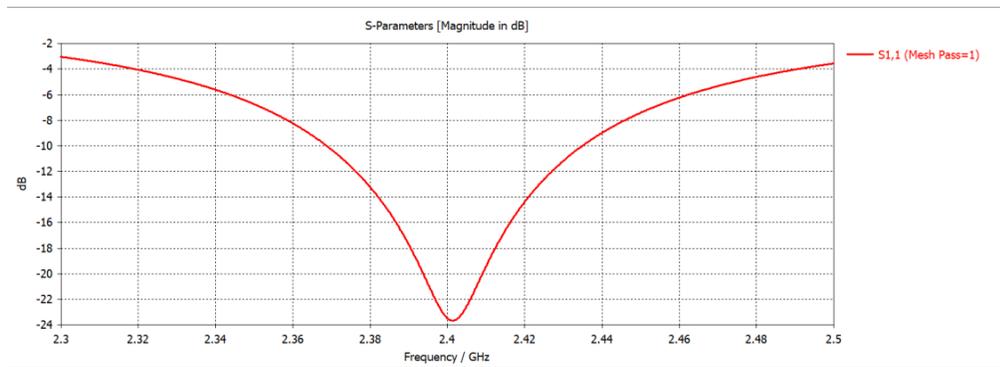


Figura 21. Coeficiente de reflexión de la antena

Fuente: elaborada por el investigador

El diagrama de radiación de campo lejano es el indicado en la figura 22.

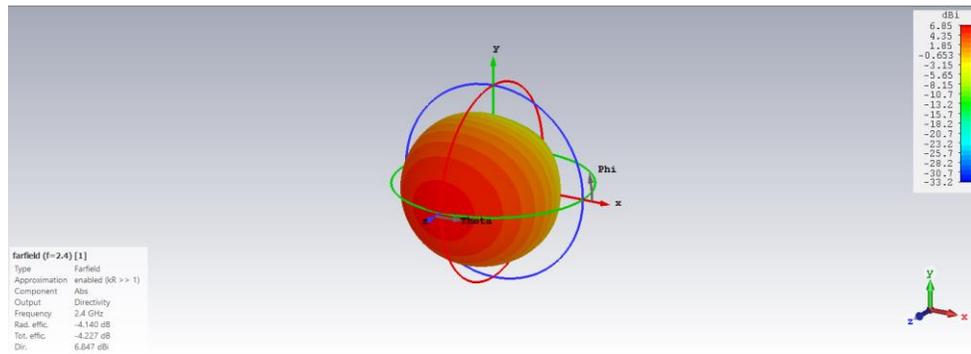


Figura 22. Diagrama de radiación de campo lejano

Fuente: Elaborada por el investigador

El parámetro SWR de la antena se puede observar en la figura 23.

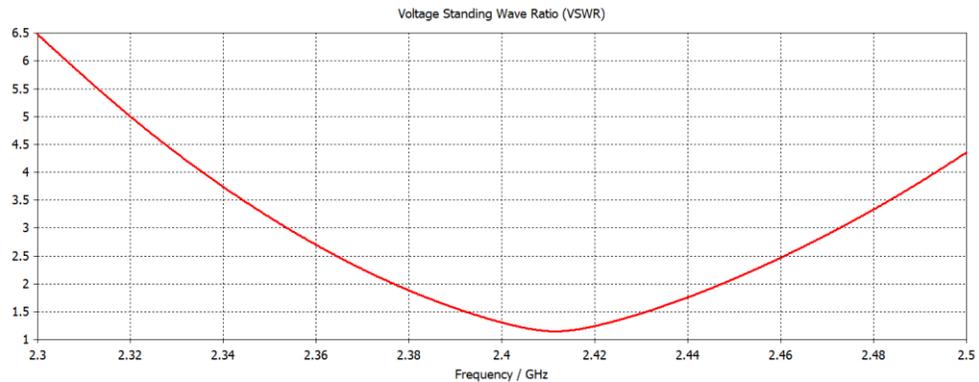


Figura 23. SWR de la antena

Fuente: Elaborado por el investigador

Luego se procede a implementar la antena aplicando una máquina de control computarizado CNC y su resultado se indica en la figura 24.



Figura 24. Antena fractal, Alfombra de Sierpinski simulada vs implementada.

Fuente: Elaborado por el investigador

Posteriormente se procede a soldar el conector SMA macho y realizar las pruebas de los parámetros de la antena, para esto se utiliza el analizador de red vectorial NANOVNA v2 2.2. Este analizador permite medir el parámetro de reflexión de la antena S11 el S21 y obtener la impedancia de la antena, con los cuales también se puede mediante un software saber cuál es el ancho de banda con el que está trabajando y su

frecuencia central. El Nano VNA utilizado en el presente proyecto se indica en la figura 25.



Figura 25. Analizador de red vectorial Nano VNA V2.2. [38]

El primer parámetro que se puede analizar de la antena es el S11 el cual muestra que la antena trabaja con un coeficiente S11 por debajo de los -10 dB desde los 2.35 GHz hasta los 2.5 GHz logrando alcanzar hasta los - 42 dB en la frecuencia de 2.39 GHz y asegurando un ancho de banda de 100 MHz entre los 2.4 y 2.5 GHz, lo cual indica que cubre todo el rango de frecuencias de trabajo del WIFI, estos resultados también son visibles en la figura 26.

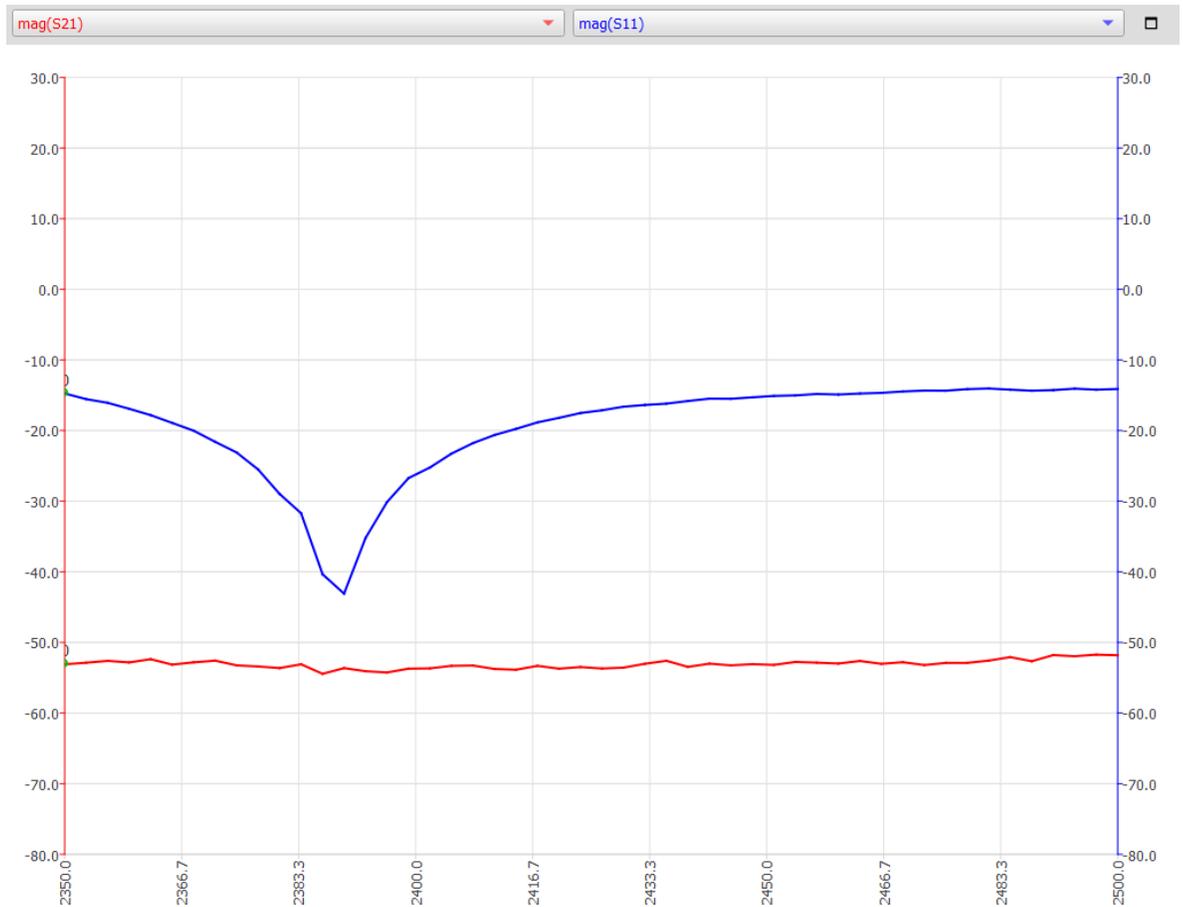


Figura 26. Parámetro S11 de la antena medido con el Nano VNA.

Fuente: Elaborado por el investigador

Análisis de la antena Fractal Alfombra de Sierpinski.

La antena fue diseñada para tener una frecuencia central en los 2.412 GHz y en la simulación también se logró obtener -24 dB en el parámetro S11 con un ancho de banda que va desde los 2.37 GHz hasta los 2.42 GHz, mientras que al implementarse se logró obtener -53 dB en la frecuencia central de 2.403 GHz con un ancho de banda que va desde los 2.37 GHz hasta los 2.5 GHz. Con la cual se procede a calcular el porcentaje de error de la antena entre lo simulado y los resultados que se obtuvieron al implementarse, en la figura 27 y 28 se puede apreciar los resultados del parámetro S11 simulado e implementado.

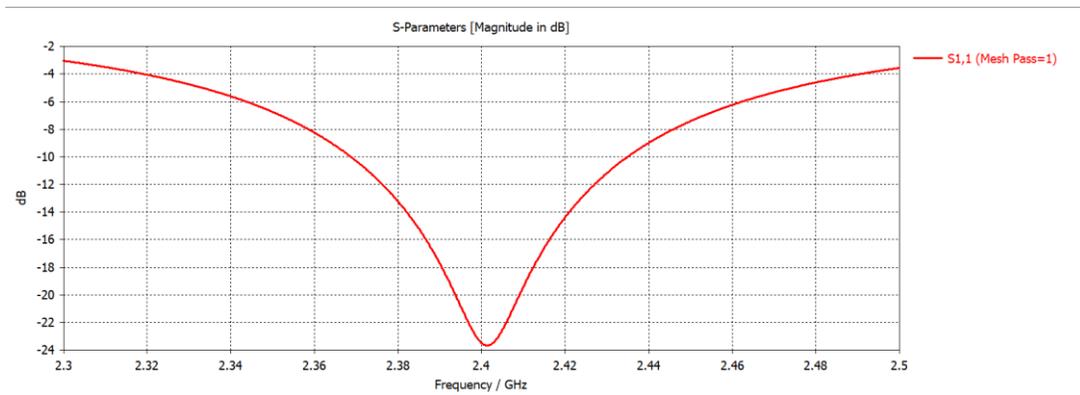


Figura 27. Parámetro S11 simulado

Fuente: Elaborado por el investigador

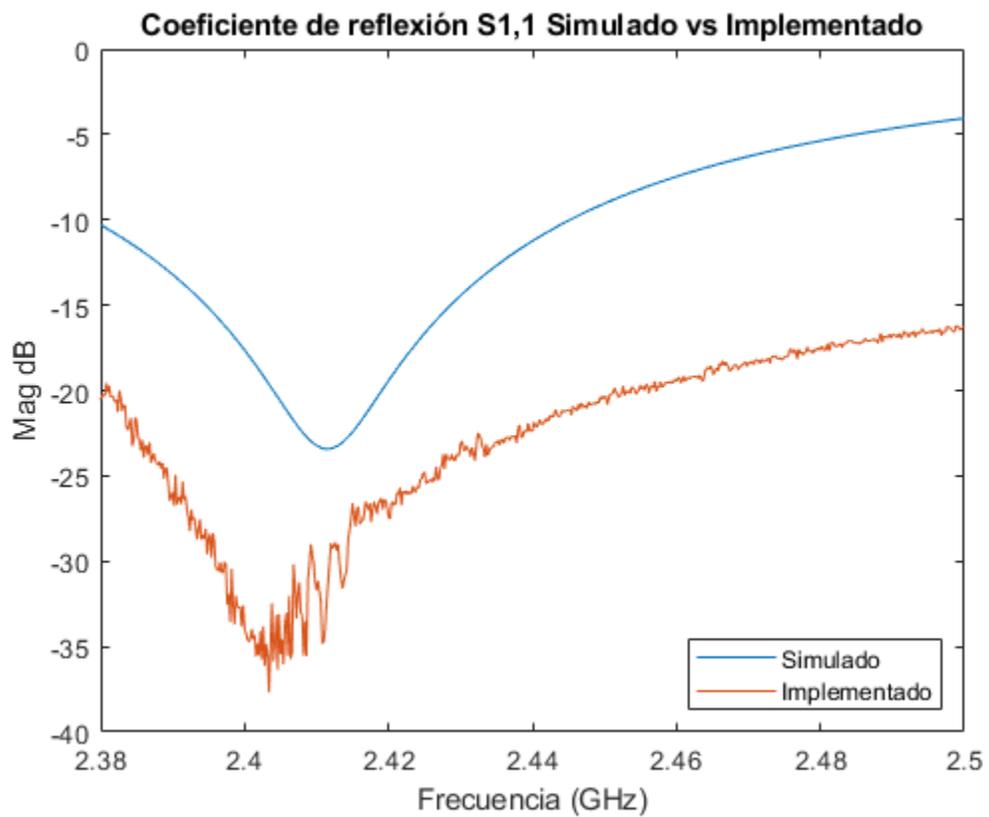


Figura 28. Parámetro S11 Simulado vs Implementado

Fuente: Elaborado por el investigador

La frecuencia central simulada es de 2.412 GHz y la frecuencia central que se obtuvo al implementarse es de 2.403 GHz lo que brinda un porcentaje de error en la desviación de frecuencia central igual a 0.34% entre lo simulado y lo implementado.

3.1.3. Sistema multiplicador rectificador de voltaje

El sistema multiplicador rectificador de voltaje implementado es el circuito de Cockcroft-Walton del cual, el circuito se indicó en el capítulo dos, por lo que aquí se presenta el circuito ya simulado en el software “Proteus” figura 29.

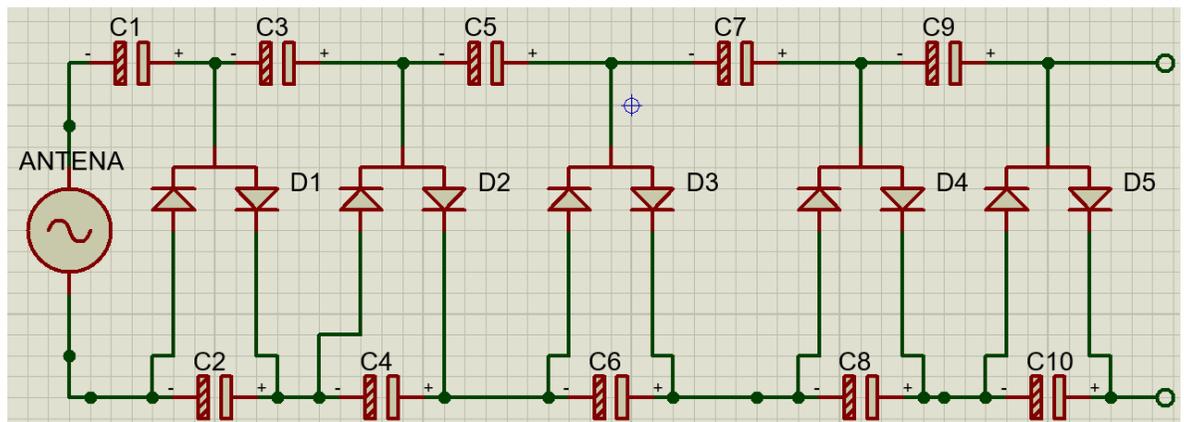


Figura 29. Circuito multiplicador de voltaje de Cockcroft-Walton de 5 etapas

Fuente: Elaborado por el investigador

El funcionamiento del circuito es muy fácil de comprender y todo inicia en el conector de la entrada del voltaje recibido por la antena después de la cual pasa por un proceso de conversión de corriente alterna a corriente directa para entrar al circuito multiplicador de Cockcroft-Walton, el circuito consta de cinco etapas, pero para comprender su funcionamiento basta con describir una etapa la cual se indica a continuación.

En el primer ciclo negativo se va a cargar el capacitor C_1 ya que existe un bloqueo de corriente por el diodo 1 lo cual solo permite que haya corriente en el capacitor C_2 , en el segundo ciclo se va a cargar el capacitor C_2 con la suma del voltaje de la fuente y el voltaje que existe en el capacitor C_1 , razón por la cual al terminar los dos ciclos en su salida se tendrá un voltaje igual al doble del recibido por la fuente.

Los materiales utilizados son los diodos schottky HSMS 286C cuyo datasheet se halla en el anexo 1, los capacitores son de 470 uF, se escogió estos diodos por presentar una respuesta para altas frecuencias llegando incluso a trabajar con frecuencias de 5.8 GHz y el consumo es de 30 mV aproximadamente como se indica en el datasheet en el anexo 1, en la figura 30 se puede ver el DIP en el cual incluyen dos diodos configurados con un puerto común y una salida para las corrientes positivas y otra para las corrientes negativas, razón por la cual también se utiliza para el proceso de rectificación de voltaje después del conector SMA de salida de la antenna.



Figura 30. Diodo schottsky 286C y diagrama de pines [39]

El diagrama PCB del circuito también fue realizado en el software Proteus y se puede ver cómo quedará cuando se haya implementado el prototipo en la figura 31.

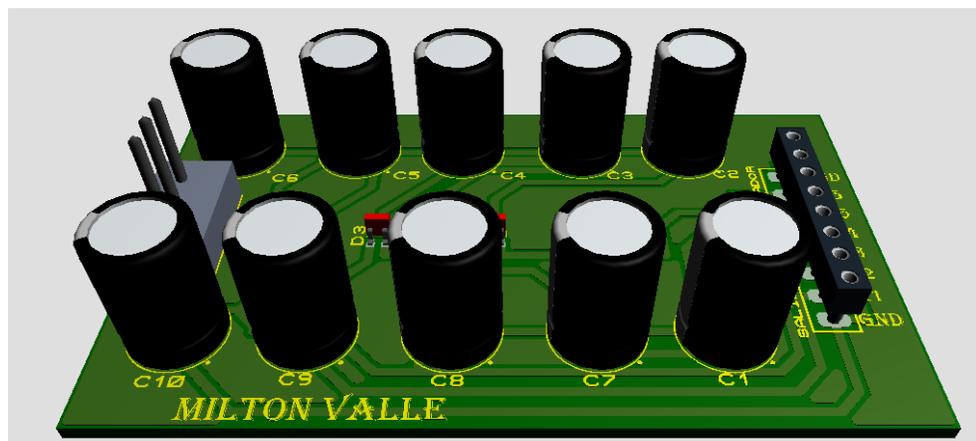


Figura 31. Placa del circuito multiplicador rectificador de voltaje de dos etapas

Fuente: Elaborado por el investigador

El diagrama de conexión de pines se indica en la siguiente figura 32.

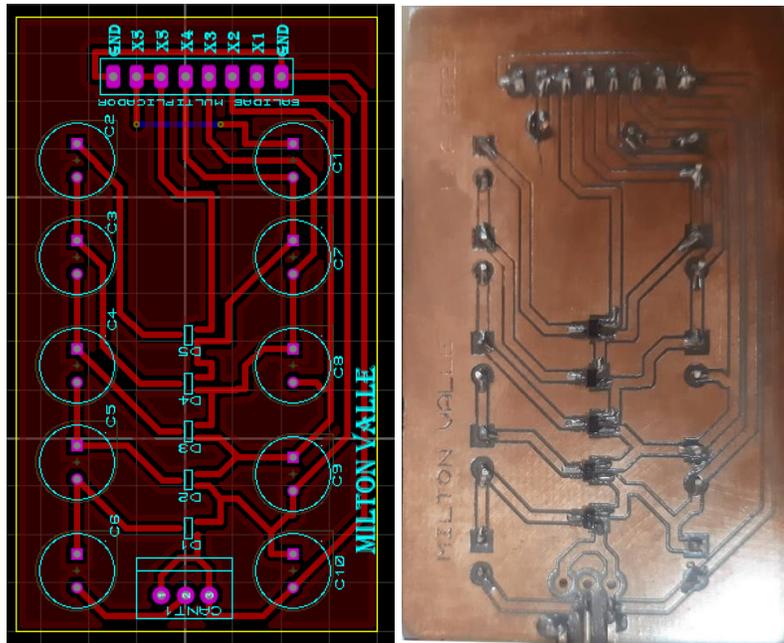


Figura 32. Diseño de las pistas. Simulado vs Implementado.

Fuente: Elaborado por el investigador

Y finalmente luego de soldados todos los componentes a la placa, el multiplicador de voltaje se puede ver en la figura 33.

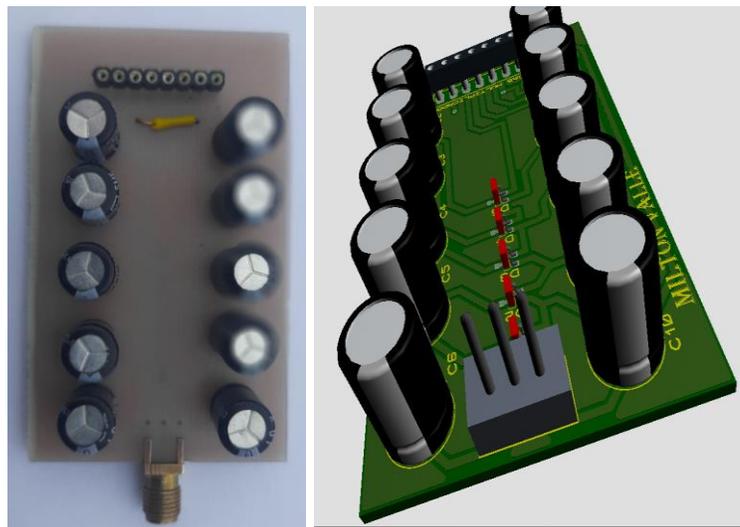


Figura 33. Placa del circuito multiplicador de voltaje. Simulado vs implementado

Fuente: Elaborado por el investigador

Una vez implementado el circuito multiplicador de dos etapas y enlazado con la antena se puede obtener hasta un máximo de 432 mV en 30 minutos.

3.1.4. Sistema para cosecha de energía solar

Como se indicó en el apartado 2.1.3 existen tres diferentes tipos de paneles solares de los cuales para el presente proyecto se eligió utilizar un panel solar monocristalino por la gran eficiencia que representa, en Ecuador son de fácil acceso los paneles solares monocristalinos de 5, 6 y 12 V además con algo de búsqueda también se puede hallar unos paneles solares pequeños de 2 voltios pero estos paneles solares al cosechar muy poca energía no podrá brindar suficiente corriente como para que el convertidor dc-dc MT3608 pueda trabajar correctamente, razón por la cual se investigó entre el panel solar de 5 y 6 voltios para ver cuál es el que mejor corriente y voltaje brinda en condiciones de poca luz, después de realizado un estudio de campo se escogió un panel solar de 6V a 150 mA, se eligió este por que puede captar mucho más voltaje que el de 5V en las mismas condiciones de luz, por ejemplo en una prueba rápida el panel solar de 5V a 200 mA en un día nublado a las 6:30 pm puede brindar 776 mili voltios a su salida mientras que el panel de 6V puede brindar 1.95 voltios, la diferencia entre estos dos es que el panel solar de 6V brinda casi el doble de voltaje en bajas condiciones de luz, como se puede observar en la figura 34.



Figura 34. Elección del panel solar

Fuente: Elaborado por el investigador

3.1.5. Sistema convertidor - regulador de voltaje

Los dos sistemas de recolección de energía propuestos para la implementación del proyecto presentan variaciones de voltaje a su salida ya que estas dependen por una parte de la cantidad de luz que pueda recibir y por otro lado de la cantidad de energía RF existente en el medio ambiente. Así por ejemplo el panel solar no brindó buena cantidad de voltaje como para recargar la batería en condiciones de escasa luz y el sistema de cosecha de energía electromagnética igual estuvo en dependencia de la cantidad de redes que podía captar por lo que en sectores rurales no fue muy eficiente, esto hizo que sea necesario un tercer sistema que permita obtener un voltaje controlado para la salida al sistema de almacenamiento, para ello se utilizó un módulo Boost conversor dc-dc MT 3608 (figura 35) el cual con una entrada mínima de 2 V puede

lograr que a su salida exista un voltaje regulado y controlado en un rango de 5 a 28 V DC.

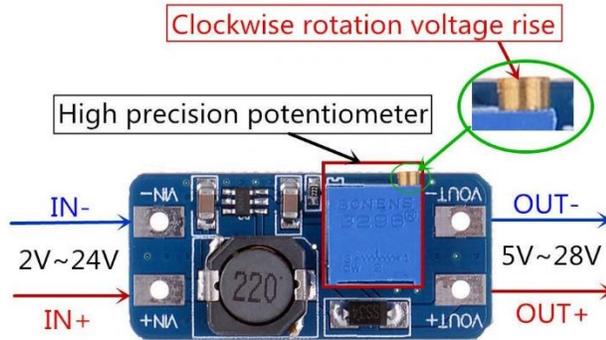


Figura 35. Convertidor Boost MT3608 [40]

3.1.6. Sistemas de almacenamiento

Es muy importante determinar el mejor sistema de almacenamiento ya que la energía cosechada es muy poca por lo que se requiere de sistemas de almacenamiento que presenten gran eficiencia, debido a eso en este proyecto se realiza pruebas de almacenamiento de energía en un capacitor y como también en baterías Ni-MH de 9V y 3.7V respectivamente.



Figura 36. Sistemas de almacenamiento [41]

3.1.7. Implementación del sistema de cosecha de energía electromagnética.

El sistema fue elaborado tal como se indica en la figura 19, el cual consta de cinco etapas, la cosecha de energía electromagnética con una antena fractal de 2.4 Ghz, un sistema multiplicador rectificador de voltaje de dos etapas, un sistema de cosecha de energía solar con un panel de 6V a 150 mA, un sistema convertidor regulador de voltaje, posteriormente los dos sistemas de almacenamiento de voltaje, en un capacitor de 1000 uF y en una batería de litio de 3.7V a 1500 mA, El sistema se implementó en una protoboard figura 37 por la facilidad que brinda el mismo el momento de medir los voltajes adquiridos en la cosecha de energía, para posteriormente agregarle una caja de acrílico que permita la entrada de luz solar hasta el panel figura 38.

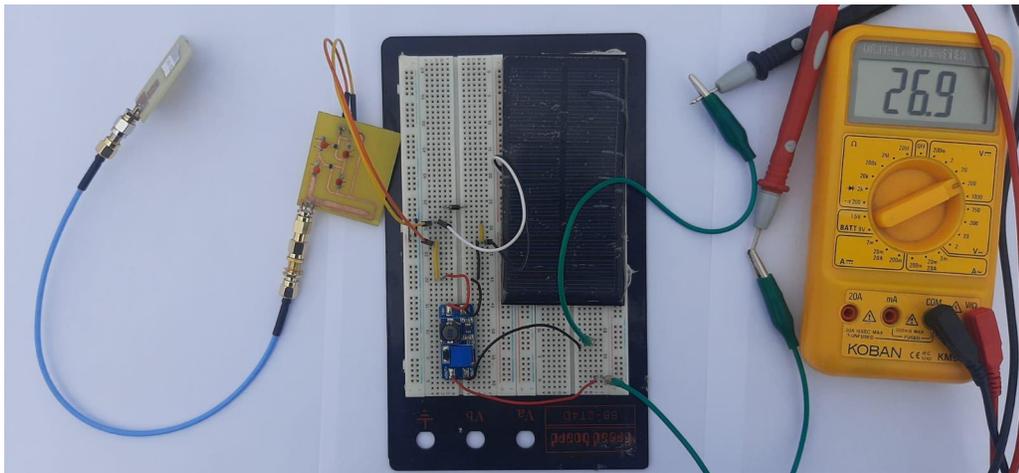


Figura 37. Sistema Implementado en protoboard

Fuente: Elaborado por el investigador

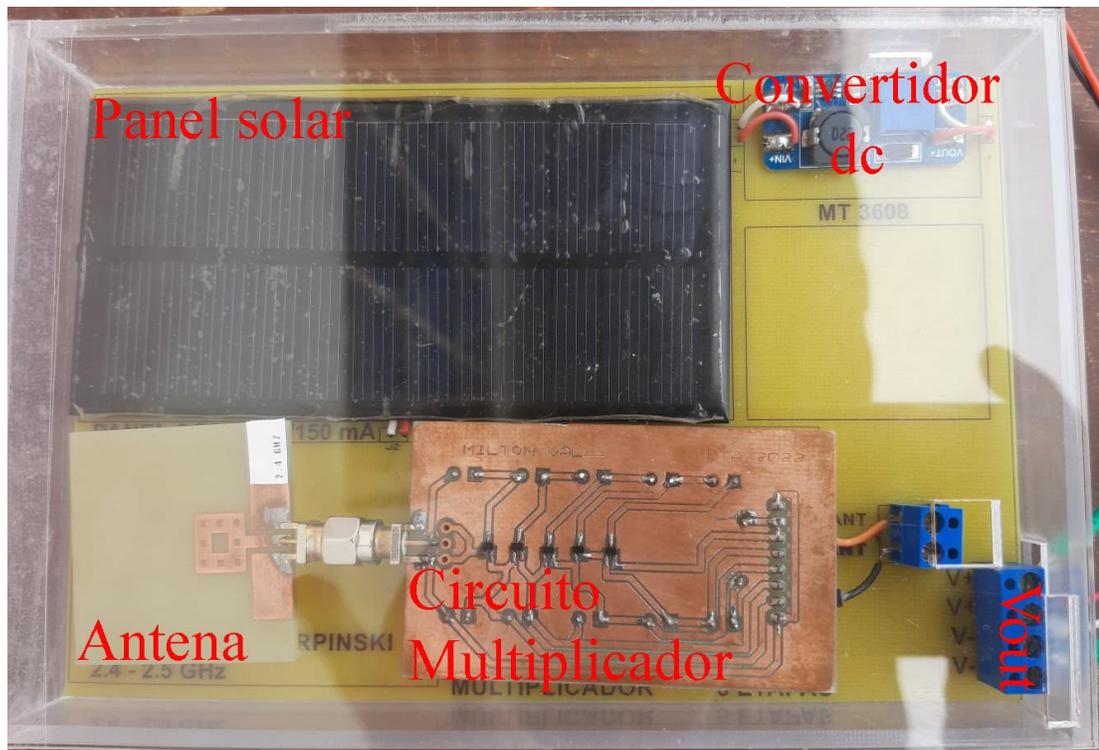


Figura 38. Sistema de recolección de energía electromagnética implementado.

Fuente: Elaborado por el investigador

3.2. Costo de elaboración del sistema.

Tabla 14. Costo de elaboración del sistema

Gastos del Proyecto de Investigación					
	#	Detalle	Ca nt.	V. unitario [\$]	V. total [\$]
Sistema para captar energía RF	1	Impresión de las antenas	2	15.00	30.00
	2	Diodos schottky	5	1.00	5.00
	3	cables	1	2.00	2.00
Sistema de recolección de energía solar	4	Celda fotovoltaica	1	10.00	10.00
	5	baquelita	1	4.00	4.00
Sistema de almacenamiento	6	batería de litio	1	10.00	10.00
		Capacitor de 1000 uF	1	0.50	0.50
Analizador de red vectorial	7	Nano VNA V2.2	1	250.00	250.00
otros	8	Herramientas de fabricación de circuitos	1	30.00	30.00
	9	Conectores SMA de 50 Ohmios macho y hembra	1	40.00	40.00
				Subtotal	381.50
				IVA (12%)	45.78
				TOTAL	427.28

Fuente: Elaborado por el investigador

3.3. Resultados obtenidos

Se realizaron las mediciones requeridas para poder tener un análisis completo del sistema y saber su funcionamiento, los cuales se indican en la siguiente tabla.

Tabla 15. Resultados obtenidos en la recolección de energía de WIFI, solo con la antena.

N°	Lugar	Tiempo [min]	Voltaje obtenido [mV]
1	Rural: Casa	30	42
2	Urbana: centro	30	90
3	Urbana: Edificio EEASA	30	432

Fuente: Elaborado por el investigador

Tabla 16. Resultados obtenidos del sistema de recolección de energía solar

N°	Día soleado	Día nublado	Hora	Interior/externior	Voltaje obtenido [V]
1		X	10:19	Interior	4.37
2		X	10:27	Exterior	7.00
3	X		12:00	Interior	3.84
4	X		12:07	Exterior	7.12
5	X		14:00	Interior	2.47
6		X	18:30	Exterior	1.90

Fuente: Elaborado por el investigador

Posteriormente se realizan las mediciones requeridas para determinar el voltaje que se puede almacenar con el panel solar, la antena y el sistema completo y así poder inferir la cantidad de energía que pueden cosechar por separado y el sistema completo. (Las siguientes mediciones se realizan utilizando el multiplicador de voltaje de dos etapas realizado e implementado por el Ing. Ángel Balarezo [42], como sustituto para el multiplicador de voltaje realizado en el presente proyecto.)

Tabla 17. Carga del sistema en diferentes bancos de almacenamiento.

	Fuente	V. Inicial [V]	Voltaje [V]			Voltaje recolectado [mV]
			30 min	60 min	90 min	
Batería 9V 300 mA	Antena	8.5	8.59	8.62	8.64	140
	Panel Solar	8.44	8.86	9.12	9.15	710
	Sistema Implementado	8.4	9.02	9.19	9.28	840
Capacitor	Antena	0	0.254	258	0.261	261.4
	Sistema Implementado	26.9	x	x	x	26.9V
Batería 3.7V 300 mA	Antena	3.71	3.72	3.74	3.75	40
	Panel Solar	3.73	3.77	3.84	3.861	131
	Sistema Implementado	3.66	3.748	3.802	3.868	208

Fuente: Elaborado por el investigador

La cantidad de carga que realiza el sistema está en dependencia de la cantidad de luz que exista en el día, esto debido al panel solar por lo que también se realizan mediciones en tres diferentes días con diferentes condiciones ambientales, tales como: soleado, nublado y por la noche, cuyos resultados se indican a continuación.

Tabla 18. Carga realizada por el sistema en un día soleado.

Día Soleado				
Almacenamiento	V. Inicial [V]	V. tras 90 Min [V]	V. Final [V]	Tiempo [horas]
Batería 9V 300mA	8.52	9.31	9.45	4
Batería 3.7V 300mA	3.75	4.03	4.12	4

Fuente: Elaborado por el investigador

Tabla 19. Carga realizada por el sistema en un día nublado.

Día Nublado				
Almacenamiento	V. Inicial [V]	V. tras 90 Min [V]	V. Final [V]	Carga completa [horas]
Batería 9V 300 mA	8.64	9.28	9.44	4
Batería 3.7V 300mA	3.74	3.97	4.01	4

Fuente: Elaborado por el investigador

Tabla 20. Carga realizada con el sistema por la noche en un tiempo de 90 minutos.

Noche		
Almacenamiento	V. Inicial [V]	V. Final [V]
Batería 9V 300 mA	8.13	8.23
Batería 3.7V 300mA	3.69	3.72

Fuente: Elaborado por el investigador

De las diferentes mediciones se puede apreciar que para el sistema es más rápido cargar la batería de 9V que la batería Ni-MH de 3.7V a 300 mA, Esto es debido a que la batería de 9V almacena mucha menos energía que la de 3.7V, en una prueba sencilla de descarga se pudo determinar que al colocar una carga a la batería de 9V esta pudo trabajar con dicha carga por 6 minutos aproximadamente, mientras que la batería de 3.7V con la misma carga resistió 1 hora y 20 minutos, razón por la cual es más conveniente evaluar la carga que puede realizar el sistema en una batería de 3.7V. Datos que pueden ser obtenidos de las tablas anteriores y se detallan a continuación.

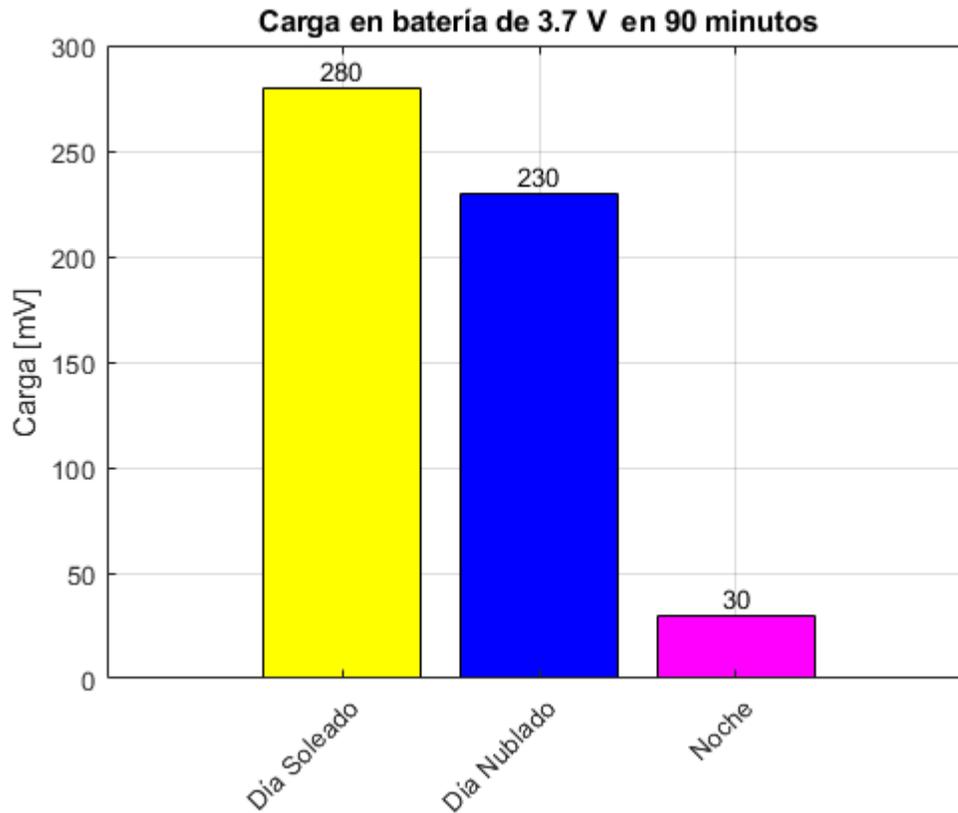


Figura 39. Carga realizada por el sistema en una batería de 3.7V

Fuente: Elaborado por el investigador

Mejora que representa el sistema con referencias a estudios realizado previamente.

Los ingenieros Criollo Walter [43], Félix Reinoso [44], Ernesto Escobar [45], Evelyn Freire [46]. Realizaron una serie de investigaciones con las antenas Log Periódica y Espiral las cuales se indican en la figura 40.

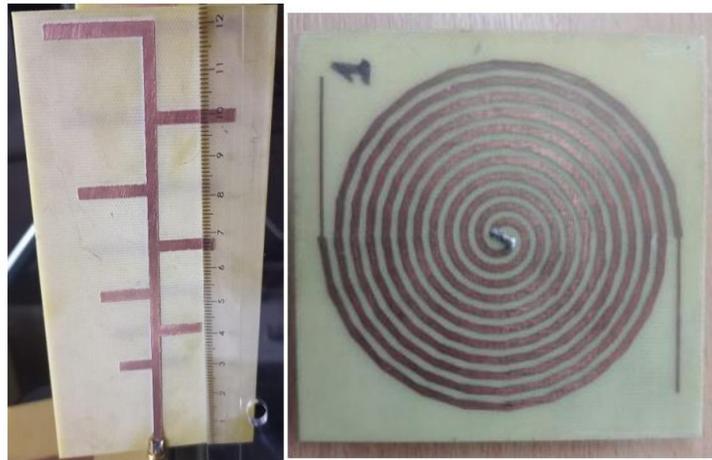


Figura 40. Antenas investigadas por los Ingenieros: Criollo Walter [43], Félix Reinoso [44], Ernesto Escobar [45], Evelyn Freire [46].

Primero se indica las cargas que se lograron recolectar en un capacitor en cada uno de los diferentes estudios.

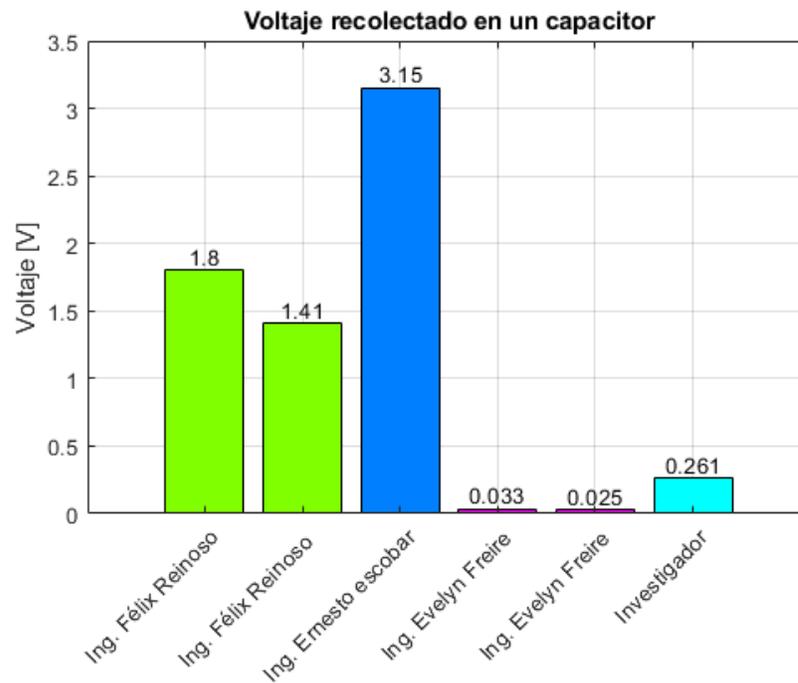


Figura 41. Voltajes recolectados de los diferentes estudios en un capacitor.

Fuente: Elaborado por el investigador.

Posteriormente se indican las cargas que se pudieron lograr con una batería de 9V en cada uno de las investigaciones.

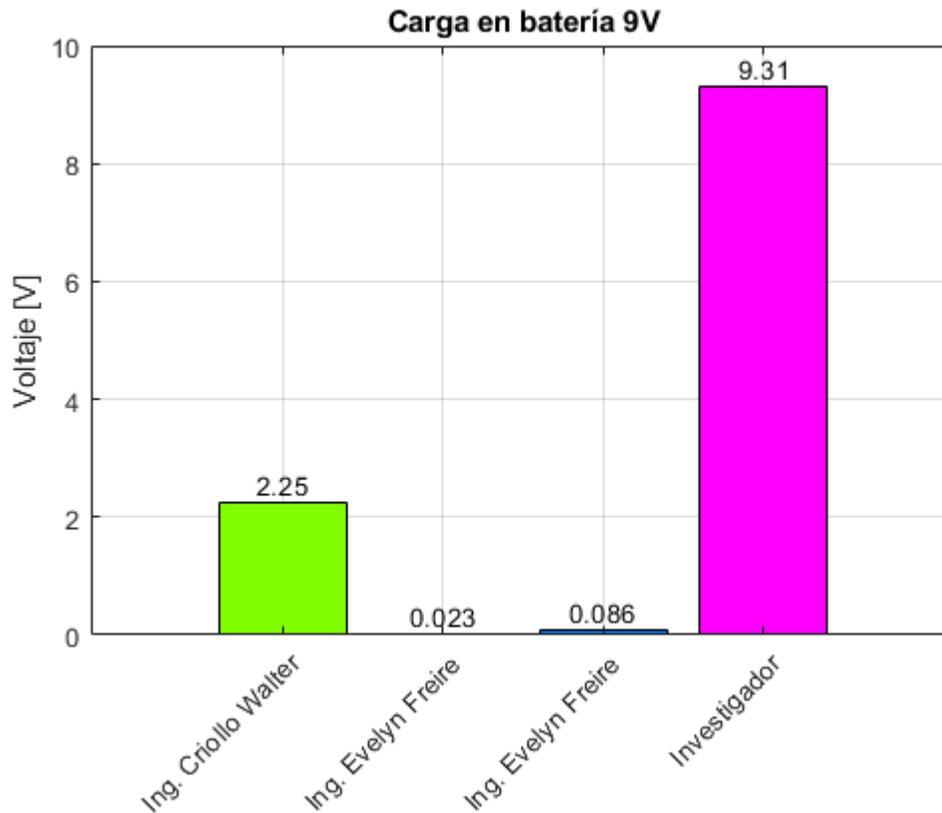


Figura 42. Voltajes recolectados de los diferentes estudios en una batería de 9V, tiempo de 90 Minutos

Fuente: Elaborado por el investigador

Finalmente se detalla los mejores valores que se pudieron obtener de carga en cada uno de los estudios realizados previamente junto con los medidos en el presente proyecto.

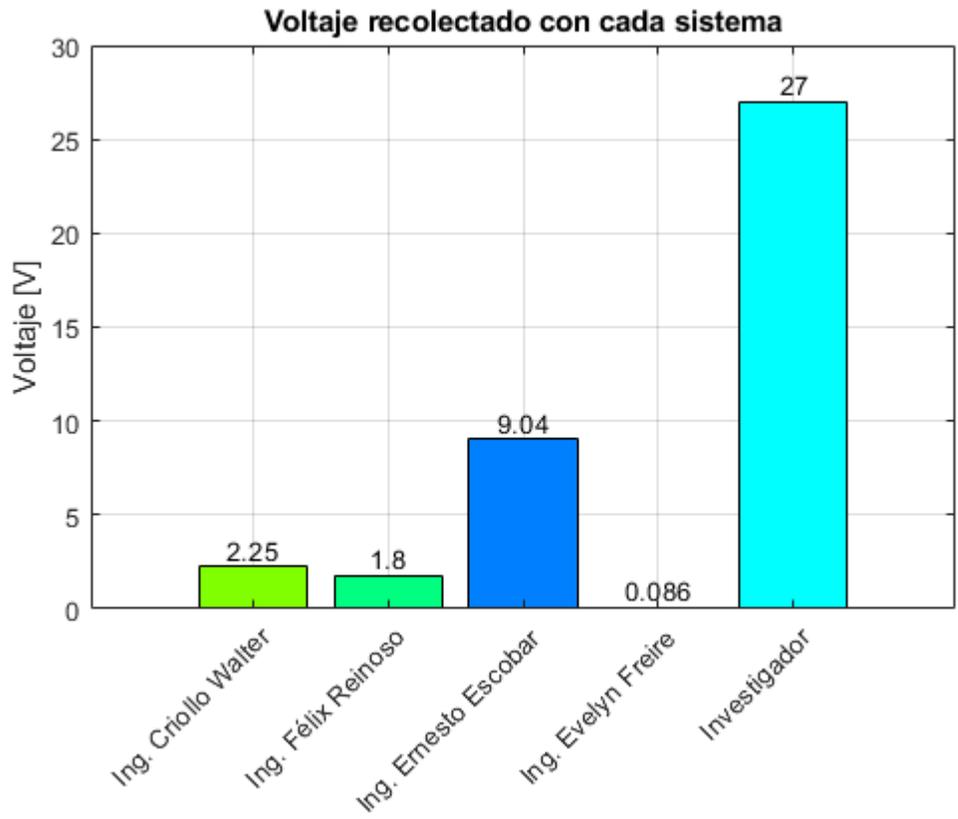


Figura 43. Voltajes captados en cada uno de los diferentes sistemas.

Fuente: Elaborado por el investigador

De las tablas anteriores se puede apreciar los diferentes proyectos y sus resultados obtenidos, de los cuales el de Ing. Ernesto Escobar es quién logró cosechar mayor voltaje, esto lo logró utilizando un array de dos antenas log periódicas, las cuales por medio de un sistema con servomotores lograba ubicar las antenas en el ángulo que mayor cantidad de energía le permita recolectar con referencia a la fuente generadora de RF. También se puede ver que el sistema implementado en el presente proyecto supera fácilmente en un 200% con referencia al trabajo realizado por el Ing. Ernesto Escobar.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los sistemas de recolección de energía RF están compuestos por una antena la cual está diseñada he implementada para recibir la energía RF en determinada frecuencia seguida de un multiplicador rectificador de voltaje el cual se encarga de incrementar el voltaje recolectado por la antena.
- En la presente investigación se determinó que si es factible la implementación de sistemas de recolección de energía RF junto con los sistemas de recolección de energía solar, los dos sistemas presentan grandes ventajas al estar incluidos en un mismo dispositivo, pues en zonas abiertas el panel solar se encarga de recolectar la energía, mientras que en zonas urbanas o interiores de oficinas la recolección de energía RF ayuda a compensar la falta de luz del panel solar logrando que a cualquier hora del día se puede tener al menos 2 V recolectados lo que garantiza también el correcto funcionamiento del convertidor boost implementado a la salida del sistema.
- Se diseño un dispositivo en el cual constan un sistema de recolección de energía RF y un sistema para recolección de energía solar, los cuales están formados por una antena de 2.4 GHz, un multiplicador de voltaje de cinco etapas, un panel solar monocristalino de 6 V y un convertidor boost a la salida del sistema, el convertidor boost es el encargado de ayudar a tener un voltaje regulado a la salida para brindar un sistema de carga de baterías mucho más seguro para los sistemas de almacenamiento es decir sin afectar su funcionamiento o reducir sus ciclos de carga y descarga.
- Con el sistema implementado se realizaron pruebas de carga en tres dispositivos de almacenamiento los cuales son: una batería de 9 V a 300 mA, una de 3.7 V a 300 mA y prueba de carga en un capacitor, cabe indicar también que las dos baterías son de Ni-MH y en la de 9 V se logró una carga de 840 mV en 90 minutos, en la batería de 3.7 V se logró cargar 208 mV en 90 minutos, posteriormente se realizaron pruebas

de carga en ambas baterías en un día soleado, nublado y por la noche entre las cuales se obtuvo un 90% de carga de las baterías en 4 horas sin importar si es un día soleado o nublado sin embargo por la noche se observó que la carga en las baterías es de 10 mV en la baterías de 9 V y 30 mV en una batería de 3.7 V esto se debe principalmente a que por las noches el panel solar no brinda energía al sistema volviéndose más bien una carga más para el sistema por lo que la carga de las baterías es debida solamente por la antena.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda para el diseño y simulación de antenas tipo parche utilizar el software CST estudio por cuanto brinda un diseño más intuitivo y cuenta con los parámetros de la baquelita más comercial en el país como es la FR4.
- Es recomendable diseñar antenas multibandas que operen en GSM, radio, 3G, 4G, 5G y Tv digital ya que la cantidad de energía recolectada es directamente proporcional a la cantidad de frecuencias captadas por la antena, también se debe tomar en cuenta la impedancia del circuito multiplicador rectificador de voltaje para poder cosechar la mayor cantidad de energía posible.
- Para la recolección de energía solar existen diferentes opciones de paneles solares con los cuales se puede trabajar, sin embargo, se recomienda utilizar los paneles solares monocristalinos si el prototipo será implementado en exteriores y el uso de paneles solares policristalinos si se pretende recolectar energía en interiores de oficinas, empresas etc. También existen los paneles solares de película delgada, los cuales son muy flexibles y es recomendable para prototipos que cuenten con muy poco espacio disponible para su implementación.
- Como se indicó en los resultados obtenidos del presente proyecto, el panel solar se convierte en una carga más para el sistema por lo que es recomendable también implementar un circuito que permita aislar el panel solar por las noches incrementando así la eficiencia del sistema durante la noche.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. M. Antony, S. Indu y R. Pandey, «An efficient solar energy harvesting system for,» *Taylor & Francis*, p. 13, 2020.
- [2] T. Anand y T. Anand, «A Review on Design of Compact Rectenna for RF Energy Harvesting,» *IEEE Explore*, 2020.
- [3] A. Akshaj, K. Saket y P. Sujata, «Experimental Investigation of a Novel MultiPatch Fractal Antenna for Radio Frequency Energy harvesting,» *IEEE Explore*, p. 4, 2020.
- [4] F. Harerimana, H. Peng, M. Ootobo, F. Luo y M. M., «Efficient circuit design for low power energy harvesting,» *Scitation*, p. 7, 10 julio 2020.
- [5] «RF-Powered Wearable Energy Harvesting and Storage Module Based on E-Textile Coplanar Waveguide Rectenna and Supercapacitor,» *IEEE Explore*, p. 13, 16 febrero 2021.
- [6] Statista, «Statista,» [En línea]. Available: <https://es.statista.com/>.
- [7] K. Rose, S. Elderidge y I. Chapin, «Internet Society,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/09/report-InternetOfThings-20160817-es-1.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [8] Andrade, Fattori y A. Claudia, «PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA,» 2019. [En línea]. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/43607/Fattori%20de%20Andrade%20Ana%20Claudia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 2021].
- [9] J. Oscullo, «factor Horario de Emisiones de CO2 Producido Por el Parque Generador de Sistema Nacional interconectado del Ecuador,» p. 6.
- [10] L. J. Aguilar, *Internet de las cosas*, México Bogotá, 2021.
- [11] A. Naranjo y I. P. Córdova, «SISTEMA ELECTRÓNICO PORTABLE DE MONITOREO CONTÍNUO DE SEÑALES CARDIACAS MEDIANTE LA TECNOLOGÍA WEARABLE,» aMBATO, 2018.

- [12] T. p. Negocios, «Tecnología para Negocios,» [En línea]. Available: <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-14-dispositivos-i-internet-de-las-cosas-iot/>.
- [13] P. Cordero, Electromagnetismo, Santiago de Chile: Universitaria S.A, 2015.
- [14] A. Mouapi, N. Hakem y D. Gilles, «A new approach to design of RF energy harvesting system to enslave wireless sensor networks,» p. 8, 2017.
- [15] I. P. Marcelle, «Sedici,» 2014. [En línea]. Available: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/69655/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 2022].
- [16] Ortiz, N. Barrionuevo, Hurtado y D. J. Cruz, «Análisis de la eficiencia de un Multiplicador de tensión de baja potencia de entrada en cuanto al número de Etapas,» *Scielo*, 2014.
- [17] L. Science, «Ludic Science,» 29 julio 2015. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=uq63Mi2Tox8>.
- [18] B. Magally, N. Stevens, C. Arce, A. Cárdenas y U. Pineda, «COMPARACION DE CIRCUITOS MULTIPLICADORES DE VOLTAJE PARA COSECHA DE ENERGÍA EN RF,» julio 2020. [En línea]. Available: <http://www.itc.mx/ojs/index.php/pistas/article/viewFile/2397/1946>.
- [19] F. Sari y Y. Uzun, «COMPARISON OF VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUITS FOR RF ENERGY HARVEST,» *Researchgate*, p. 16, 2019.
- [20] ORTIZ y D. RODRÍGUEZ, «EVALUACIÓN DE SUPERCONDENSADORES COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO PARA MICROREDES,» Quito-Ecuador, 2020.
- [21] Fonseca y L. Jaime, «CELIDAS, PILAS Y BATERÍAS DE IONLITIO UNA ALTERNATIVA PARA?,» Universidad del Valle -, 2011.
- [22] L. Gonzales, «ForoCochesElectrónicos,» 15 5 2013. [En línea]. Available: <https://forococheselectricos.com/2013/05/vida-y-muerte-de-una-bateria-de-ion-2.html>. [Último acceso: 16 11 2021].
- [23] Fang, Antenna Theory and Microstrip Antennas, 2017.
- [24] «Electronics Desk,» 2020. [En línea]. Available: <https://electronicsdesk.com/patch-antenna.html>.
- [25] Aznar y Á. Cardama, Antenas, 2002.

- [26] Bouchti y Mohamed, «Diseño y Medición de una Antena Wearable,» 2016.
- [27] A. García, Cálculo de Antenas, 1994.
- [28] A. M. Lince, «ANTENAS FRACTALES: UN PASO EN LA EVOLUCIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES».
- [29] M. Reyes, «Stalmat,» [En línea]. Available: <https://www.estalmat.org/archivos/fractales.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [30] H. Takhedmi y G. Abib, «Design and experiments of a dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting in urban environments,» *The Institute of Engineering and Technology IET*, p. 7, 2018.
- [31] Z. Zixu, J. Saumil, G. Sachit y M. Garret, «Graphene geometric diodes for terahertz rectennas,» *iopscience*, p. 2, 2013.
- [32] A. P. Jamshed Ansari, «Design and Analysis of Multiband Fractal Reconfigurable Antenna Using PIN Diodes for Smart Wireless Communications,» *PIER C*, pp. 1-12, 2022.
- [33] P. D. A. A. Nahida A, «Optimized Process Design of RF Energy Harvesting Circuit for Low Power Devices,» *Researchgate*, pp. 3-5, 2017.
- [34] S. Voltaics, «Solt Voltaics,» [En línea]. Available: <https://solvoltaics.com/what-are-solar-panels/>.
- [35] D. Meredith, «<https://www.treehugger.com>,» [En línea]. Available: <https://www.treehugger.com/types-of-solar-panels-pros-and-cons-5181546>.
- [36] AEROSEMI, «AllDataSheets,» [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131968/ETC1/MT3608.html>. [Último acceso: 2021].
- [37] D. Gómez, «Equipos y Laboratorio,» 2022. [En línea]. Available: [https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/baterias-\(electricidad\)](https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/baterias-(electricidad)). [Último acceso: 8 6 22].
- [38] Nanorfe, «Nanorfe,» [En línea]. Available: <https://nanorfe.com/es/nanovna-v2.html>.
- [39] A. Technologies, «Alldatasheets,» [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/527229/AVAGO/HSMS-286C.html>. [Último acceso: 2021].

- [40] Aliexpress, «Aliexpress,» [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/4000283425849.html>.
- [41] CAE, «CAE,» [En línea]. Available: <https://www.cargadoresespeciales.com/products/6/category?page=5>.
- [42] I. Á. Balarezo, «Optimización del sistema de acondicionamiento para un dispositivo de captación de energía electromagnética.» Ambato, 2021.
- [43] I. C. Walter., « SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA PARA ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EN DISPOSITIVOS MÓVILES.» Ambato, 2021.
- [44] I. F. Reinoso, «Optimización de antenas para sistemas de captación de energía electromagnética.» Ambato, 2021.
- [45] I. E. Escobar, «Arrays de Antenas Inteligentes para la Captación Óptima de Energía Electromagnética.» Ambato, 2021.
- [46] I. E. Freire, «ANTENAS LOGARÍTMICAS PARA APLICACIONES DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA.» Ambato, 2021.
- [47] G. Dayana y S. Mónica, «Estudio de factibilidad para la implementación de energía limpia con paneles solares.» Colombia, 2021.
- [48] T. P. ASIC, «Alldatasheets,» [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132405/ASIC/TP4056.html>. [Último acceso: 2021].
- [49] A. Eléctrica, «Afinidad Eléctrica,» [En línea]. Available: <https://afinidadelectrica.com/2020/07/25/los-supercapacitores/>. [Último acceso: 2021].

ANEXOS

Anexo 1 Cálculo del ancho de las pistas

Para el cálculo del ancho de las pistas se basó en el estándar ANSI-IPC 2221, cuyas formulas y constantes se detallan a continuación.

$$\text{Área} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{k_3} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{k_3 * (k_1 * \Delta T k_2)}$$

$$\text{Ancho} = \frac{\text{área}}{L * 1.378}$$

Donde

k_1 , k_2 y k_3 son constantes del estándar que para exteriores toman los valores de: 0.0647, 0.4281 y 0.6732 respectivamente.

L = grosor de las pistas el cual en una baquelita FR4 es 35 micras.

$$I_{m\acute{a}x} = 0.200 \text{ A}$$

$$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con esto ya podemos determinar el ancho mínimo que deben tener las pistas para el PCB a implementarse.

$$\text{Área} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{k_3 * (k_1 * \Delta T k_2)} = \frac{0.200}{0.6732 * (0.0647 * 10 * 0.4281)} = 1.0725 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ancho} = \frac{\text{área}}{L * 1.378} = \frac{1.0725}{35 * 1.378} = 0.22 \text{ mm}$$

Donde indica que el ancho mínimo que debe tener las pistas para poder trabajar con 0.2 Amperios y un incremento de temperatura ambiente máximo de 10 grados centígrados es de 0.22 milímetros.

El ancho calculado para las pistas está dentro del rango mencionado por el estándar, como se puede ver en la siguiente imagen donde indica que para un voltaje menor a 15 V el grosor de las pistas debe ser de al menos 0.2 milímetros.

Voltaje	Distancia
0-15	0.2 mm
15-50	0.4mm-1mm
50-120	8-10 mm o más

Fuente: tabla tomada del estándar [IPC 2221B](#) de diseño de circuitos impresos.

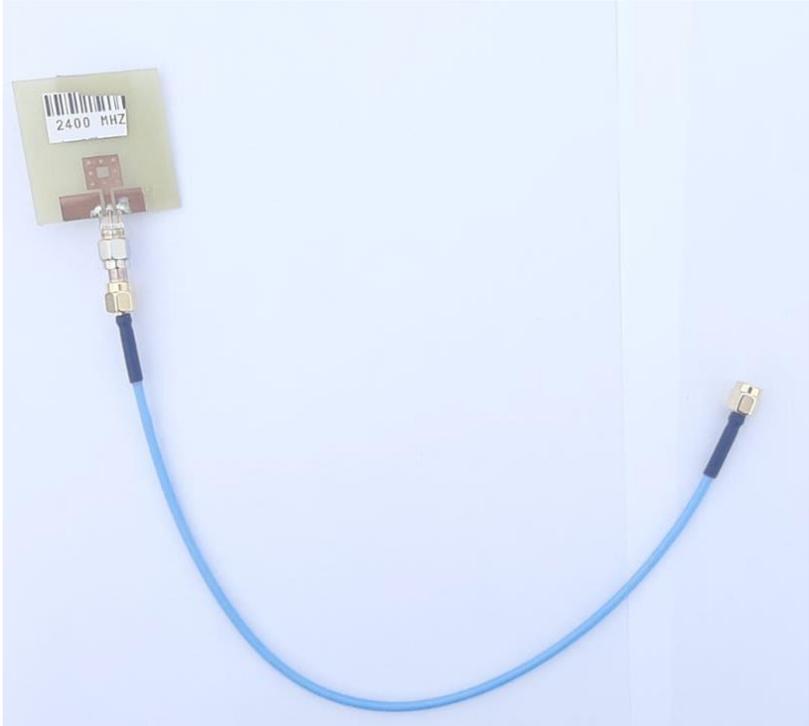
Con los cálculos realizados previamente también se puede determinar la potencia mínima con la cual podrá trabajar el sistema.

$$P = V * I = 15 * 0.2 = 3 [W]$$

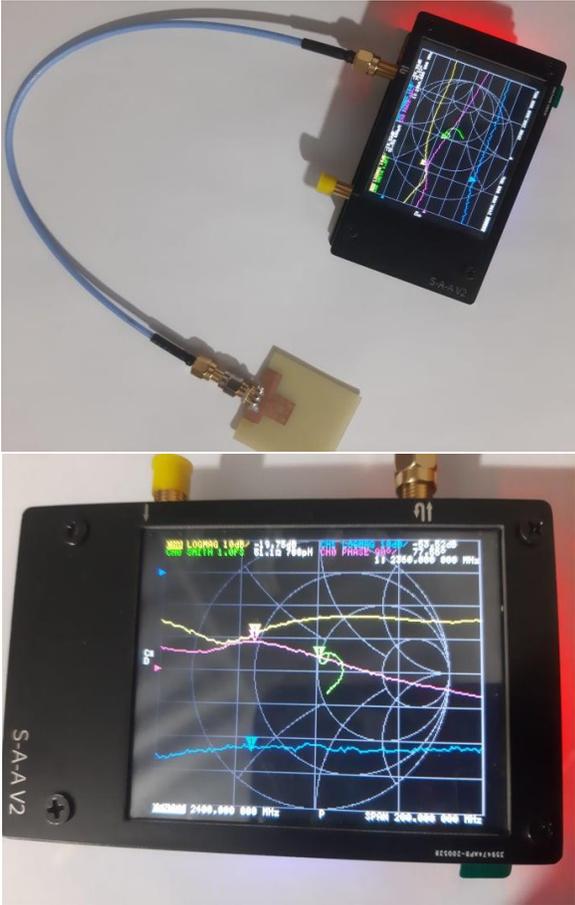
Anexo 2. Mediciones de voltaje del panel solar en el interior de una habitación y en el exterior



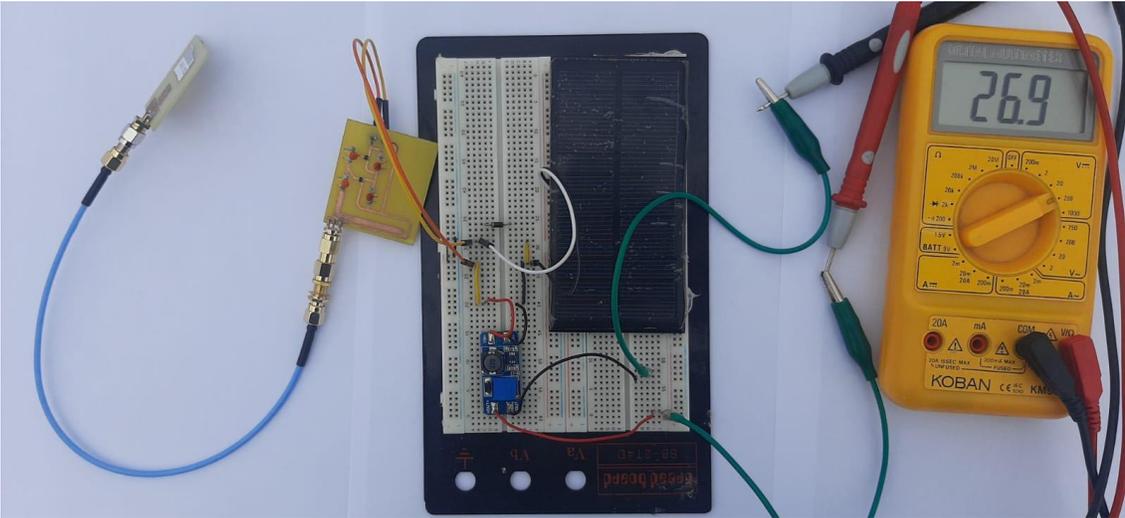
Anexo 3. Antena de 2.4 GHz diseñada e implementada.



Anexo 4. Análisis de la antena con el NanoVNA



Anexo 5. Voltaje capaz de entregar el sistema por el día.



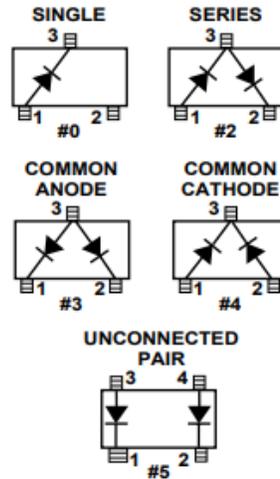
Anexo 6. Datasheet diodo HSMS 286C

Features

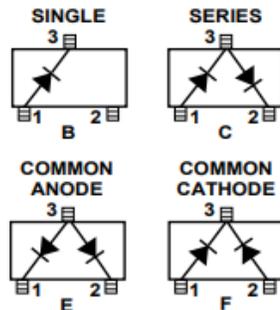
- **Surface Mount SOT-23/SOT-143 Packages**
- **Miniature SOT-323 and SOT-363 Packages**
- **High Detection Sensitivity:**
 - up to 50 mV/μW at 915 MHz
 - up to 35 mV/μW at 2.45 GHz
 - up to 25 mV/μW at 5.80 GHz
- **Low FIT (Failure in Time) Rate***
- **Tape and Reel Options Available**
- **Unique Configurations in Surface Mount SOT-363 Package**
 - increase flexibility
 - save board space
 - reduce cost
- **HSMS-286K Grounded Center Leads Provide up to 10 dB Higher Isolation**
- **Matched Diodes for Consistent Performance**
- **Better Thermal Conductivity for Higher Power Dissipation**

* For more information see the Surface Mount Schottky Reliability Data Sheet.

SOT-23/SOT-143 Package Lead Code Identification (top view)



SOT-323 Package Lead Code Identification (top view)



Description

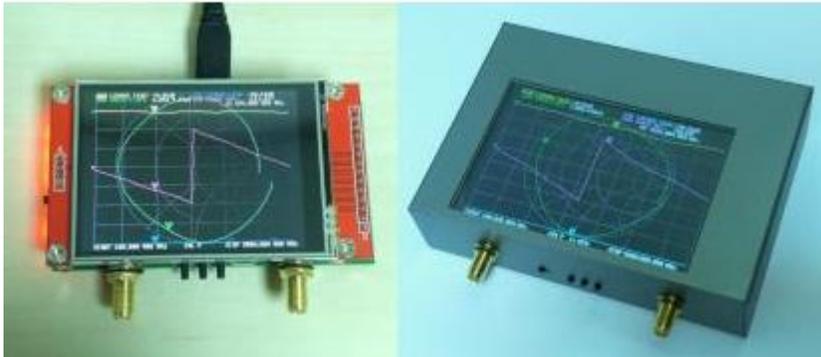
Agilent's HSMS-286x family of DC biased detector diodes have been designed and optimized for use from 915 MHz to 5.8 GHz. They are ideal for RF/ID and RF Tag applications as well as large signal detection, modulation, RF to DC conversion or voltage doubling.

Available in various package configurations, this family of detector diodes provides low cost solutions to a wide variety of design problems. Agilent's manufacturing techniques assure that when two or more diodes are mounted into a single surface mount package, they are taken from adjacent sites on the wafer, assuring the highest possible degree of match.

RF Electrical Specifications, $T_C = +25^\circ\text{C}$, Single Diode

Part Number HSMS-	Typical Tangential Sensitivity TSS (dBm) @ f =			Typical Voltage Sensitivity γ (mV/ μW) @ f =			Typical Video Resistance RV (K Ω)
	915 MHz	2.45 GHz	5.8 GHz	915 MHz	2.45 GHz	5.8 GHz	
2860 2862 2863 2864 2865 286B 286C 286E 286F 286K 286L 286P 286R	-57	-56	-55	50	35	25	5.0
Test Conditions	Video Bandwidth = 2 MHz $I_b = 5 \mu\text{A}$			Power in = -40 dBm $R_L = 100 \text{ K}\Omega$, $I_b = 5 \mu\text{A}$			$I_b = 5 \mu\text{A}$

Anexo 7. Analizador de red vectorial NanoVNa V2.2



Parámetro	Versión de placa	Especificación	Condiciones
Rango de frecuencia	V2_2, V2 más	50kHz - 3GHz	-
	V2 Plus4	50kHz – 4.4GHz	-
Resolución de frecuencia	Todo	10kHz	-
Rango dinámico del sistema (calibrado)	V2_2, V2 más	70dB	f < 1,5 GHz
		60dB	f < 3 GHz
	V2 Plus4	90dB	f < 1GHz IFBW=40Hz (20xPROMEDIO)
		80dB	f < 3GHz IFBW=160Hz (5xPROMEDIO)
		70dB	f < 3GHz IFBW=800Hz (1xPROMEDIO)