



**UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERIA EN SISTEMAS ELECTRONICA E  
INDUSTRIAL**

**CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES**

**Tema:**

---

**RECTENNA BASADA EN ARREGLOS DE ANTENAS TIPO PARCHE PARA  
CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA**

---

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:** Fausto David Tello Matehus

**Tutor:** Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD.

**Ambato – Ecuador**

**agosto – 2023**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación con el tema: RECTENNA BASADA EN ARREGLOS DE ANTENAS TIPO PARCHE PARA CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA, desarrollado bajo la modalidad de Proyecto de Investigación por el señor: Tello Matehus Fausto David, 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, agosto 2023.

---

Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD.

## **AUTORÍA**

El presente Proyecto de Investigación titulado: RECTENNA BASADA EN ARREGLOS DE ANTENAS TIPO PARCHE PARA CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA, es absolutamente original, autentico y personal. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, agosto 2023.

---

Fausto David Tello Matehus

CC: 0503535692

AUTOR

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación en favor de la Universidad Técnica de Ambato, con fines de difusión pública. Además, autorizo su reproducción total o parcial dentro de las regulaciones de la institución.

Ambato, agosto 2023

---

Tello Matehus Fausto David

Cc: 050353569-2

**AUTOR**

## **APROBACIÓN TRIBUNAL DE GRADO**

En calidad de par calificador del Informe Final del Trabajo de Titulación presentado por el señor Fausto David Tello Matehus, 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: RECTENNA BASADA EN ARREGLOS DE ANTENAS TIPO PARCHE PARA CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA, 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, agosto 2023

---

Ing. Pilar Urrutia, Mg.  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

---

Ing. Geovanni Brito, Mg  
PROFESOR CALIFICADOR

---

Ing. Fabián Salazar, PhD  
PROFESOR CALIFICADOR

## **DEDICATORIA**

*A mis padres Fausto Tello y Deysi Matehus, pilares fundamentales en mi vida, quienes confiaron y creyeron en mí siempre, quienes dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; me han enseñado a valorar cada una de las oportunidades de la vida.*

*A mis abuelitos Fausto, Zoila y Yolanda, por cuidar y estar pendiente de mí, y de cada uno de mis pasos.*

*A mi querido amigo Juan Carlos que desde el cielo sigue acompañándome en este proceso profesional.*

**FAUSTO**

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios por permitirme crecer en medio de una familia llena de cariño, que siempre me han apoyado aun a pesar de mis fracasos, sin importar el sacrificio que debían hacer, y que sé que puedo seguir contando con cada uno de ellos en los proyectos que me proponga a futuro.*

*A Lilibeth por enseñarme que, con alegría y amor, todas las cosas las podemos lograr.*

*A Ing. Carlos Gordon Tutor de tesis por todos los conocimientos compartidos tanto una mi carrera universitaria como en la presente investigación.*

## ÍNDICE GENERAL

<b>PORTADA</b> .....	I
<b>APROBACIÓN DEL TUTOR</b> .....	II
<b>AUTORÍA</b> .....	III
<b>DERECHOS DE AUTOR</b> .....	IV
<b>APROBACIÓN TRIBUNAL DE GRADO</b> .....	V
<b>DEDICATORIA</b> .....	VI
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	VII
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	VIII
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	X
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	XII
<b>ÍNDICE DE SIMBOLOS</b> .....	XIII
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	XIV
<b>ABSTRACT</b> .....	XV
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	1
<b>1.1. Tema de investigación</b> .....	1
<b>1.2. Antecedentes investigativos</b> .....	1
<b>1.2.1. Contextualización del problema</b> .....	4
<b>1.2.2. Fundamentación teórica</b> .....	5
<b>1.3. Objetivos</b> .....	21
<b>1.3.1 Objetivo General</b> .....	21
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	21
<b>CAPÍTULO II</b> .....	22
<b>METODOLOGÍA</b> .....	22
<b>2.1. Materiales</b> .....	22
<b>2.2. Métodos</b> .....	22
<b>2.2.1. Modalidad de la investigación</b> .....	22
<b>2.2.2 Recolección de la información</b> .....	23
<b>2.2.3 Procesamiento y análisis de datos</b> .....	23
<b>2.2.4 Propuesta de solución</b> .....	23
<b>2.2.5 Desarrollo del proyecto</b> .....	24
<b>CAPÍTULO III</b> .....	26
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	26

<b>3.1. Análisis y discusión de resultados .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.1. Desarrollo de la propuesta de solución .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2. Diseño de prototipo.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.1. Selección de Geometría .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.2. Arreglos de antenas microstrip.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.3. Métodos de alimentación .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.4. Cálculos de diseño de una antena tipo parche.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.5. Resultado parámetro S11 (Coeficiente de Reflexión) .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.6 Resultado Relación de Onda Estacionaria (VSWR).....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.7 Diseño de rectificador de voltaje .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Diseño y construcción del prototipo.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. Resultados rectenna basada en arreglo de antenas tipo parche.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5. Caracterización.....</b>	<b>44</b>
<b>3.6. Comparación de valores medidos y simulados. ....</b>	<b>45</b>
<b>3.6.1. Análisis de la matriz de antenas 2x2 tipo parche .....</b>	<b>45</b>
<b>3.6.2. Parámetro SWR de la antena medido con el Nano VNA y     parámetro Simulado. ....</b>	<b>45</b>
<b>3.7. Implementación Rectenna basada en arreglos de antenas tipo parche 46</b>	<b>46</b>
<b>3.7.1. Mediciones en cada una de las etapas del circuito rectificador     multiplicador de voltaje.....</b>	<b>49</b>
<b>3.8. Pruebas de almacenamiento .....</b>	<b>49</b>
<b>3.8.1. Tendencia de almacenamiento de rectenna de arreglo de antenas tipo     parche.....</b>	<b>51</b>
<b>3.9. Comparación de trabajos previos dentro de la UTA. ....</b>	<b>52</b>
<b>3.10. Comparación entre rectenna propuesta con investigaciones sobre rectennas.....</b>	<b>53</b>
<b>3.11. Presupuesto.....</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>56</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1. Conclusiones.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2. Recomendaciones.....</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Antena como dispositivo de transición [16].	9
<b>Figura 2.</b> Antena Loop y Antena Dipolo [16].	11
<b>Figura 3.</b> Diseños de Antena de bocina [16].	11
<b>Figura 4.</b> Partes de una antena de parche microstrip [17].	12
<b>Figura 5.</b> Formas de antenas microstrip [17].	12
<b>Figura 6.</b> (a) Tira Microstrip con terminación en corto circuito y (b) Tira Microstrip con terminación en circuito abierto [17].	12
<b>Figura 7.</b> Antena con reflector parabólico [19].	15
<b>Figura 8.</b> Espectro electromagnético vs telecomunicaciones [23].	19
<b>Figura 9.</b> Categorías de las tecnologías de recolección de energía actual [24].	20
<b>Figura 10.</b> Diagrama de sistema de cosecha de Energy Harvesting [25].	20
<b>Figura 11.</b> Forma estructural de una rectenna [26].	20
<b>Figura 12.</b> Diseño de Propuesta de Solución	24
<b>Figura 13.</b> Diagrama de Propuesta de solución.	27
<b>Figura 14.</b> Forma de la antena de prototipo, opción 1).	28
<b>Figura 15.</b> Arreglo de antenas 2x2 tipo parche.	33
<b>Figura 16.</b> Creación de nuevo proyecto en Ansys HFSS.	34
<b>Figura 17.</b> Menú de Ansys HFSS.	35
<b>Figura 18.</b> Colocación de frecuencias en el programa.	35
<b>Figura 19.</b> Selección de Add Frequency Sweep.	36
<b>Figura 20.</b> Valor de inicio y fin de frecuencia.	36
<b>Figura 21.</b> Parámetros de diseño.	37
<b>Figura 22.</b> Selección de material para conductores (cobre).	37
<b>Figura 23.</b> Arreglo de antenas 2x2 simulado en Ansys HFSS.	38
<b>Figura 24.</b> Parámetro S11 del arreglo de antena tipo parche.	38
<b>Figura 25.</b> Parámetro VSWR del arreglo de antenas tipo parche.	39
<b>Figura 26.</b> Vista en 3D de patrón de radiación de antenas tipo parche.	39
<b>Figura 27.</b> Circuito rectificador multiplicador de una etapa.	40
<b>Figura 28.</b> Circuito rectificador multiplicador de cinco etapas.	40
<b>Figura 29.</b> Diseño PBC del circuito.	41
<b>Figura 30.</b> Vista simulada de PBC del circuito.	41

<b>Figura 31.</b> Circuito impreso en baquelita de cobre. ....	41
<b>Figura 32.</b> Rectificador multiplicador de Voltaje implementado. ....	42
<b>Figura 33.</b> Diseño de arreglo de antenas tipo parche en baquelita de cobre (a) Arreglo 2x2 antena parche, (b) cara posterior GND. ....	42
<b>Figura 34.</b> Parámetro S11 de la medido con el NanoVNA. ....	44
<b>Figura 35.</b> Análisis parámetro S11 Simulado vs Implementado - Matlab. ....	44
<b>Figura 36.</b> Parámetro SWR de la antena medido con el NanoVNA. ....	46
<b>Figura 37.</b> Parámetro SWR de la antena simulado en HFSS. ....	46
<b>Figura 38.</b> Salida de voltaje directa de rectenna. ....	47
<b>Figura 39.</b> Salida de voltaje directa de rectenna conectada a batería 9V. ....	47
<b>Figura 40.</b> Salida de voltaje directa de rectenna conectada a batería 3.6V. ....	48
<b>Figura 41.</b> Medición de voltaje: (a) Medición en batería de 3.6V, (b) Medición en batería de 9V. ....	48
<b>Figura 42.</b> Voltaje almacenando en una batería de 3.6V. ....	51
<b>Figura 43.</b> Voltaje almacenado en una batería de 3.6V. ....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Longitudes de onda [14].....	6
<b>Tabla 2.</b> Características comunes de las ondas electromagnéticas.....	7
<b>Tabla 3.</b> Características conocidas de antenas microstrip [18]. ....	13
<b>Tabla 4.</b> Tipo de antenas reflectoras [16]. ....	15
<b>Tabla 5.</b> Principios básicos de las ondas electromagnéticas [21].....	16
<b>Tabla 6.</b> Resultados obtenidos de los cálculos realizados para la dimensión de los parches de la matriz de antenas.....	33
<b>Tabla 7.</b> Datos técnicos NanoVNA QT. ....	43
<b>Tabla 8.</b> Mediciones de voltaje en cada etapa del circuito rectificador.....	49
<b>Tabla 9.</b> Prueba de voltaje sin almacenamiento.....	49
<b>Tabla 10.</b> Almacenamiento con batería de 9V con rectenna de matriz de antenas tipo parche. ....	50
<b>Tabla 11.</b> Almacenamiento con batería de 9V con rectenna de matriz de antenas tipo parche. ....	50
<b>Tabla 12.</b> Comparativa de trabajos realizados anteriormente en la UTA para baterías de 3.6V ..... .....	52
<b>Tabla 13.</b> Comparativa de trabajos realizados anteriormente en la UTA para baterías de 9V. .... .....	52
<b>Tabla 14</b> Comparativa entre rectenna propuesta con investigaciones sobre rectennas. ....	53
<b>Tabla 15.</b> Presupuesto de elementos de fabricación para matriz de rectenna 2x2 basa en antenas tipo parche.....	54

## ÍNDICE DE SIMBOLOS

Bw	Ancho de banda	bps
Bar	Ancho de banda de la región activa	Bps
$W_i$	Ancho de línea microstrip	Metros (m)
$W_{cps}$	Ancho de dos líneas coplanares	Metros (m)
$W_g$	Ancho de plano de la tierra GND	Metros(m)
A	Ángulo de apertura	Grados (°)
Q	Calidad de circuito resonante	
C	Capacitancia	Faradios (F)
L	Carga	
a	Factor de crecimiento	
$\tau$	Factor de escala	Tau
EF	Factor de expansión	
$Fl$	Factor de espaciado	Metros(m)
F	Frecuencia	Hz
Fa	Frecuencia alta	Hz
Fb	Frecuencia baja	Hz
Fc	Frecuencia de corte	Hz
Z <sub>0</sub> (Conector)	Impedancia característica	Ohms
Z <sub>L</sub> (antena)	Impedancia de carga	Ohms
L	Inductancia	Henrios (H)
$\lambda$	Longitud de onda	Metros (m)
N	Numero de vueltas	
R <sub>o</sub>	Radio Inicial	Metros (m)
Fu	Rango de frecuencia	Hz
C	Velocidad en material	m/s

## RESUMEN EJECUTIVO

En la actualidad, la mayoría de las fuentes de energía son el gas natural, el petróleo y la industria nuclear. Pero hay que tomar en cuenta que estas fuentes de alimentación energética no son para toda la vida y su precio es generalmente aceptado. Además, se tiene que considerar que son poco amigables con el medio ambiente. Es así que hoy en día se necesita alternativas de energía que aborden las deficiencias que los otros recursos tienen, considerando todos los estudios que se han realizado sobre la recolección de energía más limpia, más verde y más segura. Por medio de varias investigaciones se sabe que la energía tiene muchos recursos de donde se la puede conseguir, como la energía solar, eólica, vibraciones y la que en esta intención se investigará, que es la de señales ambientales electromagnéticas.

Este proyecto investigativo se centró en recopilar información de rectennas, así como también sobre los arreglos de antenas tipos parches para Sistemas Energy Harvesting diseñadas a frecuencias de hasta 3 Ghz , además se añadió una simulación e implementación de una rectenna que conste con elementos y tecnología adecuada para sistemas de recolección de energía electromagnética; y a la vez analizamos los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para de esa forma poder evidenciar la eficiencia en los sistemas antes mencionados.

El diseño de este prototipo, se lo realizó en el software Ansys HFSS, mismo que nos permitió realizar un arreglo 2x2 de antenas tipo parche rectangulares, en la cual se utiliza transformadores  $\lambda/4$  para acoplar las líneas de transmisión a un impedancia característica de 50 Ohms; a la vez también se realiza el diseño de un multiplicador y rectificador de voltaje para altas frecuencias, en este caso para 2.4 Ghz; de tal forma que al unir la matriz de antena con el rectificador se logró obtener una rectenna útil para la captación de energía electromagnética.

**Palabras clave:** Rectenna, energía electromagnética, Sistemas Energy Harvesting.

## ABSTRACT

At present, most of the energy sources are natural gas, oil and nuclear industry. But it has to be taken into account that these sources of energy supply are not for life and their price is generally accepted. In addition, it must be considered that they are environmentally unfriendly. Thus, today there is a need for energy alternatives that address the shortcomings that other resources have, considering all the studies that have been conducted on the collection of cleaner, greener and safer energy. Through various researches it is known that energy has many resources from where it can be obtained, such as solar energy, wind energy, vibrations and the one that in this intention will be investigated, which is electromagnetic environmental signals.

This research project is focused on gathering information on rectennas, as well as on patch antenna arrays for Energy Harvesting Systems designed at frequencies up to 3 Ghz, in addition to a simulation and implementation of a rectenna consisting of elements and technology suitable for electromagnetic energy harvesting systems; and at the same time analyze the results obtained from the tests carried out in order to demonstrate its efficiency in the aforementioned systems.

The design of this prototype, was made in Ansys HFSS software, which allowed us to make a 2x2 array of rectangular patch antennas, in which  $\lambda/4$  transformers are used to couple the transmission lines to a characteristic impedance of 50 Ohms; at the same time the design of a multiplier and voltage rectifier for high frequencies is also performed, in this case for 2.4 Ghz; in such a way that by joining the antenna array with the rectifier, a useful rectenna for electromagnetic energy collection is obtained.

**Keywords:** Rectenna, electromagnetic energy, Energy Harvesting Systems.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Tema de investigación

RECTENNA BASADA EN ARREGLOS DE ANTENAS TIPO PARCHE PARA CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA.

### 1.2. Antecedentes investigativos

La referencia investigativa presentada en este apartado ha permitido determinar un punto de partida para nuestro proyecto, y de esa forma filtrar los conocimientos teóricos de trabajos similares acerca de la transmisión inalámbrica de energía; de tal manera se ha podido compilar la siguiente información acerca de los sistemas de Energy Harvesting.

BENFORD JAMES & SWEGLE JOHN en el año 2015 publican un libro titulado “High Power Microwaves” en el cual explican que Nicolás Tesla fue el inventor de la idea de las rectennas donde su objetivo al crearlas fuera la de que los campos de energía RF fueran usados como fuente para posicionar una antena y con la misma encender alguna otra cosa. Debido al incremento del uso de diversos sistemas electrónicos y sistemas de comunicaciones, la cantidad de energía utilizada es mayor, misma que puede ser solventada por medio de antenas con rectificador [1].

Recientemente los temas basados en la transmisión de energía inalámbrica es una llamativa aplicación para la tecnología de las microondas, así lo expresa CARLOS R. JINEZ , en su tesis realizada en el año 2016 con el tema “Sistema electrónico para recarga eléctrica en teléfonos celulares inteligentes en espacios cerrados, empleando tecnología inalámbrica” en la Universidad Técnica de Ambato en Ecuador; centrándose en generar un sistema de carga rápida por medio de un generador y receptor de ondas electromagnéticas utilizando la teoría de la inducción magnética y la vez generando un prototipo de programa en AndroidStudio 1.5.1. para visualizar el nivel energético de la batería. Se pudo conseguir un 70% de eficiencia en el prototipo, considerando una distancia de 5cm entre transmisor y receptor de los resonadores de origen y carga. [2].

Debido a la fuerza que ha presentado en los últimos años las investigaciones acerca de las antenas rectificadoras la Universidad Nacional de Colombia, ubicada en Bogotá, en el año 2016 en sus estudios desarrollados por parte del grupo de investigación en compatibilidad electromagnética de la Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, presenta su publicación con el tema “Sistema de recolección de energía ( Energy Harvesting), que emplea la corriente Corona y señales de alta frecuencia” encabezado por CARLOS A. RIVERA G. en una de sus conclusiones explica que, para la recolección de energía por medio de una matriz de antenas, la principal contribución de la potencia de radiofrecuencia captada por la matriz se da en la banda FM; resultado que pudieron obtenerlo al colocar en la universidad una serie de monopolos altos con el fin de receptar la energía del campo eléctrico ambiental, y a su vez con los circuitos elaborados pudieron demostrar que permiten igualmente receptar espectro radioeléctrico. [3]

Otra referencia que permite guiar este proyecto es la investigación particular realizada por GOUSSETIS G, GÓMEZ JL. & SILJESTROM P., titulada “Diseño de una rectenna en la banda WiFi de 2.45 GHz para aplicaciones de captación de energía electromagnética” la cual en su desarrollo permite conocer la forma en la que se puede diseñar e implementar una antena rectificadora (rectenna) que no es más que la unión de una antena con un rectificador. Para este propósito en cuestión usará la energía WiFi a 2.45 GHz, para la formación del rectificador se elaborarán tres partes, “una red de adaptación a la entrada, para eliminar los armónicos no deseados, la etapa rectificadora, formada por un diodo schottky, y finalmente una etapa de filtrado para eliminar el efecto no lineal del diodo”.

La comprobación del prototipo se lo realizó por medio de un LED que se conectó a la salida del rectificador, así se pudo evidenciar el aprovechamiento de la energía emitida por un router wifi de 2.45 GHz, con lo que se logro encender el LED. [4]

Un ejemplo más de este tipo de antenas es el prototipo que realiza PRIETO ÁLVARO en su proyecto de investigación para la Universidad Politécnica de Madrid, con el tema: “Diseño de un sistema de captación de energía de señales WiFi” en el que se diseña un rectificador que tiene la capacidad de generar señales continuas a partir de energía electromagnética del ambiente y junto con la antena se logra transformar las

señales electromagnéticas en señal continua (DC). El diseño del circuito rectificador está elaborado con un diodo Schottky de alta eficiencia para maximizar la transformación de radiofrecuencia (RF) en señal continua. Los dispositivos con esta estructura se encuentran dentro de lo que abarca la “Energy Harvesting”, que radica en recolectar la energía del ambiente para utilizarla en otro tipo de circuitos que necesiten ser alimentados constantemente de energía. Algo que se aclara en esta investigación es que la potencia que se pueden conseguir de estos prototipos solo sirve para cubrir el consumo de un dispositivo no muy grande, por lo que su uso sería más para electrónica de potencia baja. Pero uno de sus objetivos a largo plazo está en lograr reducir el tamaño de las baterías de uso común, aprovechando la cantidad de energía que generan actualmente los dispositivos inalámbricos en el mundo. [5]

Considerando que es algo novedoso en la actualidad que la interconexión de cualquier dispositivo de forma inalámbrica genere energía y que mediante antenas la misma pueda ser captada, en una de las averiguaciones más recientes se tiene el proyecto investigativo de OLAN KAREN para el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) ubicado en el Estado de Puebla, México, en el año 2019, en el que basa su estudio en el “Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para aplicaciones del internet de las cosas”, mismo que es elaborado por medio del diseño y fabricación de arreglo de antenas de dos parches. Estas contienen antenas de ranura en el plano de tierra, que trabajan a una frecuencia central de 5.8 GHz. Como resultado del proyecto se muestra el diseño de antena de ranura con el modelo empírico que considera la apertura como una discontinuidad de la línea de microcinta, a la cual se le desarrollaron simulaciones de análisis numérico de onda completa. Se considera en la elaboración de este proyecto que los diseños de la antena se obtuvieron por el método de circuito impreso, que es económico y de fácil ejecución. [6]

Por último se revisó el trabajo desarrollado por CERQUERA J. & BIANCO D. pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Católica de Colombia, con el tema: “Diseño y simulación de una rectenna para cosechar energía electromagnética a 2.4 GHz”; en su trabajo de grado constan 5 capítulos, los cuales permiten revisar de forma detallada cada concepto sobre antenas y rectificadores, pero es en el capítulo 3 donde se especifica el diseño de la rectenna,

mostrando geométricas y cálculos aptos para obtener una eficiente antena rectificadora. Para la simulación se usa el software ANSYS HFSS (Simulador de alta frecuencia), mismo que permitió apreciar el comportamiento del diseño de la rectenna, que vale recalcar que la frecuencia de operación de la misma fue de 2.4 GHz, pues al revisar otros proyectos investigativos corroboraron que en este rango se puede lograr obtener cantidades de energía y es una frecuencia que se la localiza por medio del WiFi común de los hogares colombianos. [7]

### **1.2.1. Contextualización del problema**

En la historia de la Física, la electricidad fue uno de los descubrimientos más relevantes, en la actualidad disponer de electricidad nos permite tener comodidad para el día a día, hay que tener en cuenta que ha pasado por un proceso largo, de mucho tiempo para poder adaptar en muchas de las cosas de uso común la electricidad, formando parte importante en el desarrollo de los avances tecnológicos en los últimos siglos. Consideremos también que generar elementos tecnológicos inalámbricos han dado paso a innovaciones de alto nivel en distintos campos, sea esto en medicina, ingeniería o simplemente domésticas, garantizando al hombre mejorar su nivel de vida. Desde el uso del Bluetooth o WiFi las tecnologías son inalámbricas, pero aún no se ha creado un dispositivo que permita transmitir energía eléctrica en forma inalámbrica, los estudios desarrollados únicamente logran transmitir energía eléctrica a distancias cortas y no de una forma tan eficiente como se desea. [8]

En el paso de la historia, encontramos Nikola Tesla quien en 1890 descubrió las ventajas de aprovechar las OEM convirtiéndolas en corriente continua, luego en 1985 encontramos la primera tecnología WPT (Wireless Power Transfer o en español Transferencia de energía inalámbrica), por Heinrich Hertz. Con el paso del tiempo se han venido desarrollando varias investigaciones acerca de WPT de tal forma que la sociedad se pueda ver beneficiada con el uso de esta tecnología. [9]

En 1964 fue el Ingeniero Eléctrico William C. Brown quien demostró que una rectenna no era más que una antena con un rectificador que convierte la energía electromagnética en corriente directa, comenzando ahí el interés por lograr adquirir energía de forma inalámbrica, Aunque parezca algo de ciencia ficción cabe recalcar que la idea principal de este proyecto fue en proporcionar energía eléctrica a un

helicóptero por medio de ondas de radio, enviadas desde la tierra y receptada por el helicóptero a través de una rectenna. [10]

Recientemente la aparición de varios estudios para lograr eliminar el ultimo cable, que es el de la energía ha generado un interés muy alto en personas que se dedican a esta área, su mayor objetivo se centra en poder reemplazar las limitaciones que por baterías se ha tenido en algunos avances tecnológicos. La mayoría de los estudios de los últimos tiempos se ven limitados por la potencia que puedan generar a través de sus prototipos, pues la recolección de energía que se tiene aún no es muy alta. Deseando cubrir esta necesidad Douyere A. en su proyecto experimental usó una rectenna de un solo componente compacto de antena de parche de ranura circular (CSPA), junto a un rectificador, el estudio empezaría con las medidas del efecto de acoplamiento mutuo en el plano X del espacio. Para esto cada elemento rectenna tiene una separación desde  $d= 5\text{cm}$  a  $d=12\text{ cm}$ . [11]

Algo que es importante también considerar para este tipo de proyectos investigativos es la contaminación ambiental, para el año 2020 ya se predecía el crecimiento potencial del Internet de las Cosas (IoT) de hasta 20 mil millones de dispositivos en el mundo [12]. Pues no hace falta ir muy lejos para constatar que las distancias físicas por medio de estos elementos de conexión son mas cortas y con ello se busca mayores velocidades de conexión. Es así que para el año 2021 según datos publicados por Hub de Energía 18 millones de América Latina y el Caribe no cuentan con acceso a la energía eléctrica, se puede tomar como referencia a la población de Ecuador la cantidad de personas sin acceso a este servicio, también se publica en este artículo que la cobertura de electricidad incremento del 52% que se tenía en el año 1970 a 97.2% en el año 2019. Convirtiéndose así América Latina y el Caribe en una de las regiones con mayor cubrimiento eléctrico en el mundo. [13]

### **1.2.2. Fundamentación teórica**

#### **Microondas**

Parten de la misma naturaleza que las ondas de luz visible o radio, las microondas son electromagnéticas, lo que hace que cada onda sea diferente, por su espectro electromagnético que puede ser la frecuencia o la longitud de onda. Las microondas tienen una vibración alta por segundo, en una tabla a continuación se muestra alguna

de las longitudes que podemos obtener de las diferentes ondas que se generan en el medioambiente. [14]

**Tabla 1.** Longitudes de onda [14]

		<b>Longitud de Onda</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Energía</b>
<b>Radio</b>	Muy baja frecuencia	> 10 km	< 30 khz	<1.99 e-29 J
	Onda larga	< 10 km	> 30 khz	>1.99 e-29 J
	Onda media	< 650 m	> 650 khz	>4.31 e- 28J
	Onda corta	< 180 m	> 1.7 Mhz	>1.13 e-27 J
	Muy alta frecuencia	< 10 m	> 30 Mhz	>2.05 e-26 J
	Ultra alta frecuencia	< 1 m	> 300 Mhz	>1.99 e-25J
<b>Microondas</b>		< 30 cm	> 1.0 Mhz	>1.99 e-25 J
<b>Infrarrojo</b>	Lejano/Submilimétrico	< 1 mm	> 300 Ghz	> 199 e-24 J
	Medio	< 50 um	> 6.0 Thz	>3.98 e-21 J
	Cercano	< 2.5 um	> 120 Thz	>79.5 e-21 J
<b>Luz Visible</b>		< 780 nm	> 384 Thz	>255 e-21 J
<b>Ultravioleta</b>	Cercano	< 380 nm	> 789 Thz	>523 e-21 J
	Extremo	< 200 nm	> 1.5 Phz	>993 e-21 J
<b>Rayo X</b>		< 10 nm	> 30.0 Phz	>19.9 e-18 J
<b>Rayos Gamma</b>		< 10 pm	> 30.0 Ehz	>19.9 e-15 J

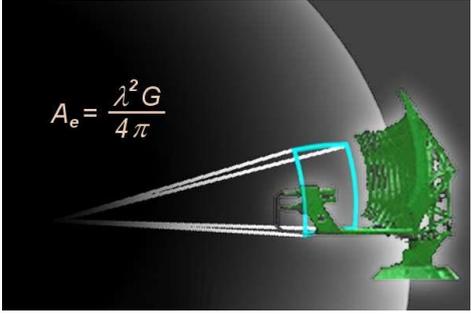
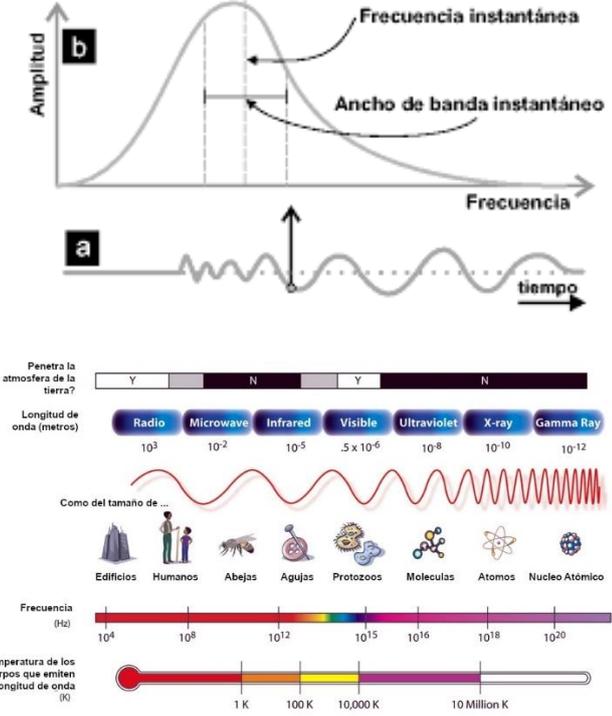
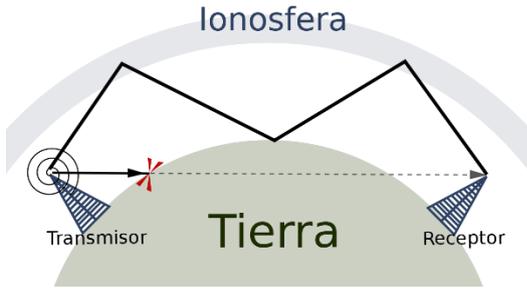
Otro concepto que aporta sobre la definición de lo que es un sistema de comunicación por microondas es que son el paso de información de un punto a otro. Al ser su principal uso para comunicación inalámbrica se puede lograr mediante dos técnicas: (i) transferencia de energía inalámbrica y (ii) recolección de energía.

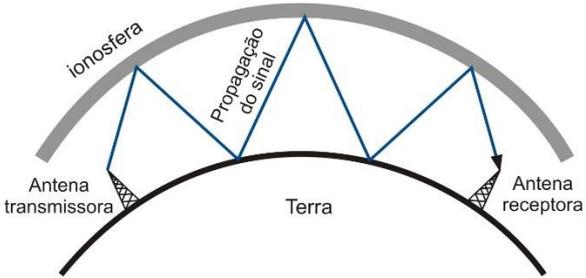
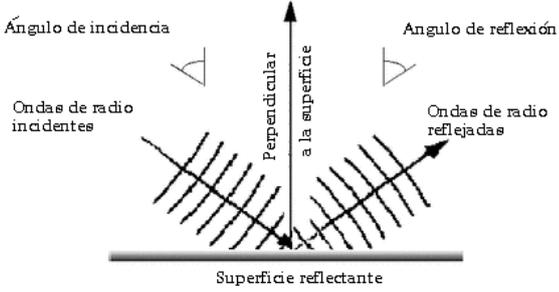
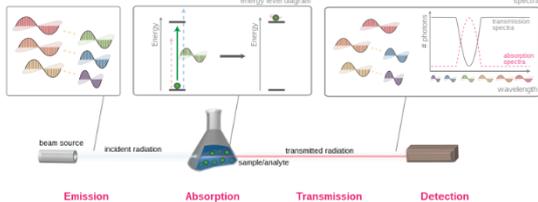
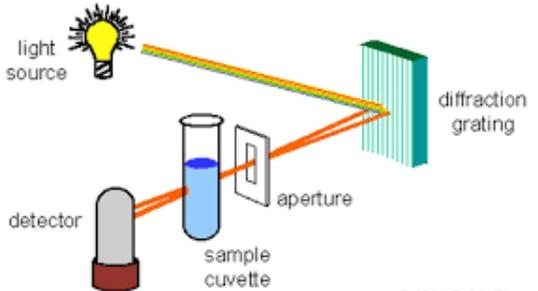
Las microondas forman parte del espectro de altas frecuencia, estas fueron anunciadas por el famoso James Clerk Maxwell en el año de 1864 en base a las conocidas como ecuaciones de Maxwell. Estas ondas electromagnéticas tienen una gran variedad de aplicaciones dependiendo en la banda de frecuencia en la que trabajan, esto ha hecho que sean muy necesarias es decir indispensables para el hombre. [15]

### **Características de las ondas electromagnéticas**

Antes de mencionar las características de las ondas electromagnéticas, hay que dejar claro que las mismas son ondas que se relacionan con el magnetismo, y son variantes con el campo eléctrico y magnético que en el espacio se encuentra. Es decir, cuando los dos campos (eléctrico y magnético) se juntan dan lugar a las conocidas ondas electromagnéticas.

**Tabla 2.** Características comunes de las ondas electromagnéticas

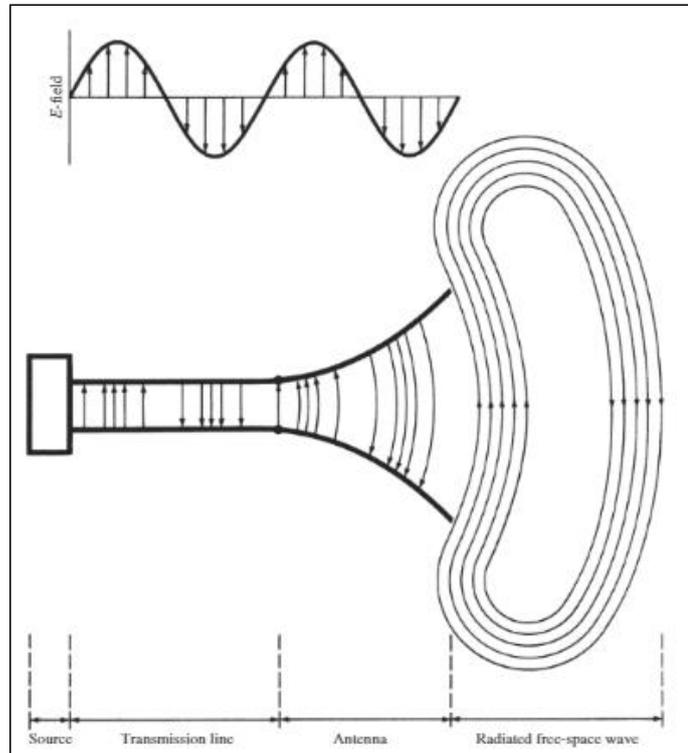
Característica	Figura
<p>La ganancia de la antena es proporcional al tamaño eléctrico de la antena, esto es de mucha importancia ya que trae consecuencias a la hora de implementación de sistemas de microondas.</p>	
<p>Se obtiene más ancho de banda a frecuencias más altas. Un ancho de banda del 1% a 600 MHz es 6 MHz, que (con modulación por desplazamiento de fase binaria modulación) puede proporcionar una velocidad de datos de aproximadamente 6 Mbps (megabits por segundo), mientras que, a 60 GHz, un ancho de banda del 1% es de 600 MHz, lo que permite una velocidad de datos de 600 Mbps.</p>	
<p>Las señales de microondas viajan por la línea de visión y no son desviadas por la ionosfera como lo hacen señales de frecuencia más baja. Enlaces de comunicaciones terrestres y satelitales con muy alta, Por</p>	

<p>lo tanto, las capacidades son posibles, con la reutilización de frecuencias en ubicaciones mínimamente distantes.</p>	
<p>El área de reflexión efectiva (sección transversal del radar) de un objetivo de radar suele ser proporcional al tamaño eléctrico del objetivo. Este hecho, junto con las características de frecuencia de la ganancia de la antena, generalmente hace que las frecuencias de microondas sean preferidas para los radares.</p>	<p style="text-align: center;"><b>REFLEXIÓN DE ONDAS DE RADIO</b></p>   <p style="text-align: center;">Ingeniería Mecafenix</p>
<p>Varias resonancias moleculares, atómicas y nucleares ocurren en frecuencias de microondas, creando una variedad de aplicaciones únicas en las áreas de ciencia básica, teledetección, diagnóstico y tratamiento médico y métodos de calentamiento.</p>	  <p style="text-align: right;">© 2001 B. M. Tissue</p>

Elaborado por el investigador

## Teoría de las antenas

Según la definición que proporciona el diccionario Webster, publicado por primera vez, en 1828, una antena es un elemento de metal (puede ser varilla o alambre) para enviar o recibir ondas de radio. En otras palabras, se puede decir que la antena no es más que un módulo de transición entre el medio ambiente y un dispositivo de guía, como se muestra en la figura 1. [16]



**Figura 1.** Antena como dispositivo de transición [16].

Para poder tener de una forma numérica el comportamiento de las antenas, las denominadas “Ecuaciones de Maxwell” permiten tener un guía, pues son encaminadas por las leyes de Faraday, Ampere y Gauss. Las ecuaciones se puntualizan en hacer un análisis del comportamiento del campo eléctrico y magnético según el tiempo y el espacio. Las ecuaciones que Maxwell unificó son las siguientes:

$$\nabla \times \varepsilon = \frac{\delta B}{\delta T} - M$$

$$\nabla \times H = \frac{\delta D}{\delta T} + J$$

$$\nabla \times D = \rho$$

$$\nabla \times B = 0$$

Donde:

- $\epsilon$  es la intensidad de campo eléctrico, en (V/m)
- H es la intensidad de campo magnético, en (A/m)
- D es la intensidad de flujo eléctrico, en (Coul/m<sup>2</sup>)
- B es la densidad de flujo magnético, en (Wb/m<sup>2</sup>)
- M es la densidad ficticia de corriente magnética
- J es la densidad de corriente eléctrica, en (A/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  es la densidad de carga eléctrica, en (Coul/m<sup>3</sup>)

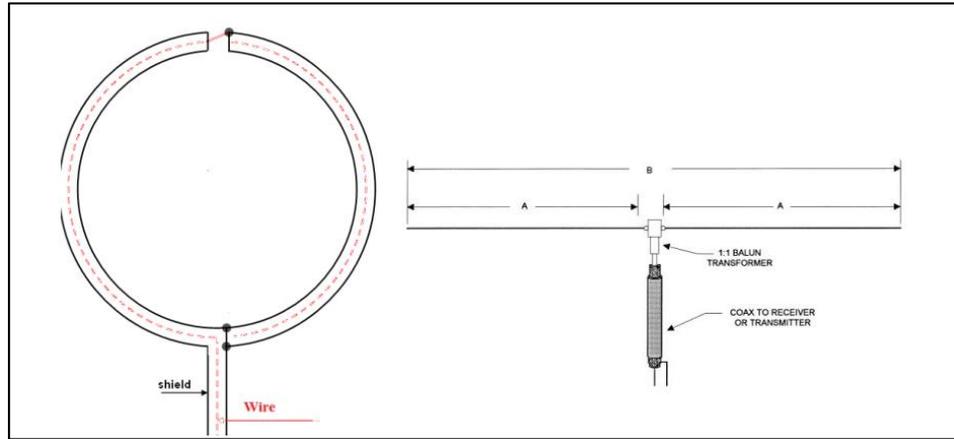
Con la creación de estas ecuaciones se ha dado paso a desarrollo de elementos tecnológicos que usan energía electromagnética y han revolucionado las diferentes funciones de los dispositivos que las personas usan en su día a día.

### **Tipos de Antenas**

En la actualidad existen algunos tipos de antenas de diferentes formas y variados materiales, para poderlas usar en diferentes trabajos tecnológicos, pues, aunque su función no varía el diseño de cada una de éstas, han hecho mucho más fácil su uso por parte de personas dedicadas a realizar investigaciones diversas sobre los temas que conlleva su uso. Es así que en la siguiente tabla se describe alguna de las más comunes:

#### **➤ Antenas de Alambre**

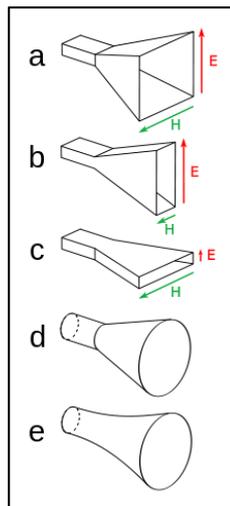
Este tipo de antenas se usan más en la parte automotriz, a la vez también en construcciones, en el área marítima y aérea, pero su mayor aplicación se ha visto en las naves espaciales. Este tipo de antenas también tiene subdivisiones y estas son las monopolos, dipolos y antenas de lazo cerrado y de hélice, según lo que menciona Balanis, 2005 en su desarrollo. A continuación, se muestra una imagen referencial de algunos ejemplos de antenas de alambre, lo que vendría siendo una antena Loop y una antena dipolo.



**Figura 2.** Antena Loop y Antena Dipolo [16].

➤ **Antenas de Apertura**

Este tipo de antenas ha tenido un uso más para el desarrollo de trabajos en altas frecuencias, así también desde la antigüedad para proyectos espaciales. En la subdivisión de las antenas de apertura, se encuentran las antenas con forma piramidal, antena de guía de onda rectangular (utilizada en las frecuencias de microondas mayores a 1GHz); y bocina cónica.



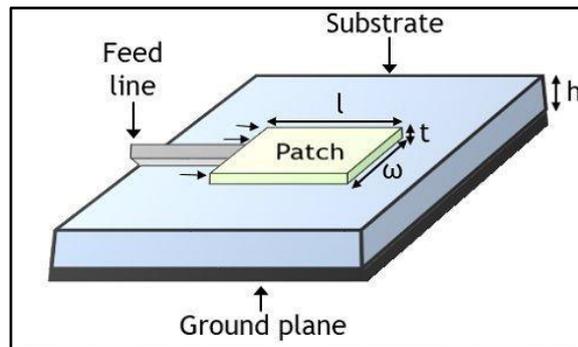
**Figura 3.** Diseños de Antena de bocina [16].

➤ **Antenas de Microcinta**

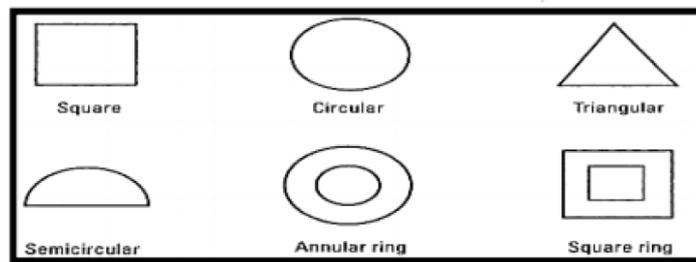
Este tipo de antena es la que se usará en el desarrollo de este prototipo, por lo que se hará mayor énfasis en hablar acerca de ésta. Empecemos por aclarar que los primeros ejemplares los desarrollo Deschamp en 1953, la primera patente fue registrada en

Francia en 1955; pero después de esto paso más de 20 años para que se empezaran a fabricar este tipo de antenas y lograr obtener mayores desarrollos de las mismas. [17]

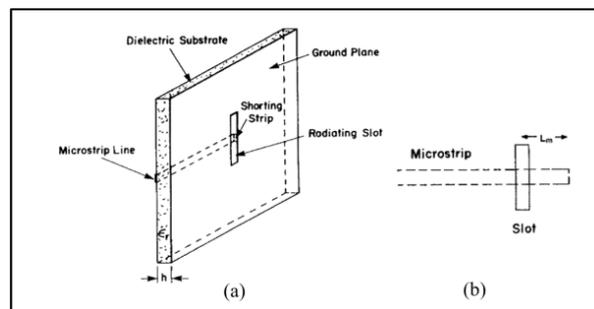
Para construir las antenas de microcinta o también conocidas como antenas de parche microstrip, debe tener dos caras, en el un lado del sustrato dieléctrico y en el otro un plano de tierra. El parche conductor puede ser de oro o cobre y puede diseñarse en cualquier forma, aunque por lo general se usan más, rectangulares para que sea muchas más simple su análisis y visualización del comportamiento.



**Figura 4.** Partes de una antena de parche microstrip [17].



**Figura 5.** Formas de antenas microstrip [17].



**Figura 6.** (a) Tira Microstrip con terminación en corto circuito y (b) Tira Microstrip con terminación en circuito abierto [17].

## Ventajas y desventajas de las antenas Microstrip

**Tabla 3.** Características conocidas de antenas microstrip [18].

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil delgado</li> <li>• Peso liviano.</li> <li>• Fabricación simple.</li> <li>• Pueden ser de diferentes formas.</li> <li>• Bajo costo.</li> <li>• Pueden ser integradas a circuitos.</li> <li>• Pueden crearse fácilmente arreglos simples</li> <li>• Se puede obtener polarización circular y lineal.</li> <li>• Las líneas de alimentación y redes de acoplamiento se pueden fabricar simultáneamente.</li> <li>• Se pueden obtener múltiples resonancias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja eficiencia</li> <li>• Ancho de banda reducido.</li> <li>• Radiación espuria.</li> <li>• Baja Ganancia.</li> <li>• Problemas de tolerancia en la fabricación.</li> <li>• Requieren sustratos de alta calidad y buena tolerancia a temperaturas extremas.</li> <li>• Arreglos de alto rendimiento requieren sistemas de alimentación complejos.</li> <li>• Es difícil de lograr pureza de polarización.</li> <li>• Radiación sólo a la mitad del espacio.</li> </ul>

### Cálculos para el diseño de una antena microstrip tipo parche – rectangular

- Longitud de Onda en el vacío ( $\lambda_{vacio}$ )

$$\lambda_{vacio} = \frac{c}{f} \quad \text{Ecuación 1}$$

- Ancho del parche (W)

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Permitividad Efectiva ( $\epsilon_{eff}$ )

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

- Incremento ( $\Delta L$ )

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad \text{Ecuación 4}$$

- Longitud del parche (L)

$$L = \frac{1}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L$$

Ecuación 5

• **Ancho de la línea de transmisión ( $W_{Ltx}$ )**

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

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

Ecuación 6

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 7

• **Inset ( $\Delta xi$ )**

$$Z_{in} = Z_A \cos^2 \left( \frac{\pi \Delta xi}{L} \right)$$

Ecuación 8

$$\Delta xi = \frac{L}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{Z_{in}}{Z_A}} \quad (rad)$$

Ecuación 9

Donde:

- $c$  Velocidad de la luz en el vacío
- $f_0$  Frecuencia Operación
- $\epsilon_r$  Permitividad Relativa sustrato
- $h$  Altura del sustrato
- $\mu_0$  Constante Permeabilidad Magnética
- $\epsilon_0$  Constante permeabilidad Eléctrica
- $Z_{in}$  Impedancia entrada
- $Z_A$  Impedancia en el parche

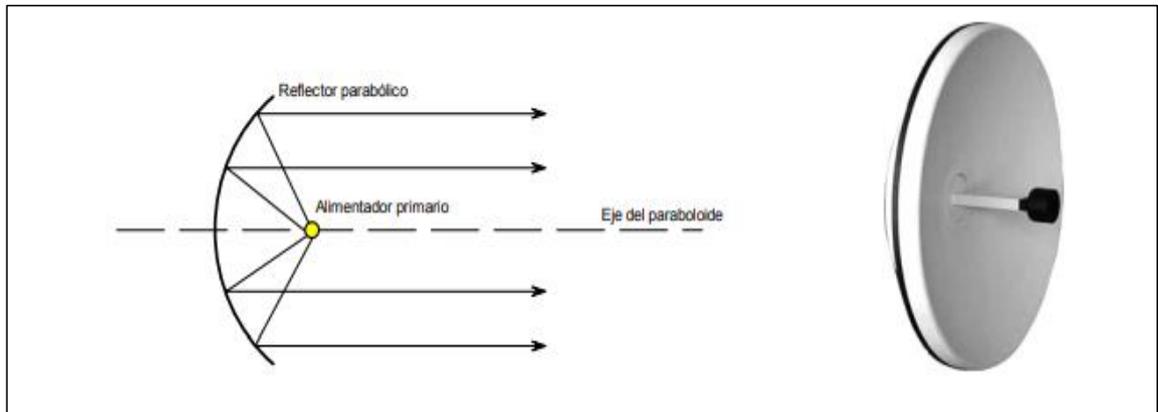
**Consideraciones para el diseño de antenas de tipo parche**

- La red de alimentación debe coincidir exactamente con cada uno de los elementos del parche
- Debe ser simétrica

- Cada elemento del parche debe recibir la señal al mismo tiempo es decir no debe existir ningún desfase
- La distancia entre parches no debe ser mayor a  $2\lambda$  se recomienda que sea  $0,8\lambda$

➤ **Antenas Reflectoras**

Para la necesidad de comunicar a largas distancias, se desarrolló esta sofisticada antena, conocidas comercialmente las antenas reflectoras parabólicas. Cuando se desea conseguir la una mayor directividad de la antena, se sugiere que la forma del reflector sea parabólica, es por lo mismo que los sistemas de comunicación han empleado en sus servicios el uso de este tipo de antenas, para garantizar la conectividad de las señales que envían, como resultado de la forma utilizada de la antena.

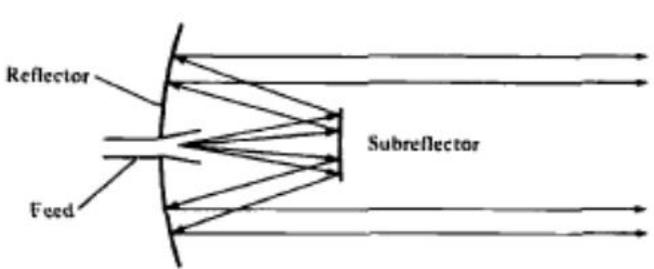
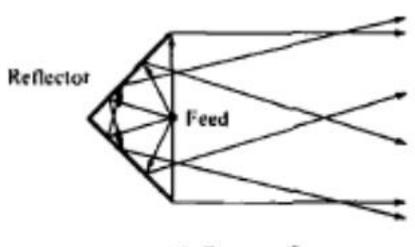


**Figura 7.** Antena con reflector parabólico [19].

A continuación, se presentan algunos modelos existentes de este tipo de antenas.

**Tabla 4.** Tipo de antenas reflectoras [16].

Tipo de antena	Referencia
Antena reflectora con alimentación frontal	

<p>Antena reflectora con alimentación Cassegrain</p>	
<p>Antena reflectora plana de 90°.</p>	

➤ **Antenas de Lentes**

Como lo especifica su nombre, la estructura de esta antena está conformada por un lente cuyo objetivo es poder usar de mejor manera la eficiencia de las altas frecuencias, por lo general su mayor aplicación está en reflectores parabólicos. [20]

Entre los tipos de estas antenas tenemos las antenas de lente planas, mismas que son realizadas en meta materiales, pues las estructura de éstas son de diseños fáciles y logran cumplir los rangos de frecuencias deseadas. Otra de las características mas comunes en estas antenas es que trabajan muy bien para las ondas milimétricas y las microondas, debido a lo robustas que pueden llegar a ser. [20]

**Ondas de Radio Magnético (Electromagnéticas)**

Los principios básicos bajo lo que se rigen las ondas electromagnéticas son los siguientes:

**Tabla 5.** Principios básicos de las ondas electromagnéticas [21]

<p><b>Radio propagación</b></p>	<p>Cualquier transmisión tanto de radio como de televisión se hace a través de las denominadas Ondas electromagnéticas. Este tipo de ondas se caracterizan porque están formadas, como su nombre indica por la conjunción de un campo eléctrico y otro magnético. La</p>
---------------------------------	--

	unión de estos campos es la que permite que este tipo de ondas se pueda transmitir por el espacio.
<b>Frecuencia</b>	Es una medida para indicar el número de repeticiones de cualquier fenómeno o suceso periódico en la unidad de tiempo.
<b>Espectro electromagnético</b>	Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia.
<b>Impedancia</b>	Es una magnitud que establece la relación (cociente) entre la tensión y la intensidad de corriente. Tiene especial importancia si la corriente varía en el tiempo, en cuyo caso, ésta, la tensión y la propia impedancia se notan con números complejos o funciones del análisis armónico.
<b>Oscilación</b>	Se denomina oscilación a una variación, perturbación o fluctuación en el tiempo de un medio o sistema. Una oscilación en un medio material es lo que crea el sonido, en una corriente eléctrica crea una onda electromagnética.
<b>Modulación</b>	El término modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal.
<b>Multiplexación</b>	En telecomunicación, la multiplexación es la combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión usando un dispositivo llamado multiplexor.
<b>Polarización</b>	Es un fenómeno que puede producirse en las ondas electromagnéticas, como la luz, por el cual el campo eléctrico oscila sólo en un plano determinado, denominado plano de polarización.
<b>Reflexión</b>	Fenómeno físico que explica la incidencia de las ondas contra un material y su curso posterior cuando el material no absorbe la onda.
<b>Refracción</b>	Es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos

## **Espectro electromagnético**

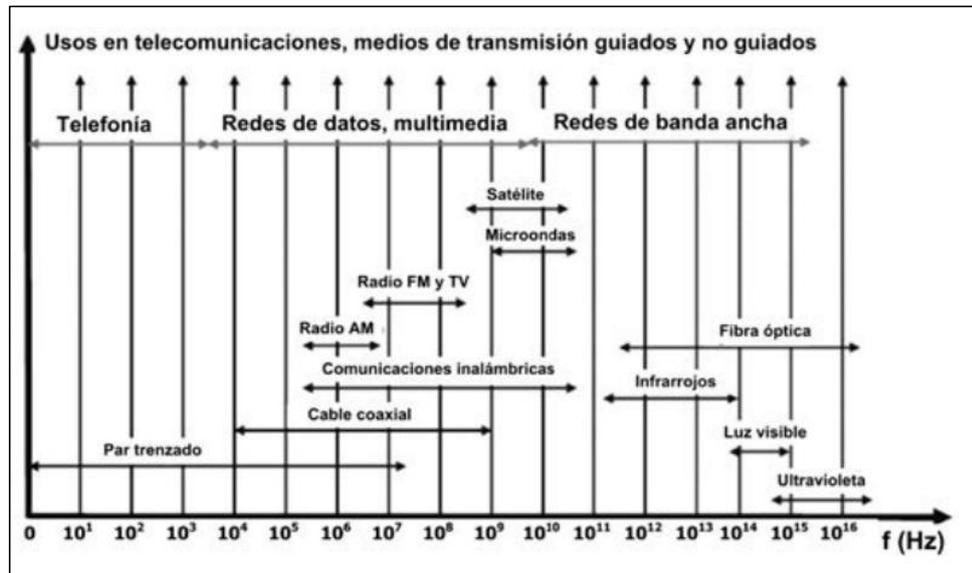
Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética.

Así, el límite teórico inferior del espectro electromagnético es 0 (ya que no existen frecuencias negativas) y el teórico superior es  $\infty$ . Con los medios técnicos actuales, se han detectado frecuencias electromagnéticas inferiores a 30 Hz y superiores a  $2,9 \cdot 10^{27}$  Hz. Aunque formalmente el espectro es infinito y continuo, se cree que la longitud de onda electromagnética (distancia entre dos valores de amplitud máxima de la onda) más pequeña posible es la longitud de Planck ( $l_p \approx 1,616252 \cdot 10^{-35}$  m), distancia o escala de longitud por debajo de la cual se espera que el espacio deje de tener una geometría clásica (medidas inferiores no pueden ser tratadas en los modelos de física actuales debido a la aparición de efectos de gravedad cuántica). Igualmente, se piensa que el límite máximo para la longitud de una onda electromagnética sería el tamaño del universo. [22]

## **Espectro electromagnético y telecomunicaciones**

Las ondas electromagnéticas, convenientemente tratadas y moduladas (normalmente, variando de forma controlada la amplitud, fase y/o frecuencia de la onda original), pueden emplearse para la transmisión de información, dando lugar a una forma de telecomunicación. Hoy día se utilizan masivamente ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias para la transmisión de información por medios guiados (par trenzado, cable coaxial, fibra óptica, etc.) y por medios no guiados (normalmente el aire o el vacío). Las frecuencias utilizadas en cada caso dependen del comportamiento de las mismas en los diferentes materiales utilizados como medios de transmisión, así como de la velocidad de transmisión deseada. En el caso particular de que la propagación de ondas electromagnéticas se realice por medios no guiados, a esta forma de telecomunicación se le denomina radiocomunicación o comunicación inalámbrica. Así, se denomina espectro

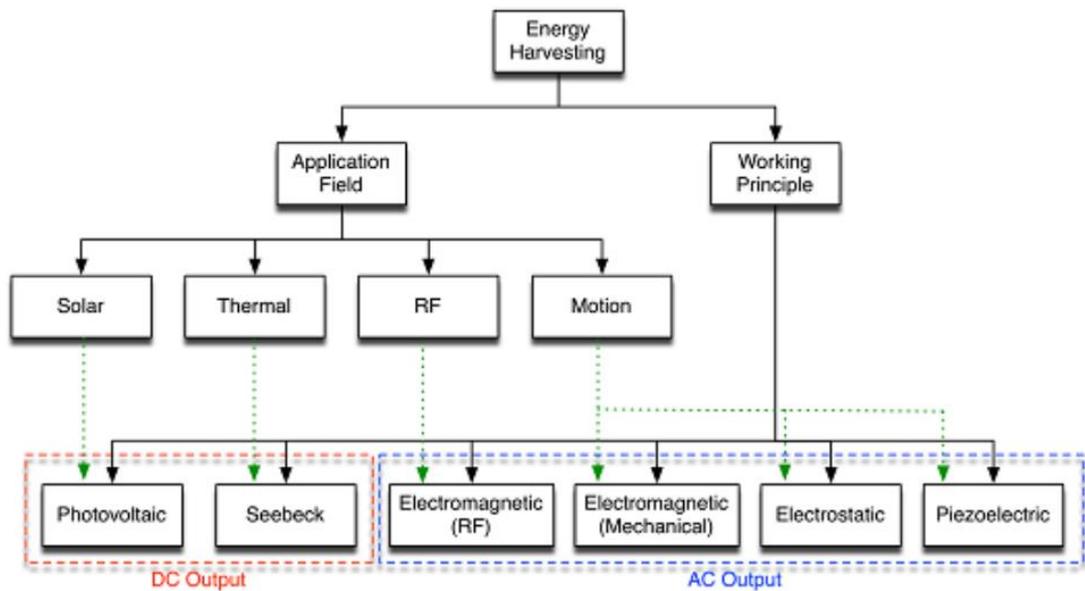
radioeléctrico a la parte del espectro electromagnético utilizada principalmente para radiocomunicaciones. [23]



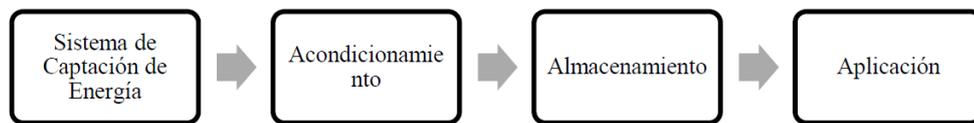
**Figura 8.** Espectro electromagnético vs telecomunicaciones [23].

### Concepto de Energy Harvesting

En la actualidad, la cantidad de energía obtenida de combustibles fósiles como de fuentes alternativas resulta ser básica e imprescindible para nuestro día a día. Pero no son las únicas formas de energía, dado que además de estas fuentes en nuestro entorno también se genera energía de fuentes energéticas a pequeña escala, que con la correcta tecnología pueden aprovecharse para distintas aplicaciones. Es por ello que en los últimos años se ha desarrollado el concepto de recolección de energía ambiental (energy harvesting). El término energy harvesting hace referencia al proceso por el cual la energía residual presente en el ambiente se aprovecha para producir energía eléctrica que puede ser almacenada o utilizada para alimentar pequeños dispositivos electrónicos de bajo consumo, como los utilizados en ordenadores y en las WSN. Por tanto, se aprovechan los distintos tipos de energía presentes en el medio ambiente para alimentar sistemas que puedan ser autosuficientes e inalámbricos. [24]



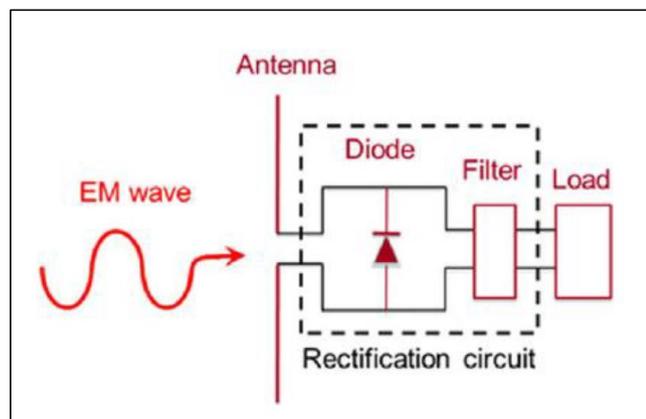
**Figura 9.** Categorías de las tecnologías de recolección de energía actual [24].



**Figura 10.** Diagrama de sistema de cosecha de Energy Harvesting [25].

### 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. [26]



**Figura 11.** Forma estructural de una rectenna [26].

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Construir una rectenna basada en arreglos de antenas tipo parche para captación de energía electromagnética en sistemas de Energy Harvesting.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información de rectennas así como en arreglos de antenas tipo parche para Sistemas Energy Harvesting.
- Calcular parámetros de diseño de un arreglo de antenas tipo parche diseñada a frecuencias de hasta 3 GHz para su operación.
- Simular e implementar una rectenna que conste con elementos y tecnología adecuada para sistemas de recolección de energía electromagnética óptimos.
- Analizar los parámetros obtenidos de simulaciones con los valores obtenidos en las pruebas de la rectenna implementada para verificar su eficiencia en sistemas de Energy Harvesting.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1. Materiales

El desarrollo de la Rectenna propuesta en el presente proyecto investigativo se utilizó de los siguientes materiales.

- Matriz de Antena tipo parche diseñadas para 2.4 GHz.
- Circuito rectificador multiplicador de voltaje de 5 etapas.
- Conectores SMA
- Materiales Investigativos Bibliográficos (Artículos científicos, libros, tesis con temas similares, etc)
- Software de ambiente electromagnético (ANSYS HFSS versión 15.0)
- Software de simulación de circuito (Proteus 8)
- Software de interfaz de Pc de nanoVNA

#### 2.2. Métodos

##### 2.2.1. Modalidad de la investigación

El presente proyecto está enfocado en un problema social y la necesidad de búsqueda aplicada a nuevos métodos para generar energía, mediante una rectenna basada en arreglos de antenas de tipo parche para sistemas de Energy Harvesting.

El proyecto se basó en el análisis de mejora para sistemas de captación de energía “Energy Harvesting” mediante el diseño de una rectenna de un arreglo de antenas de tipo parche para su posterior proceso de tratamiento y almacenamiento de la energía en baterías recargables.

**Investigación aplicada:** Se buscará dar solución a un problema social y la necesidad de búsqueda aplicada a nuevos métodos para generar energía mediante una rectenna basada en arreglos de antenas de tipo parche para sistemas de Energy Harvesting.

**Investigación Bibliográfica:** permitirá recolectar, organizar, interpretar y analizar información sobre el tema a investigarse a partir de fuentes documentales tales como libros, documentos de archivo, tesis e investigaciones anteriores que permitan entender de mejor manera en que consiste la temática planteada.

**Investigación Experimental:** obtiene datos de experimentación y los compara con la variable constante, con el fin de determinar causa- efecto de los fenómenos de estudio se utilizará programas como SCT, ANSYS o HFSS. Con la finalidad de diseñar un prototipo.

### **2.2.2 Recolección de la información**

Para lograr la recolección de información se emplearán libros, revistas, fuentes online y proyectos desarrollados, artículos científicos, así como guías prácticas y manuales de construcción por lo que las cuales permitirán el desarrollo del proyecto.

### **2.2.3 Procesamiento y análisis de datos**

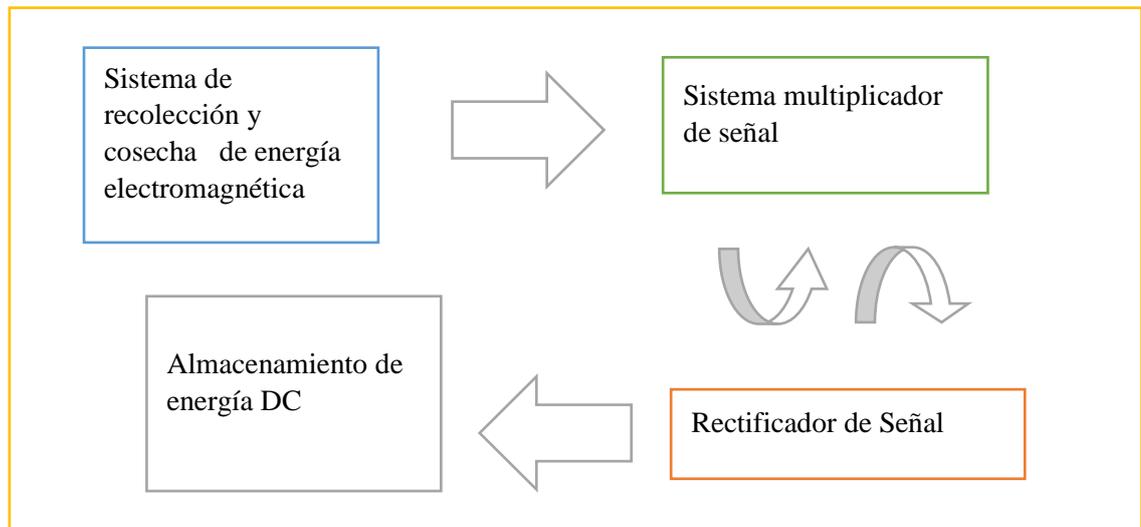
Para el procesamiento y análisis de datos se considera importantes las actividades descritas a continuación:

- Revisión de la información de las fuentes bibliográficas recolectadas.
- Análisis e interpretación correcta de información recolectada
- Identificación de distintas propuestas de solución con sistemas capaces de la recolección de energía electromagnética.
- Planteamiento de una propuesta de solución eficaz y acorde al problema planteado en la presente investigación.
- Análisis y comprobación de datos simulados vs datos medidos en el prototipo implementado.

### **2.2.4 Propuesta de solución**

Diseño de una rectenna basada en un arreglo de antenas tipo parche, la cual nos permita aprovechar energías dispersas existentes en las Ondas Electromagnéticas, en este caso el arreglo de antenas tiene su punto de resonancia a una frecuencia de 2.4 Ghz misma frecuencia que opera normalmente la mayoría de dispositivos en las comunicaciones

inalámbricas Wifi, de tal forma que la señal recibida sea rectificada para tener una señal de energía eficaz para proyectos de Energy Harvesting.



**Figura 12.** Diseño de Propuesta de Solución

Elaborado por el autor.

### 2.2.5 Desarrollo del proyecto

Para el desarrollo del siguiente proyecto se toma en consideración el siguiente orden descrito:

- Adquisición de información a través de revistas, artículos científicos tesis y de más fuentes bibliográficas, sobre temas relacionados a proyectos de Energy Harvesting (Cosecha de energía electromagnética).
- Selección de información importante y relevante de cada una de las fuentes consultadas y analizadas, siendo útiles para el desarrollo del sistema de captación de energía electromagnética a una frecuencia de 2.4 GHz misma en la que operan dispositivos Wifi por medio de una Rectenna y arreglos de antenas tipo parche.
- Procesamiento de información para un diseño óptimo de arreglos de antenas 2x2
- Modelado matemático del diseño de una matriz de antenas parche rectangulares, cálculo de dimensiones óptimas para el sistema a desarrollar.

- Diseño del tipo de alimentación, acoplamiento de impedancias y líneas de transmisión óptimo para cada una de las antenas de la matriz.
- Análisis y selección de software de microondas capaces de diseñar antenas en este caso antenas parche.
- Simulación de un arreglo de antenas tipo parche rectangulares de 2x2 para captación de energía de ondas electromagnéticas.
- Diseño de un circuito multiplicador y rectificador de onda completa para la salida de voltaje de nuestra Rectenna.
- Implementación del arreglo de antenas con el circuito rectificador
- Pruebas de funcionamiento del sistema de captación de energía electromagnética.
- Evaluación y comparación de los resultados obtenidos con propuestas de otros autores ya implementadas anteriormente
- Elaboración de una tabla de resultados donde se presenta resultados obtenidos en este proyecto con resultados de otros proyectos.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis y discusión de resultados

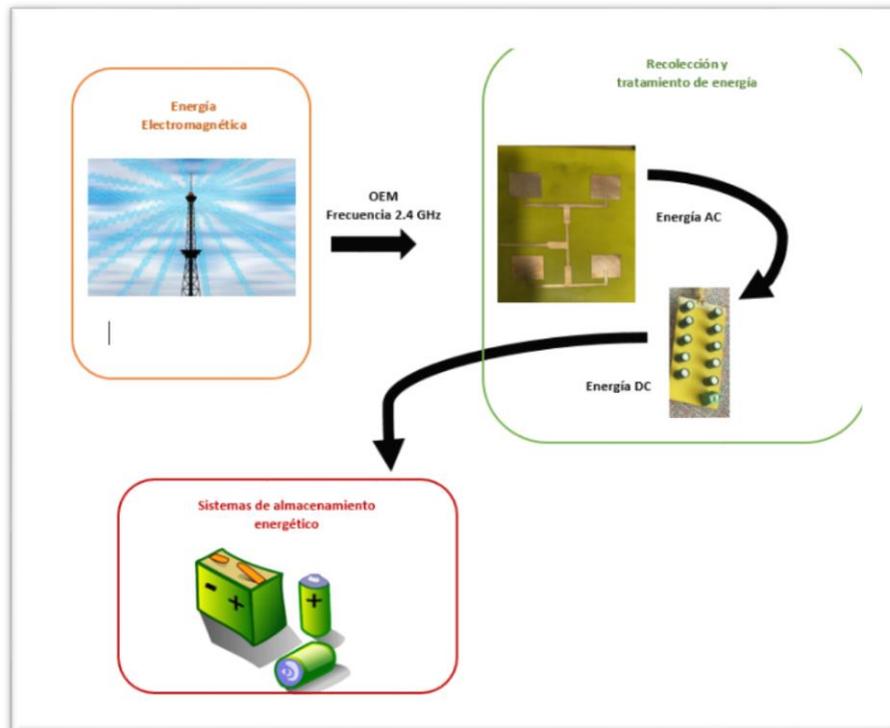
El diseño de una rectenna basada en arreglos de antenas de tipo parche para sistemas de recolección de energía electromagnética “Energy Harvesting”, presenta una ventaja sobre una antena parche singular y es que en la matriz de antenas podemos mejorar el ancho de banda, de tal forma que este proyecto permitió la recolección de energía electromagnética, presentes en las señales transmitidas en las comunicaciones inalámbricas que operan en la frecuencia de 2.4 Ghz como es el caso de las comunicaciones WiFi, así mediante un rectificador se logra convertir la señal de CA en una señal tipo DC, la cual puede ser de mucho beneficios a la sociedad debido a que existe una gran cantidad de aplicaciones para sistemas de este tipo como pueden ser para energizar sensores, carga de bancos de baterías, entre otras.

Se hizo el análisis de los resultados que se obtienen en la simulación en comparación con los resultados obtenidos y medidos en la implementación física del prototipo, teniendo como resultados valores reales que se asemejan casi exactamente a los resultados arrojados en la simulación permitiendo de esta manera que nuestro prototipo sea muy eficaz en las condiciones para la que fue diseñado, dicho de esta forma nuestra rectenna funciona en perfecta condiciones a frecuencias de 2.4 GHz, frecuencia en la cual miles de dispositivos en la actualidad trabajan ya que una de las señales más comunes y utilizadas en el mundo es la del WiFi, una señal presente en casi todos los lugares y a disponible a todo hora, entonces podemos decir que nuestro proyecto puede aprovechar esta disponibilidad y ser una fuente alternativa de energía, que puede ser cosechada en distintos sistemas de almacenamiento.

##### 3.1.1. Desarrollo de la propuesta de solución

Actualmente la mayoría de dispositivos ocupan energía DC obtenidas ya sean de baterías, o transformadores conectados directamente a la red eléctrica AC, lo cual

obliga a la dependencia casi en gran porcentaje a la energía eléctrica. El objetivo de este proyecto de es sustituir la fuente energética convencional por sistemas de antenas capaces de entregar energía útil para los dispositivos. Este proyecto investigativo de titulación es un pequeño aporte en la investigación de proyectos como “Energy Harvesting”, en la siguiente figura podemos ver el diseño esquemático de la propuesta planteada en esta investigación.

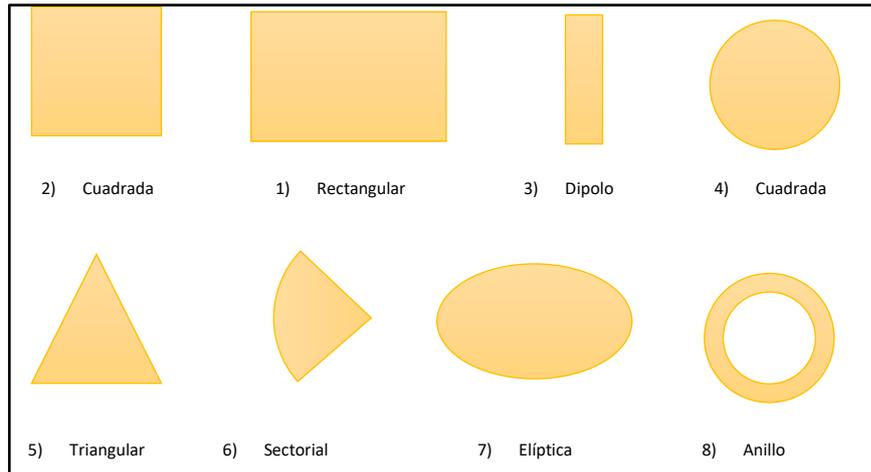


**Figura 13.** Diagrama de Propuesta de solución  
Elaborado por el investigador.

## 3.2. Diseño de prototipo

### 3.2.1. Selección de Geometría

Existe una gran variedad de geometrías para el diseño de antenas microstrip siendo los más comunes y utilizados en la construcción de estas antenas la geometría rectangular y circular.



**Figura 14.** Forma de la antena de prototipo, opción 1).

Elaborado por el autor

Para este proyecto se optó por el diseño de los parches rectangulares, esta decisión del tipo de geometría se tomó teniendo en cuenta cada una de las ventajas y desventajas que esta geometría presenta, como por ejemplo su mayor eficacia hasta del 99% dependiendo la aplicación en la que se esté usando, facilidad de integrar en superficies planas, bajo costo de fabricación.

### 3.2.2. Arreglos de antenas microstrip

La aplicación de antenas microstrip tenemos arreglos como matrices o individuales, Se escogió un arreglo de antenas tipo matriz 2x2 sobre una antena individual, pese a que esta presenta buenas características, debido a los requerimientos en la actualidad también aprovechando la factibilidad que existe para combinar antenas parche entre sí, y una de las principales razones es que pudimos obtener un mayor ancho de banda.

### 3.2.3. Métodos de alimentación

De los distintos tipos de alimentación se escogió una alimentación directa por una línea microstrip insertada al parche ya que podemos observar que la mayor radiación y efectividad de la antena se presentó en medio de la geometría del parche, de tal forma que se insertó la línea microstrip desde el punto medio del parche.

### 3.2.4. Cálculos de diseño de una antena tipo parche

Una vez listo los materiales y decidido la geometría de nuestra antena para nuestro prototipo procedimos a realizar los cálculos correspondientes a la antena de microcinta, en donde debíamos tener claros cada uno de los datos y características de nuestra placa, así como también las impedancias que tienen cada una de las líneas de transmisión e impedancia presente en nuestro parche para un adecuado acoplamiento de impedancias.

El arreglo de antenas se diseña para transmisión de señales a 2.4 GHz la cual será nuestra frecuencia de operación debido a que actualmente una de las ondas electromagnéticas de frecuencias más común y utilizada en la sociedad es el WiFi que opera en el rango de frecuencias 2.4 Ghz misma que esta presente en el ambiente.

En la siguiente tabla podemos observar la frecuencia de operación de las comunicaciones Wifi en sus diferentes protocolos destacando la frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz de tal forma que la frecuencia de operación para la presente investigación será de 2.4 GHz

**Tabla 6.** Protocolo de Wi-Fi IEEE 802.11

Protocolo	Frecuencia
802.11ax	2.4 – 5 GHZ
802.11ac wave2	5 GHz
802.11ac wave1	5 GHz
802.11n	2.4 - 5 GHz
802.11g	2.4 GHz
802.11a	5 GHz
802.11b	2.4 GHz
Tradicional 802.11	2.4 GHz

Elaborado por el autor

Para el cálculo de todos los parámetros necesarios tuvimos en cuenta que la antena se implementó en una baquelita FR4 la cual presenta características como 1.6 mm altura del sustrato, 4.4 permitividad relativa del sustrato, 0.02 tangente de pérdidas.

**Tabla 7.** Características del sustrato FR4.

Sustrato	Permitividad Dieléctrica	Tangente de pérdidas	Altura (mm)	Grosor del cobre
FR4	4.4	0.02	1.60	0.035

Elaborado por el autor

Para los cálculos tenemos una impedancia característica de  $50 \Omega$  característica común de en las líneas de transmisión.

**Datos:**

$$f_0 = 2.4 \text{ Ghz}$$

$$\epsilon_0 = 4.4$$

$$h = 1.6 \text{ mm}$$

$$Z_0 = 50 \Omega$$

**Donde:**

$f_0$  Frecuencia de Operación

$\epsilon_r$  Permitividad Relativa del Dieléctrico

$h$  Altura Dieléctrica

$Z_0$  Impedancia de línea

- Longitud de Onda en el vacío ( $\lambda_{vacio}$ )

$$\lambda_{vacio} = \frac{c}{f}$$

$$\lambda_{vacio} = \frac{3 * 10^8 \frac{m}{s}}{2.4 * 10^9 \text{ hz}}$$

$$\lambda_{vacio} = 0.125 \text{ m}$$

$$\lambda_{vacio} = 125 \text{ mm}$$

- Ancho del parche (W)

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}$$

$$W = \frac{3 * 10^8 \frac{m}{s}}{2(2.4 * 10^9 \text{ Hz}) \sqrt{\frac{4.4 + 1}{2}}}$$

$$W = 0.038036 \text{ m}$$

$$W = 38.036 \text{ mm}$$

- **Permitividad Efectiva ( $\epsilon_{eff}$ )**

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

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{1.6}{38.036} \right)}} \right)$$

$$\epsilon_{eff} = 4.086$$

- **Incremento ( $\Delta L$ )**

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

$$\Delta L = 0.412(1.6) \frac{(4.036 + 0.3) \left( \frac{38.036}{1.6} + 0.264 \right)}{(4.036 - 0.258) \left( \frac{30.036}{1.6} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.74 \text{ mm}$$

- **Longitud del parche (L)**

$$L = \frac{1}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L$$

$$L = \frac{3 * 10^{11} \frac{mm}{s}}{2(2.4 * 10^9 \text{ Hz}) \sqrt{4.086}} - 2(0.74 \text{ mm})$$

$$L = 29.44 \text{ mm}$$

- Ancho de la línea de transmisión ( $W_{Ltx}$ )

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

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

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.4 + 1}{2}} + \frac{4.4 - 1}{4.4 + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{4.4} \right)$$

$$A = 1.53$$

Entonces si  $\frac{w}{h} < 2$

$$\frac{W_{Ltx}}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}$$

$$\frac{W_{Ltx}}{h} = \frac{8e^{1.53}}{e^{2(1.53)} - 2}$$

$$\frac{W_{Ltx}}{h} = 1.9115$$

$$W_{Ltx} = 1.9115 * h$$

$$W_{Ltx} = 1.9115 * 1.6$$

$$W_{Ltx} = 3.058 \approx 3.06$$

- Insset ( $\Delta xi$ )

$$Z_{in} = Z_A \cos^2 \left( \frac{\pi \Delta xi}{L} \right)$$

$$\rightarrow Z_{in} = Z_0$$

$$\Delta xi = \frac{L}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{Z_{in}}{Z_A}} \text{ (rad)}$$

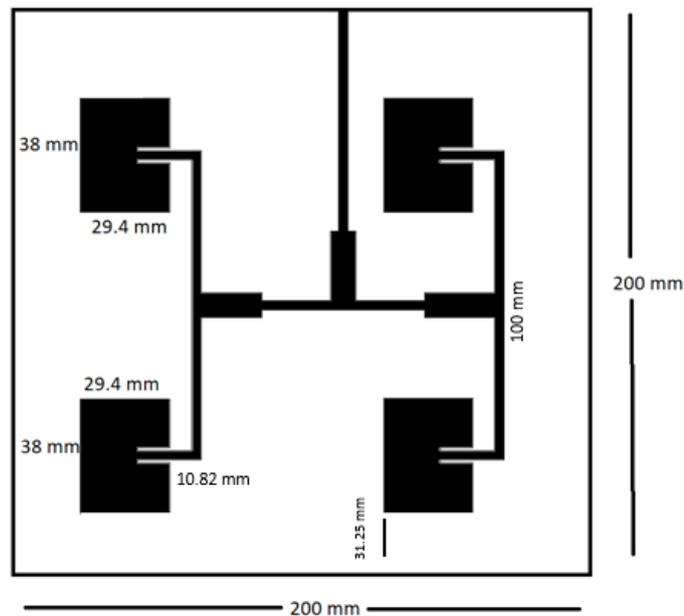
$$\Delta xi = \frac{29.44 \text{ mm}}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{50}{307}} \right) \quad \Delta xi = 10.82 \text{ mm}$$

**Tabla 8.** Resultados obtenidos de los cálculos realizados para la dimensión de los parches de la matriz de antenas.

Parámetros	Abreviatura	Valor	Unidad
Velocidad de la luz	$c$	$3 * 10^8$	$m/s$
Frecuencia de operación	$f_o$	2.4	$GHz$
Ancho Parche	$W$	38	$mm$
Longitud Parche	$L$	29.4	$mm$
Permitividad Efectiva	$E_{eff}$	4.086	
Inset	$\Delta xi$	10.82	$mm$

Elaborado por el investigador

Una vez realizados los cálculos correspondientes pudimos observar el diseño esperado para nuestro arreglo de antenas 2x2.



**Figura 15.** Arreglo de antenas 2x2 tipo parche.

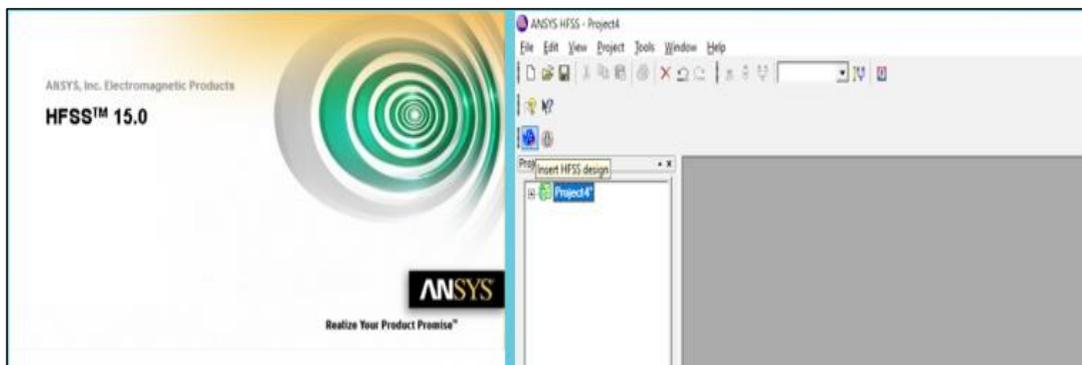
Elaborado por el investigador.

En la actualidad encontramos una gran variedad de software útiles para el diseño y simulación de los distintos tipos de antenas en este caso antenas microstrip, entre estos softwares podemos mencionar: Ansys HFSS, Zeland IE3D, CST Microwave Studio, Antenna Magus, entre otros.

Entro los softwares mencionados destacan dos por ser los más utilizados en el diseño de antenas, estos son Ansys HFSS y CST Microwave debido a las facilidades que presentan en el diseño de antenas, para el diseño, simulación y análisis de este proyecto utilizamos la versión de ANSYS la cual nos permite trabajar estructuras electromagnéticas, a su vez este presenta un mejor rendimiento ya que maneja el método de elementos finitos (FEM), de tal forma que se reduce el tiempo de ejecución así como también utiliza menor recursos de memoria del computador, otra de las características es que en este nosotros creamos nuestro ambiente de radiación.

Con los resultados de los parámetros calculados se precedió al diseño en el software Ansys HFSS 15.0, para ello creamos un nuevo proyecto y ambiente de simulación.

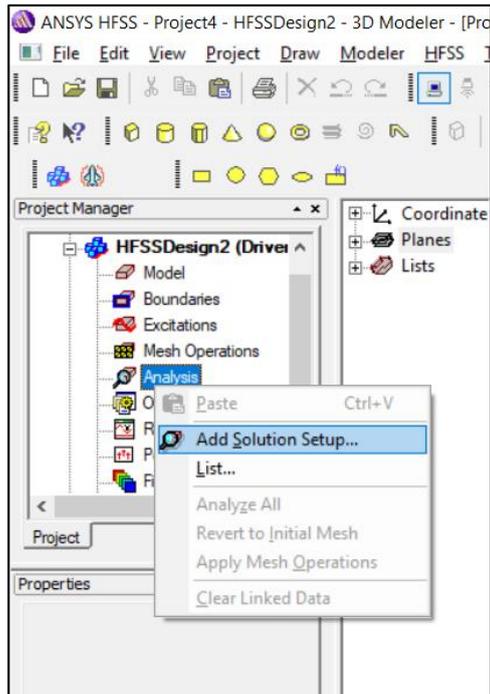
- De esta forma pudimos ver el ambiente de trabajo para la simulación de nuestra antena.



**Figura 16.** Creación de nuevo proyecto en Ansys HFSS.

Elaborado por el investigador.

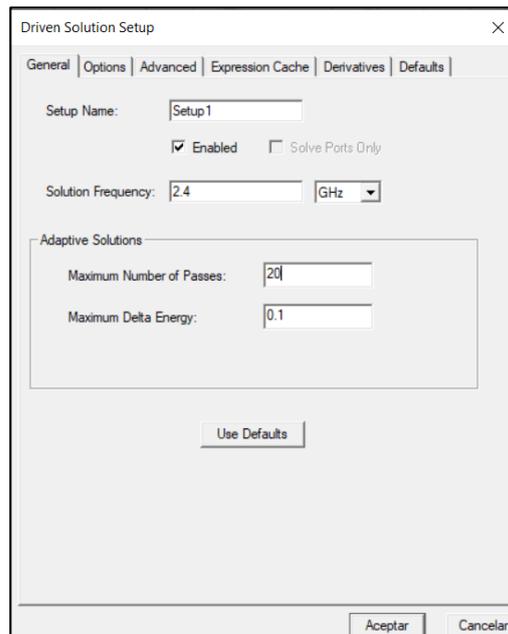
- En el menú de HFSS seleccionamos Analysis y seleccionamos Add Solutions Setup.



**Figura 17.** Menú de Ansys HFSS.

Elaborado por el investigador.

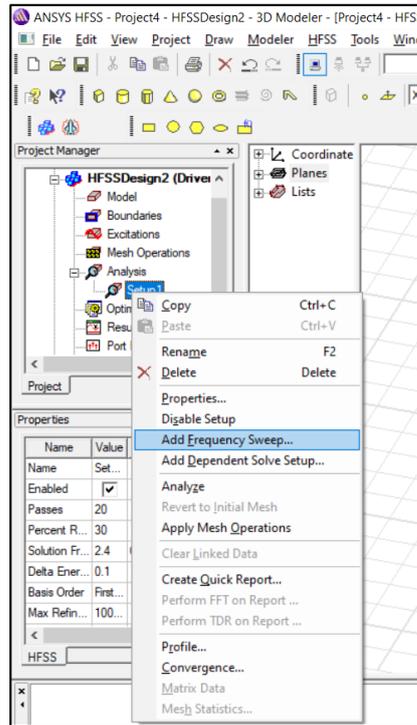
- Y en la ventana pusimos nuestra frecuencia de operación en ese caso fue de 2.4GHz.



**Figura 18.** Colocación de frecuencias en el programa.

Elaborado por el investigador.

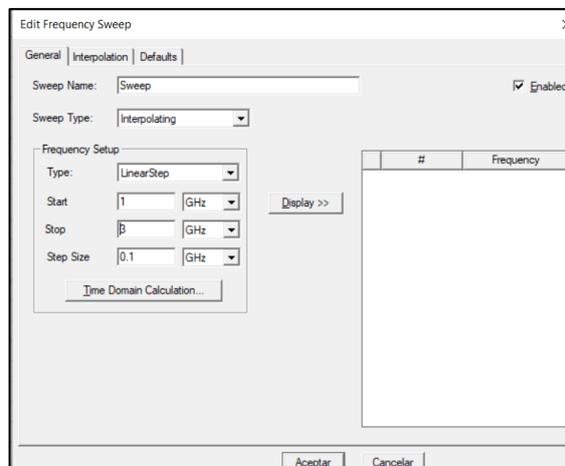
- Cuando se creó Setup 1, con clic derecho seleccionamos Add Frequency Sweep.



**Figura 19.** Selección de Add Frequency Sweep.

Elaborado por el investigador.

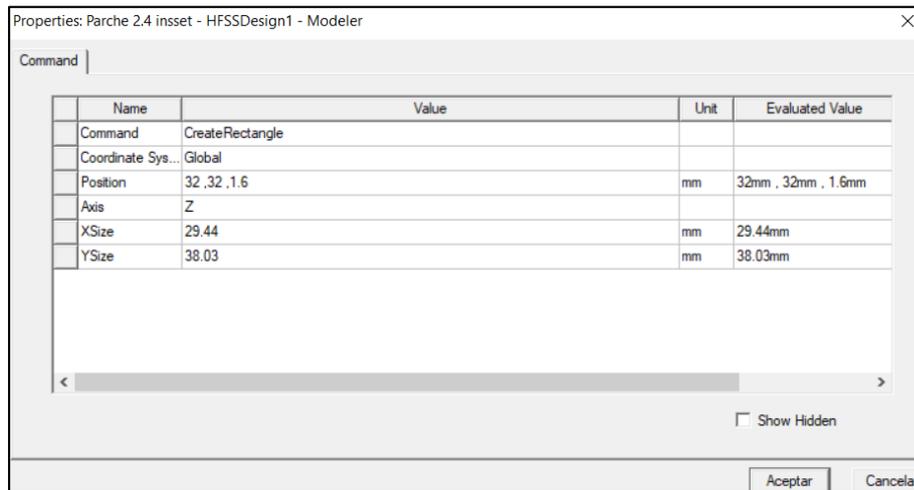
- En esta ventana se puso el valor de inicio y fin de la frecuencia para el análisis de la simulación.



**Figura 20.** Valor de inicio y fin de frecuencia.

Elaborado por el investigador.

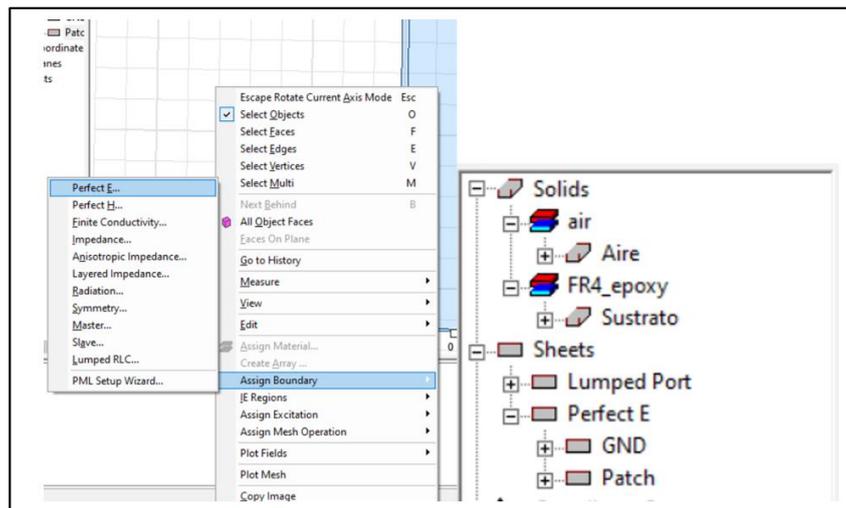
- Procedimos a la creación de cada uno de los objetos, ingresando los parámetros de diseño del objeto previamente calculados.



**Figura 21.** Parámetros de diseño.

Elaborado por el investigador.

- Seleccionamos tipo de material en la opción Assign Boundary y seleccionamos Perfect E la cual usamos para conductores este caso cobre.

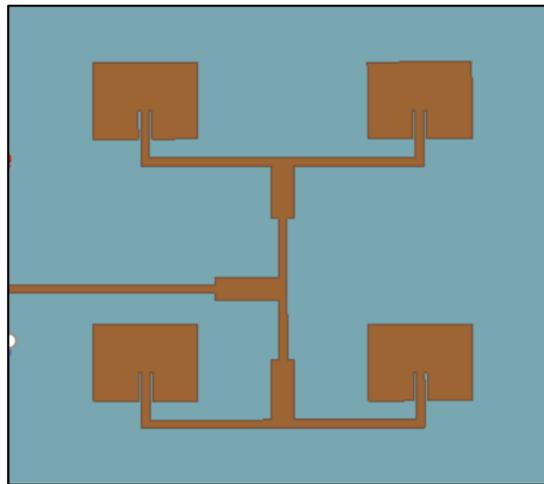


**Figura 22.** Selección de material para conductores (cobre).

Elaborado por el investigador.

A partir de este parche procedimos a crear la matriz de antenas en este caso de 2x2, para ello tomamos en cuenta las siguientes consideraciones:

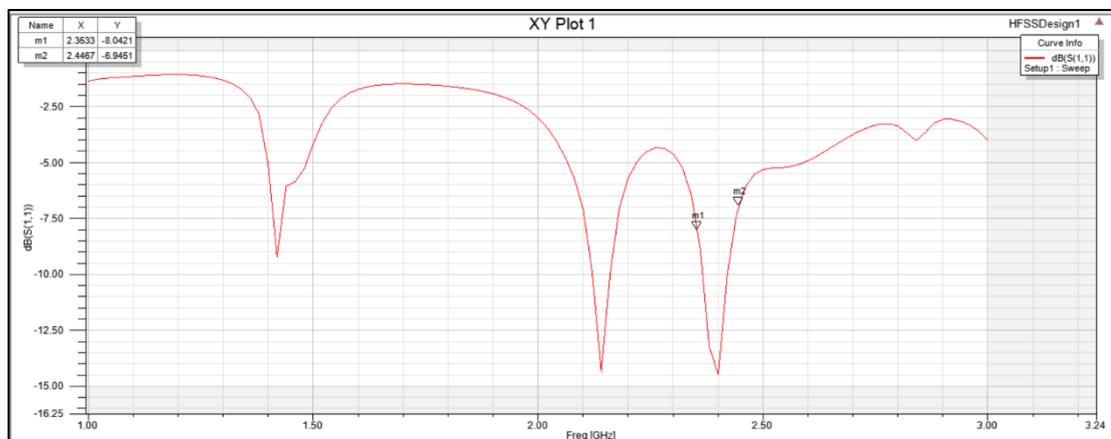
- La red de alimentación debe coincidir exactamente con cada uno de los elementos del parche
- Debe ser simétrica
- Cada elemento del parche debe recibir la señal al mismo tiempo es decir no debe existir ningún desfase
- La distancia entre parches no debe ser mayor a  $2\lambda$  se recomienda que sea  $0,8\lambda$



**Figura 23.** Arreglo de antenas 2x2 simulado en Ansys HFSS.

Elaborado por el investigador.

### 3.2.5. Resultado parámetro S11 (Coeficiente de Reflexión)



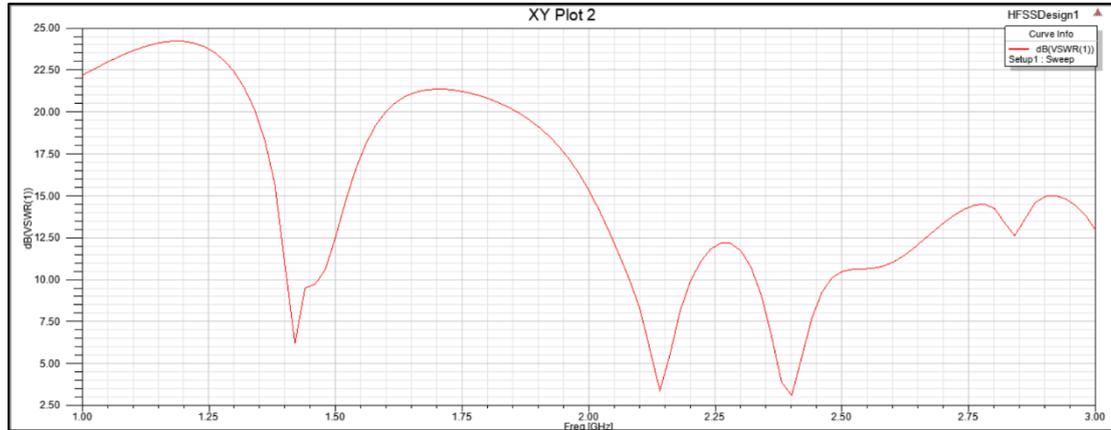
**Figura 24.** Parámetro S11 del arreglo de antena tipo parche.

Elaborado por el investigador.

En la figura 24 pudimos ver que el punto de resonancia de la matriz diseñada está en la frecuencia planteada de 2.4 GHz, con los marcadores que se puso en la gráfica de la

simulación pudimos determinar que tenemos un ancho de banda de 93 MHz y una ganancia de -16dB.

### 3.2.6 Resultado Relación de Onda Estacionaria (VSWR)

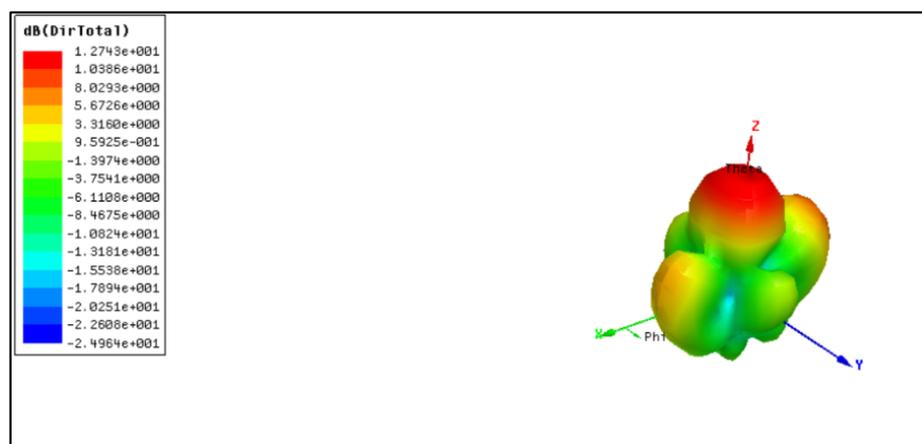


**Figura 25.** Parámetro VSWR del arreglo de antenas tipo parche.

Elaborado por el investigador.

En la figura 25 se pudo ver la relación entre las ondas estacionarias de voltaje transmitidas y reflejadas en frecuencia de radio (RF).

En la figura 26 se observó una vista en 3D del patrón de radiación de nuestra antena, se mostró también que a diferencia de una antena parche singular esta presenta un aumento en los lóbulos laterales de tal forma que el ancho de banda aumenta.



**Figura 26.** Vista en 3D de patrón de radiación de antenas tipo parche.

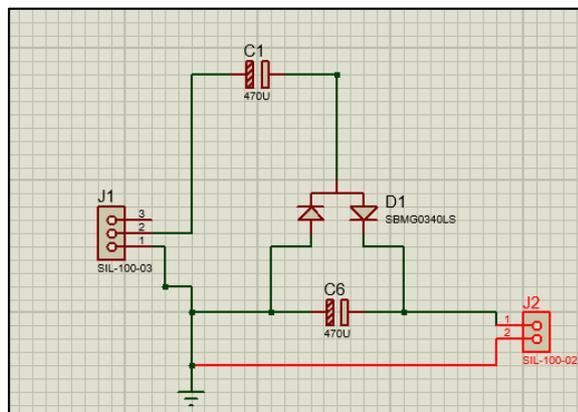
Elaborado por el investigador.

### 3.2.7 Diseño de rectificador de voltaje

Se procedió al diseño de un rectificador con el propósito de obtener un voltaje en corriente continua a la salida cumpliendo con los objetivos planteados, al mismo tiempo se realizó un multiplicador de voltaje por etapas en este caso consto de 5 etapas basado en el circuito de Villard. Las características del diodo utilizado en este proyecto se encuentran en el Anexo 1.

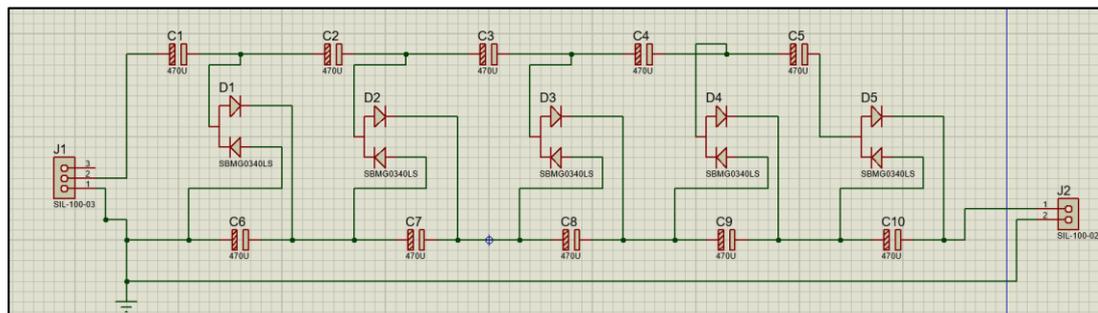
En la siguiente se muestra el circuito simulado en proteus para el cual hemos utilizado:

- Conector SMA macho
- 10 capacitores electrolíticos de 470uF 16 V.
- 5 diodos Schottky HSMS-286C de alta frecuencia
- 1 bornera de 2 pines



**Figura 27.** Circuito rectificador multiplicador de una etapa.

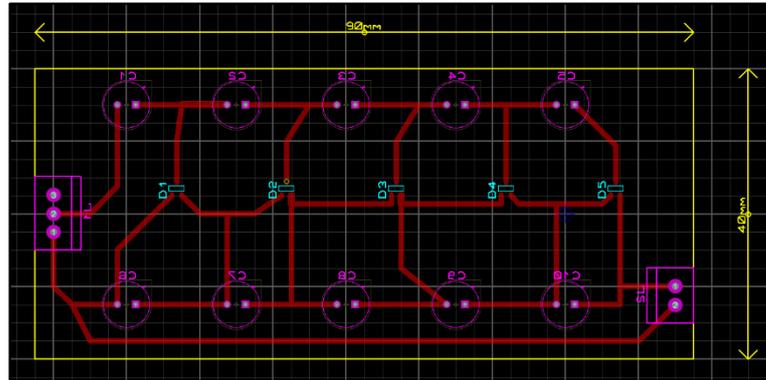
Elaborado por el investigador.



**Figura 28.** Circuito rectificador multiplicador de cinco etapas.

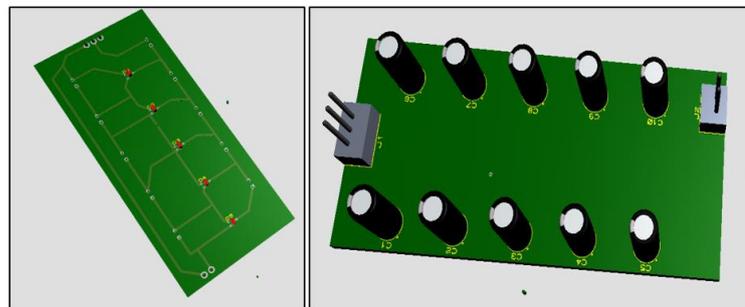
Elaborado por el investigador.

Una vez que se realizó la simulación se procedió a la implementación física para ello diseñamos un PBC para implementar en una baquelita en la figura 29 se muestra el diseño.



**Figura 29.** Diseño PBC del circuito.

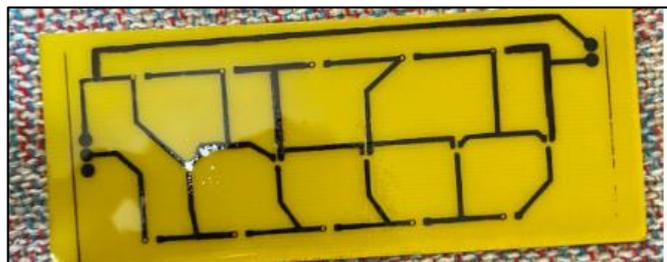
Elaborado por el investigador.



**Figura 30.** Vista simulada de PBC del circuito.

Elaborado por el investigador.

Con el diseño simulado se procede a pasar el circuito en una baquelita de cobre como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 31.** Circuito impreso en baquelita de cobre.

Elaborado por el investigador.

Luego de impresión de las pistas del circuito en la placa se soldaron los elementos electrónicos del mismo.



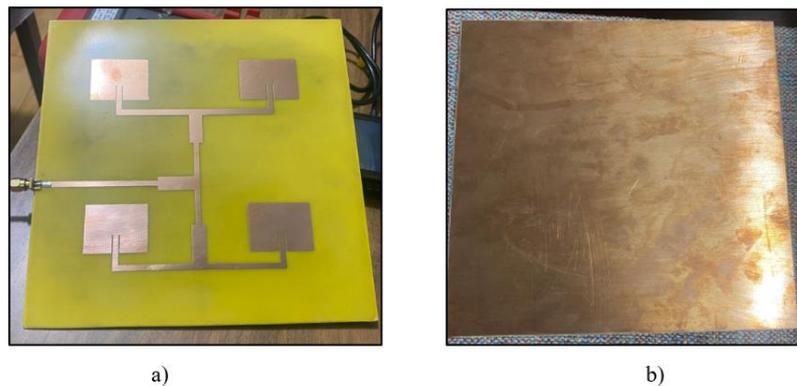
**Figura 32.** Rectificador multiplicador de Voltaje implementado.

Elaborado por el investigador.

### 3.3. Diseño y construcción del prototipo

#### a) Matriz 2x2 de antenas tipo parche.

Se muestra a continuación el arreglo de antenas 2x2 tipo parche diseñado e impreso en baquelita RF4.



**Figura 33.** Diseño de arreglo de antenas tipo parche en baquelita de cobre (a)

Arreglo 2x2 antena parche, (b) cara posterior GND.

Elaborado por el investigador.

El diseño del arreglo de antenas 2x2 tipo parche, la cual consta con dos estructuras una de tierra que se encuentra en la parte posterior y los parches los cuales están impresos la cara delantera del sustrato dieléctrico FR4. En el lado de los parches se soldó el conector SMA de 50 Ohms en la línea de transmisión, que se utilizó para conectar al circuito rectificador al cable coaxial para las pruebas del mismo.

### 3.4. Resultados rectenna basada en arreglo de antenas tipo parche

Para comprobar el funcionamiento y la eficacia de la matriz de antenas tipo parche diseñada se utilizó el dispositivo nanoVNA QT (Anexo 5 y 6) que es un analizador de espectro para antenas el cual dispone de una pantalla para observar resultados, así como también se puede conectar vía USB para tener una interfaz de pc y a su vez extraer los datos reflejados por el analizador, este dispositivo trabaja en el rango de frecuencias de 50 KHz a 3 GHz en el dispositivo podemos observar datos como:

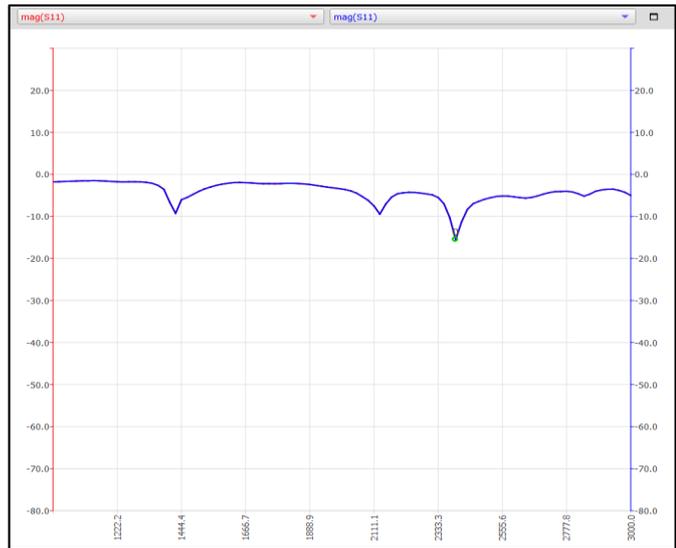
- Exportación de parámetros S (Coeficiente de reflexión)
- SWR ((Relación de Onda Estacionaria)
- TDR (Reflectometría en el dominio del tiempo)
- Presenta pérdidas de retorno ( $\geq 13$ dB (hasta 3GHz), 20dB (hasta 1,5 GHz))
- Los parámetros representados en la carta de SMITH

**Tabla 9.** Datos técnicos NanoVNA QT.

Parámetros	Valores
Frecuencias	50 KHz – 3 GHz
Impedancia (z)	(1-1000) $\Omega$
Potencia de salida	-6dBm a 500 MHz
Rango dinámico del sistema	70 dB a 1.5 GHz, 60dB hasta 3 Ghz
S11	-50dB a 1.5 GHz, -40dB hasta 3 GHz
Consumo de energía	Max 1A a 5v
Tasa de barrido	100 puntos/s
Perdida de retorno puerto (1.5 GHz)	20 dB
Perdida de retorno puerto (3 GHz)	13 dB min

Elaborado por el investigador.

Uno de los primeros parámetros que se analizó en nuestra matriz de antenas es el parámetro S11 en el cual se observó que opera en el rango de 2.3 a 2.5 GHz, y que a su vez tuvo en valores menores a -10 dB, teniendo un ancho de banda de 93 MHz asegurando que el rango de frecuencias de las comunicaciones Wifi inalámbricas quede cubierta, en la siguiente figura podemos demostrar estos valores.

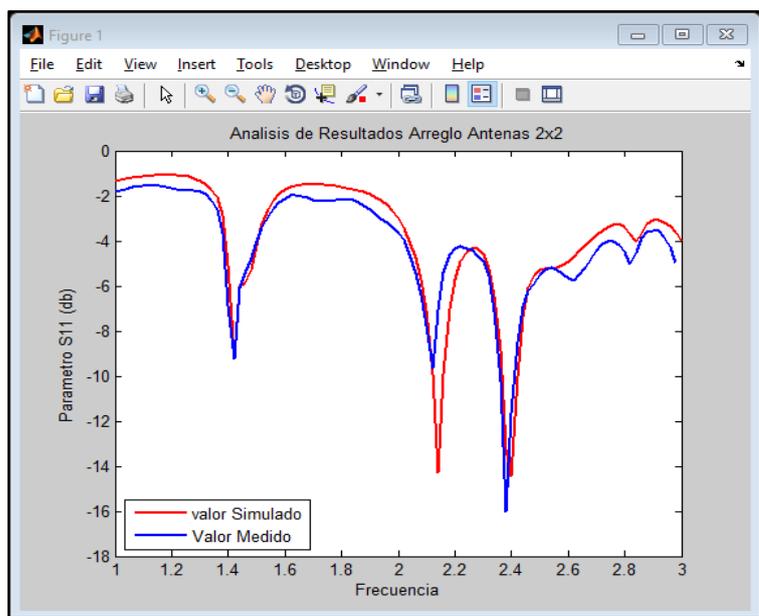


**Figura 34.** Parámetro S11 de la medido con el NanoVNA.

Elaborado por el investigador.

### 3.5. Caracterización

Se utilizó el software Matlab, una herramienta que nos permitió realizar una gráfica comparativa de los parámetros S11 simulados en HFSS 15.0 con los medidos con NanoVNA QT en la implementación.



**Figura 35.** Análisis parámetro S11 Simulado vs Implementado - Matlab.

Elaborado por el investigador.

### 3.6. Comparación de valores medidos y simulados.

**Tabla 10.** Resultados Simulados vs Medidos

	<b>Frecuencia resonancia</b>	<b>Ganancia</b>	<b>Ancho de Banda</b>
Simulación	2.4 GHz	-14.45 dB	100 MHz
Medido	2.38 GHz	-16.025 dB	110 MHz

Elaborado por el investigador.

#### 3.6.1. Análisis de la matriz de antenas 2x2 tipo parche

El parámetro simulado y el valor real medido de coeficiente de reflexión, estos valores obtenidos y al ser comparados mostraron que la matriz de antenas parche trabaja de una manera eficaz, con estos valores medidos y simulados podemos calcular el error existente entre la simulación y el valor real.

$$\%error = \frac{|V_{aprox} - V_{real}|}{V_{real}} * 100\%$$

$$\%error = \frac{|2.4 \text{ GHz} - 2.38 \text{ GHz}|}{2.38 \text{ GHz}} * 100\%$$

$$\%error = 0,0084 * 100\%$$

$$\%error = 0.84 \%$$

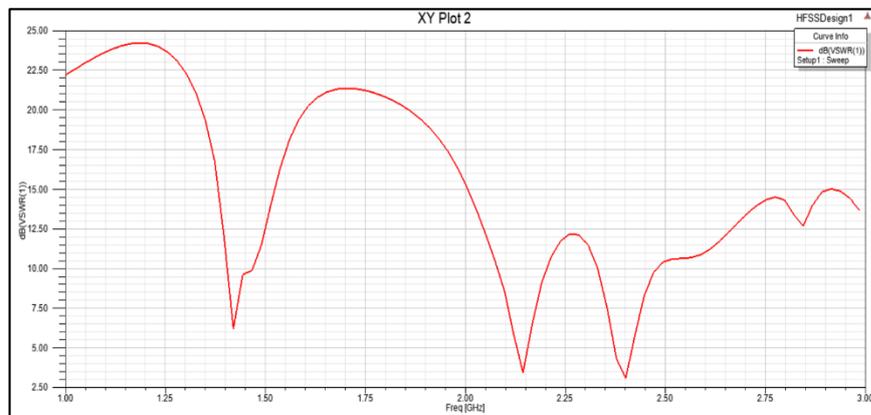
Luego que analizamos las comparaciones entre los valores medidos y simulados se pudo determinar que existe un error mínimo con respecto de la parte medida como la simulada correspondiente al 1%, un resultado muy optimo debido a q este debe ser menor al 5%. De tal manera que se probó que este proyecto funciona acorde a los requerimientos planteados.

#### 3.6.2. Parámetro SWR de la antena medido con el Nano VNA y parámetro Simulado.



**Figura 36.** Parámetro SWR de la antena medido con el NanoVNA.

Elaborado por el investigador.

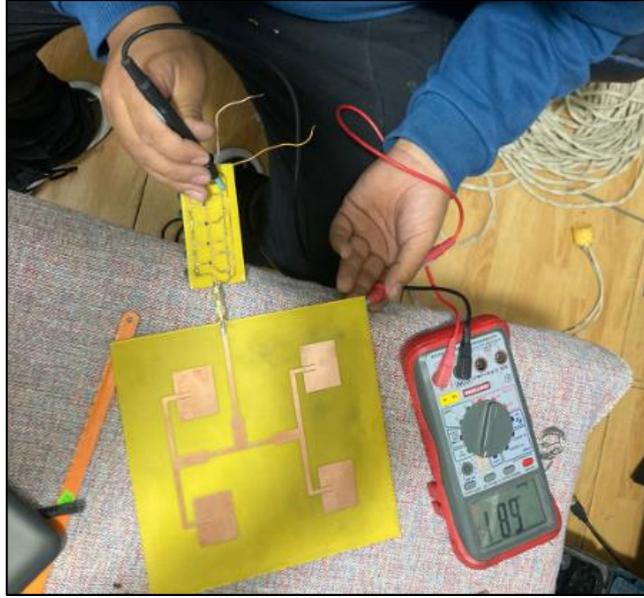


**Figura 37.** Parámetro SWR de la antena simulado en HFSS.

Elaborado por el investigador.

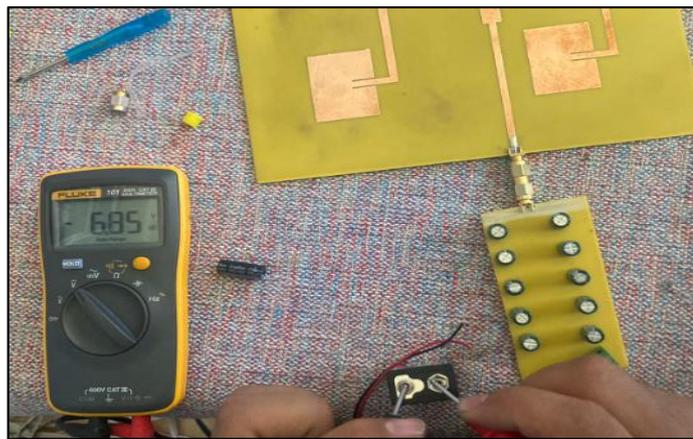
### 3.7. Implementación Rectenna basada en arreglos de antenas tipo parche

Para la implementación de la rectenna se hizo un acoplamiento del rectificador multiplicador de voltaje mostrado en la siguiente figura, en la cual también observaremos el montaje del circuito con el arreglo de antenas tipo parche, Se muestra también el valor de salida que se obtuvo en nuestra rectenna que fue de 680 mV. Valor que se midió cerca de un modem de internet obteniendo datos reales del sistema sin emplear un sistema de almacenamiento.



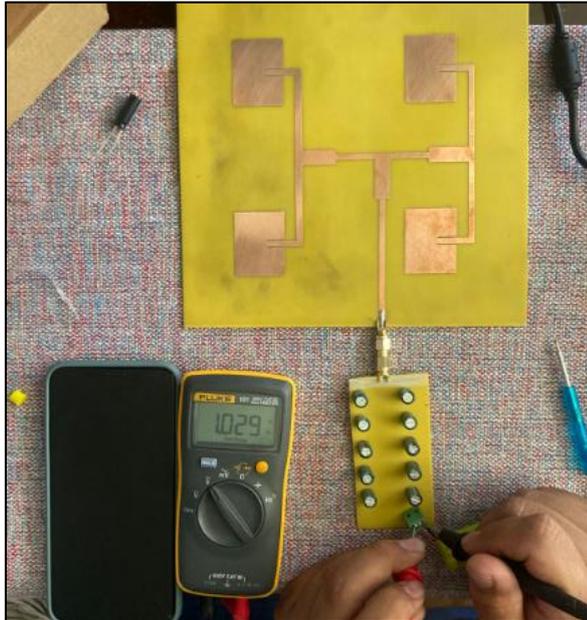
**Figura 38.** Salida de voltaje directa de rectenna.  
Elaborado por el investigador.

En la siguiente figura podemos observar el sistema de rectenna completo el cual fue conectado a un sistema de almacenamiento en ese caso una batería de 9V 300 mA



**Figura 39.** Salida de voltaje directa de rectenna conectada a batería 9V.  
Elaborado por el investigador.

En la siguiente figura podemos observar el sistema de rectenna completo conectado a un sistema de almacenamiento en ese caso una batería de 3.6V y 80mA.



**Figura 40.** Salida de voltaje directa de rectenna conectada a batería 3.6V.

Elaborado por el investigador.

Una vez implementada la rectenna es decir conectada nuestra matriz de antenas tipo parche al rectificador de voltaje, y a su vez conectada a los distintos sistemas de almacenamiento, realizamos mediciones en distintos rangos de tiempo a continuación mostramos en la figura los valores iniciales medidos en una batería de 3.6 V y una de 9 V.



a)

b)

**Figura 41.** Medición de voltaje: (a) Medición en batería de 3.6V, (b) Medición en batería de 9V.

Elaborado por el investigador.

### 3.7.1. Mediciones en cada una de las etapas del circuito rectificador multiplicador de voltaje

**Tabla 11.** Mediciones de voltaje en cada etapa del circuito rectificador.

# DE ETAPA	V (mV)
1° etapa	998
2° etapa	1733
3° etapa	2463
4° etapa	3239
5° etapa	4065

Elaborado por el investigador.

### 3.8. Pruebas de almacenamiento

Se realizaron pruebas de funcionamiento en dos tipos de ambiente, cerca de un modem de internet CNT y otra cerca un router Tp – Link de tres antenas, en las cuales se pudo observar el comportamiento en dispositivos que trabajan las mismas frecuencias, pero tienen diferentes potencias de transmisión, de tal forma que se pudo obtener datos reales del sistema sin un sistema de almacenamiento conectado. En la tabla se muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en cada ambiente.

**Tabla 12.** Prueba de voltaje sin almacenamiento.

Ambiente	Voltaje de Salida (mV)
Modem de Internet	694
Router de Internet	680

Elaborado por el investigador.

A continuación realizamos una prueba con sistemas de almacenamiento conectados a nuestra rectenna para ello utilizamos baterías de 9 y 3.6 V, Analizamos la cantidad de energía que se pudo almacenar en un rango de tiempo, para la cual se midió el valor

inicial de carga de las baterías y el voltaje final teniendo como voltaje de carga total la diferencia de estas mediciones, entonces para este proceso tomamos medidas en un rango de 30 min, una vez que realizamos dicho proceso se obtuvieron los siguientes resultados.

Para cada prueba de almacenamiento se determinó el voltaje de la batería (pila recargable de 9 V.) antes y después del proceso de recolección de energía.

**Tabla 13.** Almacenamiento con batería de 9V con rectenna de matriz de antenas tipo parche.

Tiempo de carga	Vo (mV)	Vf (mV)	V recibido (mV)
<b>0 min - 30 min</b>	6850	7100	250
<b>31 min - 60min</b>	7100	7290	190
<b>61 min - 90 min</b>	7290	7530	240
<b>Carga total (mV)</b>			680

Elaborado por el investigador.

Para cada prueba de almacenamiento se determinó el voltaje de la batería (pila recargable de 3,6V.) antes y después del proceso de recolección de energía.

**Tabla 14.** Almacenamiento con batería de 3,6V con rectenna de matriz de antenas tipo parche.

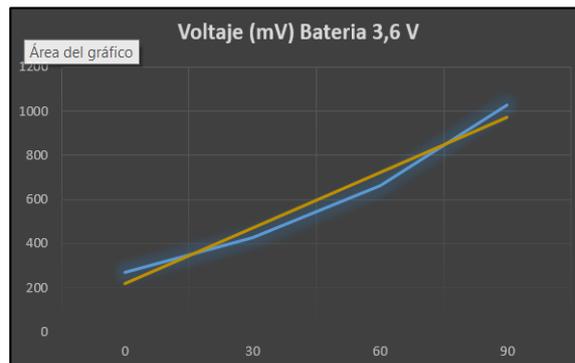
Tiempo de carga	Vo (mV)	Vf (mV)	V recibido (mV)
<b>0 min - 30 min</b>	270	429	159
<b>31 min - 60min</b>	429	661	232
<b>61 min - 90 min</b>	661	1028	367
<b>Carga total (mV)</b>			758

Elaborado por el investigador.

### 3.8.1. Tendencia de almacenamiento de rectenna de arreglo de antenas tipo parche.

En las siguientes figuras se muestra la tendencia en forma lineal de la carga que se obtuvo en cada una de las baterías, la línea de voltaje medido está representada de color azul mientras que la línea naranja muestra la tendencia de carga lineal de las baterías

#### a) Batería 3.6V

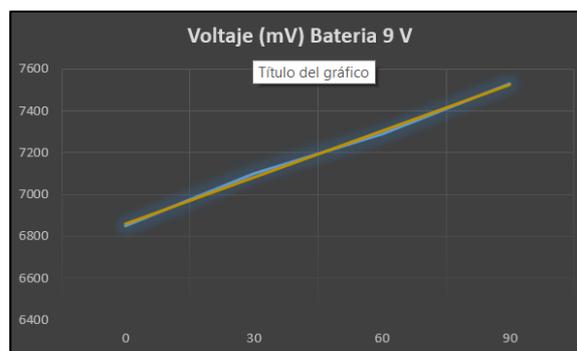


**Figura 42.** Voltaje almacenando en una batería de 3.6V.

Elaborado por el investigador.

La Figura muestra que el almacenamiento de la rectenna basada en arreglo de antenas tipo parche es de 758mV, las mediciones fueron realizadas en 0 min, 30 min, 60 min y 90 min respectivamente, la carga inicial fue de 270 mV, mientras que la carga final luego de 90 min fue de 1028 mV.

#### b) Batería 9V



**Figura 43.** Voltaje almacenado en una batería de 3.6V.

Elaborado por el investigador.

La Figura 43 muestra que el almacenamiento de la rectenna basada en arreglo de antenas tipo parche es de 680mV, las mediciones fueron realizadas en 0 min, 30 min, 60 min y 90 min respectivamente, la carga inicial fue de 6850 mV, mientras que la carga final luego de 90 min fue de 7530 mV.

### 3.9. Comparación de trabajos previos dentro de la UTA.

Para este proyecto usamos como referencia la investigación propuesta la Ing. Evelyn Freire [27], la cual diseña 2 antenas, una de estas antenas con características similares como es la antena log periódica que basa su funcionamiento en microcintas, otra referencia es el trabajo propuesto por el Ing. Dario Pillajo [28] el cual propone el diseño de una rectenna de una matriz de antenas logarítmica espirales, en este caso comparamos por tratarse del diseño de una matriz de antenas al igual que la presente investigación, finalmente tenemos como referencia el proyecto desarrollado por el Ing. Milto Valle [29] de este proyecto se tomó en cuenta la antena diseñada en su proyecto la cual trata de una antena tipo parche con ranuras, se comparó los resultados obtenidos en un ambiente similar y en los mismos sistemas de almacenamiento de energía.

**Tabla 15.** Comparativa de trabajos realizados anteriormente en la UTA para baterías de 3.6V

<b>Batería 3,6</b>		
<b>Tipo Antena</b>	<b>Autor</b>	<b>Voltaje Almacenado (mV)</b>
Matriz de rectenna	Ing. Darío Pillajo	73
Antena Parche con ranuras	Ing. Milton Valle	40
Rectenna de Arreglo 2x2 parche	Investigador	758

Elaborado por el investigador.

**Tabla 16.** Comparativa de trabajos realizados anteriormente en la UTA para baterías de 9V.

<b>Batería 9V</b>		
<b>Tipo Antena</b>	<b>Autor</b>	<b>Voltaje Almacenado (mV)</b>
Matriz de rectenna	Ing. Dario Pillajo	74
Antena Logarítmica Periódica	Ing. Evelyn Freire	37

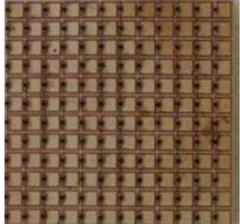
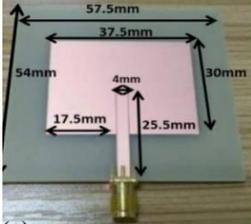
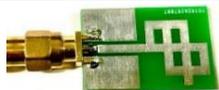
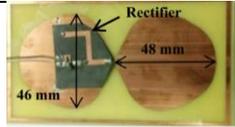
Antena Parche con ranuras	Ing. Milton Valle	140
Rectena de Arreglo 2x2 parche	Investigador	680

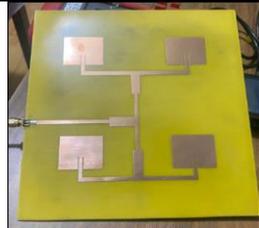
Elaborado por el investigador.

### 3.10. Comparación entre rectenna propuesta con investigaciones sobre rectennas

Finalmente, presentamos una comparación entre diferentes investigaciones sobre rectennas y la rectenna propuesta en este documento, en la cual pudimos comparar parámetros como son frecuencia de operación, Ganancia, Ancho de Banda, y su estructura.

**Tabla 17** Comparativa entre rectenna propuesta con investigaciones sobre rectennas.

Nº	Estructura	Frecuencia	Ganancia	WB	Imagen	Fuente
1	Parche cuadrado con ranuras	4 – 8 (Ghz)	-12 (dB)	170 (MHz)		[30]
2	Parche Rectangular	2.40 (Ghz)	-30 (dB)	25 (MHz)		[31]
3	Parche Rectangular con Ranura	2.45 (Ghz)	-30 (dB)	150 (MHz)		[32]
4	Mono polo con Anillos	2.45 – 2.6 (Ghz)	-35 (dB)	9 – 180 (MHz)		[33]
5	Lazo	0.9 - 1 (Ghz)	-35 (dB)	200 (MHz)		[34]

6	Array Antenas tipo Parche	2.4 (Ghz)	-25 (dB)	900 (MHz)	
---	---------------------------------	-----------	----------	--------------	---

Elaborado por el investigador.

### 3.11. Presupuesto

Una de las partes que consideramos en este tipo de prototipos es el valor económico que cada uno de los elementos empleados en el trabajo tienen, pues si bien es cierto las partes con las que se trabajó no son muy voluminosas, es más el poder conseguir dentro de las tiendas comerciales del país, pues alguno de los elementos que se usó fueron importados, valor que está considerado en la siguiente tabla 7.

**Tabla 18.** Presupuesto de elementos de fabricación para matriz de rectenna 2x2 basa en antenas tipo parche.

Ítem	Descripción	Unidad	Cant.	Valor Unitario \$	Valor Final \$
1	Impresión en la hoja y verificar medidas	c/u	3	0,10	0,30
2	Placa de fibra de vidrio con doble plano conductor (190 x 210) mm	c/u	1	9	9
3	Impresión digital en la placa	c/u	2	1	2
4	Acido cloruro férrico	c/u	2	0,50	1
5	Ácido clorhídrico	c/u	1	1	1
	Fabricación de la matriz de antenas en RF-4	c/u	1	36	36
6	Alambre de estaño de un milímetro de grosor	m	1	0,60	0,60
7	Pasta para soldar cobre	c/u	1	2	2
8	Thinner	lt	1	3	3
9	Capacitor de 0.01uF-16V	c/u	20	0,70	1,40
10	Diodo Schottky	c/u	10	1	10
	Bornera	c/u	3	1,00	3,00
	Batería recargable de 9V	c/u	1	11,00	11,00
	Batería recargable de 3.6V	c/u	1	6,00	6,00

	Broche de batería	c/u	2	0.60	1,20
	Conector SMA macho	c/u	2	4,00	8,00
	Conector SMA hembra	c/u	2	4,00	8,00
	Conector SMA macho-hembra	c/u	2	4,00	8,00
	Kit de equipamiento electrónico	c/u	1	30,00	30,00
	Kit de herramientas de precisión	c/u	1	30,00	30,00
Subtotal					171.5
Imprevistos 15%					25.73
<b>Total</b>					<b>197.23</b>

Elaborado por el investigador.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- Los sistemas de recolección de energía electromagnética, son sistemas que están en varios tipos de aplicaciones, y que pueden operar y ser funcionales en distintas frecuencias, es decir pueden captar diferentes señales electromagnéticas, siendo de esta manera un factor muy importante el diseño de nuestro sistema para que este trabaje en condiciones óptimas a la frecuencia de 2.4 que es la establecida en esta investigación, de tal forma pudimos obtener un ancho de banda que cubra dicha frecuencia y a su vez tenga una ganancia adecuada para su funcionalidad.
- En el presente trabajo investigativo se determinó que el diseño de un arreglo de antenas tipo parche mejora considerablemente el ancho de banda y la ganancia en comparación con una sola antena tipo parche, pero a su vez presenta menor directividad que una sola antena, lo cual no afecta en la elaboración de este proyecto puesto que nosotros debemos captar la mayor cantidad de señales electromagnéticas dispersas en el medio mas no se desea transmitir o recibir señales en una sola dirección, entonces el aumento de lóbulos laterales no resulta perjudicial sino más bien de gran utilidad para el sistema de captación de energía electromagnética.
- Se implementó una rectenna la cual está basado en el diseño de un arreglo de antenas tipo parche, este arreglo es una matriz de 2x2 diseñada para que opere a una frecuencia de 2.4 GHz, dicha rectenna consta de elementos adecuados para su funcionamiento a altas frecuencias, uno de estos elementos son los diodos schottky, de esta forma la implementación del prototipo es eficaz en los sistemas de recolección de energía electromagnética.
- Se pudo diferenciar los valores reales medidos en el sistema implementado, con los valores simulados teniendo como resultado valores muy semejantes, tanto en los parámetros S11, SWR, ganancia del sistema en db, entre los más

importantes, en las pruebas de carga en los distintos sistemas de almacenamiento se tuvo valores de carga muy aceptables y mejorados en comparación a investigaciones previas de otros autores.

- Considerando la prueba realizada en dos tipos de ambientes, uno con la presencia de un router, y otro en una sala con un modem de internet, la rectenna presento mejores condiciones con la presencia del modem de internet en la cual se obtuvo una medición de voltaje de 694 mV a diferencia del espacio con router que fue de 680mV, aunque la diferencia no es tan abismal esto se debe a la potencia radiada por cada uno de los dispositivos.
- La carga de los dos sistemas de almacenamiento utilizados en esta investigación en este caso una batería de 9V y otra de 3.6V presentan una carga de manera exponencial, sea en cualquiera de los dos ambientes en los cuales se realizaron las mediciones correspondientes, teniendo como resultado una carga de 680 mV para la batería de 9V, y una carga de 758 mV para la batería de 3.6 V, en un tiempo total de 90 minutos de carga.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Para futuras investigaciones similares a la propuesta presentada, se aconseja realizar un diseño que opere a distintas frecuencias, las cuales se presentan con mayor impacto en las nuevas tecnologías que opera en 5G, de tal forma que se puede optimizar el dispositivo a su vez que mejora su captación, así maximiza el aprovechamiento de las señales presentes en las nuevas generaciones de las comunicaciones.
- La eficiencia de captación de energía puede mejorar en gran parte empleando un substrato dieléctrico de mejor calidad como PTFE; ya que este no presenta resistencia y es utilizado para altas velocidades y altas frecuencias, de tal manera que se reduzcan las pérdidas existentes, el estudio de otras formas de alimentación en las antenas pueden presentar grandes ventajas tanto en la facilidad de diseño como en la eficiencia del mismo.

- Reforzar el funcionamiento del circuito rectificador con la ayuda de amplificadores de voltaje y amplificadores de corriente, de tal forma que la energía receptada pueda aprovecharse al máximo en los sistemas de almacenamiento reduciendo pérdidas de energía, a su vez que esta carga pueda realizarse en menor tiempo.
- Acoplar sistemas para captación de energía electromagnética, con otros sistemas de captación energética como puede energía solar mediante el uso de paneles solares, de esta forma se obtendrá una mayor cantidad de voltaje recolectado, dando como resultado sistemas de carga inalámbrica mucho más potentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. S. E. S. James Benford, «Rectennas,» de *High Power Microwaves*, Taylor & Francis Group, 2015, pp. 64-66.
- [2] C. Jinez, «Sistema electrónico para recarga eléctrica en teléfonos celulares,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2016.
- [3] C. A. R. Guerrero, «Sistema de recolección de energía (Energy Harvesting), que emplea la corriente Corona y señales de alta frecuencia.,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2016.
- [4] J. L. G. T. & P. S. G. George Goussetis, «Diseño de una "rectenna" en la banda WiFi de 2.45GHz para aplicaciones de captación de energía electromagnética,» Universidad Politécnica de Cartagena, 2015.
- [5] A. P. Poyatos, «Diseño de un sistema de captación de energía de señales WiFi,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid , 2019.
- [6] O. N. K. NALLELY, «Diseño, modelado y caracterización de arreglo de Antenas Microstrip para aplicaciones del Internet de las Cosas.,» Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Puebla, 2019.
- [7] C. B. & B. DAVID, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RECTENNA PARA COSECHAR ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA A 2.4 GHz,» UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA , BOGOTÁ, 2020.
- [8] V. Milton, «SISTEMA DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON SISTEMAS DE RECTENNAS Y CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA DISPOSITIVOS INALÁMBRICOS IOT DE BAJA POTENCIA.,» Universidad Técnica de Ambato , Ambato, 2022.
- [9] K. P. y C. Phongcharoenpanich, Design of Planar Dipole Array Antenna Above Square Reflector for Energy Harvesting at 2.4 GHz Band, *Advanced Computer and Communication Engineering Technology*, 2015.

- [10] E. P. J. G. P. C. A. X. F. P. P. ... .. A. N. Donchev, El dispositivo rectenna: de la teoría a la práctica (una revisión), Cambridge, 2014.
- [11] A. Douyere, «Experimental study of rectenna coupling at low power level,» Université de La Réunion, Francia , 2015.
- [12] R. v. d. Meulen, «Gartner,» 7 febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-02-07-gartner-says-8-billion-connected-things-will-be-in-use-in-2017-up-31-percent-from-2016>. [Último acceso: 24 julio 2023].
- [13] A. Y. -. L. C. P. -. F. C. L. -. M. H. -. V. Snyder, «Energía para el Futuro,» 24 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://hubenergia.org/index.php/es/indicadores/acceso-al-servicio-de-electricidad>. [Último acceso: 24 Julio 2023].
- [14] W. David, Electromagnetic compatibility: methods, analysis, circuits, and measurement., Crc Press, 2016.
- [15] G. George, Diseño de una "rectenna" en la banda WiFi de 2.45GHz para aplicaciones de captación de energía electromagnética, 2015.
- [16] C. A. Balanis, Antenna Theory - Analysis and desing, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [17] P. B. I. B. y. A. I. Ramesh Garg, Microstrip Antenna Design Handbook, Boston: Artech House.
- [18] N. G. a. C. G. A. Kumar, Gain and Bandwidth Enhancement Techniques in Microstrip Patch Antennas-A Review, International Journal of Computer Applications, 2016.
- [19] C. P. Vega, Antenas con reflector parabólico, Cantabria : Universidad de Cantabria, 2008.
- [20] A. P. J Anguera, Teoría de antenas, Barcelona: Universidad Ramón Llull, 2008.

- [21] D. Irwin, *Análisis Básicos de circuitos en Ingeniería*, Mexico: Limusa Wiley, 2003.
- [22] J. L. Ordoñez, *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*, Madrid : Centro Español de Derechos Reprográficos, 2017.
- [23] J. Luque, *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*, Autores Científico - Técnico y Académico, 2018.
- [24] A. F. Ramos, *Energy Harvesting: Una técnica para generar energía*, Madrid: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID, 2017.
- [25] S. Jouhnas, «The Guardian, Guardian News & Media Limited or its affiliated companies,» 16 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://www.theguardian.com/media-network/2015/jun/04/energy-harvesting-future-mobile-charging..> [Último acceso: 27 Julio 2023].
- [26] J. S. G. S. & M. G. Z. Zixu, *Graphene geometric diodes for terahertz rectennas*, Iopscience, 2013.
- [27] I. E. Freire, «ANTENAS LOGARÍTMICAS PARA APLICACIONES DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA,» Universidad Tecnica de Ambato, Ambato, 2021.
- [28] I. D. Pillajo, «SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA DE RF BASADO EN MATRIZ DE,» Universidad Tecnica de Ambato, Ambato, 2022.
- [29] I. M. Valle, «ISTEMA DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON SISTEMAS DE RECTENAS Y CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA DISPOSITIVOS INALAMBRICOS IOT DE BAJA POTENCIA,» Universidad Tecnica de Ambato, Ambato, 2022.
- [30] T. Almoneef y O. M. Ramahi, «Split-Ring Resonator Arrays for Electromagnetic Energy Harvesting,» *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 62.
- [31] K. Shafique, «Energy Harvesting Using a Low-Cost Rectenna for Internet of Things (IoT) Applications,» vol. VI, 2018.

- [32] A. Qasim, J. Yang, T. C. Hassan, J. Mohsin, Q. He y K. Bilal, «A compact rectenna system with high conversion efficiency for wireless energy harvesting,» *IEEE Access*, p. 2, 2017.
- [33] A. Benayad y M. Tellache, «A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary split ring resonator antenna and modified hybrid junction ring rectifier,» *International Journal of RF and Microwave Computer - AIDED Engineering*, 2019.
- [34] A. Okba, A. Takacs y H. Aubert, «Compact Rectennas for Ultra-Low-Power Wireless Transmission Applications,» *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*.
- [35] T. Almoneef y O. M. Ramahi, «A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary Split-Ring Resonator Arrays for Electromagnetic Energy Harvesting,» *International Journal of RF and Microwave Computer and Engineering*, p. 26, 2019.

# ANEXOS

## ANEXO 1: DATASHEET DIODO SCHOTTKY HSMS286

### HSMS-286x Series Surface Mount Microwave Schottky Detector Diodes



### Data Sheet

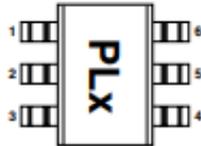


#### Description

Avago'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. Avago'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.

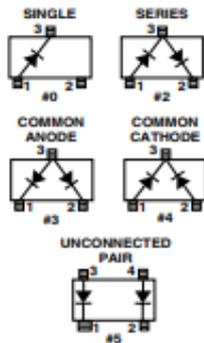
#### Pin Connections and Package Marking



#### Notes:

1. Package marking provides orientation and identification.
2. The first two characters are the package marking code. The third character is the date code.

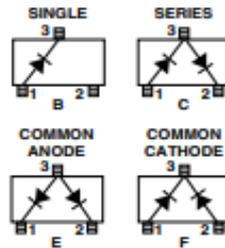
#### SOT-23 /SOT-143 Package Lead Code Identification (top view)



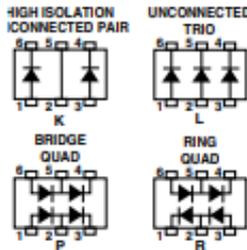
#### Features

- 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
- Lead-free
- \* For more information see the Surface Mount Schottky Reliability Data Sheet.

#### SOT-323 Package Lead Code Identification (top view)



#### SOT-363 Package Lead Code Identification (top view)



SOT-23/SOT-143 DC Electrical Specifications,  $T_C = +25^\circ\text{C}$ , Single Diode

Part Number HSMS-	Package Marking Code	Lead Code	Configuration	Forward Voltage $V_f$ (mV)		Typical Capacitance $C_T$ (pF)
2860	T0	0	Single	250 Min.	350 Max.	0.30
2862	T2	2	Series Pair <sup>(1,2)</sup>			
2863	T3	3	Common Anode <sup>(1,2)</sup>			
2864	T4	4	Common Cathode <sup>(1,2)</sup>			
2865	T5	5	Unconnected Pair <sup>(1,2)</sup>			
Test Conditions				$I_f = 1.0 \text{ mA}$		$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$

Notes:

1.  $\Delta V_f$  for diodes in pairs is 15.0 mV maximum at 1.0 mA.
2.  $\Delta C_T$  for diodes in pairs is 0.05 pF maximum at -0.5V.

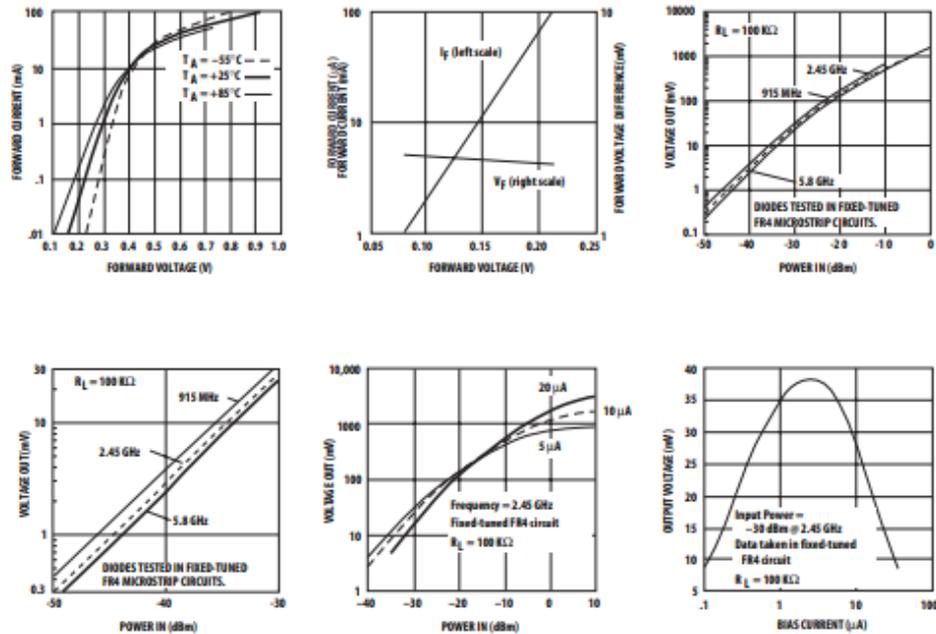
SOT-323/SOT-363 DC Electrical Specifications,  $T_C = +25^\circ\text{C}$ , Single Diode

Part Number HSMS-	Package Marking Code	Lead Code	Configuration	Forward Voltage $V_f$ (mV)		Typical Capacitance $C_T$ (pF)
286B	T0	B	Single	250 Min.	350 Max.	0.25
286C	T2	C	Series Pair <sup>(1,2)</sup>			
286E	T3	E	Common Anode <sup>(1,2)</sup>			
286F	T4	F	Common Cathode <sup>(1,2)</sup>			
286K	TK	K	High Isolation Unconnected Pair			
286L	TL	L	Unconnected Trio			
286P	TP	P	Bridge Quad			
286R	ZZ	R	Ring Quad			
Test Conditions				$I_f = 1.0 \text{ mA}$		$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$

Notes:

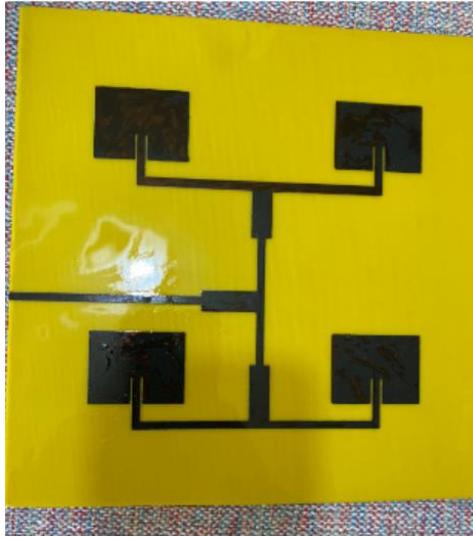
1.  $\Delta V_f$  for diodes in pairs is 15.0 mV maximum at 1.0 mA.
2.  $\Delta C_T$  for diodes in pairs is 0.05 pF maximum at -0.5V.

Typical Parameters, Single Diode

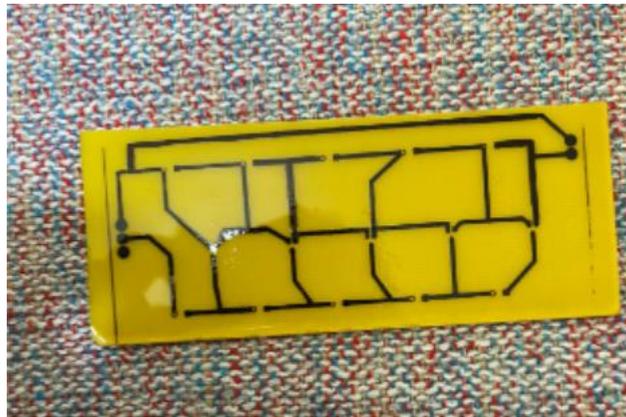


**ANEXOS 2: FABRICACIÓN: ARREGLO DE ANTENA Y RECTIFICADOR**

*ARREGLO DE ANTENA*

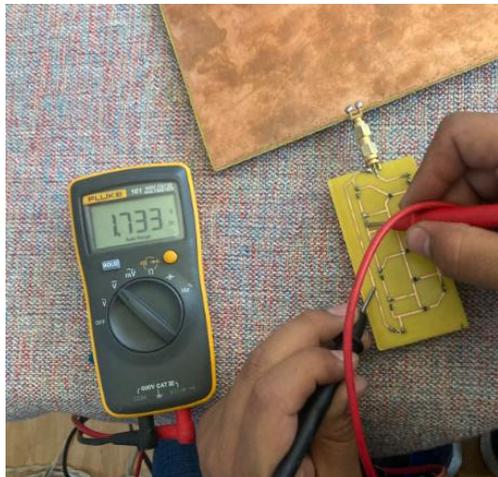


*RECTIFICADOR*

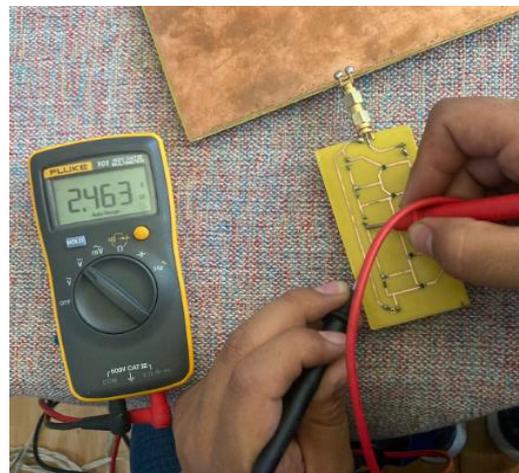


**ANEXO 3: FOTOGRAFÍAS MEDICIONES EN CADA UNA DE LAS ETAPAS DEL CIRCUITO RECTIFICADOR MULTIPLICADOR DE VOLTAJE.**

• **1<sup>RA</sup> Etapa**



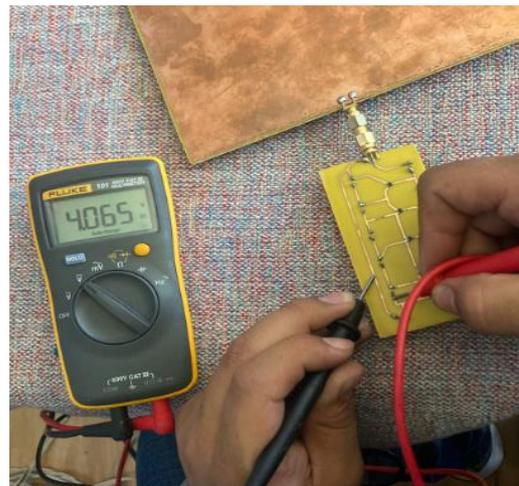
• **2<sup>DA</sup> Etapa**



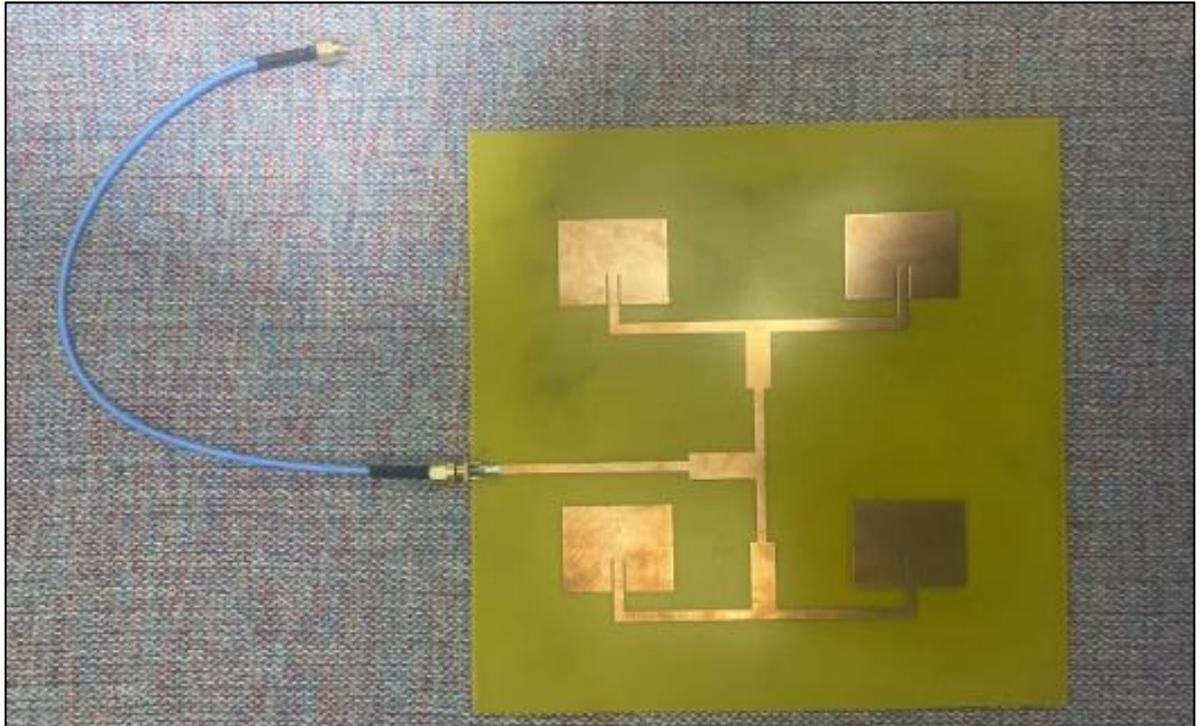
• **3<sup>RA</sup> Etapa**



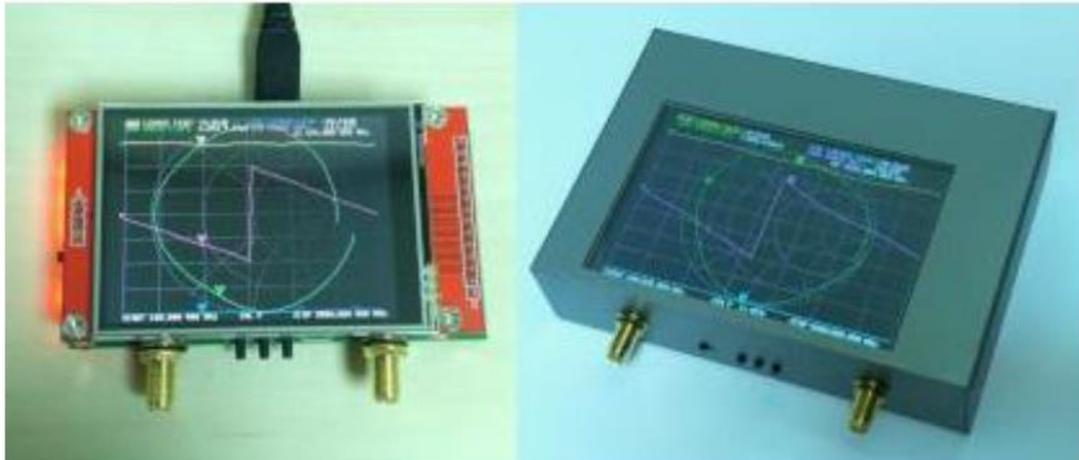
• **4<sup>TA</sup> Etapa**



**ANEXO 4: ARREGLO DE ANTENAS TIPO PARCHE A 2.4 GHZ DISEÑADA E IMPLEMENTADA.**



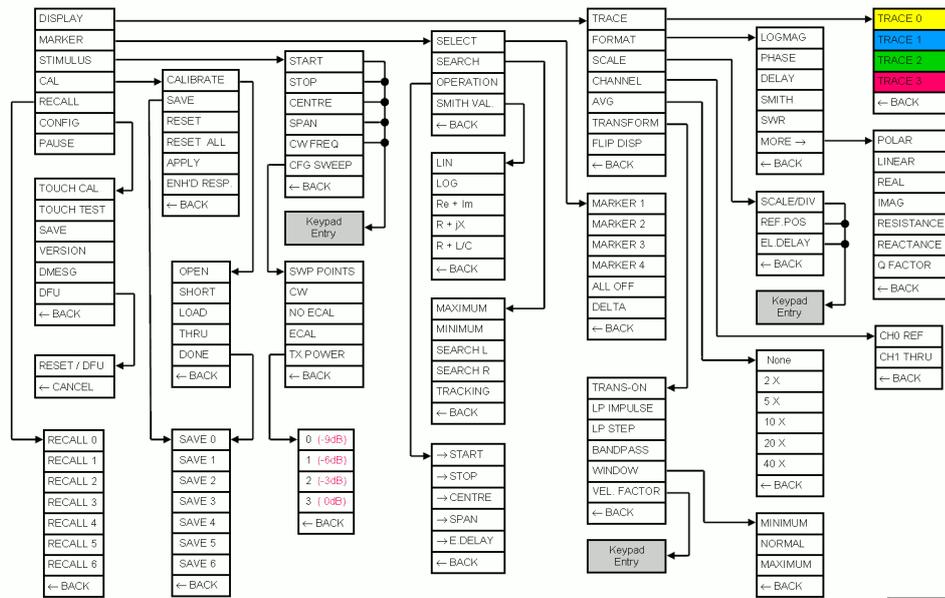
**ANEXO 5: ANALIZADOR DE RED VECTORIAL (NANO VNA V2.2)**



Parámetro	Versión de placa	Especificación	Condiciones
Rango de frecuencia	V2_2, V2 más	50kHz – 3GHz	-
	V2 Plus 4	50kHz – 4.4 GHz	-
Resolución de frecuencia	Todo	10kHz	-
Rango dinámico del sistema (calibrado)	V2_2, V2 más	70dB	f < 1,5 GHz
		60dB	f < 3HGz
	V2 Plus4	90 dB	f < 1GHz IFBW = 40 Hz (20xPROMEDIO)
		80 dB	f < 3GHz IFBW = 160 Hz (5xPROMEDIO)
		70 dB	f < 3GHz IFBW = 800 Hz (1xPROMEDIO)

# ANEXO 6: MAPA DEL MENÚ NANOVNA

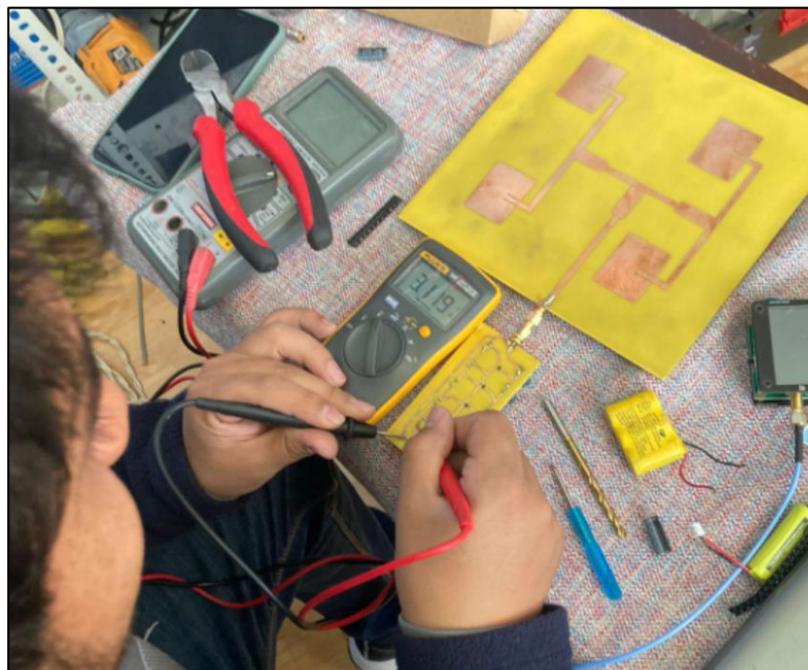
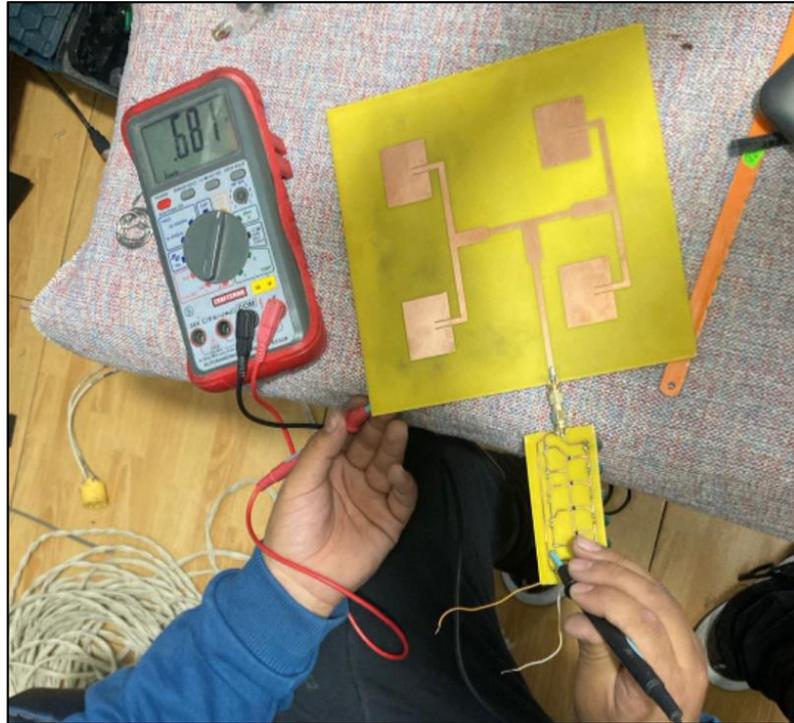
## NanoVNA V2 (S-A-A-2) menu system (FW 20201013)



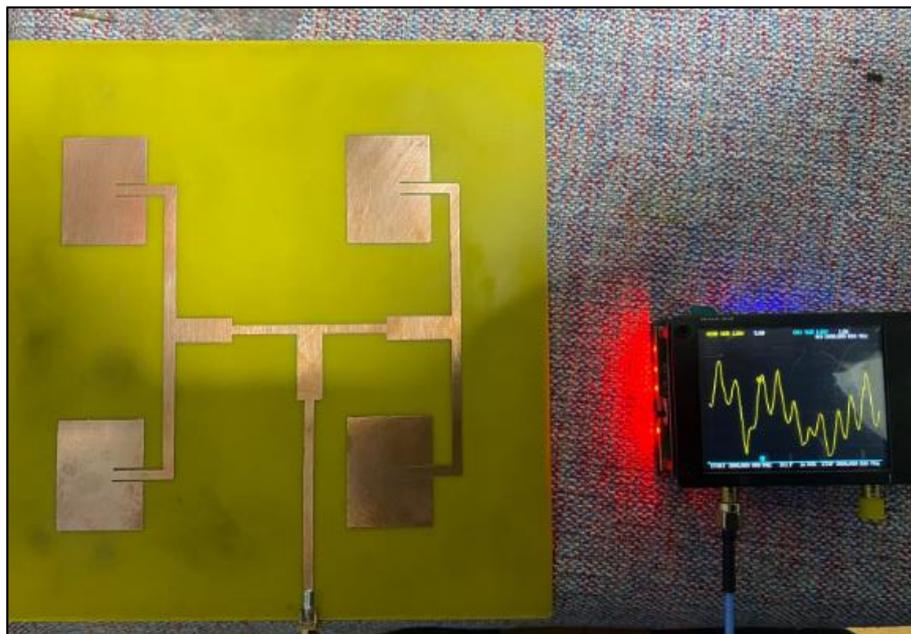
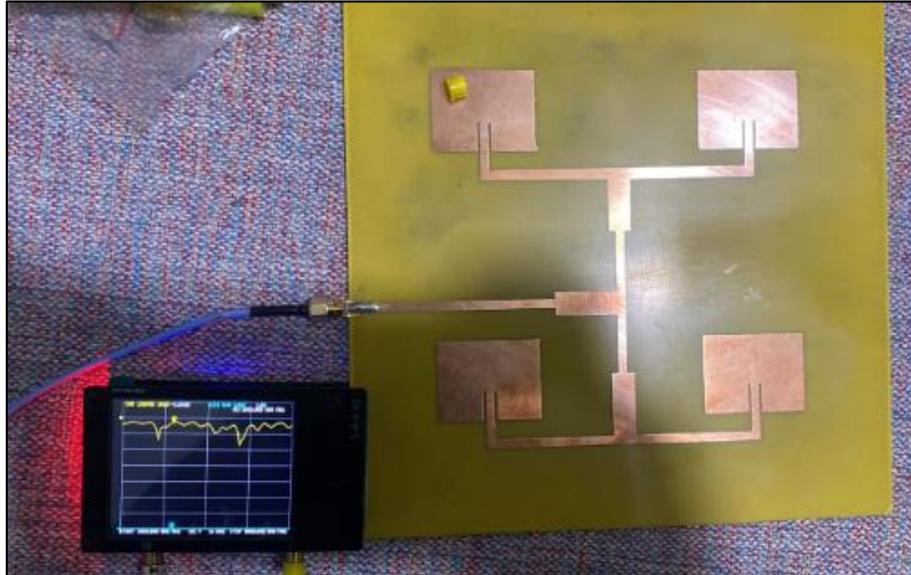
Note - NanoVNA V2 now always loads Calibration data stored in memory location C0 at start-up.

By: G3TMG  
20th Oct 2020  
Issue 1.1

**ANEXO 7: FOTOGRAFÍAS HACIENDO PRUEBAS DEL PROTOTIPO**



**ANEXO 8: ANÁLISIS DE ARREGLO DE ANTENAS CON NANOVNA**



**ANEXO 9: MEDICIONES DE VOLTAJE RECTENNA BASADA EN ARREGLO DE ANTENAS TIPO PARCHE**

