

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



## FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

### MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

---

**Tema:** “Arrays de Antenas Inteligentes para la Captación Óptima de Energía Electromagnética.”

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de  
Magister en Telecomunicaciones

Modalidad de Titulación: Proyecto de Desarrollo

**Autor:** Ing. Ernesto Guillermo Escobar Suárez

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

Ambato - Ecuador

2021

## **APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Magíster, e integrado por los señores: Ingeniero Julio Enrique Cuji Rodríguez Magister, e Ingeniero Mario Geovanny García Carrillo Magister, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Arrays de Antenas Inteligentes para la Captación Óptima de Energía Electromagnética.” elaborado y presentado por el señor, Ingeniero, Ernesto Guillermo Escobar Suárez, para optar por el Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa

-----  
Ing. Julio Enrique Cuji Rodríguez Mg.

Miembro del Tribunal de Defensa

-----  
Ing. Mario Geovanny García Carrillo, Mg.

Miembro del Tribunal de Defensa

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: "Arrays de Antenas Inteligentes para la Captación Óptima de Energía Electromagnética.", le corresponde exclusivamente al: Ingeniero Ernesto Guillermo Escobar Suárez Autor, bajo la Dirección del Ingeniero Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD, director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Ernesto Guillermo Escobar Suárez

**AUTOR**

-----  
Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD.

**DIRECTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

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

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

-----  
Ing. Ernesto Guillermo Escobar Suárez  
c.c. 1803532413

## ÍNDICE GENERAL

### Contenido

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	xi
DEDICATORIA.....	xii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xiii
EXECUTIVE SUMMARY .....	xv
<b>1. CAPÍTULO I</b>	
1.1 Introducción .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Objetivos. ....	3
1.3.1 General. ....	3
1.3.2 Específicos: .....	3
<b>2. CAPÍTULO II</b>	
2.1. Array de Antenas .....	4
2.1.1 Haz Conmutado. ....	5
2.1.2 Haz adaptativo .....	5
2.1.3 Array de Antenas microstrip. ....	6
2.1.3.1 Tamaño de la antena tipo parche. ....	6
2.1.3.2 Fabricación de la antena tipo parche en tecnología microstrip. . .	6
2.1.3.3 Diseño de agrupaciones de antenas o arrays de antenas. ....	7
2.1.3.4 Tamaño de las antenas Tipo Parche. ....	7
2.1.3.5 La línea de transmisión .....	7
2.1.3.6 Método de alimentación del array de antenas parche microstrip. .	10
2.2 Antena Log-Periódica. ....	11
2.2.1 Diseño del array de antena Log-Periódica . ....	13

2.3 Combinador Wilkinson. ....	14
<b>3. CAPÍTULO III</b>	
3.1. Ubicación. ....	16
3.2. Equipos y materiales . ....	16
3.3 Tipo de Investigación. ....	16
3.4 Recolección de información. ....	17
3.5 Procesamiento de información y análisis estadístico. ....	17
3.2.1 Software CST. ....	17
3.2.2 NanoVna. ....	17
3.2.3 Multímetro. ....	18
3.2.4 Raspberry Pi 4. ....	19
3.2.5. Placa en FR4. ....	20
3.2.6 Conector SMA. ....	21
<b>4. CAPÍTULO IV</b>	
4.1. Resultados. ....	22
4.1.1. Circuito Combinador. ....	22
4.1.1.2 Diseño y Fabricación. ....	22
4.1.2 Arrays de Antenas. ....	24
4.1.2.1. Diseño. ....	24
4.1.2.2. Simulación. ....	26
4.1.2.3. Fabricación. ....	28
4.1.2.4. Configuración de Raspberry Pi 4 para localizar el ángulo de mayor potencia. ....	32
4.1.2.5. Caracterización. ....	35
4.2. Análisis de Resultados. ....	39
4.2.1. Análisis de resultados Antena Log-Periódica. ....	39
4.2.2. Comparación Antena con trabajo Similar. ....	41
<b>5. CAPÍTULO V</b>	
5.1. Conclusiones. ....	45
5.2. Recomendaciones. ....	45

5.3 BIBLIOGRAFÍA.....	47
5.4. ANEXOS.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Especificaciones NanoVNA v2. ....	18
Tabla 2. Especificaciones Multímetro . . . . .	18
Tabla 3: Resultados cálculos para diseño antena Log- Periódica. ....	27
Tabla 4. Comparación de Raspberry Pi 4 vs Arduino. ....	33
Tabla 5. Comparación a 2.4 GHz Combinador Simulado vs Implementado ( <b>dB</b> ). ....	36
Tabla 6: Comparación NanoVna vs MiniVna-TINY . . . . .	39
Tabla 7: Medición Antena Log-Periódica. ....	40
Tabla 8: Medición Array de antenas conjuntamente con el combinador. . .	40
Tabla 9. Comparación de Resultados Recolección Energía electromagnética Antena Log-Periódica Ing. Félix Reinoso vs Antenas Log-Periódicas investigación. ....	42
Tabla 10. Comparación de Resultados Recolección Energía Electromagnética del Array de Antenas Log-Periódicas investigación actual vs antena Log-Periódica Ing. Félix Reinoso[1]. ....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema del lóbulo de radicación de array conmutado y adaptativa.....	4
Figura 2. Ejemplo de array bidimensional 4x4 formado con radiadores microstrip. La red de distribución microstrip sirve para alimentar los elementos [2].....	6
Figura 3. Array de antenas parche microstrip a 10.3GHz. [3].....	7
Figura 4. Circuito equivalente de un parche rectangular en el modelo de línea de transmisión [3].....	8
Figura 5. Líneas de campo provocadas por el efecto de franjas.....	8
Figura 6. Ejemplo de array con alimentación en paralelo. [3].....	10
Figura 7. Agrupación Log-Periódica de Dipolos [4].....	11
Figura 8. Arreglo de dipolos[4].....	11
Figura 9. Contornos calculados de directividad constante frente a $\sigma$ y $\tau$ para matrices de dipolos Log-Periódicas [5].....	12
Figura 10. Alimentación de una agrupación Log-Periódica[6].....	12
Figura 11. Alimentación de una agrupación Log-Periódica[7].....	14
Figura 12. Array de antena Log-periódica en tecnología microstrip haz conmutado.....	15
Figura 13. NanoVNA V2.....	17
Figura 14. Multímetro.....	18
Figura 15. Raspberry pi4.....	19
Figura 16. Placa FR4.....	20
Figura 17. Conector SMA hembra.....	20
Figura 18. Calculo de la línea de alimentación del combinador.....	23
Figura 19. Combinador/Divisor Wilkinson.....	23
Figura 20: Resultado calculo ancho de línea de transmisión del primer dipolo.....	24
Figura 21: Simulación para optimización tamaño primer dipolo.....	25
Figura 22: Diseño del primer dipolo.....	25
Figura 23. Diseño array de antena Log-Periódica optimizada en software CST Microwave Studio.....	27
Figura 24. Resultado simulación, Parámetro S11 Antena Log-Periódica. ...	28
Figura 25: Resultado simulación, VSWR Antena Log-Periódica.....	28
Figura 26. Combinador Wilkinson Fabricado.....	29
Figura 27. Arrays de Antenas Log -Periódicas Fabricado.....	30
Figura 28. Circuitos captadores de energía RF 1, 2 y 4 etapas [8].....	30
Figura 29. Arrays de Antenas Log -Periódicas Fabricado con combinador.....	31
Figura 30. Arrays de Antenas Log -Periódicas Fabricado con combinador y circuito captador de energía RF.....	31

Figura 31. Arrays de Antenas Log -Periódicas Fabricado con combinador y circuito captador de energía RF conector a NanoVna. ....	32
Figura 32. Placa vinil soporte Servomotor. ....	34
Figura 33. Servomotor encargado de movimiento del array de antenas. ....	34
Figura 34. Combinador/Divisor Wilkinson a) simulado y b) implementado	35
Figura 35. Parámetro S Combinador/Divisor Wilkinson simulado . . . . .	35
Figura 36. Parámetro S Combinador/Divisor Wilkinson implementado. ....	36
Figura 37. Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado simulado e implementado. ....	36
Figura 38. Parámetro S Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado implementado . . . . .	37
Figura 39. Parámetro S Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado simulado. ....	37
Figura 40. Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado implementado conectado a NanoVna. ....	38
Figura 4. Medición Parámetro S Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado implementado. ....	38
Figura 42. Medición Antena Log-Periódica conectada al circuito de 2 etapas[1] . . . . .	41
Figura 43. Antena Log-Periódica optimizada conectada al circuito de 2 etapas[1] . . . . .	42
Figura 44. Antena Log-Periódica conectada al circuito de 2 etapas[1]	43
Figura 45. Medición Red WIFI mediante app Wifi Analyzer. ....	44
Figura 46. Imagen del Ordenador de Placa Reducida Raspberry Pi 4. ....	49
Figura 47. Imagen del Ordenador de Placa Reducida Raspberry Pi 4 con su carcasa y acoplado su ventilador. ....	49
Figura 48. Imagen del Ordenador de Placa Reducida Raspberry Pi 4 con su carcasa y acoplado su ventilador junto al servomotor con el combinador Wilkinson acoplado. ....	50
Figura 49. Imagen Raspberry Pi 4 con el Array de Antenas Log - Periódicas	50
Figura 50. Raspberry Pi imager. ....	51
Figura 51. Imagen código implementado en Python. ....	52
Figura 52. Imagen acrílica utilizado para la base del trabajo de investigación. ....	53
Figura 53. Imagen acrílica para la base del motor . . . . .	53
Figura 54. Imagen Final de Array de Antenas. ....	54

## **AGRADECIMIENTO**

A todos los que apoyaron este esfuerzo con paciencia y amor, familia, amigos, docentes y maestros.

## **DEDICATORIA**

A mis hijas, Paula y Kristina.

**EE.**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:**

“ Arrays de Antenas Inteligentes para la Captación Óptima de Energía  
Electromagnética.”

**AUTOR:** Ing. Ernesto Guillermo Escobar Suárez

**DIRECTOR:** Ing. Carlos Gordón, PhD.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

- Tecnologías, seguridad y gestión de redes de comunicaciones.

**FECHA:** 13 de noviembre de 2021

**RESUMEN EJECUTIVO**

Las antenas inteligentes constituyen actualmente uno de los campos más explotados en cuanto a las redes inalámbricas permitiendo altas capacidades de transmisión de datos, esto se logra focalizando la radiación en la dirección deseada y ajustándose al medio y las condiciones en las cuales se desarrolla las comunicaciones.

Las antenas inteligentes emplean un conjunto de elementos radiadores y emisores y combinadores organizados en forma de arreglos conectadas en un punto en común para garantizar la potencia requerida, las señales desde estos elementos son combinadas para formar un patrón de haz movable que sigue un patrón determinado por el usuario o diseñador.

El mayor desafío para aplicar sistemas de antenas inteligentes dentro de la recolección de energía Electromagnética en comunicaciones inalámbricas es la capacidad de las antenas de alta frecuencia para captar un nivel de potencia adecuada para la recolección y almacenamiento de energía, por lo que, se requiere un gran ancho de banda para aprovechar varias longitudes de ondas presentes en el medio ambiente, como son las frecuencias 3G y WIFI (2.4 GHz).

El consumo de energía dentro de los sistemas de comunicaciones se considera un gran problema y un reto al momento de realizar implementaciones en medios donde el almacenamiento o recarga de los terminales finales es complicado por su ubicación, dicha tendencia crece con la presencia del Internet de las cosas IoT, en donde se depende directamente de la construcción de una gran red inalámbrica que permita interconectar todo, por esta razón existen investigaciones en las bandas 2,4 y 5,8 GHz y representa futuros trabajos para la 5ta Generación (5G) celular.

La gran posibilidad de recolectar la energía electromagnética de las zonas urbanas densamente pobladas se convierte en una gran fuente renovable de alimentación para los dispositivos de comunicaciones tanto para tecnología existente Wifi y las nuevas tecnologías como lo son la red 5G.

**Palabras Claves:** Array de Antenas, Energy Harvester, Wifi 2.4 GHz.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**THEME:**

“Smart Antenna Arrays for Optimal Capture of Electromagnetic Energy.”

**AUTHOR:** Ing. Ernesto Guillermo Escobar Suárez

**DIRECTED BY:** Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD.

**LINE OF RESEARCH:**

- Technologies, Security and Management of Communications Networks.

**DATE:** November 13th, 2021

**EXECUTIVE SUMMARY**

Smart antennas are currently one of the most exploited fields in terms of wireless networks, allowing high data transmission capacities, this is achieved by focusing the radiation in the desired direction and adjusting to the environment and conditions in which communications are developed.

Smart antennas employ a set of radiating and emitting and combining elements organized in the form of arrangements connected at a common point to guarantee the required power, the signals from these elements are combined to form a moving beam pattern that follows a pattern determined by the user or designer.

The biggest challenge to apply smart antenna systems within the Electromagnetic energy harvesting in wireless communications is the ability of high frequency antennas to capture an adequate power level for energy harvesting and storage, therefore, a Great bandwidth to take advantage of various wavelengths present in the environment, such as 3G and WIFI frequencies (2.4 GHz).

The consumption of energy within communication systems is considered a big problem and a challenge when carrying out implementations in media where the storage or recharging of the end terminals is complicated by their location, this trend grows with the presence of the Internet of the IoT things, where it is directly dependent on the construction of a large wireless network that allows everything to be interconnected, for this reason there are investigations in the 2.4 and 5.8 GHz bands and represents future work for the 5th Generation (5G) cell phone.

The great possibility of collecting electromagnetic energy from densely populated urban areas becomes a great renewable source of power for communication devices for both existing Wi-Fi technology and new technologies such as the 5G network.

**Keywords:** Antenna Array, Energy Harvester, Smart Antennas.

## **1. CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Introducción**

Los arrays de antenas son una combinación de múltiples elementos que a través de un dispositivo combinador[9] pueden maximizar la potencia obtenidas del medio ambiente de manera automatizada para ajustarse a la dirección de la señal emitida por diferentes puntos de radiación, el array es capaz de acoplarse a los diferentes rangos del espectro para los que fueron diseñados en el presente caso desde 1.8 a 2.6 GHz.

El diseño del array en primera instancia fue considerado mediante antenas tipo parche y se basó en un modelo empírico conectado a través de una línea de transmisión que dado sus resultados no generaron los niveles de potencia necesarios para cumplir con el objetivo del estudio, por lo que, al tener trabajos previos realizados median antenas Log- Periódicas se los aborda en método de optimización y mejora para garantizar una recolección de energía más eficiente.

Muchos de los resultados de las simulaciones para los arreglos propuestos indican un ancho de banda muy angosto por lo que se descartan a medida que fueron implementados en el material FR4 especial para altas frecuencias

A diferencia de otros estudios, el diseño propuesto debe poder adaptarse a la posible miniaturización por lo limitado del espacio en los equipos terminales, así como el uso de acopladores que faciliten la integración de nuevas frecuencias logrando adaptarse a los cambios tecnológicos.

Las antenas que usualmente se utilizan para constituir el array son las planares con tecnología microstrip pero que por su composición y geometría son capaces de poseer una gran directividad, pero un ancho de banda limitado por lo que para poder construirlo en formación de array se requiere mucho espacio además que su captación de potencia es baja, las antenas propuestas para este diseño se basan en la antena Log – Periódica.

Dada la problemática de salud pública a nivel mundial el factor determinante como lo es el trabajo en campo genera que esta investigación se torne aún más desafiante para todos los actores que intervienen en el mismo, por lo que, se trató de acercarse a la realidad de la actual normalidad y ajustarse lo mejor posible a una futura mejora en el diseño y análisis.

## **1.2. Justificación**

Para la investigación se han determinado las siguientes experiencias previas de experimentación, en USA en la Electrical Engineering & Computer Science Department, Colorado School of Mines Golden, CO 80401 [10] se realizó un diseño inicial sobre antenas inteligentes y la recolección de energía obteniendo resultados positivos para posteriores estudios, el diseño contó con todas las etapas de recolección mediante experimentación en laboratorio, en la University of MalekAshtar en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Tehran, Iran desarrollaron un estudio de Energy Harvesting usando antenas con tecnología Microstrip [11] dio como resultado una eficiencia de conversión máxima de aproximadamente el 67% a la frecuencia de 35,7 GHz.

Adicionalmente en la Universidad Técnica de Ambato se cuenta actualmente con el trabajo de investigación del Ing. Félix Reinoso “Optimización de antenas para sistemas de captación de energía electromagnética”[1] donde las mediciones se realizaron en un ambiente controlado y la potencia en una frecuencia de 2.4 GHz entregada al circuito recolector de energía logrando 4.02 Vdc en 30 minutos para un circuito recolector de 4 etapas diseñado en el trabajo de investigación del Ing. Darío Balarezo “Optimización del sistema de acondicionamiento para un dispositivo de captación de energía electromagnética”. [8]

Una vez analizados los trabajos previos es necesario aclarar la importancia de la actual investigación, ya que, si se logra una mejora en la captación e identificación de potencia de las señales que rodearan al Array de Antenas se generará un modelo de almacenamiento de energía y se podrá obtener una mayor potencia para enviar al circuito de captación de energía electromagnética[12], para en próximos trabajos aplicarlo al IoT[13].

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

- Elaborar el Estado del Arte del Arrays de Antenas Inteligentes para la captación óptima de energía electromagnética

#### **1.3.2. Específicos**

- Diseñar el Modelo Óptimo de Arrays de antenas inteligentes para la captación óptima de energía electromagnética.
- Implementar el Arrays de Antenas Inteligentes para la captación óptima de energía electromagnética.
- Evaluar el Sistema de Arrays de una Antenas Inteligentes.

## 2. CAPITULO II

### ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

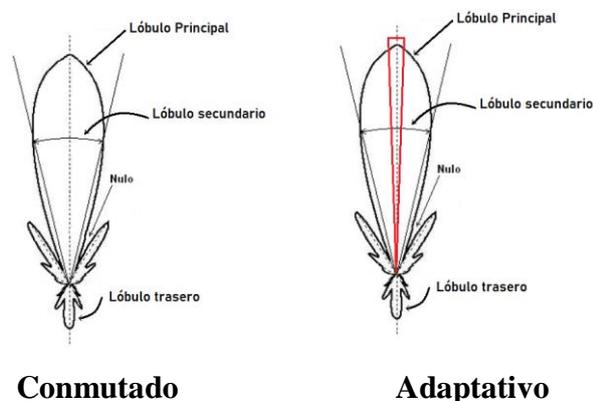
#### 2.1. Array de Antenas

La IEEE define una antena como un dispositivo de un sistema de comunicaciones transmisión o recepción, diseñado específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas, dependiendo de su diseño varia su capacidad en el espectro electromagnética, dentro del campo de las antenas, se pueden diferenciar dos grupos importantes, las antenas de haz conmutado (Switched-Beam Antenna) y las antenas de haz flexible, que están inmersas en los sistemas de arreglo adaptativo (AAS, Adaptive Array Systems).

Las antenas de haz flexible consisten en un arreglo lineal de antenas y un desfaseador para cada componente del arreglo. El funcionamiento de la agrupación requiere del cambio constante de la fase en cada una de las antenas para modificar la posición del lóbulo principal, la Figura 1 muestra un Esquema del lóbulo de radiación de array adaptativa y conmutado.

La idea de usar múltiples antenas y la innovación en la captación de energía DC por medio de circuitos que adapten la señal para su almacenamiento en baterías es cada vez menos costoso. Con la llegada de poderosos procesadores digitales de señales a bajos costos (DSPs), procesadores de propósito general, así como las técnicas de procesamiento de las señales basadas en software innovadoras, ha hecho práctico el uso de las antenas inteligentes[14], [15] para los sistemas de captación de energía.

Principalmente, existen dos formas de implementar un sistema de antenas inteligentes: haz Conmutado y Arreglo adaptativo.



*Figura 1. Esquema del lóbulo de radiación de array conmutado y adaptativa*

*Elaborado por: Investigador*

### **2.1.1 Haz Conmutado**

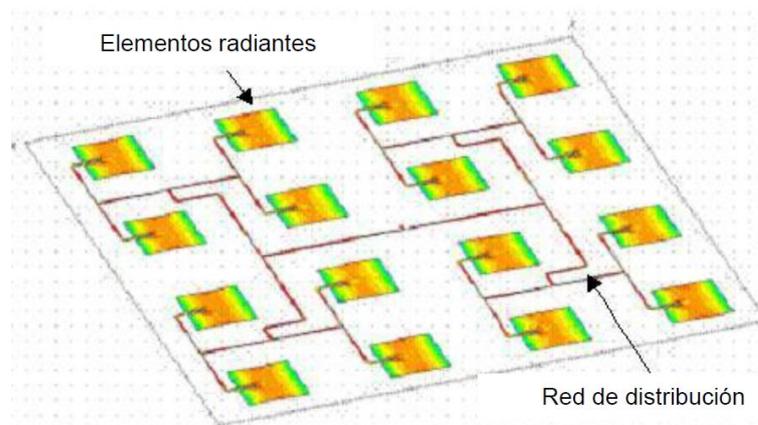
Se lo llama también Switched Lobe (cambio de dirección del lóbulo). Es la técnica más simple donde se genera una multiplicidad de haz (generado por una matriz) cuya salida puede cambiarse a un receptor o un banco de receptor[9], [16], [17]. El sistema radiante genera varios haces fijos, cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos se cubre toda zona deseada (un sector o una celda), la inteligencia del sistema se encarga de seleccionar el haz que mejor servicio da a cada usuario en particular, en función de algún parámetro de control (mayor nivel de potencia recibida), mejor SINR (relación señal a ruido más interferencia) y mejor C/I (relación señal a interferencia). Esta técnica no garantiza que el móvil se encuentre en la dirección de máxima radiación del haz que le da servicio, ni que las señales interferentes se vean notablemente reducidas (ya que siempre es posible que alguna entre por uno de los lóbulos secundarios).

### **2.1.2 Haz adaptativo**

Este es el máximo nivel de inteligencia con que se podría dotar al sistema. En este caso, se utiliza un algoritmo de DoA para determinar la dirección hacia las fuentes de la interferencia (por ejemplo: otros usuarios). Aquí, la salida de cada elemento del arreglo se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo que se conforma el diagrama de radiación para maximizar algún parámetro de la señal, (por ejemplo, la SINR) de este modo el diagrama sintetizado habitualmente presentará un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado, lóbulos secundarios en las direcciones de las componentes multitrayecto y mínimos (e incluso nulos) de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia. No siempre será posible eliminar toda la interferencia, ya que el número de fuentes interferentes que se pueden suprimir está directamente relacionado con el número de elementos de la antena. Esta técnica requiere del uso de complicados algoritmos, tanto para la detección de las señales deseada e interferente como para la optimización de los parámetros que forman el haz. Estos algoritmos suelen conllevar una gran carga computacional, mientras que deben procesarse en tiempo real, por lo que suponen una seria limitación.

### 2.1.3 Array de Antenas microstrip

Consisten en un conjunto de parches metálicos sobre un sustrato y un plano de masa por debajo, las antenas microstrip son de perfil bajo, adaptables a cualquier superficie, simples y baratas de fabricar, mecánicamente robustas cuando se instalan sobre superficies rígidas[18], la misma es alimentada mediante una Línea de transmisión Microstrip que es una tira conductora, generalmente de un ancho mucho menor en comparación con el parche. Es fácil de fabricar, simple de combinar controlando la posición del recuadro y bastante simple de modelar. En la Figura 2 se muestra un array de 4x4 formado por parches microstrip.



*Figura 2. Ejemplo de array bidimensional 4x4 formado con radiadores microstrip.  
La red de distribución microstrip sirve para alimentar los elementos [2]*

#### 2.1.3.1 Tamaño de la antena tipo parche

Una de las características más notables de las antenas tipo parche es su tamaño en comparación a las antenas tradicionales. La fabricación de antenas de una sola capa emplea espesores en el sustrato bajo los  $0.05\lambda_0$ , con  $\lambda_0$  en el vacío. Dado su tamaño las antenas tipo parche son las adecuadas para implementarse en superficies planas donde no ocupan mucho espacio. [3]

#### 2.1.3.2 Fabricación de la antena tipo parche en tecnología microstrip

Las antenas tipo parche fabricadas en tecnología microstrip pueden ser implementadas muy convenientemente para ser utilizada conjuntamente con circuitos integrados tipo SMD (Tecnología de Montaje Superficial) que son de fácil instalación ahorrando espacio en el sustrato, esta característica las hace ideales para ser desarrolladas como

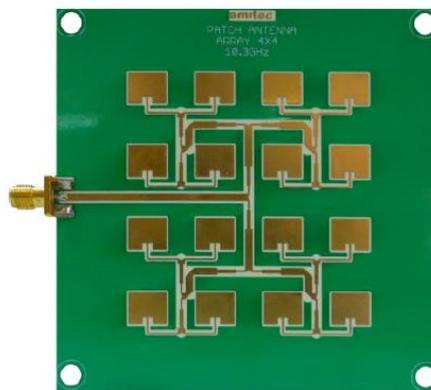
parte de un sistema de captación de energía RF ya que no ocupan mucho espacio al requerir ser utilizadas dentro de estos sistemas de recolección de energía electromagnética.

### 2.1.3.3 Diseño de agrupaciones de antenas o arrays de antenas

La ganancia de las antenas tipo parche diseñadas en tecnología microstrip se encuentra en un nivel medio con un promedio de 8 *dBi* y para aumentar su directividad se las agrupa, en el actual estudio esta condición es uno de los parámetros requeridos pero además, se necesita de un gran ancho banda para poder acumular la energía electromagnética, es por esto, que su eficiencia se limita a su ancho de banda estrecho que es causado a su resonancia en alta frecuencia y al tipo de sustrato utilizado[19].

### 2.1.3.4 Tamaño de las antenas Tipo Parche

El tamaño aparente de las antenas está ligado directamente al ancho de banda que manejen por tal motivo a frecuencias altas su tamaño disminuye y para frecuencias bajas aumenta. [3]



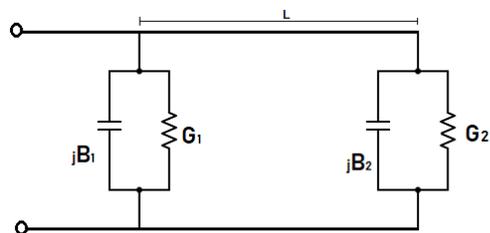
*Figura 3. Array de antenas parche microstrip a 10.3GHz. [3]*

### 2.1.3.5 La línea de transmisión

La antena parche microstrip puede implementarse como parte de la línea de transmisión colocada entre dos ranuras radiantes, pero que cuya geometría final es rectangular o circular, pero que necesariamente requiere de modificaciones para acercarse al modelo más adecuado dependiendo de la aplicación que se requiera.

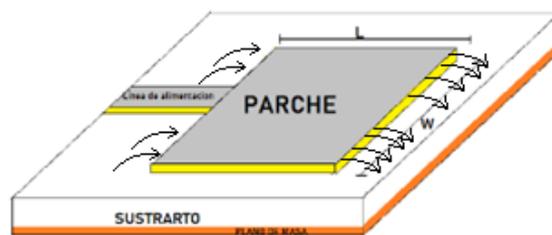
En este modelo los bordes de la antena son considerados como dos aperturas (slots) que radian, las aperturas poseen una anchura  $W$  (el ancho de la antena), situada a una altura  $h$  sobre el plano de masa (altura del substrato) y estarán separadas entre ellas una distancia  $L$  (será la longitud de la antena), además las aperturas son consideradas como admitancias complejas compuestas de una conductancia (de valor  $G$ ) y una susceptancia (de valor  $\beta$ ).

En la siguiente Figura 4 se muestra el circuito equivalente para una antena rectangular con el modelo de línea de transmisión. [2]



*Figura 4. Circuito equivalente de un parche rectangular en el modelo de línea de transmisión [3]*

Los campos se distribuyen en los bordes de la antena parche microstrip y presenta el llamado efecto franjas (fringing effects). Los campos se desbordan en los bordes de la antena formando las líneas de campo apreciables en las siguientes Figura 5.



*Figura 5. Líneas de campo provocadas por el efecto de franjas. Elaborado por: Investigador*

Este efecto dependerá tanto de la frecuencia de operación como del substrato empleado, debido a que se va manifestar en el medio que rodea la antena, es decir, el aire y el substrato. Al producirse este efecto en dos medios distintos (aire y substrato)

la distribución de campos será distinta debido a que cada medio tiene una permitividad eléctrica diferente.

Para evitar la existencia de dos permitividades eléctricas diferentes, se define un nuevo parámetro, la permitividad eléctrica efectiva  $\epsilon_{eff}$ , combinando ambas permitividades eléctricas.

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

Donde  $\epsilon_r$  es la permitividad eléctrica del sustrato,  $h$  el grosor del sustrato y  $W$  la anchura del parche microstrip, calculada previamente mediante la siguiente expresión:

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

Donde  $c$  corresponde a la velocidad de la luz en el vacío.

Debido a los efectos provocados por los campos de desbordamiento, la antena parche microstrip es eléctricamente mayor que sus dimensiones físicas, por lo que se deberá realizar un ajuste en la medida obtenida para la longitud de la antena. Dicho ajuste se calculó mediante la siguiente expresión. [6]

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

Para calcular la longitud real de la antena se empleó la siguiente ecuación. [5]

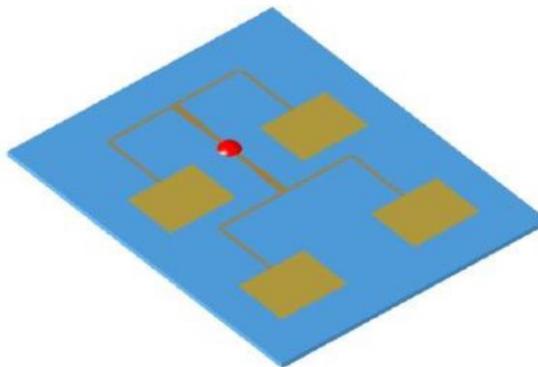
$$L = L_r - 2\Delta L = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

### 2.1.3.6 Método de alimentación del array de antenas parche microstrip

El modo en que una antena parche microstrip es alimentada determinará el ancho de banda de trabajo, la dirección de los campos radiados, la eficiencia, la facilidad para su fabricación y su robustez.

#### Agrupaciones con alimentación en paralelo

Las agrupaciones de parches microstrip con alimentación en paralelo es la configuración más común a la hora de implementar agrupaciones de antenas parche. A diferencia de las agrupaciones alimentadas en serie, en las agrupaciones alimentadas en paralelo cada elemento de la agrupación tiene su propia línea de alimentación, siendo independiente de las líneas de alimentación del resto de elementos[3] . En la siguiente imagen se puede apreciar un ejemplo de una agrupación con alimentación en paralelo.



*Figura 6. Ejemplo de array con alimentación en paralelo. [3]*

Las líneas de alimentación están conectadas entre sí mediante divisores de potencia Wilkinson que incluyen una resistencia entre los dos brazos de las dos líneas de la división para un mejor aislamiento, pero complican el diseño e implementación [3], la configuración en paralelo ofrece mejorar el ancho de banda siendo en algunos casos mayor a los elementos individuales[20]

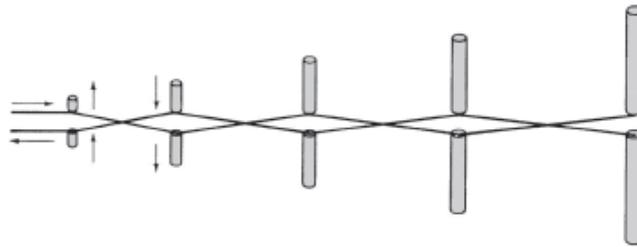
Para esta investigación se implementó en un principio un array de antenas tipo parche microstrip con alimentación en paralelo, pero dado a sus resultados de ancho de banda mediante las mediciones que aún al resonar a la frecuencia deseada no garantiza la

suficiente potencia para poder activar la etapa de recolección, por lo que se continua el estudio con las antenas Log-periódicas.

## 2.2 Antena Log-Periódica.

La primera antena Log-Periódica implementada con éxito fue introducida por DuHammel e Isbell [21] y era una estructura de hoja plana auto complementaria que constaba de dos tiras angulares que soportaban dientes curvos produciendo un patrón bidireccional, sin embargo es Isbell quien introdujo una Log-Periódica que consistía en un arreglo de dipolos[4], considerada la antena Log-Periódica más utilizada.

El arreglo de dipolos dentro de la antena Log-Periódica cuya geometría se evidencia en la Figura 7, se ve conformada por una agrupación no uniforme similar a una antena Log -Periódica tradicional pero escalada por un factor de escala  $\tau$ . [22]



*Figura 7. Agrupación Log-Periódica de Dipolos [4]*

La antena Log-Periódica es una secuencia de dipolos lineales paralelos uno junto a otro que forman una matriz coplanar, que posee una directividad menor que la matriz Yagi-Uda (7-12 dB), las dimensiones geométricas de la matriz logarítmica periódica aumentan logarítmicamente y se define por la inversa de la relación geométrica  $\tau$ .

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{S_{n+1}}{S_n} < 1 \quad (5)$$

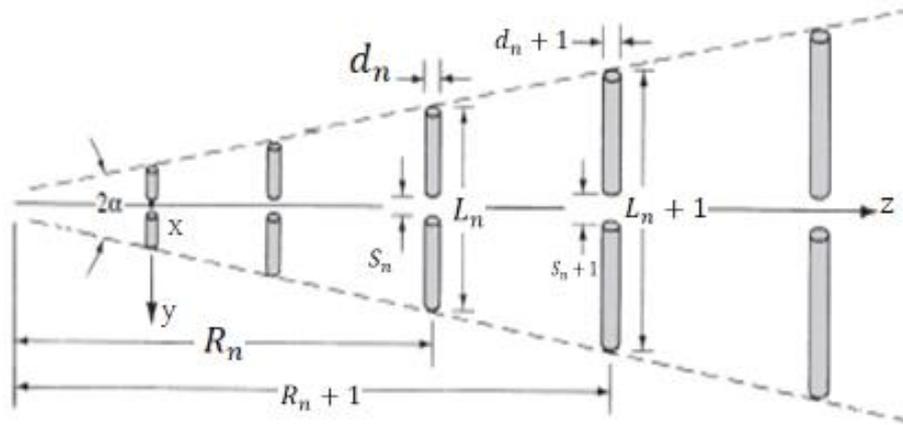


Figura 8. Arreglo de dipolos[4]

El factor de espaciamento  $\sigma$  es el espacio en longitudes de onda entre  $\lambda/2$  dipolo y el dipolo más corto adyacente, definido por:

$$\sigma = \frac{R_{n+1} + R_n}{2L_{n+1}} = \frac{1 - \tau}{4 \tan \alpha} \quad (6)$$

El factor de escala  $\tau$  y el espaciado relativo  $\sigma$ , determinan la directividad de la agrupación. En la Figura 9 se muestra una gráfica de las curvas de Carrel [23] que relaciona estos parámetros con la ganancia.

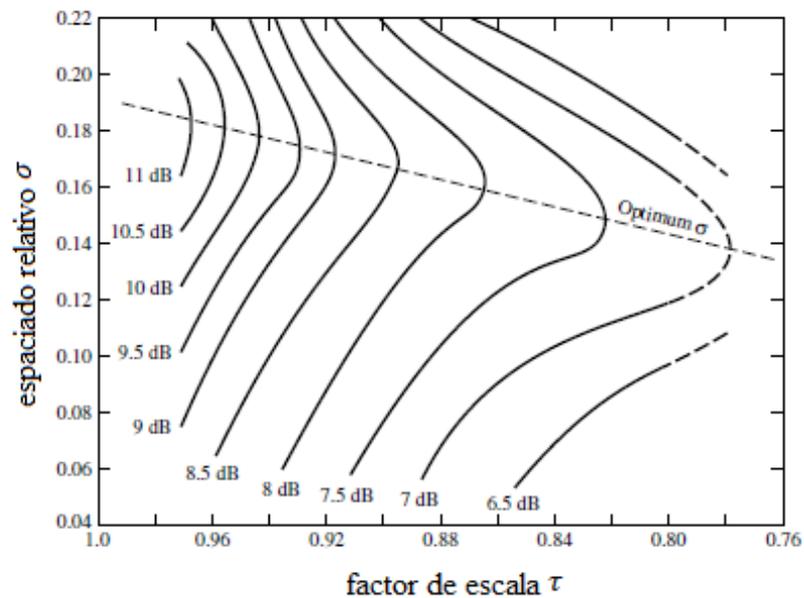
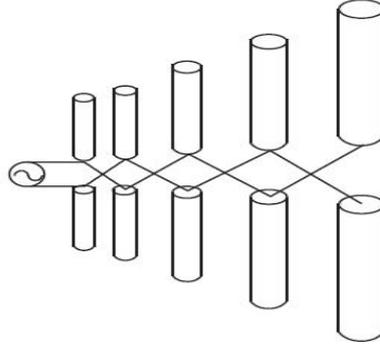


Figura 9. Contornos calculados de directividad constante frente a  $\sigma$  y  $\tau$  para matrices de dipolos Log-Periódicas[23] [5].

La agrupación Log-Periódica se alimenta por el vértice, por lo que para conseguir mejores resultados se necesitan cruzar los cables de alimentación de forma que cada dipolo este alimentado con un desfase adicional de  $\pi$  al introducido por la línea de transmisión [5], como se muestra en la Figura 10.



*Figura 10. Alimentación de una agrupación Log-Periódica*[6]

### 2.2.1 Diseño del array de antena Log-Periódica

El ancho de banda del sistema determina la longitud de los elementos más cortos y más largos del array, [23] ha introducido una ecuación semiempírica para calcular el ancho de banda de la región activa  $B_{ar}$  relacionado con  $\alpha$  y  $\tau$  :

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7 (1 - \tau^2) \cot \alpha \quad (7)$$

En la práctica, se diseña un ancho de banda mayor  $B_s$  al propuesto  $B$ , sin embargo, ambos están relacionados por:

$$B_s = B B_{ar} = B [1.1 + 7.7 (1 - \tau^2) \cot \alpha] \quad (8)$$

Donde:

$B_s$  = ancho de banda diseñado

$B$  = ancho de banda deseado

$B_{ar}$  = ancho de banda de la región activa

La longitud Total  $L$ , desde el elemento más corto  $l_{min}$  hasta el más largo  $l_{max}$ , está dado por:

$$L = \frac{\lambda_{max}}{4} \left( 1 - \frac{1}{B_s} \right) \cot \alpha \quad (9)$$

Donde:

$$\lambda_{max} = 2l_{max} = \left( \frac{v}{f_{min}} \right) \quad (10)$$

El número de elementos está determinado por:

$$N = 1 + \left( \frac{\ln(B_s)}{\ln(1/\tau)} \right) \quad (11)$$

### 2.3 Combinador Wilkinson

El combinador no resonante puede proporcionar un gran ancho de banda, por lo que, es empleado en tecnología microstrip como medio de transmisión. El modelo más empleado es el combinador Wilkinson ya que logra el aislamiento entre las salidas mientras se mantiene la adaptación [7]. El modelo más conocido es el Wilkinson de dos puertos, consiste en dos líneas de transmisión paralelas de longitud  $\lambda/4$  alimentadas por la entrada, y una resistencia entre los dos puertos de salida, gracias a este resistor, se logra el aislamiento entre las salidas, además no se disipa ninguna potencia, para este caso de recolección no se requiere aislamiento de las señales ya que las mismas servirán como alimentación del circuito de recolección de energía.

El combinador Wilkinson no inyecta la potencia en partes necesariamente iguales por lo que cada puerto debe estar adaptado para este caso a  $50\Omega$ , y así aprovechar el máximo acoplamiento con el circuito captador de energía [8].

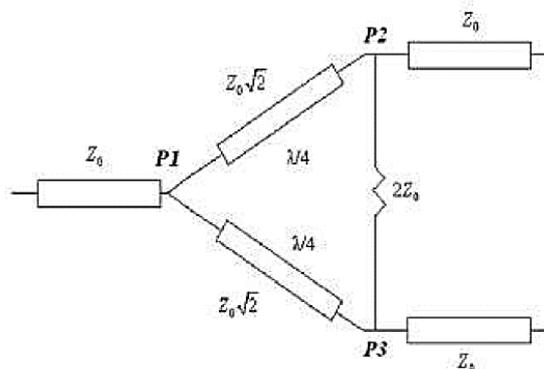
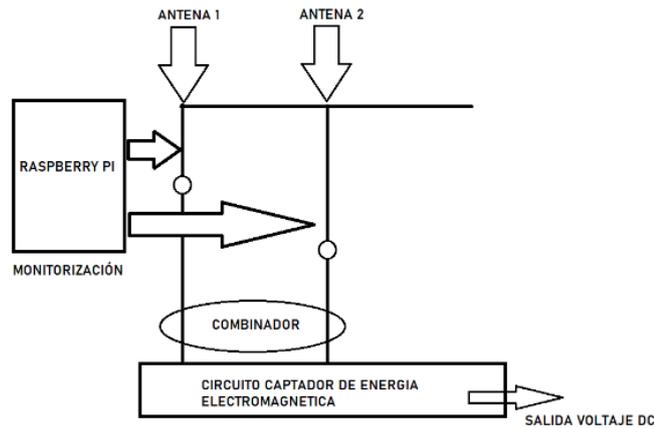


Figura 11. Alimentación de una agrupación Log-Periódica[7]

Ya que existe una simetría entre los puertos en  $P_2$  y  $P_3$  el potencial es el mismo, por tanto, no hay una circulación de corriente entre ellos, sin embargo, al momento de la implementación los valores pueden variar por la imperfección de la fabricación, por lo que, lo más importante en el combinador es mantener la impedancia en  $50 \Omega$  para minimizar las pérdidas. El concepto de implementación de dos conjuntos de arrays conjuntamente con un combinador se muestra en la Figura 12.



*Figura 12. Array de antena Log-periódica en tecnología microstrip haz conmutado  
Elaborado por: Investigador*

### **3. CAPITULO III**

## **MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1. Ubicación**

El trabajo de investigación es realizado en la provincia de Tungurahua cantón Ambato, República del Ecuador, la ciudad consta de aproximadamente de 180 mil habitantes, a una altitud de 2580 msnm

### **3.2. Equipos y materiales**

Para el proyecto de investigación se ha requerido algunos componentes y equipos para el completo desarrollo los cuales son el software CST para la simulación de los diseños de la antena Log Periódica, así como el diseño y simulación del combinador de 3 puertos para posteriormente realizar la fabricación.

Las antenas y el combinador se implementaron sobre placas FR4 y una vez fabricadas y utilizando el analizador NanoVNA se obtiene la medición del parámetro S11, estos resultados se comparan con lo obtenido en la simulación realizada sobre el software especializado CST Microwave Studio. para la acumulación de energía electromagnética, se utilizan los circuitos elaborados por el Ing. Darío Balarezo en su trabajo de investigación[8] para conocer la cantidad de energía (voltaje) que las antenas pueden “recolectar” en la frecuencia de 2.4 GHz, la Optimización se realiza sobre las antenas elaboradas por el Ing. Félix Reinoso en su trabajo de investigación[1] sometiendo bajo análisis comparativo.

### **3.3. Tipo de Investigación**

El tipo de investigación del presente proyecto es explicativa, ya que se fundamenta en investigaciones previas y en implementaciones que se muestran en artículos científicos de alto impacto, en tesis doctorales y libros basados en publicaciones, la información obtenida fundamenta el presente trabajo de investigación y al mismo tiempo presenta los equipos y herramientas para el diseño e implementación del arrays de las antenas para la captación óptima de energía electromagnética.

### **3.4 Recolección de información**

La recolección de información se realizó mediante pruebas prácticas de los diseños de los arrays de antenas inteligentes y su desempeño en campo, esto permitió la recopilación de datos necesarios para la investigación, y comparar los resultados con investigaciones previas.

### **3.4 Procesamiento de la información y análisis estadístico**

En este numeral se determinó los diferentes componentes necesarios para el diseño, simulación, fabricación y caracterización del array de antenas inteligentes para la óptima captación de energía electromagnética.

Mediante el diseño se determinó el array de antenas óptimo para la frecuencia de 2.4 GHz, posteriormente se pasó a la simulación en CST STUDIO donde los resultados obtenidos mostraron el valor de la longitud del primer dipolo optimizado, así como el espaciamiento entre elementos, se continuó con la fabricación de las diferentes placas sobre material FR4, finalmente en la caracterización se realizó el análisis comparativo con trabajos de investigación previos.

#### **3.2.1 Software CST**

Es un software de análisis de EM 3D de alto rendimiento para sistemas electromagnéticos (EM). La versión del software utilizado es el CST STUDIO SUITE 2019.

En el análisis se incluyen el rendimiento y la eficiencia de antenas y filtros, la compatibilidad electromagnética y las interferencias (EMC/EMI), la exposición del cuerpo humano a campos de EM, los efectos electromecánicos en motores y generadores, y los efectos térmicos en dispositivos de alta potencia.

#### **3.2.2 NanoVna**

NanoVNA V2 (S-A-A-2) Figura 13 es un analizador de redes vectoriales T / R de 4GHz de bajo costo desarrollado por HCXQS en colaboración con OwOComm.

El hardware V2 es un nuevo diseño, no usa armónicos para las mediciones y logra un rango dinámico más alto y cuyas especificaciones satisfacen la necesidad de medición.

### Especificaciones NanoVNA v2

Parameter	Board version	Specification	Conditions
Frequency range	V2_2, V2 Plus	50kHz - 3GHz	-
	V2 Plus4	50kHz - 4.4GHz	-
Frequency resolution	All	10kHz	-
System dynamic range (calibrated)	V2_2, V2 Plus	70dB	f < 1.5GHz
		60dB	f < 3GHz
	V2 Plus4	90dB	f < 1GHz IFBW=40Hz (20xAVG)
		80dB	f < 3GHz IFBW=160Hz (5xAVG)
S11 noise floor (calibrated)	All	-50dB	f < 1.5GHz
		-40dB	f < 3GHz
Sweep rate	V2_2	100 points/s	f >= 140MHz
		80 points/s	f < 140MHz
	V2 Plus	200 points/s	f >= 140MHz
		100 points/s	f < 140MHz
	V2 Plus4	400 points/s	f >= 140MHz
		200 points/s	f < 140MHz

Tabla 1. Especificaciones NanoVNA v2



Figura 13. NanoVNA V2

### 3.2.3 Multímetro

Es una herramienta de comprobación de parámetros eléctricos, principalmente voltaje (voltios), corriente (amperios) y resistencia (ohmios), adicionalmente se puede

verificar diodos y continuidad. Las especificaciones técnicas del equipo de medición se encuentran detalladas en la Tabla 2.



*Figura 14. Multímetro*

Especificaciones	
Tensión CC / CA	200 mV - 1,000 V / 200 V - 750 V
Corriente CC / CA	200 mA -10 A / N/A
Resistencia	200 Ohms - 2 M Ohms
Temperatura (°C)	-40° C a 1,370° C

*Tabla 2. Especificaciones Multímetro*

### 3.2.4 Raspberry Pi 4

La Raspberry Pi es una gama de ordenadores de bajo costo de placa simple (SBC), implementado en el Reino Unido por la Raspberry Pi Foundation,[24] su principal objetivo era proporcionar acceso a más personas en el mundo a la informática y a la era digital, los primeros modelos cumplieron con el principio de promover la enseñanza en las escuelas sin recursos suficientes para poder adquirir equipo de alta gama.

Dado que mediante una simple memoria SD se puede intercambiar entre varios Sistemas Operativos las Raspberry es considerada actualmente como un equipo versátil en el desarrollo de muchas aplicaciones ya que al poder implementar códigos de libre acceso es fundamental para el desarrollo de la investigación, su SO principal

es Debian, denominado Raspberry Pi OS, aunque permite usar varios sistemas operativos. En todas sus versiones, incluye un procesador Broadcom, memoria RAM, GPU (Unidad de Procesamiento de Gráficos), puertos USB, HDMI, Ethernet, 40 pines GPIO. En la Figura 15 se muestra la Raspberry utilizada para este trabajo de investigación.



*Figura 15. Raspberry pi4  
Elaborado por: Investigador*

### **3.2.5. Placa en FR4**

El material ampliamente conocido como FR4 es una estructura compuesta, la capa más básica del material es fibra de vidrio tejida en una hoja delgada similar a una tela, esto genera una estabilidad estructural conjuntamente con la resina epoxi resistente al fuego garantizan su funcionamiento en altas frecuencias.

**Las principales propiedades de este material son:**

$\epsilon = 4.3$  constante dieléctrica

$h = 1.6$  altura del sustrato

$t = 0.035$  altura del conductor de cobre sobre el sustrato



*Figura 16. Placa FR4*

### **3.2.6 Conector SMA**

Los conectores SMA son conectores de semiprecisión y subminiatura para alta frecuencia, que proporcionan resultados fiables en sistemas de banda ancha. Con impedancia constante y bajo coeficiente de reflexión. Su uso está principalmente destinado a aplicaciones militares y aeroespaciales.



*Figura 17. Conector SMA hembra*

#### **Características**

Impedancia: 50  $\Omega$

Frecuencia: 0 ~ 6 GHz

Material del conector: Cobre

Longitud: 13 mm

Longitud de la puntada: 4 mm

## 4. CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestra el proceso de diseño, simulación, optimización e implementación del array de antenas objetivo de esta investigación, el tipo de antenas seleccionadas fueron consideradas en base a las mediciones de resonancia, así como la cantidad de ancho de banda que mostraron durante las pruebas. La tecnología microstrip aporta el trabajo eficiente en alta frecuencia lo que garantiza que las frecuencias de trabajo se aprovechen. Se analizan los resultados obtenidos en la simulación de los arrays individuales y comparando con las mediciones realizadas en la implementación, se determinan las frecuencias de operación en base a las redes Wifi y 3G presentes en el ambiente, la cantidad de energía que pueden recolectar en presencia de frecuencias de entre 1.6 y 3 GHz, siendo las redes WIFI[25] las de mayor nivel de potencia, este array de antenas posteriormente se comparó con otras antenas similares en trabajos previos[1] y con ello conocer si se llegó a los objetivos de la investigación.

#### 4.1. Resultados.

Los pasos para la implementación fueron, diseño, simulación, fabricación y caracterización[26] del array Antenas.

##### 4.1.1. Circuito Combinador.

##### 4.1.1.2 Diseño y Fabricación

A continuación, se detalla el diseño del combinador Wilkinson (Figuras 19 y Figura 20) el cual es el más sencillo dentro del conjunto de combinadores y divisores de RF.

Como primer paso se calcula el ancho de la línea de Transmisión[7] a  $\lambda/4$  con una frecuencia de 2.4 GHz:

$$\begin{aligned}\lambda/4 &= L_1 \\ L_{1Z_0} &= 31.25 \text{ mm} \\ Z_0 &= 50 \Omega\end{aligned}$$

$$Z1 = Z0 * \sqrt{2}$$

$$Z1 = 70 \Omega$$

Para la línea de alimentación mediante la web <https://www.emtalk.com> realizamos el cálculo a  $50 \Omega$  con una frecuencia de 2.4 GHz, por lo que se obtiene el largo de la línea Figura18:

### Microstrip Line Calculator

**Substrate Parameters**

Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ ):

Dielectric Height (h):  mm

Frequency:  GHz

**Electrical Parameters**

Zo:   $\Omega$

Elec. Length:  deg

**Physical Parameters**

Width (W):  mm

Length (L):  mm

Figura 18. Cálculo de la línea de alimentación del combinador  
Web <https://www.emtalk.com>

$$17.29\text{mm} = L_{\text{alimentacion}}$$

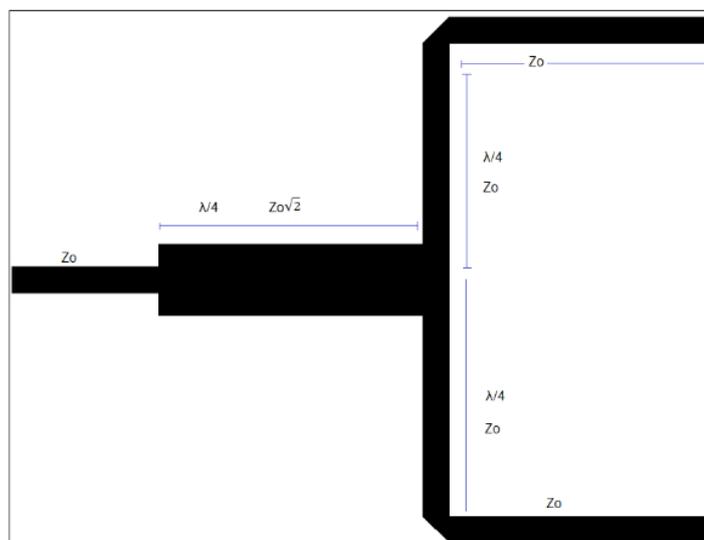


Figura 19. Combinador/Divisor Wilkinson  
Elaborado por: Investigador

#### 4.1.2 Arrays de Antenas.

Continuando con el diseño del array de antena Log-Periódica propuesta, ahora se va a determinar las mejores frecuencias donde uno de los 2 arrays a implementar resuene entre las frecuencias de funcionamiento 3G y WIFI, en este caso la antena que se propone diseñar es en las frecuencias desde 1.8 GHz hasta 2.4 GHz, por lo que, se establece las dimensiones del dipolo que funcione a la frecuencia de 1.8 GHz, una vez obtenidas estas dimensiones se procedió a calcular el resto de elementos requeridos.

##### 4.1.2.1. Diseño.

- Línea de transmisión, considerando el sustrato a utilizar y la impedancia

Sustrato: FR4: a  $50\Omega$

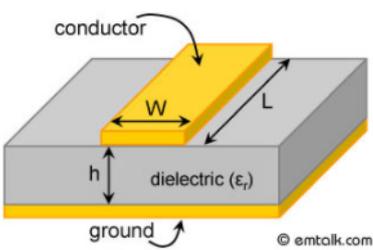
$$\epsilon = 4.3$$

$$h = 1.6$$

$$t = 0.035$$

Para la línea de alimentación y transmisión del primer dipolo que en este caso será la misma distancia mediante la web <https://www.emtalk.com> realizamos el cálculo Figura 20 a  $50\Omega$  con una frecuencia de 1.8 GHz, por lo que se obtiene:

#### Microstrip Line Calculator



© emtalk.com

**Substrate Parameters**

Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ ):

Dielectric Height (h):  mm

Frequency:  GHz

---

**Electrical Parameters**      **Physical Parameters**

Zo:   $\Omega$             Width (W):  mm

Elec. Length:  deg            Length (L):  mm

Figura 20: Resultado calculo ancho de línea de transmisión del primer dipolo

$$L_{alimentacion} = 46mm$$

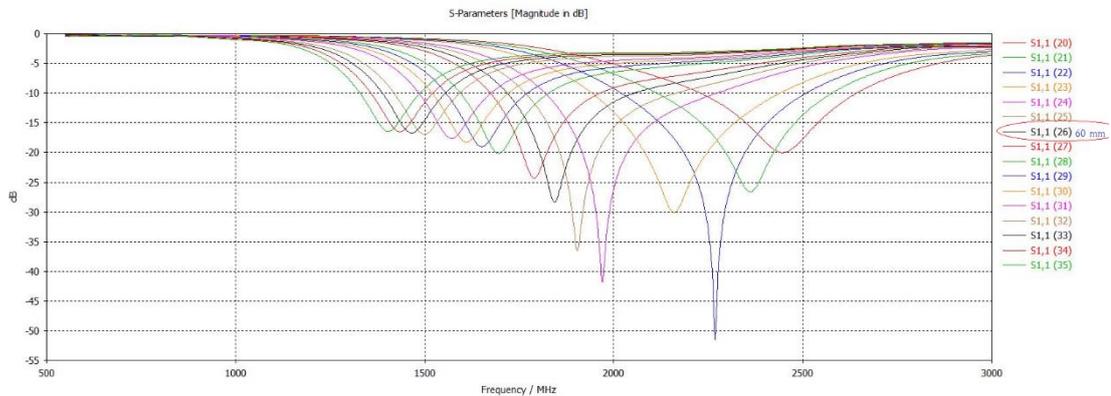
El cálculo de la longitud del primer dipolo se lo realizó en base a la frecuencia más baja de funcionamiento que 1.8 GHz que corresponde a la frecuencia celular 3G, mediante el software CST Studio se varía el valor entre  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$  para conseguir valor optimo del dipolo, es por eso que, se tiene:

$$f_l = 1.8 \text{ GHz}$$

$$\lambda = 0.17 \text{ m}$$

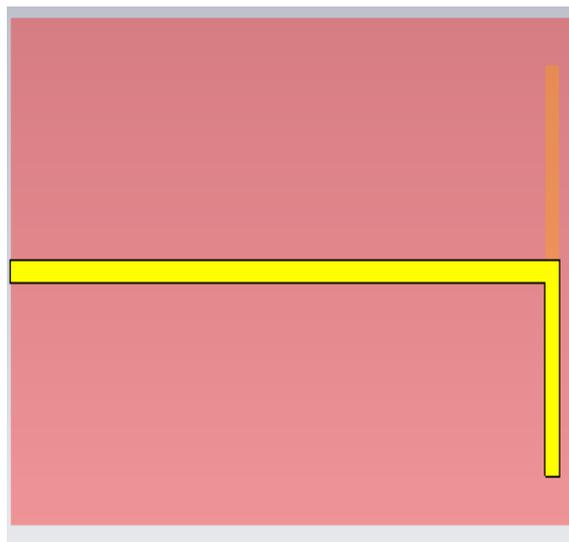
$$\lambda/2 = 8.5 \text{ cm}$$

$$\lambda/4 = 4.25 \text{ cm}$$



**Figura 21: Simulación para optimización tamaño primer dipolo**  
**Elaborado por: Investigador**

Con los resultados de la simulación se concluye que la longitud del primer dipolo debe ser de  $L1 = 60 \text{ mm}$  para que este resuene a la frecuencia de 1800 MHz.



**Figura 22: Diseño del primer dipolo**  
**Elaborado por: Investigador**

Con la longitud y el ancho del primer dipolo se procede a realizar los cálculos adicionales como el número de elementos y sus separaciones, sin embargo, para el ancho de los elementos será 3.11 mm como medida óptima para garantizar el ancho de banda requerido para la investigación:

Se tomó una ganancia de 8 dB para establecer un valor para el factor de escala  $\tau = 0.88$  y espaciamiento  $\sigma = 0.161$ ; [27]

$$B = 2.6/1.8$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{1 - \tau}{4\sigma} \right]$$

$$\alpha = 0.18$$

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7 (1 - \tau^2) \cot \alpha$$

$$B_{ar} = 1.696$$

$$B_s = B B_{ar} = 1.696 * 1.44$$

$$B_s = 2.443$$

$$N = 1 + \left( \frac{\ln(B_s)}{\ln(1/\tau)} \right)$$

$$N = 1 + \left( \frac{\ln(2.443)}{\ln(1/0.88)} \right)$$

$$N = 1 + \left( \frac{0.89}{0.13} \right)$$

$$N = 7.84$$

Para efectos de reducir el tamaño del array se toma el valor de 7 elementos que componen la antena Log-Periódica.

La separación del primer dipolo con el siguiente esta dado por:

$$S_N = \frac{1}{2} (L_N - L_{N-1}) \cot \alpha \quad (12)$$

$$L_2 = \tau * L_1 = 52.8 \text{ mm}$$

$$S_2 = 19.78 \text{ mm}$$

Con estos valores se calculan los demás dipolos con sus respectivas separaciones que se detallan en la Tabla 3:

N.º Dipolo	Longitud (mm)	Separación (mm)	Ancho (mm)
1	60,00	19,78	3.11
2	52,80	17,41	3.11
3	46,46	15,32	3.11
4	40,89	13,48	3.11
5	35,98	11,86	3.11
6	31,66	10,44	3.11
7	27,86	31.92*	3.11

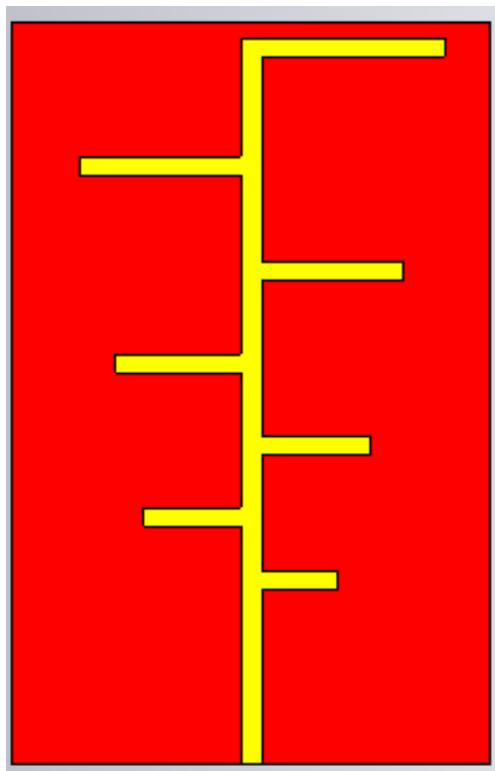
*Tabla 3: Resultados cálculos para diseño antena Log- Periódica  
Elaborado por: Investigador*

\*Distancia corresponde entre el dipolo más pequeño y el punto de alimentación hacia el captador de energía[10].

#### **4.1.2.2. Simulación.**

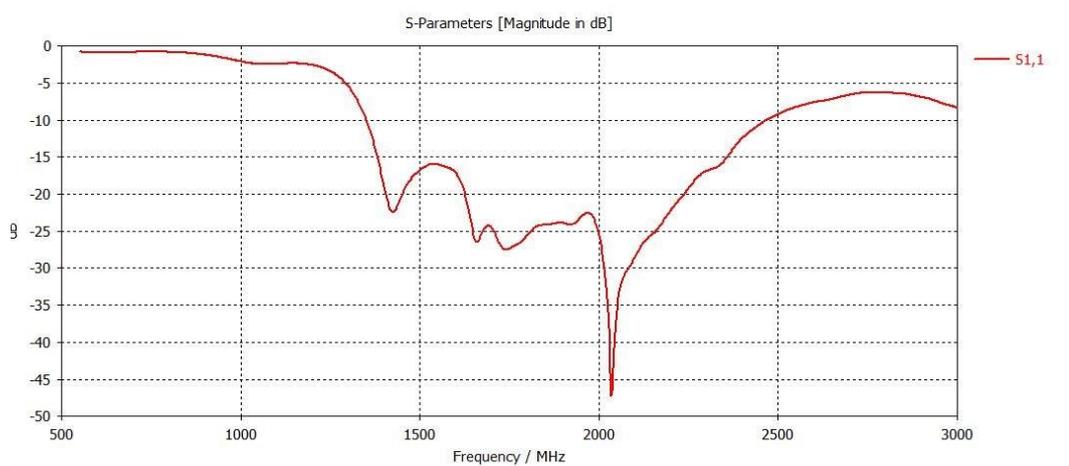
A continuación, se muestran los resultados de la simulación para la posterior fabricación:

- ✓ Con los resultados de la Tabla 3 se diseña la Antena en CST Microwave Studio:



*Figura 23. Diseño array de antena Log-Periódica optimizada en software CST Microwave Studio  
Elaborado por: Investigador*

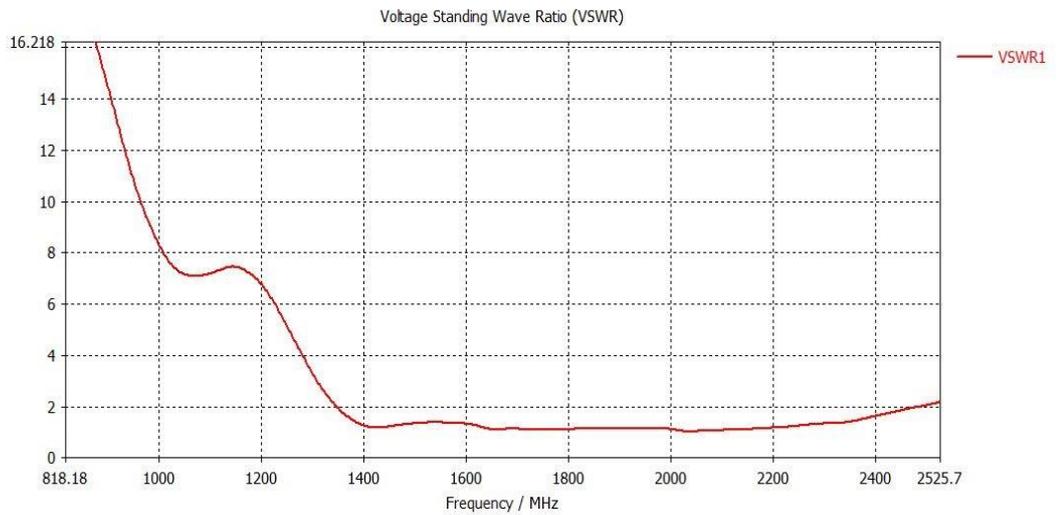
### Parámetro S11:



**Figura 24. Resultado simulación, Parámetro S11 Antena Log-Periódica  
Elaborado por: Investigador**

En la Figura 24 se indica el parámetro S11 cuyo valor representa a la potencia reflejada en el puerto 1 en comparación a la potencia aplicada al mismo puerto.

### VSWR:



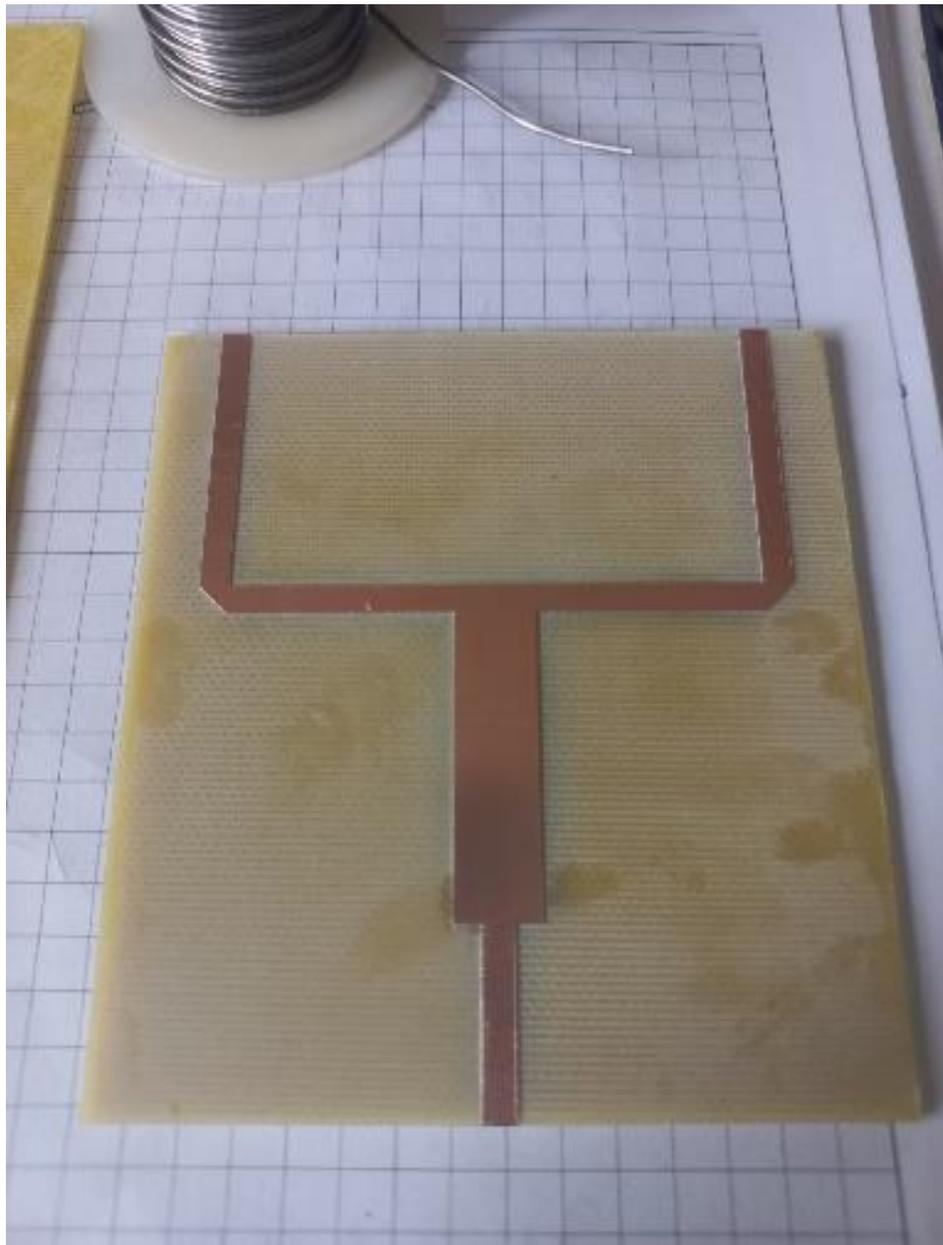
**Figura 25: Resultado simulación, VSWR Antena Log-Periódica  
Elaborado por: Investigador**

En la Figura 25 se observó que existe un acoplamiento aceptable entre la fuente y la carga, lo que se determinó mediante el valor de VSWR.

#### **4.1.2.3. Fabricación.**

Con los resultados obtenidos en la simulación se procede con la implementación del array de antenas y el combinador Wilkinson para su posterior caracterización.

Como primer paso se procede a la impresión del combinador Wilkinson y la colocación de los conectores SMA.



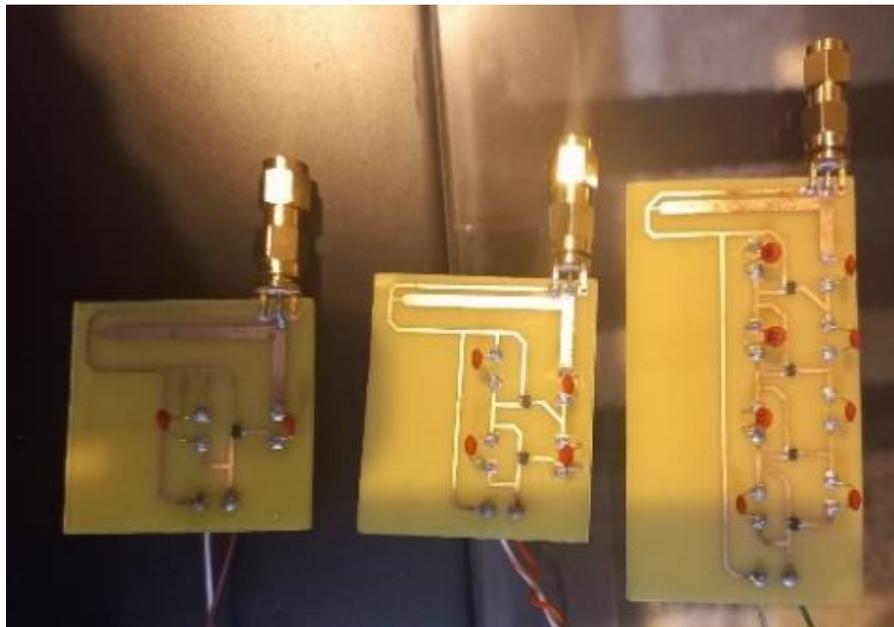
*Figura 26. Combinador Wilkinson Fabricado  
Elaborado por: Investigador*

Posteriormente se fabrican los 2 arrays de antenas Log- Periódicas.

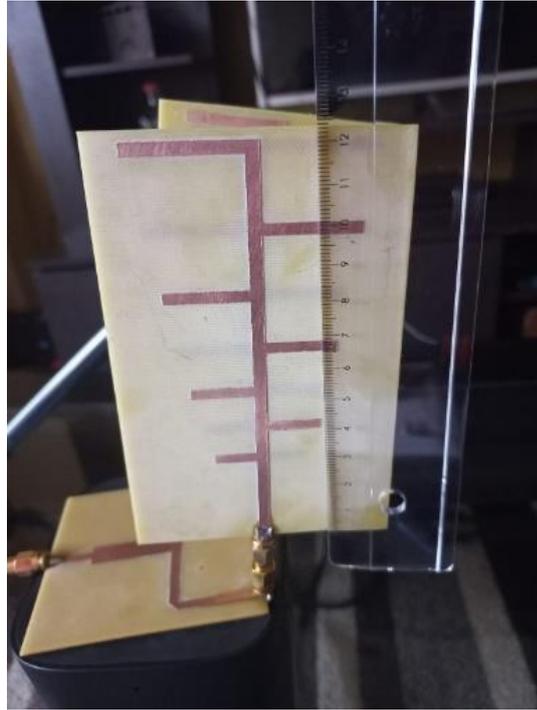


*Figura 27. Arrays de Antenas Log -Periódicas Fabricado  
Elaborado por: Investigador*

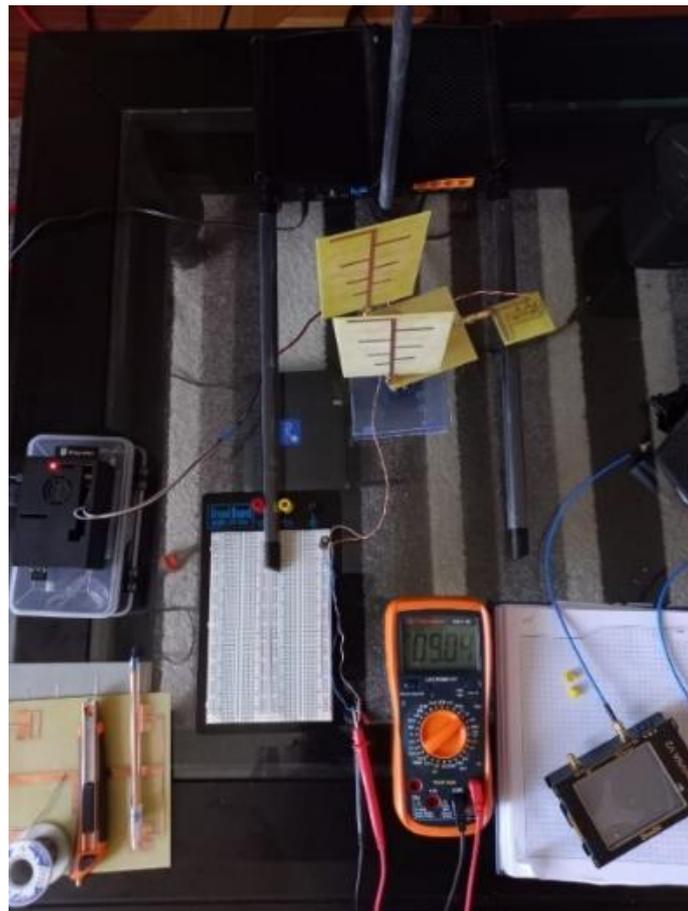
Como último paso se acopla el circuito captador de energía para la posterior medición de voltaje captado.



*Figura 28. Circuitos captadores de energía RF 1, 2 y 4 etapas [8]*



*Figura 29. Arrays de Antenas Log -Periódicas Fabricado con combinador  
Elaborado por: Investigador*



*Figura 30. Arrays de Antenas Log -Periódicas Fabricado con combinador y circuito captador de energía RF  
Elaborado por: Investigador*

En la Figura 30 se muestra el voltaje resultante de 9.04 Vdc del array de antenas inteligentes luego de 30 minutos de exposición a un dispositivo emisor de red WIFI a 2.4 GHz.



*Figura 31. Arrays de Antenas Log -Periódicas Fabricado con combinador y circuito captador de energía RF conector a NanoVna  
Elaborado por: Investigador*

#### **4.1.2.4. Configuración de Raspberry Pi 4 para localizar el ángulo de mayor potencia**

##### **Instalación de Python**

Python vienen preinstalados en los sistemas operativos Raspbian, pero para instalar por lo que se hace simple el comenzar la implementación del servo motor a la estructura de arrays de antenas.

Una vez implementado el sistema conjuntamente con el servomotor el programa Python se encargará de darle ángulos distintos al array de antenas hasta localizar el ángulo con mayor porcentaje de potencia y captación de energía RF.

<b>Características</b>	<b>Raspberry Pi4</b>	<b>Arduino</b>
<b>Procesador:</b>	Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz	Microchip, ATmega328P 8-bit AVR RISC Microcontroller
<b>Memoria:</b>	1GB, 2GB, 4GB or 8GB LPDDR4 (depending on model) with on-die ECC	256 KB Flash (8KB para bootloader), 8KB RAM y 4KB Eeprom
<b>Conectividad</b>	2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethernet 2 × USB 3.0 ports 2 × USB 2.0 ports.	USB
<b>GPIO:</b>	Standard 40-pin GPIO header (fully backwards-compatible with previous boards)	54 pines digitales (15 PWM) y 16 pines analógicos
<b>Video &amp; sonido:</b>	2 × micro HDMI ports (up to 4Kp60 supported) 2-lane MIPI DSI display port 2-lane MIPI CSI camera port 4-pole stereo audio and composite video port	N/A
<b>Multimedia:</b>	H.265 (4Kp60 decode); H.264 (1080p60 decode, 1080p30 encode); OpenGL ES, 3.0 graphics	N/A
<b>SD Card soporte:</b>	Micro SD card slot for loading operating system and data storage	N/A
<b>Entrada de Energía:</b>	5V DC via USB-C connector (minimum 3A1 ) 5V DC via GPIO header (minimum 3A1 ) Power over Ethernet (PoE)–enabled (requires separate PoE HAT)	5V
<b>Funcionamiento Temperatura</b>	0–50°C	–40°C to 85°C
<b>Producción lifetime:</b>	The Raspberry Pi 4 Model B will remain in production until at least January 2026.	N/A

*Tabla 4. Comparación de Raspberry Pi 4 vs Arduino  
Elaborado por: Investigador*

Las características técnicas de la tarjeta Raspberry Pi 4 vs las características de la tarjeta Arduino son muy diferentes, por lo que, se escoge la tarjeta Raspberry Pi 4 por sus múltiples especificaciones técnicas que garantizan el funcionamiento adecuado del servomotor y que para el trabajo de investigación se la adquiere para controlar el array de antenas inteligentes, las especificaciones están detalladas en la Tabla 4.

### **Servomotor en placa de vinilo**



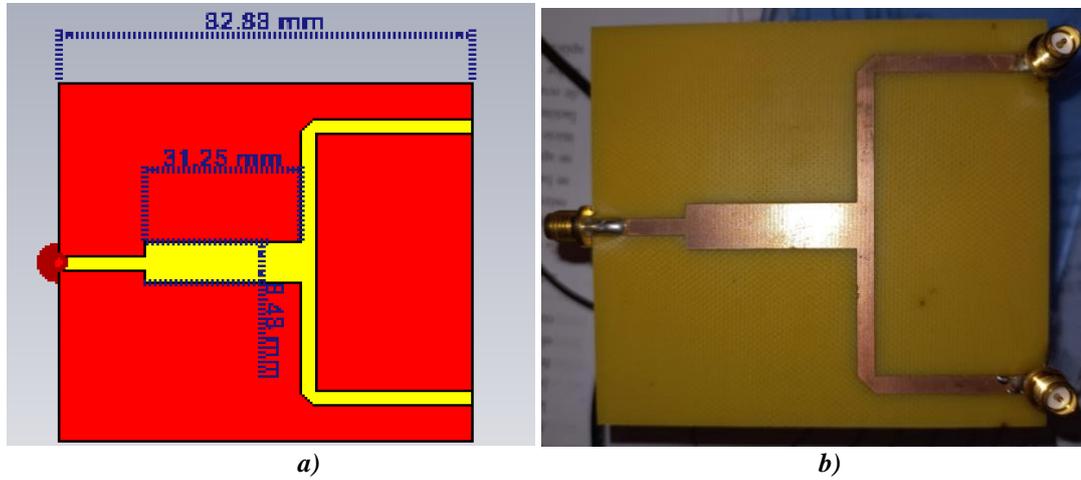
*Figura 32. Placa vinil soporte Servomotor  
Elaborado por: Investigador*



*Figura 33. Servomotor encargado de movimiento del array de antenas  
Elaborado por: Investigador*

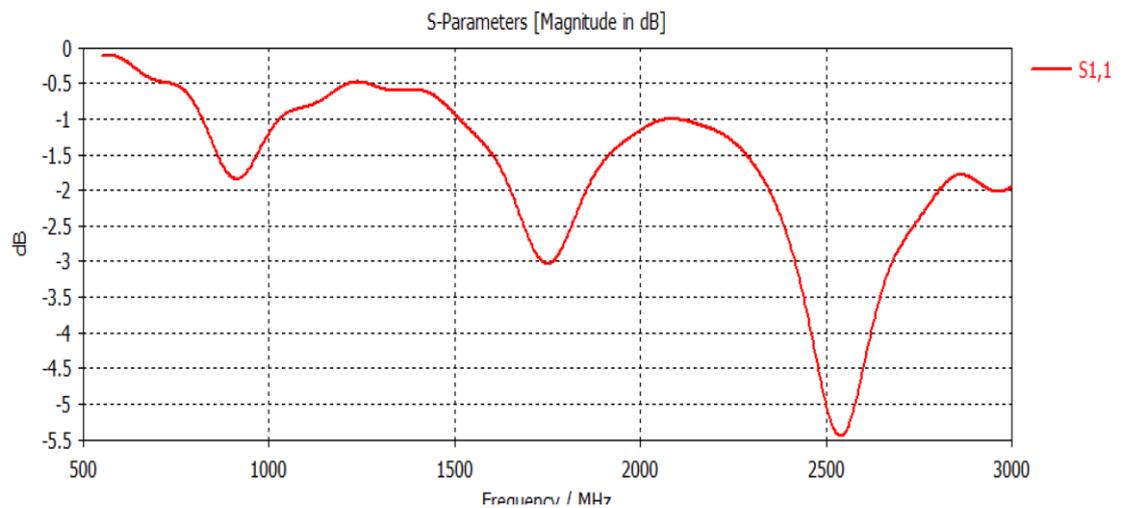
#### 4.1.2.5. Caracterización

Con los resultados del combinador Wilkinson simulado y fabricado se realizó una comparación en la Tabla 5:



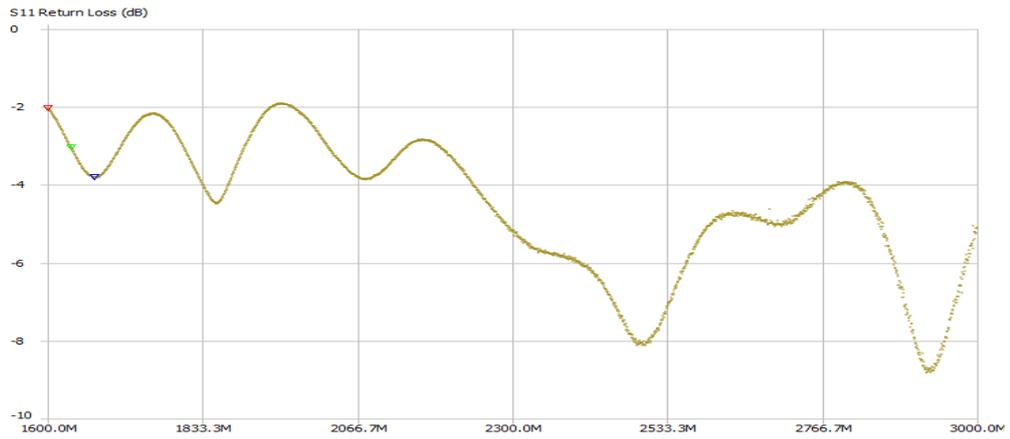
*Figura 34. Combinador/Divisor Wilkinson a) simulado y b) implementado  
Elaborado por: Investigador*

En la Figura 35 se muestra la frecuencia de resonancia del combinador Wilkinson simulado, diseñado para una frecuencia de 2.4 GHz.



*Figura 35. Parámetro S Combinador/Divisor Wilkinson simulado  
Elaborado por: Investigador*

En la Figura 36 se muestra la frecuencia de resonancia del combinador Wilkinson fabricado para una frecuencia de 2.4 GHz.

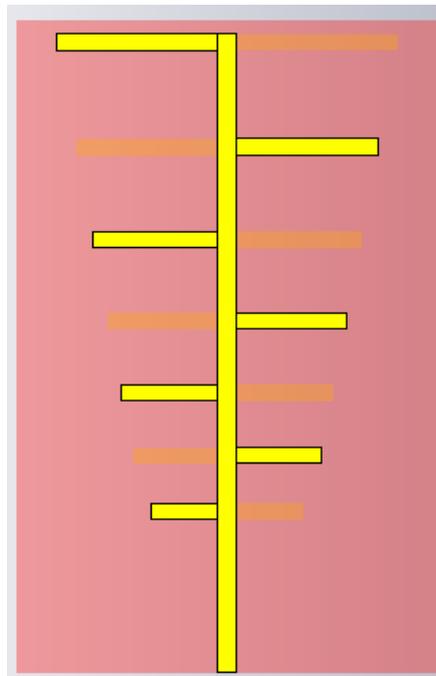


**Figura 36. Parámetro S Combinador/Divisor Wilkinson implementado**  
*Elaborado por: Investigador*

Comparación a 2.4 GHz	
Combinador Simulado vs Implementado (dB)	
Simulado	- 4 dB
Implementado	- 8 dB

**Tabla 5. Comparación a 2.4 GHz Combinador Simulado vs Implementado (dB)**  
*Elaborado por: Investigador*

En base al resultado se determinó que el Combinador implementado es más eficiente que en la simulación, por lo que los resultados son favorables para la investigación.



*Simulado*

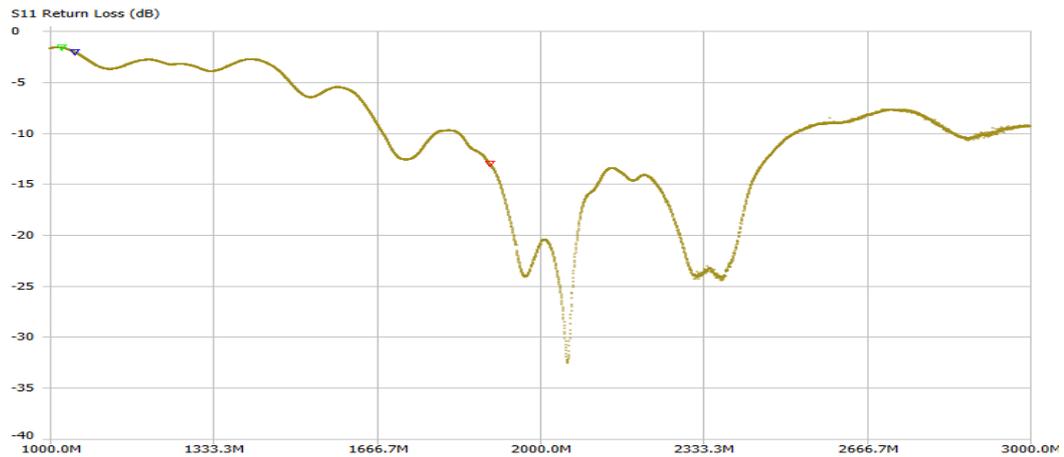


*Implementado*

**Figura 37. Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado simulado e implementado**  
*Elaborado por: Investigador*

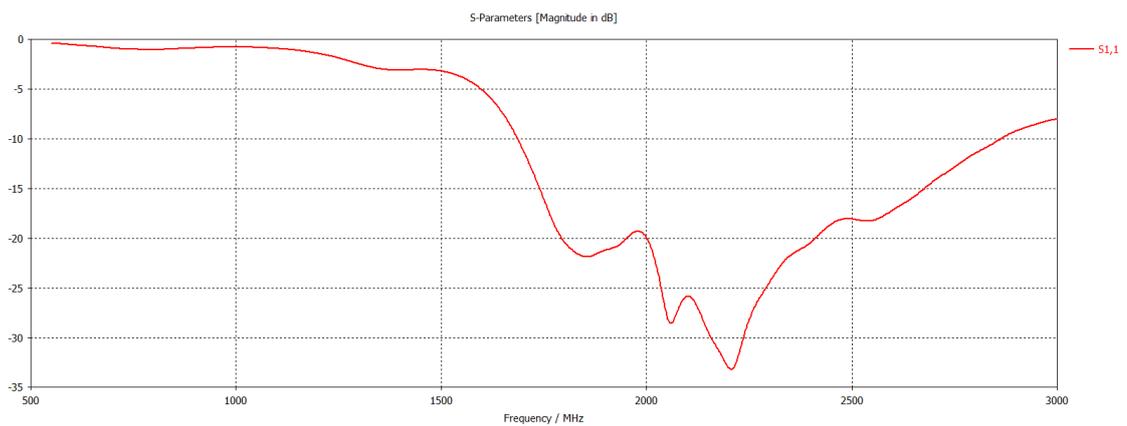
Con el medidor NanoVna se realiza la medición real del parámetro S del array de Antenas Log-Periódicas conjuntamente con el combinador con los siguientes resultados:

En la Figura 38 se muestra la frecuencia de resonancia del Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado fabricado.

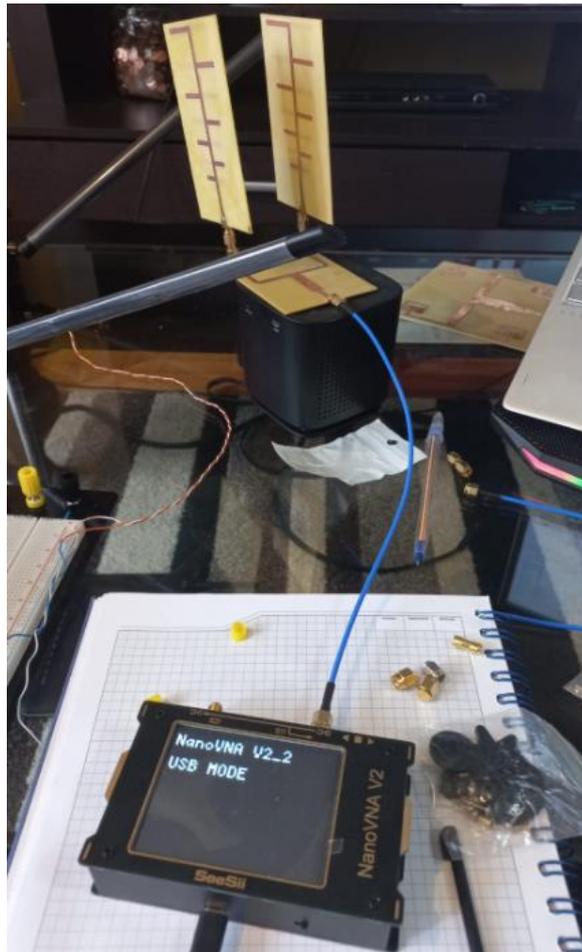


*Figura 38. Parámetro S Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado implementado  
Elaborado por: Investigador*

En la Figura 39 se muestra la frecuencia de resonancia del Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado simulado.

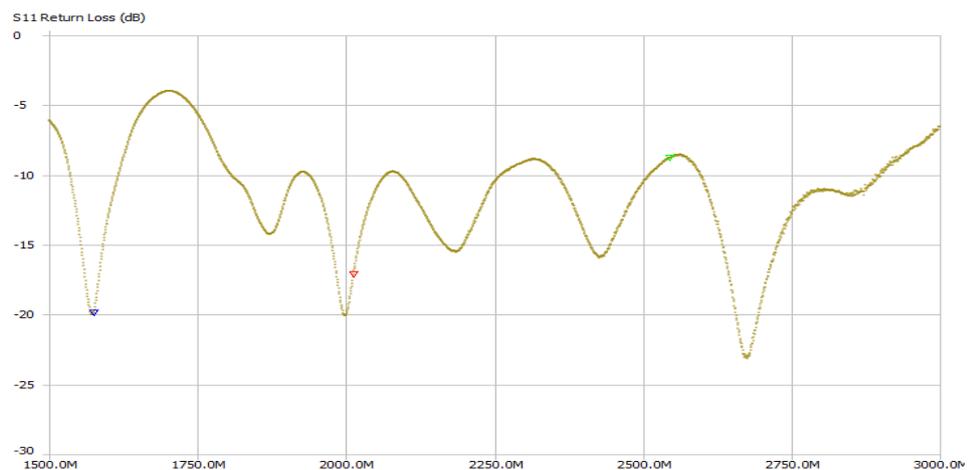


*Figura 39. Parámetro S Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado simulado  
Elaborado por: Investigador*



**Figura 40. Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado implementado conectado a NanoVna**  
**Elaborado por: Investigador**

En la Figura 41 se muestra la frecuencia de resonancia del Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado combinado fabricado.



**Figura 41. Medición Parámetro S Arrays de Antenas Log-Periódicas Optimizado implementado**  
**Elaborado por: Investigador**

<b>Características</b>	<b>NanoVna</b>	<b>MiniVna-TINY</b>
<b>Frecuencia:</b>	50kHz – 3000 MHz v1 50kHz – 4000 MHz v2	1-3000 MHz
<b>Calibración:</b>	open-short-load-true	open-short-load
<b>Conectividad</b>	USB 2.0 ports	USB 2.0 ports
<b>Display</b>	SI	NO
<b>Puertos:</b>	Two ports VNA	Two ports VNA
<b>Energía:</b>	5V	5V

*Tabla 6: Comparación NanoVna vs MiniVna-TINY  
Elaborado por: Investigador*

Existe una amplia gama de analizadores en el mercado, sin embargo, en este trabajo de investigación se utilizó NanoVna ya que presenta un display que permite la visualización de resultados sin requerir un computador.

#### **4.2. Análisis de Resultados**

Con los resultados alcanzados en la sección anterior a continuación se analizan los mismos:

##### **4.2.1. Análisis de resultados Antena Log-Periódica.**

En la medición práctica del array de antenas Log-Periódica individual se determina que la antena implementada posee un ancho de banda considerablemente mayor al simulado y se puede usar para la recolección de energía electromagnética en el rango de 1.6 GHz a 2.8 GHz, sin considerar, que en el diseño se estableció frecuencias entre 1.8 - 2.6 GHz, las frecuencias de resonancia de la antena se resumen en la Tabla 7 con sus respectivos anchos de banda, analizando los para metros S11 de acuerdo a los resultados obtenidos en la práctica.

<b>Frecuencia Inicial (GHz)</b>	<b>Frecuencia Final (GHz)</b>	<b>Ancho de Banda (GHz)</b>
<b>1.6</b>	<b>2.8</b>	<b>1.2</b>

*Tabla 7: Medición Antena Log-Periódica  
Elaborado por: Investigador*

Los resultados determinan que el diseño y la implementación de esta antena puede ser utilizada para las frecuencias de cobertura de 3G y WIFI para la óptima captación de energía electromagnética.

Para la Frecuencia de 1800 MHz:

$$\%error = \frac{|1666 - 1600|}{1600} * 100\% = 4.125\%$$

Para la Frecuencia de 2400 MHz:

$$\%error = \frac{|2433 - 2400|}{2400} * 100\% = 1.375\%$$

Se puede determinar que:

En una comparación con la simulación y lo obtenido en la práctica, se disminuye el ancho de banda de operación de la antena, ya que en lo simulado la frecuencia de operación iba desde los 1.6 GHz hasta los 2.8 GHz con un pico de resonancia de -33dB en la frecuencia de 2.2 GHz , sin embargo, en la práctica el valor de resonancia obtenido midiendo el parámetro S11 es igual a -33dB pero con un ancho de banda desde los 1.8 GHz hasta los 2.6 GHz, por lo que, se considera que para frecuencias más altas la antena implementada recolecta una mayor cantidad de energía electromagnética

A continuación, se muestra en la Tabla 8 las mediciones reales del array de antenas conjuntamente con el combinador:

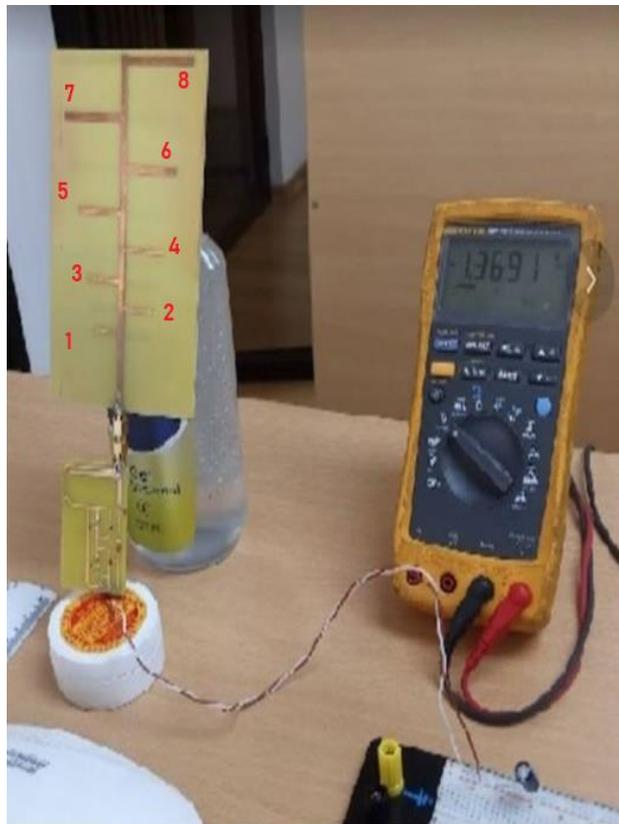
<b>Frecuencia Inicial (GHz)</b>	<b>Frecuencia Final (GHz)</b>	<b>Ancho de Banda (GHz)</b>
<b>1.750</b>	<b>1.950</b>	<b>0.2</b>
<b>1.975</b>	<b>2.1</b>	<b>0.13</b>
<b>2.150</b>	<b>2.250</b>	<b>0.1</b>
<b>2.3</b>	<b>2.5</b>	<b>0.2</b>
<b>2.6</b>	<b>2.9</b>	<b>0.3</b>

*Tabla 8: Medición Array de antenas conjuntamente con el combinador  
Elaborado por: Investigador*

#### 4.2.2. Comparación Antena con trabajo Similar

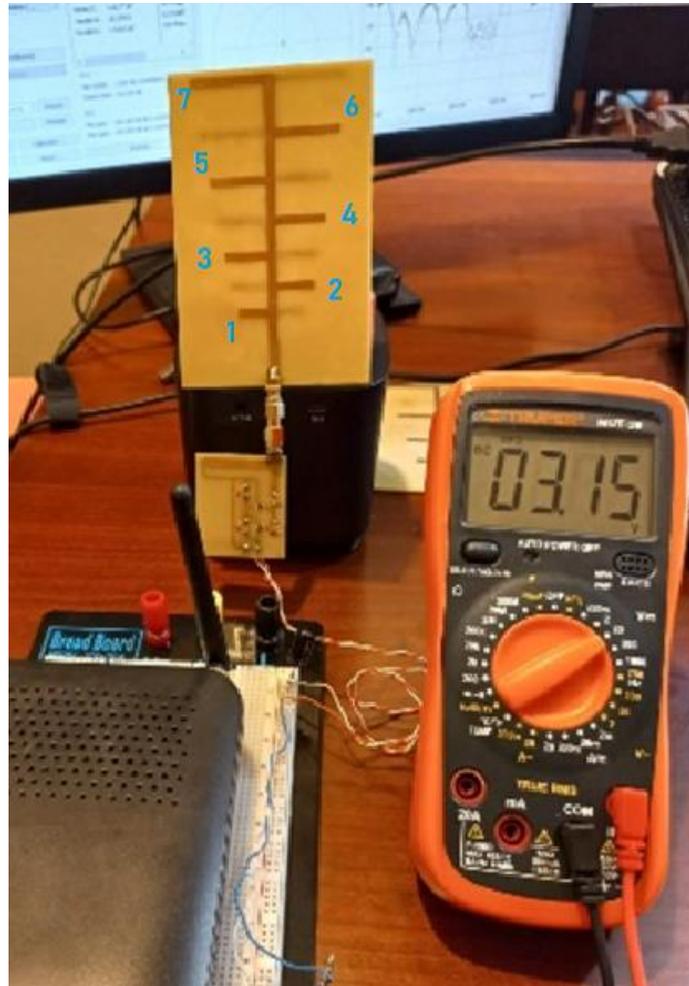
Para el proceso de Optimización del array de antena Log-Periódica, se usa como referencia el estudio realizado por el Ing. Félix Reinoso[1], donde elabora 1 antena tipo Log-Periódica, la cual sirve de base para comparar y analizar los resultados obtenidos en las mediciones con analizador NanoVna, en cuanto al parámetro S11, posteriormente se realiza las pruebas de recolección de energía electromagnética mediante el circuito de 2 etapas del trabajo de investigación realizado por el Ing. Darío Balarezo en su Investigación[8], las mediciones para el parámetro S11 en el caso del Ing., Félix Reinoso se utilizó el analizador MiniVna-TINY y para esta investigación se midió mediante el analizador NanoVna, sin embargo, para la medición de la recolección de energía electromagnética se utilizó el mismo circuito recolector con una fuente WIFI a 2.4 GHz.

En la Figura 42 se muestra la antena Log-Periódica de 8 elementos diseñada por el Ing. Félix Reinoso conjuntamente con el circuito recolector de energía electromagnética diseñada por el Ing. Darío Balarezo:



*Figura 42. Medición Antena Log-Periódica conectada al circuito de 2 etapas[1]*

En la Figura 43 se muestra la antena Log-Periódica de 7 elementos optimizada en esta investigación conjuntamente con el circuito recolector de energía electromagnética diseñada por el Ing. Darío Balarezo:



*Figura 43. Antena Log-Periódica optimizada conectada al circuito de 2 etapas[1]  
Elaborado por: Investigador*

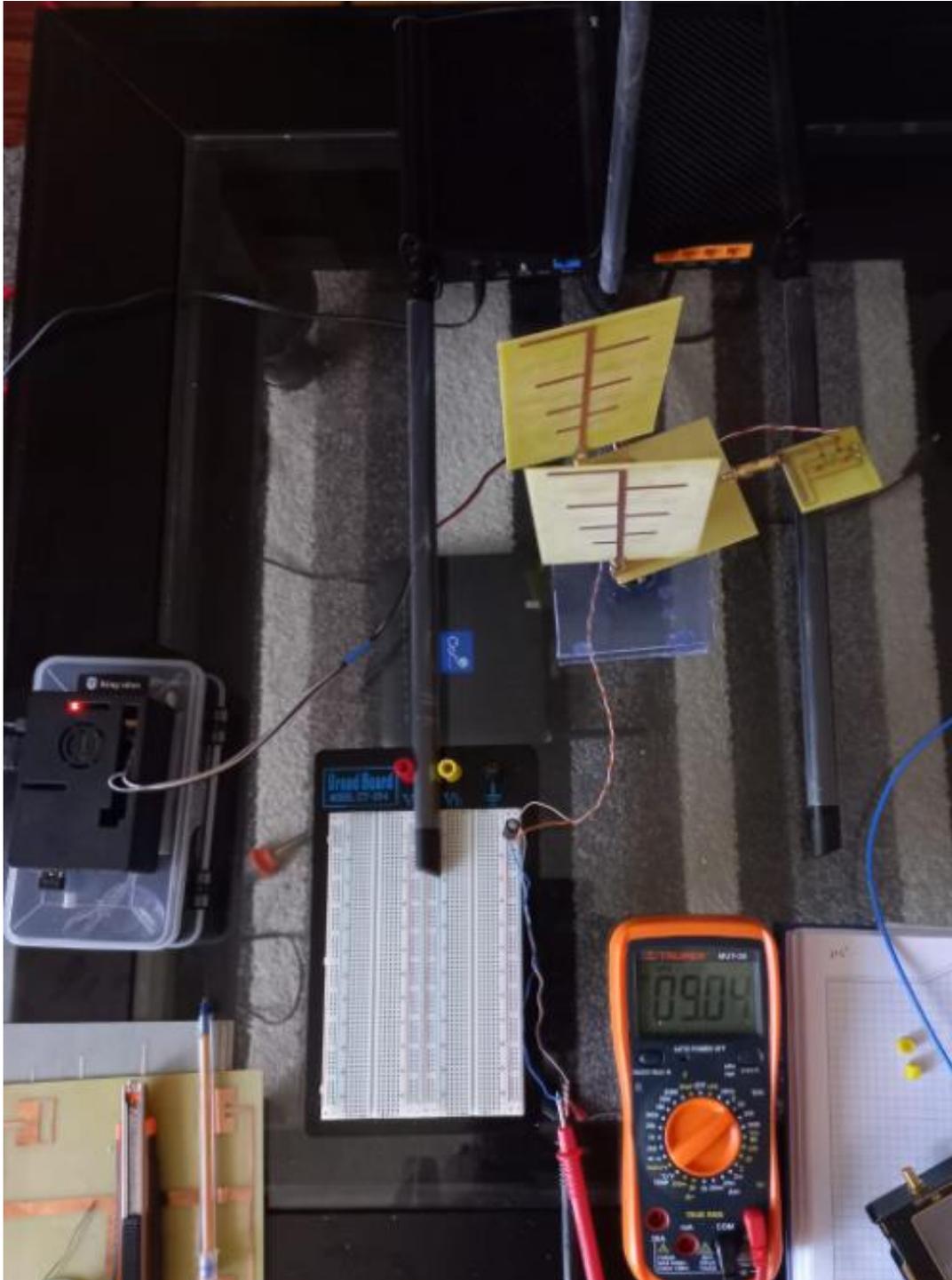
En la Tabla 9 se muestran los resultados de las antenas Log- Periódicas individuales:

<b>Etapa</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Voltaje Recolectado Investigación Ing. Félix Reinoso[1]</b>	<b>Voltaje Recolectado Investigación Actual</b>
<b>2</b>	30 min	1.437 Vdc	3.15 Vdc

*Tabla 9. Comparación de Resultados Recolección Energía Electromagnética Antena Log-Periódica  
Ing. Félix Reinoso vs Antenas Log-Periódicas investigación actual  
Elaborado por: Investigador*

Los resultados obtenidos por el array de antenas Log-Periódicas conjuntamente con el recolector de energía electromagnética y el acople al servomotor que varía el ángulo

de orientación de la antena para optimizar la captación de energía se observa en la Figura 44, la Red WIFI utilizada se indica en la Figura 45 y en la Tabla 8 se muestran las mediciones a continuación:



*Figura 44. Antena Log-Periódica conectada al circuito de 2 etapas[1]*

*Elaborado por: Investigador*

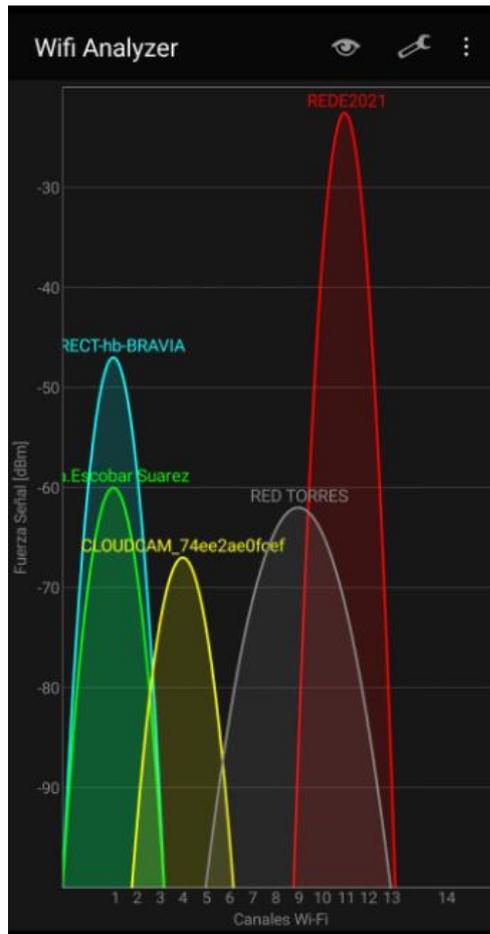


Figura 45. Medición Red WIFI mediante app Wifi Analyzer

Etapa	Tiempo	Voltaje Recolectado Investigación Ing. Félix Reinoso[1]	Angulo respecto al Router	Voltaje Recolectado Investigación Actual	Angulo respecto al Router
2	30 min	1.437 Vdc	N/A	9.04 Vdc	40°
2	30 min	1.437 Vdc	N/A	5.52 Vdc	0
2	30 min	1.437 Vdc	N/A	2.66 Vdc	90
2	30 min	1.437 Vdc	N/A	4.91 Vdc	180

Tabla 10. Comparación de Resultados Recolección Energía Electromagnética del Array de Antenas Log-Periódicas investigación actual vs antena Log-Periódica Ing. Félix Reinoso[1].  
Elaborado por: Investigador

## **5. CAPÍTULO V**

### **5.1. Conclusiones**

1. En el presente trabajo de investigación se implementó un array de antenas inteligente para la óptima captación de energía mediante un circuito captador de energía electromagnética de 2 etapas la frecuencia en las que trabaja el array de antenas se encuentra en 1.6 y 2.8 GHz, por lo que, se puede aprovechar las distintas redes celulares, así como las redes WIFI para la captación eficiente de energía RF para su posterior almacenamiento.
2. El array de antenas log-periódicas implementada muestra que la captación de energía electromagnética es posible utilizando el diseño e implementación adecuado y teniendo a la mano las diferentes herramientas y equipos para su desarrollo.
3. La optimización de la antena Log-periódica mejoró las características de la misma, tanto en tamaño individual como en recolección de energía electromagnética, por lo que, al utilizar el Software CST para este propósito se muestra claramente que las simulaciones y los valores obtenidos son fundamentales para una correcta fabricación.
4. El array de Antenas Log-Periódicas conjuntamente con el combinador incrementaron el ancho de banda utilizable de hasta 300 MHz por frecuencia resonante, esto mejora la captación de energía electromagnética al fijar las frecuencias que se encuentran presentes en el ambiente, para su posterior almacenamiento.
5. Se logra de esta manera optimizar el trabajo de investigación del Ing. Félix Reinoso [1] y aprovechar la investigación del Ing. Darío Balarezo[8] para la óptima captación de energía electromagnética mediante arrays de Antenas inteligentes.

### **5.2. Recomendaciones**

1. Al momento de la implementación de las antenas, se recomienda la medición práctica con equipos especializado, adicionalmente se debe contar con los equipos de cómputo con las capacidades requeridas para las simulaciones ya que estos procesos requieren grandes cantidades de recursos en memoria RAM y procesador.

2. Utilizar combinadores más precisos y analizar los resultados en comparación al combinar Wilkinson utilizado en este trabajo de investigación.
3. Analizar los procesos de miniaturización del presente trabajo de investigación para su desempeño en el IoT, ya que sus resultados favorables pueden servir en el desarrollo de terminales autosustentables por medio de la captación de energía electromagnética.
4. La energía electromagnética que se capta por medio del array de antenas puede ser ampliamente mejorado al incrementar de forma controlada el número de puertos en el combinador, esto a su vez incrementaría la posibilidad de tener varias fuentes de RF disponibles en un ambiente, lo que, causaría un incremento considerable en la captación de energía electromagnética para su posterior almacenamiento.
5. Dado que el sustrato del material del array de antenas inteligentes es importante en el momento de la fabricación se recomienda el análisis de materiales que incrementen el ancho de banda, así como la eficiencia.

### 5.3 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Reinoso, «“Optimización de antenas para sistemas de captación de energía electromagnética”», p. 94.
- [2] J. Anguera, «TEORÍA DE ANTENAS», p. 336.
- [3] A. O. Fernández, «Diseño y caracterización de un array de antenas en tecnología plana en la banda de 8GHz con polarización circular», p. 114.
- [4] D. Isbell, «Log periodic dipole arrays», *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 8, n.º 3, pp. 260-267, may 1960, doi: 10.1109/TAP.1960.1144848.
- [5] C. Baladines, *Antenna Theory*.
- [6] E. Universitat Politècnica de València, «Universitat Politècnica de València», *Ing. Agua*, vol. 18, n.º 1, p. ix, sep. 2014, doi: 10.4995/ia.2014.3293.
- [7] C. Rubiano y F. Castaneda, «Diseño, Optimización y Construcción de un Divisor Wilkinson», p. 6.
- [8] A. Balarezo, «“Optimización del sistema de acondicionamiento para un dispositivo de captación de energía electromagnética”», p. 86.
- [9] J. Martínez Moreno, A. S. Medina Vazquez, C. A. Bonilla Barragan, J. M. Villegas Gonzalez, y J. C. Aldaz Rosas, «Radio Frequency Energy Harvesting System Making Use of 180° Hybrid Couplers and Multiple Antennas to Improve the DC Output Voltage», *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, n.º 03, pp. 604-612, mar. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082733.
- [10] D. Schemmel y P. Nayeri, «A smart wireless energy harvesting system with adaptive beamforming and power management», en *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, USA, jul. 2017, pp. 1085-1086. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072585.
- [11] «Mavaddat et al. - 2015 - Millimeter-Wave Energy Harvesting Using \$4\times4\$.pdf».
- [12] A. M. Castillo, «Antenas para aplicaciones de captación de energía en la banda UHF», p. 69.
- [13] K. Olan, «Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas».
- [14] V. Dakulagi y M. Bakhar, «Advances in Smart Antenna Systems for Wireless Communication», *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 110, n.º 2, pp. 931-957, ene. 2020, doi: 10.1007/s11277-019-06764-6.
- [15] H. Campanella, A. Comas, y Y. Alba, «Antenas inteligentes con aplicación en SDMA», p. 7.
- [16] «Kausar et al. - 2016 - Energy efficient switched parasitic array antenna .pdf».
- [17] J. Zhang, Y. Huang, y P. Cao, «Harvesting RF energy with rectenna arrays», en *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Prague, Czech Republic, mar. 2012, pp. 365-367. doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206340.
- [18] «Balanis\_Antenna\_Theory\_Analysis and Design.pdf».
- [19] K. Guney y N. Sarikaya, «Resonant Frequency Calculation For Circular Microstrip Antennas With A Dielectric Cover Using Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System Optimized By Various Algorithms», *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 72, pp. 279-306, 2007, doi: 10.2528/PIER07031302.
- [20] M. A. D. Chia, «Diseño De Agrupación Lineal De Parches Microstrip Para Aplicaciones En Wifi (802 11a-N)», p. 125.

- [21] R. H. DuHamel y D. E. Isbell, «Broadband Logarithmically Periodic Antenna Structures», p. 10.
- [22] E. Avila, «Diseño, modelado, fabricación y medida de antenas impresas para comunicaciones inalámbricas», p. 259.
- [23] R. Carrel, «The Design of W-Periodic Dipole Antennas», p. 15.
- [24] S. Shibu, «Automatic Antenna Reorientation System for Affordable Marine Internet Service», p. 4.
- [25] R. C. Villar, «Diseño, construcción y prueba de un amplificador bidireccional para WiFi en 2,4 GHz», p. 22.
- [26] L. A. Perez, D. F. Sendoya, C. A. Vera, E. R. Bernal, y S. Campaña, «Método de elementos finitos para caracterizar antenas microstrip con diferente sustrato para sensores de alta temperatura», *Publicaciones E Investig.*, vol. 11, n.º 2, pp. 47-55, oct. 2017, doi: 10.22490/25394088.2788.
- [27] D. Pozar, *Microwave Engineering*, 4ta ed. Wiley.

## 5.4 ANEXOS

### 5.4.1 Instalación de Raspberry sobre base y componentes

En las Figuras 46, 47 , 48, 49 y 50 detallan el ensamblaje del ordenador Raspberry Pi 4, con sus partes y carcasa para su funcionamiento final:



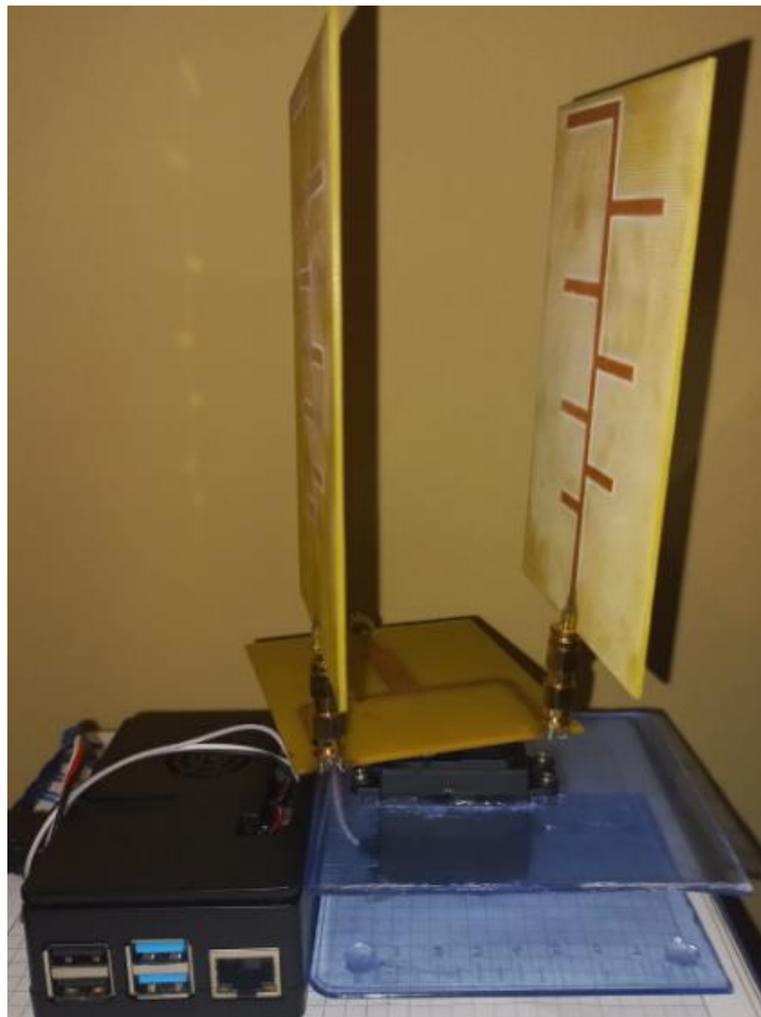
*Figura 46. Imagen del Ordenador de Placa Reducida Raspberry Pi 4  
Elaborado por: Investigador*



*Figura 47. Imagen del Ordenador de Placa Reducida Raspberry Pi 4 con su carcasa y acoplado su ventilador  
Elaborado por: Investigador*



*Figura 48. Imagen del Ordenador de Placa Reducida Raspberry Pi 4 con su carcasa y acoplado su ventilador junto al servomotor con el combinador Wilkinson acoplado  
Elaborado por: Investigador*



*Figura 49. Imagen Raspberry Pi 4 con el Array de Antenas Log - Periódicas  
Elaborado por: Investigador*

## 5.4.2 Instalación Linux en Raspberry Pi 4

La herramienta Raspberry Pi imager que se encuentra en la Web oficial de Raspberry es la que permite instalar el SO que se utilizará en la investigación, en la Figura 50, se muestra la pantalla principal la aplicación antes de proceder con la instalación de Linux:



*Figura 50. Raspberry Pi imager*

### Instalación de Python sobre Linux

En las versiones recientes de Rasbian ya se encuentra instalado el paquete Python, pero por motivos de investigación se corre el comando para su integración como se muestra a continuación:

En la línea de comandos se escribe:

Instala o actualiza Python 2: **sudo apt-get install Python**

### Código Fuente para movimiento de servomotor

Mediante la herramienta NANO que sirve para editar texto dentro de los proyectos de la carpeta de la raíz Python se inserta el código fuente para el movimiento del servomotor como se indica a continuación;

```

Import RPi.GPIO as GPIO
From time import sleep
ServoPIN = 17
GPIO.setmode (GPIO.BCM)
GPIO.setup (servoPIN, GPIO.OUT)
p = GPIO.PWM (servoPIN, 50)
p.start (0)

def SetAngle(angle):
    duty = angle / 18+2
    GPIO.output (servoPIN, True)
    p.ChangeDutyCycle(duty)
    sleep (0.5)
    GPIO.output (servoPIN, False)
    p.ChangeDutyCycle(0)
try:
        while True:
            value = int (input("Ingrese el Angulo:\n"))
            SetAngle (value)
except KeyboardInterrupt:
    p.stop()
    GPIO.cleanup()

```

```

GNU nano 3.2
import RPi.GPIO as GPIO
from time import sleep

servoPIN = 17
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(servoPIN, GPIO.OUT)
p = GPIO.PWM(servoPIN, 50) # GPIO 17 for PWM
p.start(0) # Initialization

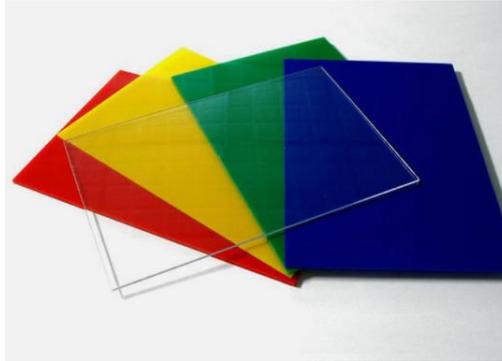
def SetAngle(angle):
    duty = angle / 18 + 2
    GPIO.output(servoPIN, True)
    p.ChangeDutyCycle(duty)
    sleep(0.5)
    GPIO.output(servoPIN, False)
    p.ChangeDutyCycle(0)

try:
    while True:
        value = int(input("Ingrese el Angulo:\n"))
        SetAngle(value)
except KeyboardInterrupt:
    p.stop()
    GPIO.cleanup()

```

*Figura 51. Imagen código implementado en Python  
Elaborado por: Investigador*

### 5.4.3 Corte acrílico para Base de Servomotor y Base



*Figura 52. Imagen acrílica utilizado para la base del trabajo de investigación.  
Elaborado por: Investigador*



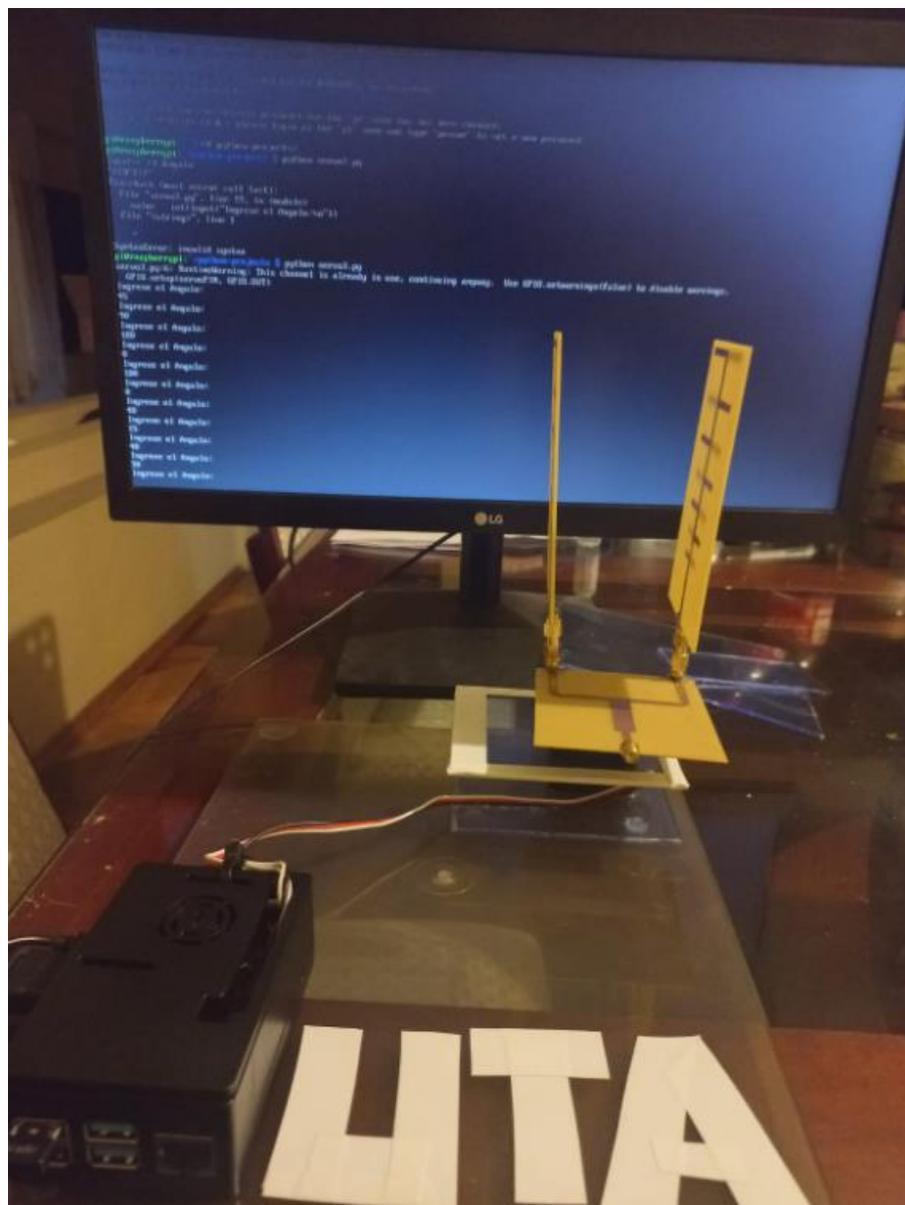
*Figura 53. Imagen acrílica para la base del motor  
Elaborado por: Investigador*

### 5.4.4 Manual de uso del programa desarrollado conjuntamente con el Arrays de Antenas Inteligentes para la Captación Óptima de Energía Electromagnética

El prototipo implementado se debe ensamblar según los siguientes pasos:

- 1.- Con los 2 Arrays de antenas Log-Periódicas y el combinador Wilkinson fabricados se las debe combinar por medio de uniones tipo macho/hembra SMA de ambos lados de las placas.
- 2.- Posteriormente se debe conectar el circuito recolector de energía electromagnética de 2 etapas desarrollado en la investigación del Ing., Darío Balarezo[8] para obtener el voltaje indicado en el presente trabajo de investigación.

- 3.- Para poder variar el ángulo de la antena respecto a la fuente de energía electromagnética, se debe acoplar el array de antenas ya armado al servomotor que es dirigido por el ordenador Raspberry Pi 4, para ello se debe cargar con anticipación el SO de la Raspberry para poder ejecutar el programa indicado en el numeral 7.4.
- 4.- Para poder ejecutar el programa se debe conectar un monitor y los periféricos (teclado y mouse) a la Raspberry, y proceder con la programación.
- 5.- Finalmente se puede variar el ángulo de acuerdo a la captación de energía que en este caso se determina por el voltaje a la salida del circuito captador de energía Electromagnética.



*Figura 54. Imagen Final de Array de Antenas  
Elaborado por: Investigador*