



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

Tema:

**SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA DE RF BASADO EN MATRIZ DE
RECTENNAS DIPOLOS LOGARÍTMICAS ESPIRALES**

Trabajo de Titulación Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones

ÁREA: Física y Electrónica

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnologías de Comunicación

AUTOR: Dario Bladimir Pillajo Iza

TUTOR: Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos. PhD

Ambato – Ecuador

septiembre - 2022

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación con el tema: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA DE RF BASADO EN MATRIZ DE RECTENNAS DIPOLOS LOGARÍTMICAS ESPIRALES, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Dario Bladimir Pillajo Iza, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 15 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y el numeral 7.4 del respectivo instructivo.

Ambato, septiembre 2022.

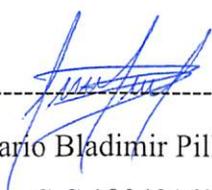
Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos. PhD

TUTOR

AUTORÍA

El presente Proyecto de Investigación titulado: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA DE RF BASADO EN MATRIZ DE RECTENNAS DIPOLOS LOGARÍTMICAS ESPIRALES es absolutamente original, auténtico y personal. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, septiembre 2022.



Dario Bladimir Pillajo Iza

C.C 1804816245

AUTOR

APROBACIÓN TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del Informe Final del Trabajo de Titulación presentado por el señor Dario Bladimir Pillajo Iza, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA DE RF BASADO EN MATRIZ DE RECTENNAS DIPOLOS LOGARÍTMICAS ESPIRALES, 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 Presidente del Tribunal.

Ambato, septiembre 2022.

Ing. Pilar Urrutia, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Julio Cují. Mg
PROFESOR CALIFICADOR

Ing. Fabián Salazar. PhD
PROFESOR CALIFICADOR

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, septiembre 2022.



Darío Bladimir Pillajo Iza

C.C 1804816245

AUTOR

DEDICATORIA

Este trabajo le dedico a Dios por darme inteligencia, fortaleza, paciencia en cada etapa de mi vida y llegar a este momento muy importante en mi formación profesional, por otorgarme salud, sabiduría, humildad para cumplir cada una de mis metas y anhelos, con toda mi fe permitiéndome llegar a cumplir un sueño más en mi vida.

A mis padres: María y Octavio por estar presentes en todo momento malo o bueno de mi vida, forjándome a ser un hombre con buenos sentimientos y valores, por haberme ayudado a no decaer y culminar mis estudios con sus consejos. Para mis abuelitos que desde el cielo me dan su bendición, guían mi caminar y me dieron su mejor experiencia y conocimientos de la vida.

A mi novia Tania por siempre darme sus ánimos, fe y confianza en Dios, su apoyo moralmente, comprensión, por ser la persona quien está conmigo en las buenas y malas reafirmandome el sentimiento de la frase "Juntos mi amor" y luchar a cumplir cada día mis sueños.

Dario Bladimir Pillajo Iza

Venciéndote te vencerás

AGRADECIMIENTO

A mi madre quien fue la persona que me motivo a continuar con mis estudios y a mis abuelos que en paz descansen, pioneros de darme la educación y conocimiento de la vida. Agradezco a Dios por cada día bendecirme.

A cada uno de los Ingenieros que me formaron en cada nivel y me brindaron sus conocimientos y guía de aprendizaje en la carrera Electrónica y Comunicaciones.

A mi tutor Ing. Carlos Gordón por su ayuda permanente durante el desarrollo de la tesis, sus conocimientos y brindarme paciencia para cumplir el proyecto y a su arduo trabajo que desempeña como docente y persona.

A mis amigos, compañeros que durante este trayecto compartimos largas jornadas de clase y vivencia juvenil conjuntamente apoyándonos en la formación profesional y personal y ser una familia de seres mirando hacia el futuro, gracias a ellos porque en mi mente permanece los bellos recuerdos.

Dario Bladimir Pillajo Iza

ÍNDICE GENERAL

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA	iii
APROBACIÓN TRIBUNAL DE GRADO	iv
DERECHOS DE AUTOR.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN EJECUTIVO	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN.....	xvii
CAPITULO I.....	19
MARCO TEORICO.....	19
1.1 TEMA	19
1.2 Antecedentes Investigativos	19
1.3 Contextualización del problema	22
1.4 Fundamentación Teórica	23
1.4.1 Espectro electromagnético	23
1.4.4 Antena	26
1.4.5 Parámetros fundamentales de antena	26
1.4.6 Antena Microstrip	30
1.4.7 Técnicas de alimentación	31
1.4.8 Alimentación de línea coaxial	32
1.4.9 Antena Logarítmica: espiral	33

1.4.10	Rectenna.....	34
1.4.11	Arreglo de antenas	34
1.4.12	Teoría para el mecanismo de arreglo de antenas.	35
1.4.13	Parámetros de Dispersión S.....	37
1.4.14	Concepto de Energy Harvesting.....	37
1.4.15	Método de rectificación	38
1.4.16	Efecto de la constante Dieléctrica	42
1.4.17	Influencia del Sustrato	43
1.5	Objetivos	43
1.5.1	General.....	43
1.5.2	Específicos	43
CAPITULO II.....		44
METODOLOGIA.....		44
2.1	Materiales	44
2.2	Métodos.....	44
2.2.1	Modalidad de la investigación.....	44
2.2.2	Recolección de la información	44
2.2.3	Procesamiento y análisis de datos	45
2.2.4	Desarrollo del proyecto.....	45
CAPITULO III		46
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		46
3.1	Análisis y discusión de resultados	46
3.2	Diseño del prototipo.....	46
3.3	Parámetros para el diseño de la matriz de antena en el software CST Studio.	50
3.4	Diseño de la matriz de la antena logarítmica espiral.	53
3.5	Diseño y construcción del circuito	61
3.6	Pruebas de funcionamiento	63

3.7	Comparación de valores medidos y simulados.	66
3.8	Acoplamiento y análisis del circuito rectificador/multiplicador de voltaje con la matriz de antenas logarítmica espiral.	68
3.9	Pruebas de almacenamiento	71
3.10	Figura de almacenamiento con batería recargable.....	74
3.11	Presupuesto.....	82
CAPÍTULO IV		85
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		85
4.1	Conclusiones.....	85
4.2	Recomendaciones	86
Bibliografía.....		87
ANEXOS.....		92
ANEXO 1: PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA MATRIZ DE ANTENAS.....		92
ANEXO2: PROCESO DE FABRICACIÓN DEL RECTIFICADOR/MULTIPLICADOR.....		94
ANEXO 3: DATASHEET DIODO SCHOTTKY HSMS286 SERIE X.....		96
ANEXO 4: MANNUAL DEL ANALIZADOR MININVATINY		101
ANEXO 5: FOTOGRAFÍAS DEL FUNCIONAMIENTO Y LA PRUEBA DE ALMACENAMIENTO.....		103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Electromagnético	23
Figura 2. Campos eléctrico, magnético y dirección de propagación	25
Figura 3. Sistemas de coordenadas para análisis de antenas	27
Figura 4. Lóbulos de radiación y ancho de haz de un patrón de campo eléctrico de antena	28
Figura 5. Patrón de radiación 2D con lóbulos y ancho de haz	29
Figura 6. Microstrip antena patch	31
Figura 7. Técnicas de alimentación en antenas de parche microstrip	32
Figura 8. Alimentación Coaxial.....	33
Figura 9. Alimentación de la espiral equiangular plana.....	34
Figura 10. Representación gráfica del margen visible	36
Figura 11. Diagrama de bloque de un Sistema Energy Harvesting	37
Figura 12. Rectificador de media onda	39
Figura 13. Efecto producido por el rectificador de media onda a la señal	39
Figura 14. Rectificador de onda completa	39
Figura 15. Efecto producido por el rectificador de onda completa a la señal	40
Figura 16. Curva del diodo Schottky	40
Figura 17. Sistema para cosecha de energía con fuente y carga.....	41
Figura 18. Rectificador/Multiplicador de tensión.....	42
Figura 19. Parámetros fundamentales para la fabricación de la antena espiral auto-complementaria.....	47
Figura 20. Creación de nuevo proyecto	51
Figura 21. Selección de la antena tipo parche	51
Figura 22. Selección del dominio de trabajo para la matriz de antena	52
Figura 23. Selección para el rango de frecuencia	52
Figura 24. Modelado para el diseño de la matriz de antena	53

Figura 25. Modelado de la antena logarítmica espiral conforme a los cálculos rediseñados	53
Figura 26. Parámetro S ₁₁ de la antena logarítmica espiral.....	54
Figura 27. Parámetro VSWR de la antena logarítmica espiral.....	54
Figura 28. Modelado de la matriz de 2x1 de la antena logarítmica.....	55
Figura 29. Parámetro S ₁₁ de la matriz 2x1 antena logarítmica espiral	55
Figura 30. Parámetro VSWR de la matriz 2x1 antena logarítmica espiral	56
Figura 31. Modelado de la matriz de la antena logarítmica	56
Figura 32. Parámetro S ₁₁ de la matriz antena logarítmica espiral	57
Figura 33. Parámetro VSWR de la matriz antena logarítmica espiral	57
Figura 34. Vista del campo lejano	58
Figura 35. Vista del campo Eléctrico.....	59
Figura 36. Vista del campo Magnético	59
Figura 37. Vista del patrón de radiación tridimensional.....	59
Figura 38. Esquema del circuito multiplicador diseñado en Proteus.....	60
Figura 39. Diseño en PCB.....	61
Figura 40. Prototipo fabricado de la matriz de antenas logarítmica espiral.....	62
Figura 41. Placa en baquelita de cobre	63
Figura 42. Analizador de antena MiniVNA- Tiny.....	64
Figura 43. Conector SMA hembra.....	65
Figura 44. Resultado S ₁₁ de la matriz de antenas logarítmica espiral	65
Figura 45. Gráfica de S ₁₁ de la matriz de antenas logarítmica espiral.....	66
Figura 46. Salida de voltaje directa empleando la matriz de rectenna logarítmica espiral	68
Figura 47. Salida de voltaje directa empleando la matriz de rectenna logarítmica espiral	69
Figura 48. Salida de voltaje directa empleando la matriz de rectenna logarítmica espiral	70

Figura 49. Medición de voltaje:.....	70
Figura 50. Antenas logarítmicas espirales a comparar	73
Figura 51. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en el ambiente frente a un módem de internet.....	75
Figura 52. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en la biblioteca.....	75
Figura 53. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en el ambiente frente a las antenas offset.....	76
Figura 54. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en el ambiente frente a un módem de internet.....	77
Figura 55. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en la biblioteca.....	78
Figura 56. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en el ambiente frente a las antenas offset.....	79
Figura 57. Voltaje almacenado en el ambiente frente internet de módem.....	80
Figura 58. Voltaje almacenado en el ambiente en de la biblioteca	81
Figura 59. Voltaje almacenado en el entorno frente a las antenas offset.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Espectro Electromagnético	24
Tabla 2. Propiedades de los Sustratos.....	43
Tabla 3. Parámetros esenciales para el diseño de la matriz de antena.....	48
Tabla 4. Resultados sobre los cálculos realizados para los parámetros de la antena logarítmica espiral.....	50
Tabla 5: Almacenamiento en la batería de 9V con la matriz de antena logarítmica espiral	71
Tabla 6: Almacenamiento en la batería de 3.6 V con la matriz de antena logarítmica espiral	72
Tabla 7: Comparativa de trabajos previos dentro de la UTA.....	74
Tabla 8: Presupuesto de fabricación de la matriz rectenna logarítmica espiral.	83

RESUMEN EJECUTIVO

El constante aumento de la demanda de producción energética a nivel mundial y su panorama de suministro en campos como la ciencia y tecnología, más específico en dispositivos móviles, ha incentivado el desarrollo de sistemas de captación de energía electromagnética o conocido también “Energy Harvesting” aplicado a RF, permitiendo sea amigable con el medio ambiente, previo a investigaciones del funcionamiento y uso que se dan mediante esta tecnología. Por consiguiente, el presente proyecto muestra el desarrollo, diseño, simulación y fabricación de una matriz de antenas logarítmicas espirales para el sistema de captación de energía electromagnética independientes de la frecuencia, compactas en tecnología microstrip, de bajo coste y que funciona dentro de un rango de frecuencias 1 a 4 GHz, para su diseño se utilizó el software CST Studio y fabricada sobre el sustrato RF4 con un grosor de 1.6 mm, una constante dieléctrica de 4.4 y una impedancia de entrada de 50 Ω . La matriz de rectennas logarítmicas espirales con dimensiones de 190 x 210 mm, resuena en múltiples frecuencias desde 900 MHz hasta 4 GHz, con la frecuencia centralizada a 2.4GHz con su ganancia obtenida de 3.472 dB y con un rango de pérdidas de -12 dB, dando un buen rendimiento para aplicaciones de captación de energía electromagnética que operan en frecuencias estándar como GSM, Wi-Fi, LTE las cuales están disponibles en el entorno y permite cosechar su energía. Para la obtención de energía eléctrica como parte del diseño matriz de rectennas consta de un rectificador de frecuencia el cual se optimiza con la aplicación del diodo Schottky HSMS serie 286x, seguidamente se ejecutaron pruebas de funcionamiento y validación del prototipo utilizando el instrumento de espectros miniVNA Tiny para finalmente realizar pruebas de almacenamiento de energía en distintos entornos donde existe presencia de redes Wi-Fi.

Palabras clave: Recolección de energía, antena espiral. electromagnética, microstrip, multibanda.

ABSTRACT

The constant increase in the demand for energy production worldwide and its supply panorama in fields such as science and technology, more specifically in mobile devices, has encouraged the development of systems for capturing electromagnetic energy or also known as "Energy Harvesting" applied to RF, allowing it to be friendly to the environment, prior to investigations of the operation and use that occur through this technology. Therefore, this project shows the development, design, simulation and manufacture of a logarithmic spiral antenna array for the electromagnetic energy collection system independent of frequency, compact in microstrip technology, low cost and that works within a range of frequencies 1 to 4 GHz, for its design the CST Studio software was used and manufactured on the RF4 substrate with a thickness of 1.6 mm, a dielectric constant of 4.4 and an input impedance of 50 Ω . The resonator structure antenna with dimensions of 190 x 210 mm. The frequencies achieved with the rectenna matrix, since it offers good performance for electromagnetic energy harvesting applications that operate in standard frequencies such as GSM, Wi-Fi, LTE which are available in the environment and allows harvesting its energy at all times. To obtain electrical energy as part of the design of a frequency rectifier which is optimized with the application of the HSMS 286x series Schottky diode. In addition, its construction of the rectenna matrix was carried out based on the proposed design, then performance tests and validation of the prototype were carried out using the miniVNA Tiny spectrum verifier to finally carry out energy storage tests in different environments through Wi-Fi networks.

Keywords: energy harvesting, spiral antenna. electromagnetic, microstrip, multiband.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversos estudios que formulan la importancia de adquirir energía alternativa y sustentable para alimentar los diferentes dispositivos electrónicos de baja potencia, con la finalidad de que estos alcancen autonomía, asimismo que la energía utilizada sea amigable y no genere efecto con la contaminación del medio ambiente. Una de las más conocida y cuya investigación va en auge es la llamada “Energy Harvesting”, la cual consiste en el proceso de extraer energía presente en el entorno para producir energía eléctrica para posteriormente almacenar y utilizar en dispositivos de bajo consumo, en el presente proyecto de investigación se implementa el uso de una matriz de rectenna logarítmica espiral para captar energía electromagnética, el mismo permite tener una fuente de energía alternativa para cargar una batería a transistor o de corriente continua recargable, de tal forma se pretende evitar el consumo frecuente del uso de cargadores convencionales y también pueda ser operado en zonas donde la cobertura es mínima, esto debido a la necesidad de la instalación de infraestructura. El desarrollo del trabajo está basado en la investigación bibliográfica referente al método de Energy Harvesting orientado en RF, además se empleó la investigación experimental para determinar las condiciones que permitan obtener energía eléctrica y en que magnitud se le puede obtener.

A continuación, se presenta una breve descripción del trabajo con el siguiente esquema:

Capítulo I. Se presenta un marco teórico orientado con la importancia de contar con un sistema de captación de energía y la funcionalidad constante de los dispositivos móviles. En esta sección se plantean los objetivos, por medios de los cuales se determina el alcance y las necesidades del proyecto.

Capítulo II. Se presenta el desarrollo del marco metodológico, por la cual se define la justificación, la modalidad de investigación, la manera en que se recolecto y proceso la información para el avance de la respectiva propuesta.

Capítulo III. En este capítulo, la información recolectada fue analizada y discutida, la cual permite visualizar la viabilidad técnica, económica y bibliográfica, de igual manera la descripción del sistema, el diseño y el esquema en general para del proyecto. Se incluye la parte diagnóstica, requerimientos técnicos necesarios, elección de la tecnología y

equipamiento apropiado. Finalmente se propone el diseño, elaboración e implementación del prototipo de rectennas logarítmicas espirales.

Capitulo IV. Finalmente, en este capítulo se plantearon las conclusiones en base a los objetivos y las recomendaciones sugeridas para la implementación del proyecto que servirán de ayuda a elaboraciones futuras y sus investigaciones similares.

.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1 TEMA

“SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA DE RF BASADO EN MATRIZ DE RECTENNAS DIPOLOS LOGARÍTMICAS ESPIRALES”

1.2 Antecedentes Investigativos

Se realizó una búsqueda de documentación que ayuden a la realización del presente proyecto mediante artículos científicos, repositorios bibliográficos de universidades existentes a nivel nacional, en las cuales ha permitido determinar el tema reciclaje de energía y empezar en el desarrollo del proyecto relacionado a sistemas de captación de energía de radiofrecuencia, mediante el uso de rectennas logarítmicas espirales:

José Mezquita en el año 2015, presenta su trabajo de titulación: DISEÑO DE ANTENAS COMPACTAS PARA APLICACIONES DE ENERGY HARVESTING. Trabajo previo a la obtención del título en Ingeniería de sistemas de Telecomunicación, Sonido e Imagen. En la Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Comunicaciones. El presente proyecto se enfoca en el estudio sobre: la teoría, el diseño, la implementación y medición de una Rectenna con el objetivo de captar energía de la banda de 2.4Ghz. En primera instancia se investigó sobre la teoría del diseño de antenas planas y rectificadores, para diseñarlos adecuándolos a nuestras necesidades, se ha simulado con el software comercial CST para verificar la parte teórica y cumpla el objetivo marcado. Finalmente se implementara conjuntamente estos circuitos (antena y rectificador) para obtener el prototipo que serán construidos y montados con materiales adecuados, por ultimo probados y calibrados con los correspondientes aparatos de medida, y se comprobó los resultados de la simulación con las resultados obtenidos de las mediciones reales en el prototipo [1].

David Zavala en el año 2018, presenta su trabajo titulado: ESTUDIO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CAPTACION DE ENERGIA RF EN REDES WSN. Trabajo previo a la obtención del título en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. El presente trabajo describe el estudio y desarrollo de un sistema de recolección de energía de radiofrecuencia de la banda en los 868MHz, normalmente el sistema está estructurado de 4 etapas que son: Antena es la estructura encargada de recolectar la energía y transmitir al circuito rectificador. Circuito de acoplamiento que es un circuito resonante y opera en una frecuencia dada para maximizar la transferencia de potencia. Circuito multiplicador-rectificador se encarga de rectificar y aumentar el voltaje y por último el Circuito de nivelación. Finalmente, se realizan simulaciones y un análisis experimental del circuito impreso, conectando los diferentes circuitos del sistema de recolección, mediante este proceso se demuestra el funcionamiento del sistema conjuntamente con sus ventajas y limitaciones [2].

Andry Contreras & Maryory Urdaneta en el 2020, presenta su trabajo titulado: RECTENNAS FOR ENERGY HARVESTING FROM RF COMMUNICATION SYSTEMS de la Universidad del Zulia - Facultad de Ingeniería, el objetivo que conlleva esta investigación presenta el desempeño de las rectennas utilizadas en los sistemas de comunicación en radiofrecuencia que recolectan energía de los sistemas de telefonía móvil, con el propósito de reconocer las distintas etapas conformadas para dicha fuente de energía, de tal manera se realizó investigaciones documentales en artículos sobre rectenas y como un resultado importante la antena más utilizada en estos sistemas es la monopolo con parche rectangular, así mismo el rectificador más usado es el doblador de voltaje obteniendo una eficiencia máxima de conversión RF-DC de 93%, también se da a conocer que el elemento de interconexión más utilizado es el acoplador de impedancia de sección L convencional con una eficiencia máxima obtenida del 87% para el sistema WLAN a frecuencia de 2.45 GHz. Como una conclusión importante para futuras investigaciones se plantea establecer criterios particulares en cada aplicación permitiendo así un mejor rendimiento y alcanzar una mayor eficiencia de conversión y recolectar más energía [3].

José Águila en el año 2020, presenta el trabajo titulado: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ARREGLO DE ANTENAS IMPRESAS PARA MICROONDAS. El presente trabajo de investigación manifiesta que emplear arreglos de antenas mejora la resolución, la ganancia y la relación señal a ruido obtenidas respecto a una sola antena. Controlando la distribución de amplitudes, fases de la señal de excitación, de la misma manera la geométrica del arreglo.

Se desarrolla un demostrador de arreglo plano 4x4 elementos, basados en antenas impresas, donde se estudiaron previamente antenas tipo parche, seguidamente se partió de las simulaciones electromagnéticas considerando el prototipo de antena Vivaldi doble, es así que la optimización para el desempeño del arreglo se enfocó en el estudio de acoplamiento entre elementos, separado por simplicidad en los planos fundamentales de radiación E y H, analizando varias técnicas para el acoplamiento adecuado. Este método se basa en introducir cortes transversales a la dirección del flujo de corriente entre las antenas. Finalizando el proceso de optimización, fabricando el arreglo de antenas en conjunto con un bastidor para suministrar soporte mecánico el cual fue medido en una cámara anecoica rectangular dando resultados apropiados con respecto al patrón de radiación, adaptación de impedancia y polarización [4].

Edison Zapata y otros autores en el año 2021, presentan el trabajo titulado: SIMULATION OF A RECTANGULAR SPIRAL MICROSTRIP MULTIBAND ANTENNA FOR RADIO FREQUENCY ENERGY HARVEST, El presente trabajo analiza la influencia de las variaciones en el espesor del sustrato dieléctrico y la posición de las ranuras de microcinta creadas en el parche radiante de una antena de microbanda, utilizando el software CST Studio con la simulación de una antena para la recolección de energía RF. El material del sustrato hecho con ARLON AD450 la cual conlleva un constante dieléctrica de 4.5, pérdida tangencial de 0.035 y espesor de 3mm. En el resultado se presenta lo siguiente: al aumentar el espesor del sustrato el cual separa el plano de tierra del parche radiante, la pérdida de retorno del parámetro se reduce y paralelamente la ganancia de la antena se aumenta. Al cortar las ranuras, su grosor y cambiar la ubicación del parche radiante, produce un cambio en la frecuencia de resonancia de la antena. Dicho diseño presento mejoras en el patrón de radiación y en la ganancia.

La creación de ranuras en el parche radiante modifico la distribución de corriente superficial de la antena generando nuevas frecuencias de resonancia, por otra parte, el espacio del aire producido entre el cobre y el sustrato mejoro el rendimiento de la antena, así mismo el espacio creado por el sustrato entre el plano de tierra y el parche radiante hizo que disminuyera las pérdidas en ganancia de la antena debido a la reducción del cobre. Dicha antena presento un comportamiento multibanda debido a la agregación de las ranuras al parche. A recalcar que es útil para desarrollar antenas de microcinta el sustrato y su estructura para sistemas de recolección de energía RF [5].

1.3 Contextualización del problema

En la actualidad la recolección de energía ofrece un recurso para la alimentación de dispositivos IoT a través del uso de la energía aprovechable del entorno. Por lo que países en constante avance tecnológico acogen interés en los recursos de energía alternativa, siendo así el aprovechamiento en tecnologías como térmica, solar, piezoeléctrica y recolección de energía RF [6]. En las últimas décadas la tecnología va en constante crecimiento hacia el descubrimiento y desarrollo de variables las cuales permitan reducir el consumo de combustibles fósiles. Hoy en día gana popularidad en referencia a los años pasados reemplazando así la batería y mejorando costos de mantenimiento, donde se ha llevado a cabo varios diseños como matrices y rectennas de banda única, rectenna multibanda y rectenna banda ancha. La recolección de energía inalámbrica mediante el uso de tecnología de rectennas es una solución viable para convertir la potencia de RF ambiental a una potencia de DC utilizable [7].

La captación de energía puede ser de diversos tipos entre los cuales se distinguen la energía solar, de luz, eólica, de temperatura, de movimiento y energía electromagnética [8]. Denominadas fuentes de energía amigable con el medio ambiente, de las fuentes antes nombradas, la energía electromagnética tanto en interiores como en exteriores están disponibles todas horas en diferentes bandas de frecuencia, puesto que el crecimiento notable de las instalaciones inalámbricas comerciales y personales conlleva a la captación de energía de RF, las mismas que son emanadas de estaciones bases, puntos de acceso Wi-Fi, transmisión de televisión y radio FM/AM, redes móviles.

La recolección de energía de RF y la transferencia de energía inalámbrica están en primer plano debido a la propagación de dispositivos inalámbricos. Una rectenna es un elemento clave en los sistemas de recolección de energía [9]. El presente trabajo muestra el diseño y fabricación con sus respectivas pruebas de funcionamiento de una matriz de rectennas independientes de la frecuencia para aplicaciones de Energy Harvesting encaminado en la energía de RF y que puede ser aprovechada para mantener activos los equipos de consumo en baja potencia como los utilizados en IoT. El arreglo de antenas logarítmica espiral funciona dentro de las bandas de uso en el territorio ecuatoriano como son las asignadas a las operadoras de celulares para tecnología 2,3 y 4 G LTE, de igual forma en la frecuencia de operación Wi-Fi y proporciona un aporte para el estudio de antenas multibanda y de captación de energía en el Ecuador.

1.4 Fundamentación Teórica

1.4.1 Espectro electromagnético

Se define como un grupo de subsecciones o bandas de frecuencia, relacionando cada una con un nombre y sus límites [10]. El conjunto de todas las frecuencias nombrado como espectro radioeléctrico se segmentan en bandas, en las cuales presentan características únicas que dan origen a una gama de antenas muy diversas conforme a su área de aplicación. De tal manera cada antena está diseñada para ejecutarse en una banda de frecuencia específica [11]

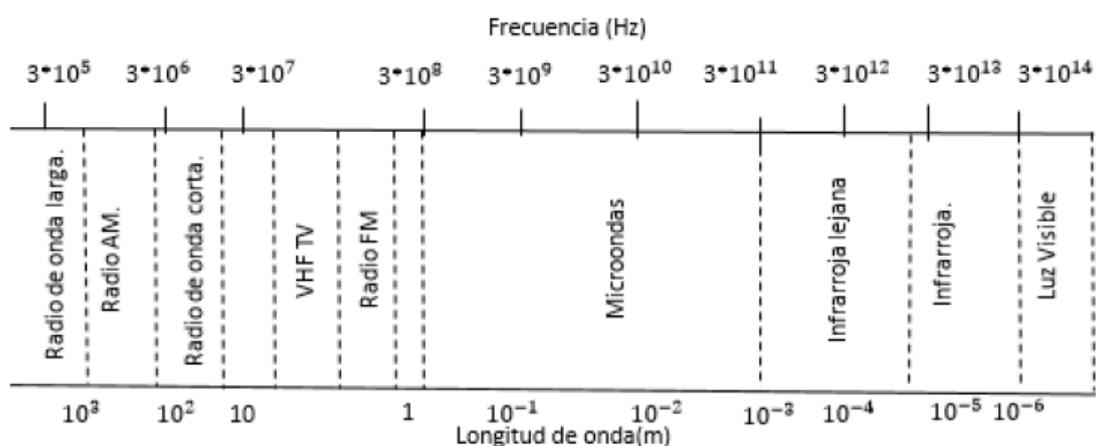


Figura 1. Espectro Electromagnético [11]

Tabla 1. Espectro Electromagnético [11]

Frecuencias Típicas		Designación de bandas aproximadas	
Banda de Tx AM	535-1605 KHz	Frecuencia media	300KHz-3MHz
Radio de onda corta	3-30 MHz	Alta frecuencia (Hf)	3 MHz-30MHz
Banda de Tx FM	88-108 MHz	Muy alta frecuencia (VHF)	30MHz-300MHz
VHF TV (2-4)	54-72 MHz	Ultra alta frecuencia (UHF)	300 MHz-3 GHz
VHF TV (5-6)	76-88 MHz	Banda L	1-2 GHz
UHF TV (7-13)	174-216 MHz	Banda S	2-4 GHz
UHF TV (14-83)	470-890 MHz	Banda C	4-8 GHz
US teléfono celular	824-849 MHz	Banda X	8-12 GHz
	869-894 MHz	Banda Ku	12-18 GHz
Europeo GSM celular	880-915 MHz	Banda K	18-26 GHz
	925-960 MHz	Banda Ka	26-40 GHz
GPS	1575.42 MHz	Banda U	40-60 GHz
	1227.60 MHz	Banda V	50-75 GHz
Microondas	2.45 GHz	Banda E	60-90 GHz
US DBS	11.7-12.5 GHz	Banda W	75-110 GHz
US ISM banda	902-928 GHz	Banda F	09-140 GHz
	2.400-2.484 GHz		
US UWB radio	5.725-5.850 GHz		
	3.1-10.6 GHz		

1.4.2 Onda

Es aquella perturbación que se propaga a través del tiempo y espacio [12], es un tipo de movimiento que transporta energía y momento lineal pero no transporta materia [13].

El origen de una onda electromagnética se basa en el hecho que toda carga eléctrica en movimiento emite energía en forma de onda electromagnética, y la frecuencia de dicha onda es la misma del movimiento de la carga [14]. Entonces, se define como la propagación en un medio descrito como espacio libre considerado realmente como el vacío y a través de cualquier material dieléctrico. Por otra parte, una onda electromagnética en el espacio libre tiene una velocidad de propagación constante aproximado de 300.000 km/seg. Esta expresado por la siguiente relación entre su frecuencia y longitud de onda:

$$c = \lambda f = 3 * 10^8 \left(\frac{m}{s}\right)$$

Conjuntamente los campos eléctrico y magnético se propagan en forma de onda, llamada onda electromagnética, que son ondas transversales y no mecánicas [13]

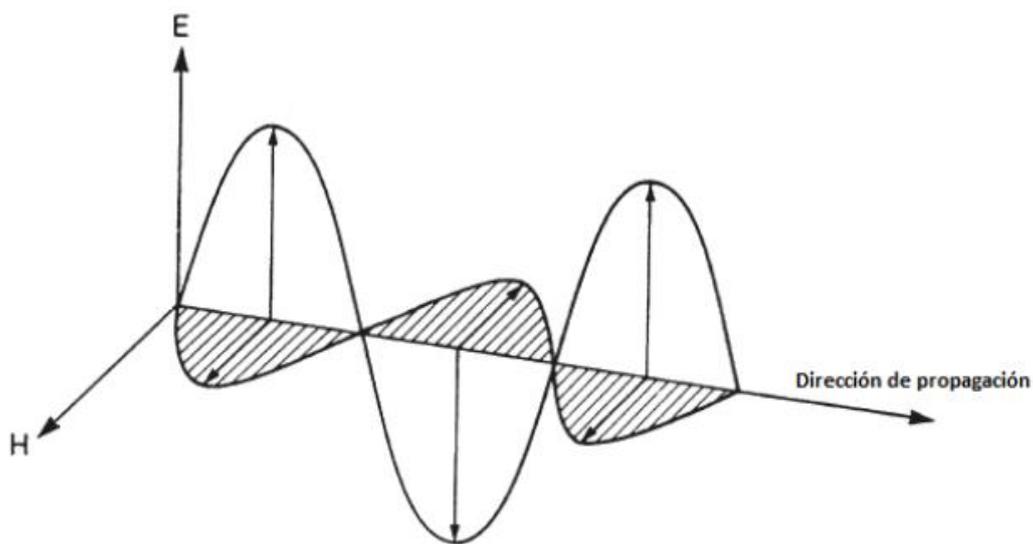


Figura 2. Campos eléctrico, magnético y dirección de propagación [13].

- **Ondas Transversales:** Es aquella que presenta una magnitud vectorial con oscilaciones en sentido perpendicular a la dirección de propagación.
- **Ondas no mecánicas:** Es aquella onda que no necesita ningún material para propagarse.

1.4.3 Parámetros sobre el comportamiento de ondas electromagnéticas

- Longitud de onda: definida como la distancia entre dos puntos, los cuales están en un mismo estado de vibración, siendo su unidad de medida en el Sistema Internacional el metro (m) [13].
- Frecuencia: Es aquella medición que indica el número de repeticiones de un suceso periódico o de cualquier fenómeno en unidad de tiempo [15], su unidad de medida es en segundo a la menos 1 (s^{-1}), recibe por nombre Hercio y simbólicamente se expresa Hz para el sistema SI [13].
- Periodo: Tiempo de una onda en completar una oscilación y su unidad de medida es el segundo (s) [13].

1.4.4 Antena

La IEEE (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica), define una antena como parte de un sistema transmisor y/o receptor con diseño para radiar o recibir ondas electromagnéticas [16]. También utilizado como una interfaz entre el transmisor y receptor en el espacio libre. Por otra parte, se adiciona que es un dispositivo recíproco pasivo, dicha antena puede tener una ganancia, pero no puede amplificar una señal [17].

1.4.5 Parámetros fundamentales de antena.

▪ Patrón de radiación

Se conoce como la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena con cierta direccionalidad en función de las coordenadas espaciales, por lo cual centraliza la energía a radiar en una dirección del medio. Las propiedades de radiación de una antena implican densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad y polarización. El patrón de radiación determina en sí la potencia en función de la dirección desde la antena, igual que posee un patrón tridimensional.

El campo eléctrico [E] y el campo magnético [H]. La propiedad de radiación más importante es la distribución espacial 2D O 3D de la energía radiada [11].

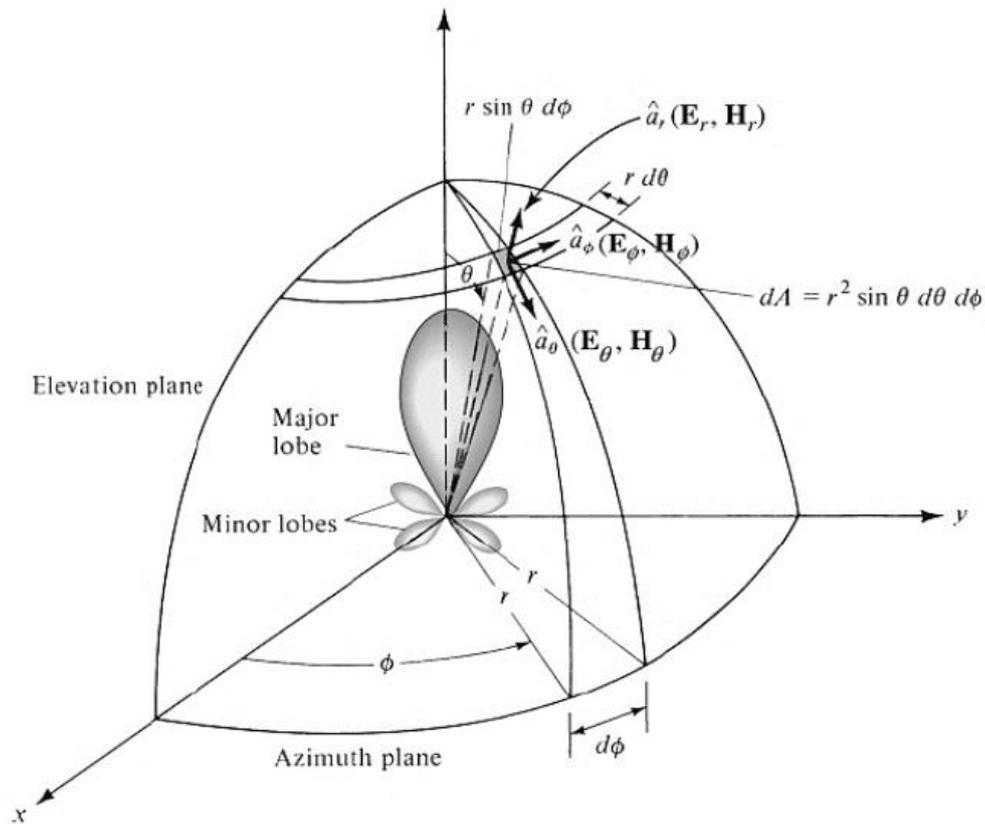


Figura 3. Sistemas de coordenadas para análisis de antenas [11].

- **Lóbulos de patrón de radiación**

Se define como la parte del patrón de radiación delimitada por regiones de intensidad de radiación relevante débil [18]. Es decir, son picos de intensidad rodeados con regiones de menor intensidad, el siguiente grafico muestra un patrón polar en 3D simétrico que incluye una serie de lóbulos de radiación en la dirección de máxima propagación, denominada como haz directo.

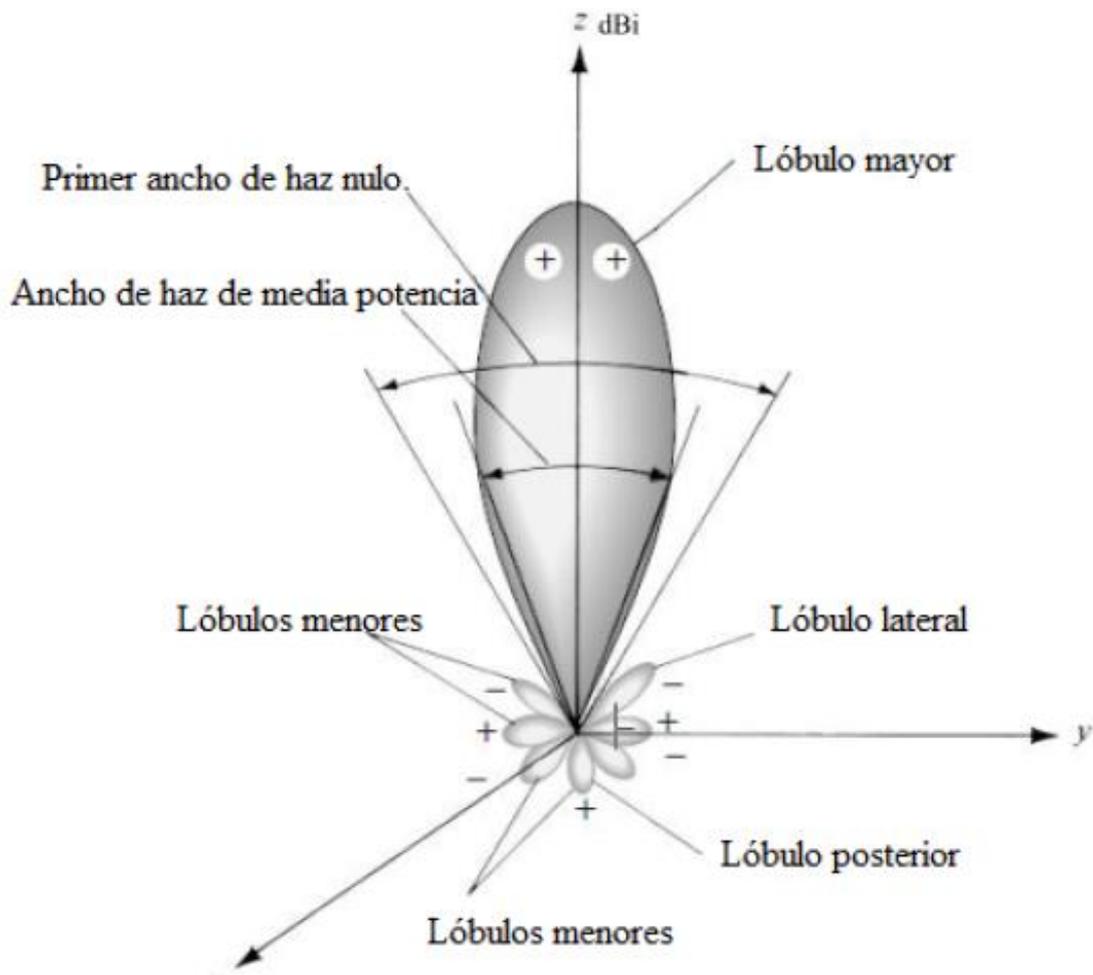


Figura 4. Lóbulos de radiación y ancho de haz de un patrón de campo eléctrico de antena [18].

El siguiente gráfico, explica de forma particular el diagrama 2D para los lóbulos del patrón de radiación y el ancho de haz.

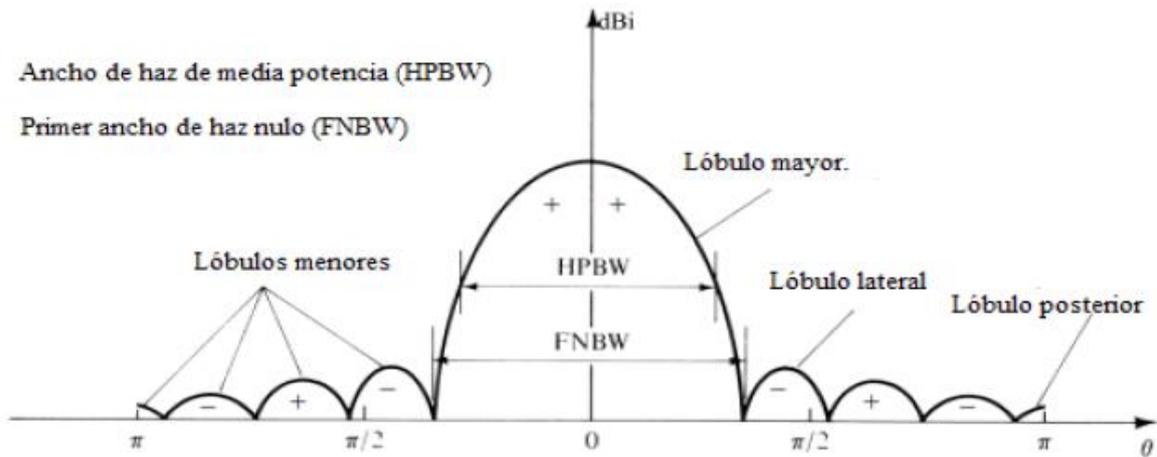


Figura 5. Patrón de radiación 2D con lóbulos y ancho de haz [11].

- **Directividad**

Se define entre la relación de la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiara a una distancia dada o determinada una antena isotrópica con la misma potencia de la antena a transmitir [19].

- **Ancho de banda**

El ancho de banda se define como el margen de frecuencias donde la antena es apta para trabajar, es decir, donde los parámetros de la antena cumplen ciertas características [20].

- **Factor de calidad**

Frecuentemente hay pérdidas por radiación, conducción dieléctrica y ondas superficiales, así, el factor de calidad (Q_t) está condicionado por todas estas pérdidas y, en general, se escribe de la siguiente manera: [18]

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}}$$

Donde:

Q_t =factor de calidad total

Q_{rad} =factor de calidad debido a las pérdidas por radiación

Q_c =factor de calidad debido a pérdidas de conducción

Q_d =factor de calidad debido a pérdidas dieléctricas

Q_{sw} =factor de calidad debido a las ondas superficiales

- **Eficiencia de la antena**

Es la relación entre la potencia radiada por la antena y la potencia total entregada a las antenas para una frecuencia dada de operación. Se puede considerar que la resistencia total de carga está formada por dos resistencias en serie, una de valor de R (resistencia de radiación) y otra de valor r que representa la disipación óhmica de la antena. Será tanto más eficiente cuanto mayor sea la relación R/r , se expresa la eficiencia de la siguiente manera: [21]

$$\eta = \frac{R}{R + r} 100$$

- **Impedancia de entrada**

Se define a la entrada de una antena mediante la relación tensión-corriente presentada en su terminal, esta consta de una parte real denominada resistencia y la parte imaginaria denominada reactancia de antena dependiendo de la frecuencia dada [22].

- **Polarizacion**

Comúnmente las antenas emplean 2 tipos de polarización con respecto al campo eléctrico, entonces en la antena la polarización se determina por mantener la fuerza y cambiar su dirección de modo rotativo. La polarización lineal en una antena de ranura se caracteriza por la orientación perpendicular al campo eléctrico con relación a su dimensión de longitud ya que se debe a su tipo de radiación. Seguidamente la polarización circular se tiene al lograr la excitación de dos modos ortogonales con una diferencia de fase y tiempo de 90° entre ellos, es más utilizada esta polarización ya que hace viable alcanzar una señal con excelentes condiciones, puesto que la onda resultante siempre va a presentar una variación angular [23].

1.4.6 Antena Microstrip

Las antenas tipo parche igualmente nombrada como antenas microstrip dado que se basa en dicha tecnología. Su uso mantiene un gran encubrimiento para aplicaciones en las que

el tamaño reducido es fundamental, por ejemplo: satélites, aeronáutica, aviación, dispositivos móviles, comunicaciones inalámbricas [24].

Las antenas tipo parche basadas en tecnología de circuito impreso, con la finalidad de crear estructuras planas radiadas en la parte superior constituida de sustratos dieléctricos, líneas de alimentación y un plano de tierra. Progresivamente más útiles, su aplicación, así como su estudio está propagado en ambientes inalámbricos debido a sus ventajas y características atrayentes. Son más livianas, bajo volumen, bajo costo, bajo perfil, dimensiones más pequeñas y fácil de fabricar [25].

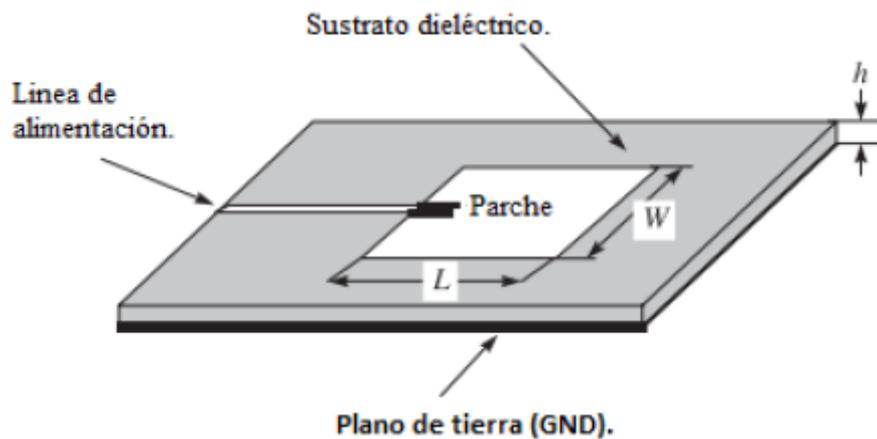


Figura 6. Microstrip antena patch [25].

1.4.7 Técnicas de alimentación

Las antenas microstrip en vista que poseen elementos radiantes, la alimentación se obtiene por medio de líneas a través del plano de tierra y su elemento radiante, entre las cuales se recalca una infinidad variada para la alimentación de este tipo de antenas. A continuación, se presenta tres técnicas fundamentales de alimentación renombrada como acoplamientos directos, estos modelos de alimentación son fáciles de aplicar, pero su desventaja es la autonomía ilimitada de arreglo de impedancia en la entrada y su ancho de banda estrecho por lo cual puede equilibrarse aumentando el grosor de sustrato [26].

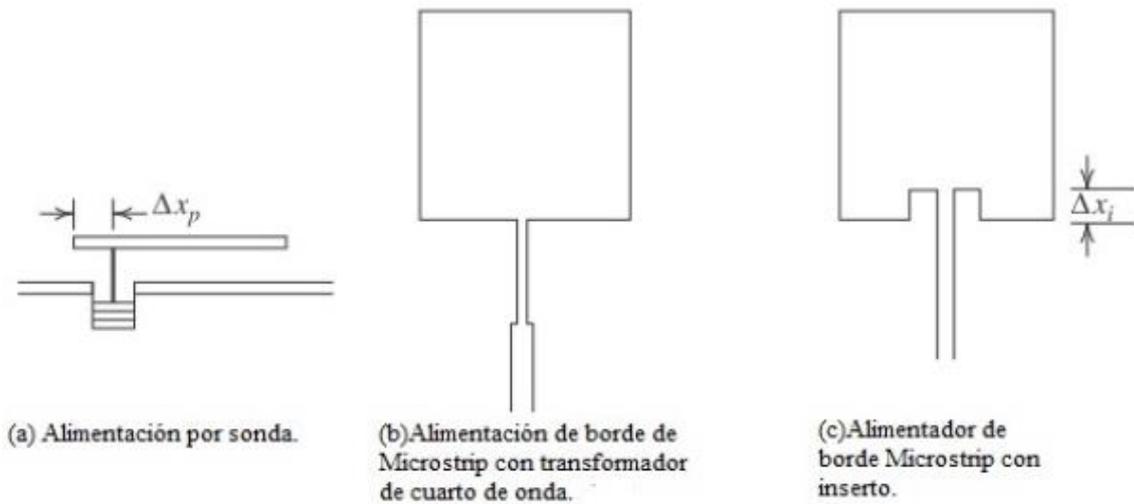


Figura 7. Técnicas de alimentación en antenas de parche microstrip [26].

1.4.8 Alimentación de línea coaxial

Se presenta la alimentación de tipo coaxial, técnica utilizada para alimentar una antena de parche microstrip, por su factible combinación y fabricación, de la misma manera sus bajas pérdidas de radiación. La guía externa del conductor coaxial está conectado al plano de tierra y el interno se extiende a través del dieléctrico y se suelda el elemento radiante. Como grande utilidad que presenta este tipo de esquema de alimentación es que su impedancia de entrada puede coincidir colocando la alimentación en cualquier ubicación deseada sobre el parche [18].

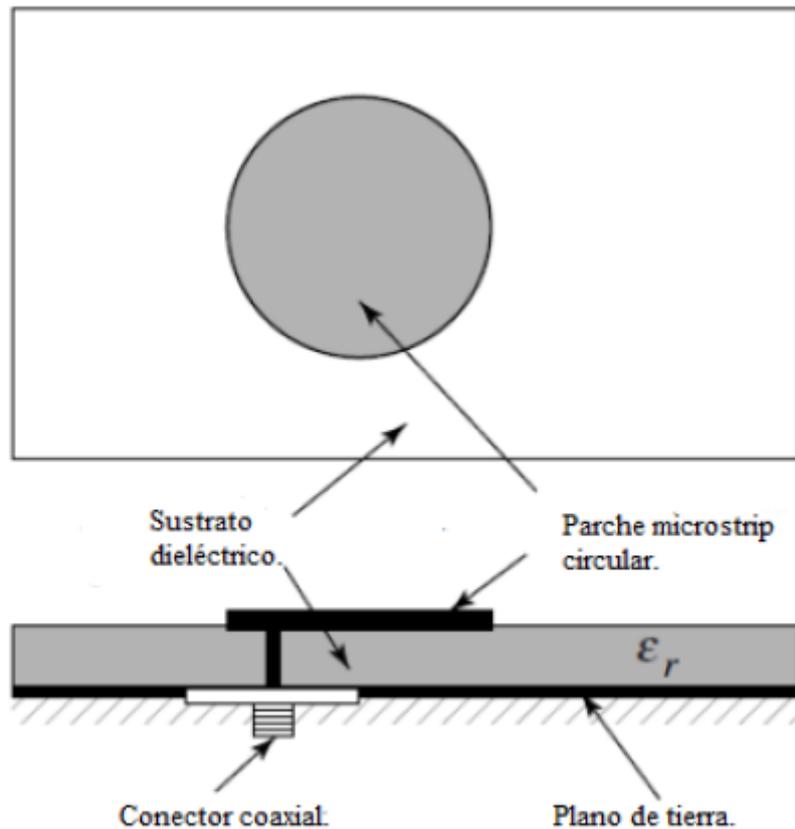


Figura 8. Alimentación Coaxial [18].

1.4.9 Antena Logarítmica: espiral

La antena espiral fue presentada en el año de 1956 por primera vez, el cual es una espiral logarítmica de doble brazo como mínimo, perteneciente a una clase de antenas independientes de la frecuencia ya que cumple con los requerimientos específicos para el diseño. Estas antenas presentan una particularidad, que su polarización, patrón de radiación e impedancia se mantiene sin cambios en un ancho de banda grande, que opera en un extenso rango frecuencial. En el procedimiento una antena espiral se forma al distribuir 4 espirales proporcionalmente rotadas. Las antenas independientes de la frecuencia pueden ser detalladas integralmente por ángulos, entonces la antena es autocomplementaria cuando el ángulo de rotación es $\pi/2$. Una importante propiedad en todas las antenas es su apropiada alimentación para un correcto funcionamiento dentro del margen de frecuencias. En la antena espiral plana debe alimentarse de forma equilibrada, es decir, debe circular una corriente de la misma amplitud por cada uno de los brazos de la espiral.

La singularidad geométrica de esta antena tiene su fundamento en espirales, es una curva autoescalable, definida en coordenadas polares por r y φ , como se presenta a continuación: [27]

$$r = Ae^{a\varphi}$$

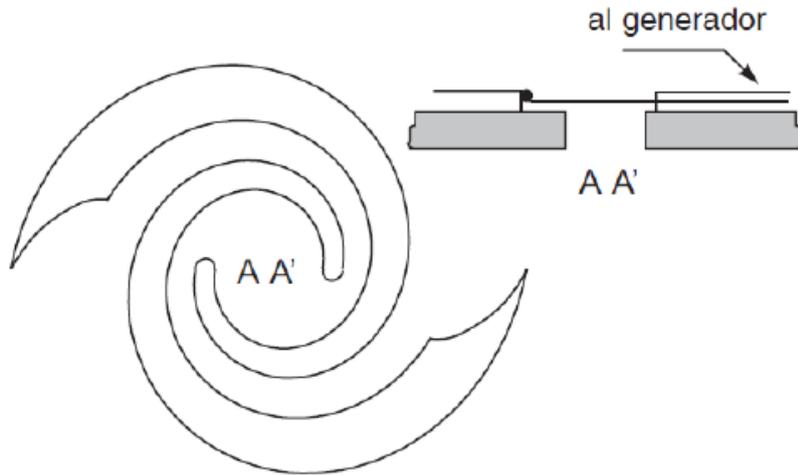


Figura 9. Alimentación de la espiral equiangular plana [27].

1.4.10 Rectenna

Se define este termino rectenna por los conceptos “rectifyng antenna”, traducido quiere decir antena rectificadora, el cual se caracteriza por la conversión directa de microondas a corriente continua, dicha antena rectificadora se puede construirse a partir del diodo schottky el cual se encuentra situado entre los dipolos de la antena [23].

1.4.11 Arreglo de antenas

Se define a los arreglos de antenas que estan compuesta por un conjunto de dos o mas antenas identicas distribuidas y ordenadas en cierta medida para conseguir un patrón de radiación propio, como principal característica es que su diagrama de radiación es variable de tal manera se consigue al controlar de modo individual su fase y amplitud en la señal que alimenta a cada uno de estos elementos del arreglo de antenas, igualmente desechando pérdidas por acoplamiento dicho campo de radiación total es la suma vectorial de estos campos con respecto a los elemetos radiadores.

Como parámetro fundamental en el arreglo de antenas considerar las siguientes características a fin de modelar con éxito el patrón de radiación: tipos de arreglos (Lineal, plano, circular, etc); distancia de separación entre elementos; amplitud y fase de excitación, patrón relativo respectivamente en cada elemento realizando mas efectivo al momento de transmitir y recibir una señal [28].

Entre sus principales ventajas estan:

La dimensión total de la antena se incrementa sin tener la necesidad de ampliar el tamaño de dichos elementos.

Alta directividad y ganancia.

Formar un patrón de radiación determinado.

Técnica de suministrar un haz capaz de cambiar su dirección eléctricamente [29].

Por otra parte sus inconvenientes son:

Complejidad de la red de alimentación.

Limitaciones de ancho de banda [29].

1.4.12 Teoría para el mecanismo de arreglo de antenas.

Se tiene una agrupación de N antenas iguales equiespaciadas a una distancia x, distribuido en el eje z, en la cual su alimentación es con corrientes I_n , donde $n=0,1,2, N-1$. Cada antena está situada en la posición $z'_n = nd$.

La distribución de corriente del conjunto de antenas será:

$$\vec{j}(\vec{r}') = \vec{j}_0(\vec{r}') * \sum_{n=0}^{N-1} I_n \delta(\vec{r}' - nd\hat{z}) = \vec{j}_0(\vec{r}') * I(n)(\vec{r}')$$

El vector de radiación de la agrupación es la transformada de Fourier tridimensional de la distribución de corrientes:

$$\vec{N}(\hat{r}') = TF_{\partial D} [\vec{j}(\hat{r}')] = \vec{N}_0(\hat{r}') * TF_{\partial D} [I(n)]$$

Desarrollando la expresión y considerando que:

$$I_n = a_n e^{jna}$$

$$\vec{N}(\hat{r}) = \vec{N}_0 \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(kd \cos\theta + \alpha)}$$

Para simplificar los cálculos, la expresión suele escribirse en función de un ángulo eléctrico Ψ :

$$\Psi = kd \cos\theta + \alpha$$

Factor de arreglo

Se define el factor de arreglo de la siguiente manera:

$$FA(\Psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\Psi}$$

Siendo una función del ángulo Ψ , de período 2π y los coeficientes de la serie de Fourier obedecen únicamente de los coeficientes de la alimentación.

El ángulo θ solo admite valores reales de 0 a 2π , también indica la dirección de radiación en el espacio, se determina el margen visible de la agrupación:

$$\Psi \in [-kd + \alpha, kd + \alpha]$$

La figura a continuación muestra una representación del margen visible, de una asociación de antenas dipolo [29].

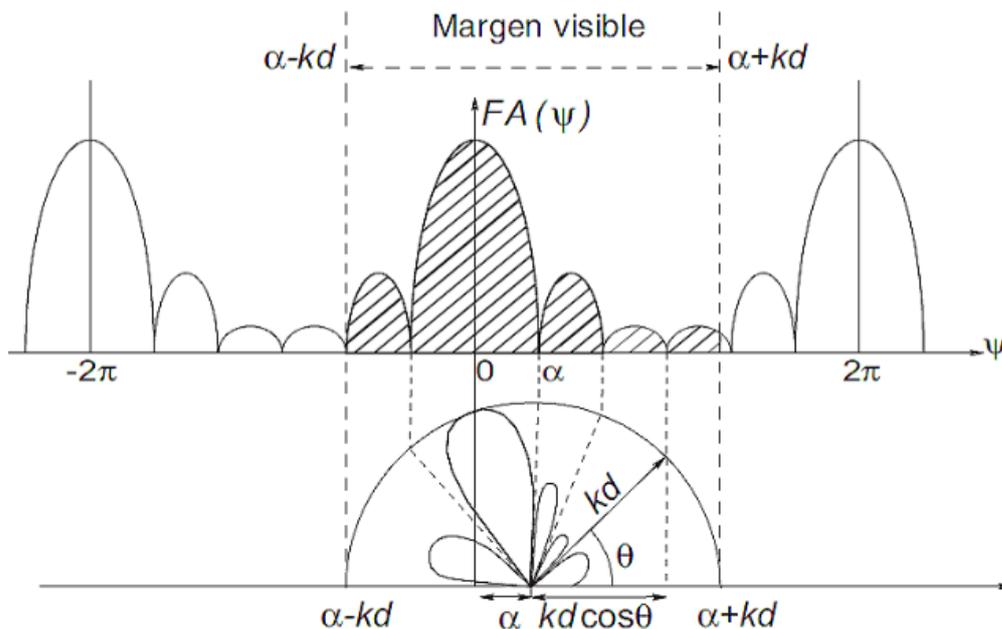


Figura 10. Representación gráfica del margen visible [29].

De esta figura se puede concluir que cuando se aumenta la separación x , del arreglo de antenas, el margen visible se hará más grande, entonces puede incitar la aparición de nuevos máximos en el diagrama de radiación del arreglo denominado lóbulos de difracción [29].

1.4.13 Parámetros de Dispersión S.

Llamada también Matriz de dispersión S, se conceptualiza como una representación más coherente con las medidas directas y con las ideas de ondas incidentes, reflejadas y transmitidas en redes de alta frecuencia, debido a la dificultad de precisar voltajes y corrientes para líneas que no son TEM (modo transversal electromagnético) y analizando además que existe un dilema funcional al intentar medir generalmente involucran la magnitud y la fase de una onda que viaja en una dirección determinada. Para algunos componentes y circuitos los parámetros S se puede calcular utilizando técnicas de análisis de red. De lo contrario, la Matriz S se puede medir directamente con un analizador de redes vectoriales [30]

1.4.14 Concepto de Energy Harvesting.

La captación de energía es el proceso encargado de captura de energía del entorno, para ser utilizada como energía eléctrica, pasando por diferentes procesos donde se almacena y se gestiona para un determinado beneficio o aplicación, además fomenta una mejoría en el sector energético suministrando potencia a dispositivos que trabajen con baja energía en todo tipo de escenario [31].

Un sistema de recolección de energía necesita en común, una fuente de energía, como el calor, la luz, la vibración o flujo de aire. Al igual que otros 3 componentes electrónicos se incluye en el sistema de cosecha de energía expresado en el siguiente diagrama: [32]

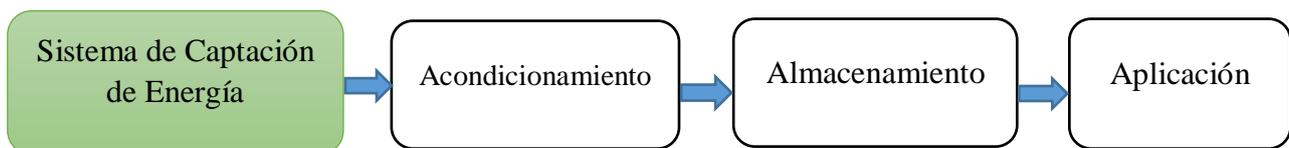


Figura 11. Diagrama de bloque de un Sistema Energy Harvesting [32].

Energy Harvesting se está aplicando en la recolección de energía del medio ambiente, hoy en día, es decir se aprovecha la energía de fuentes como: energía solar, térmica; esfuerzos mecánicos y radiación electromagnética, que se han transformado en fuentes de energía percibidas, es así que proporcionan una cantidad útil de energía para la red eléctrica. En relación a los dispositivos de baja potencia tienen que encargarse de los sistemas de captación de energía que pueden capturar milivoltios de energía provenientes de fuentes de luz, vibraciones [33].

Los sistemas de captación de energía más populares son los enormes generadores eólicos y paneles solares, que se han transformado en fuentes de energía fundamentales para la red eléctrica. Sin embargo los dispositivos integrados pequeños obligan a confiar en fuentes de luz, térmicas, vibración o biológicas. Estos recolectores de energía de micro potencia deben extender cuantiosamente la vida útil de las baterías en aplicaciones de consumo industriales. A través de un diseño moderado, los dispositivos de cosecha de energía lograrían reemplazar las baterías por su totalidad en algunas aplicaciones [34].

1.4.15 Método de rectificación

Definición:

Un rectificador es un circuito electrónico que se caracterizan por transformar la corriente alterna en corriente continua, con un elemento fundamental siendo el diodo gracias al cual se consigue la rectificación [32].

Rectificado de media onda.

En este tipo de circuito al aplicar la corriente alterna al diodo su ciclo negativo se la onda se pierde y el ciclo positivo pasa conocido como polarización directa, y en la polarización inversa eliminara la parte positiva [35].

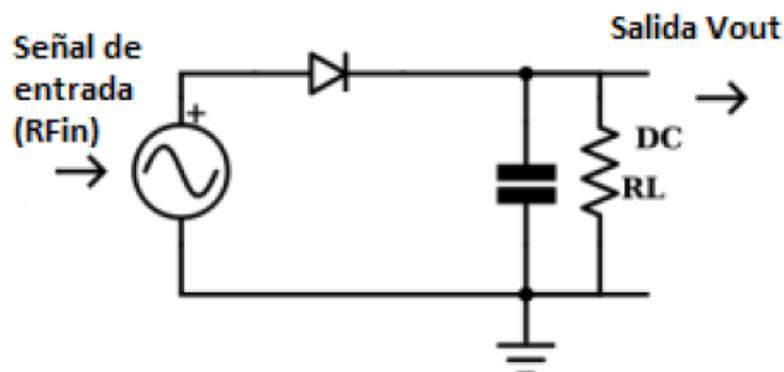


Figura 12. Rectificador de media onda. [35]

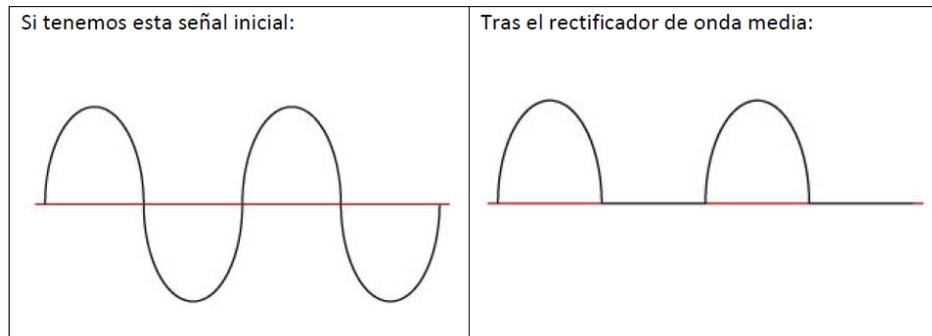


Figura 13. Efecto producido por el rectificador de media onda a la señal [32].

Rectificador de onda completa

Este circuito permite al mismo tiempo que la onda del ciclo positivo y negativo entren en la salida, mediante el uso de 2 diodos que funcionan como 2 válvulas siendo más eficiente que el rectificador de media onda [35].

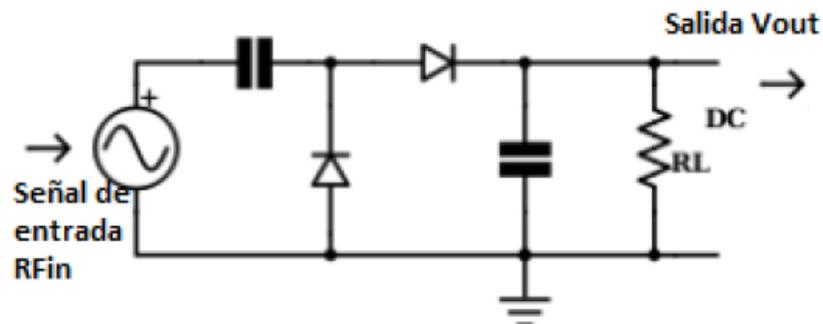


Figura 14. Rectificador de onda completa [35].

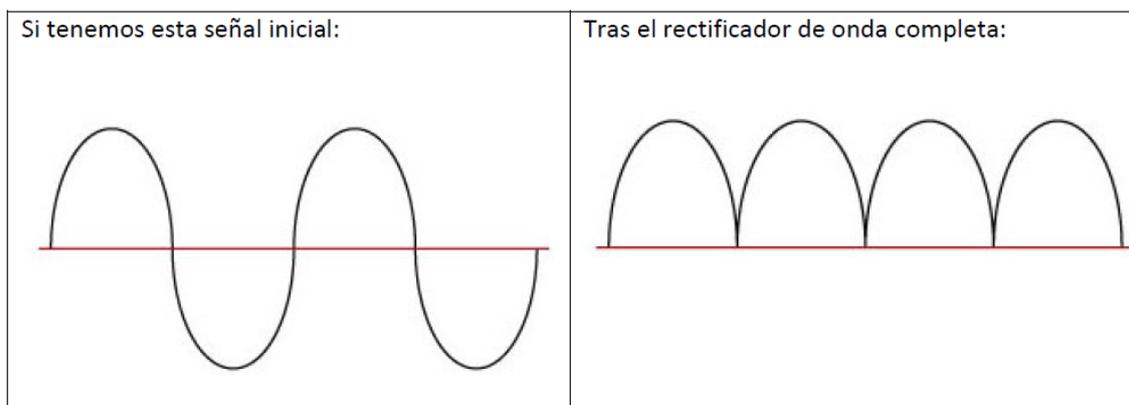


Figura 15. Efecto producido por el rectificador de onda completa a la señal [32].

A partir del rectificador de onda completa que funciona además como multiplicador de voltaje, el factor duplicador se puede aumentar incrementando el número de diodos y condensadores respectivos, conocido como multiplicador de tensión [36].

Diodo Schottky

Los diodos rectificadores de estado sólido son componentes de vital consideración para la electrónica, ya que converge en diversas versiones, con distintos materiales básicos como el germanio y silicio. Con el pasar del tiempo, la tecnología ha guiado a los diodos con características particulares que encuentran aplicaciones concretas como el suceso del diodo Schottky. Para que comience a conducir es preciso que una tensión mínima sea conseguida, siendo primordial para romper la barrera de potencial que se presenta en la unión del diodo, esta barrera exige una tensión de orden 0.7V [37].

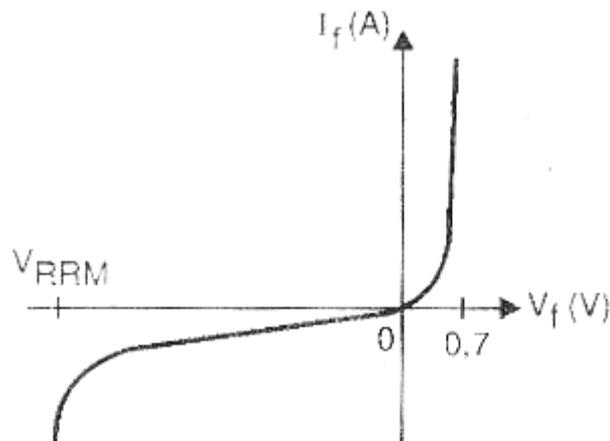


Figura 16. Curva del diodo Schottky [37].

Citado por (Tran, 2017), en los sistemas de cosecha de energía la antena receptora está considerada como la fuente, en tanto que el rectificador/duplicador de tensión se establece como la carga. Un desajuste de impedancias entre la fuente y la carga produce un flujo de energía reflejado en el circuito que reduce la eficiencia del sistema [38].

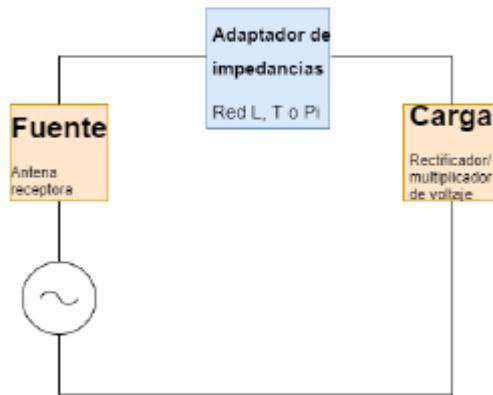
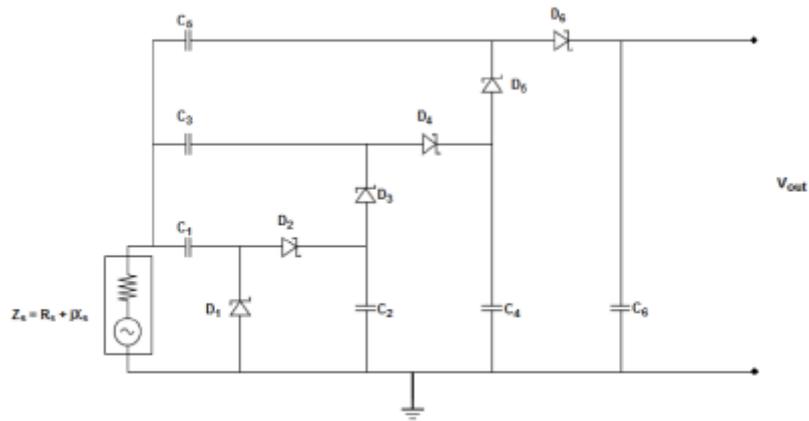


Figura 17. Sistema para cosecha de energía con fuente y carga [38].

Rectificador/Multiplicador de voltaje

Este circuito convierte la tensión desde la fuente de corriente alterna a corriente continua de mayor voltaje mediante etapas de diodo y condensadores con la función de convertir la tensión sinusoidal de ondas de RF captadas por la antena a corriente directa y aumentar el nivel de voltaje [36].

Se presenta dos topologías de rectificador/multiplicador de voltaje con 3 pasos en cada uno, de manera que, estos circuitos tendrán en la salida el valor pico del voltaje de entrada multiplicado por seis [36].



a)

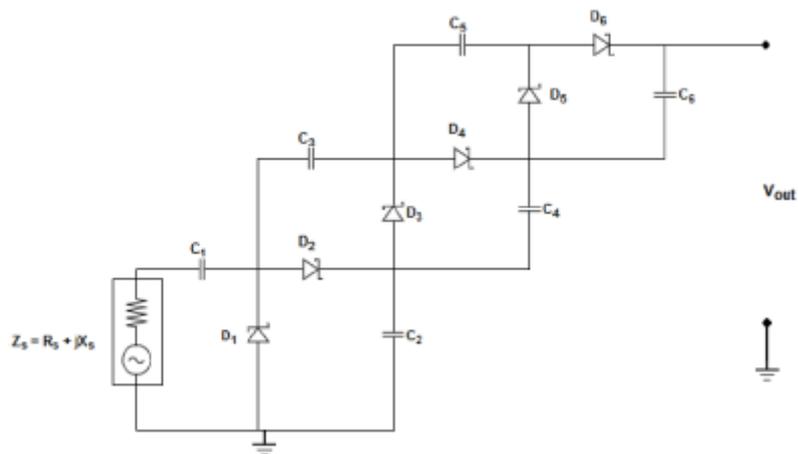


Figura 18. Rectificador/Multiplicador de tensión a) Dickson/Greinacher, b) Villard/Cockcroft-Walton [36].

1.4.16 Efecto de la constante Dieléctrica

La constante dieléctrica expresa la capacidad general de un condensador. En el momento en que los condensadores cargados o paredes que componen se introduce un material dieléctrico distinto al aire, la capacidad de almacenamiento de la carga del capacitor aumenta, asignando una relación entre la capacidad inicial y la capacidad final distinguida como la constante dieléctrica [39].

1.4.17 Influencia del Sustrato

Se debe tener en cuenta dos principales características del sustrato [40]

- Espesor: Si el sustrato tiene mayor espesor, produce una mayor eficiencia de radiación de la antena y produce un aumento de las pérdidas del dieléctrico.
- Constante dieléctrica: Si la constante dieléctrica es baja mejora la eficiencia de radiación y menos pérdidas en el dieléctrico.

Tabla 2. Propiedades de los Sustratos [40].

Sustrato	Constante Dieléctrica (ϵ_r)	Pérdidas: $\tan(\delta)$
Epoxy fibra de vidrio FR-4	4.4	0.01
RohacellFoam	1.07	0.001
Honeycomb	1.02	<0.0001
Kapton	3.5	0.002
RT Duroid 5880 (teflón + glassfiber)	2.2	0.0009
Oxidos de Titanato de bario Ceramicdielectrics	>80	0.0001

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Implementar un prototipo para la captación de Energía RF mediante el uso de rectenna de matriz dipolos logarítmicos espirales.

1.5.2 Específicos

- Describir el estado de arte sobre rectennas logarítmicas para uso de recolección de energía RF, Energy Harvesting.
- Implementar un modelo de matriz de rectenna dipolos logarítmicos espirales para un prototipo de un sistema de captación de energía RF.
- Evaluar la eficiencia del modelo de rectenna matriz dipolos logarítmicos espirales en un prototipo de un sistema de Energy Harvesting.

CAPITULO II

METODOLOGIA

2.1 Materiales

La información para el desarrollo e implementación del presente trabajo de investigación, se recolecta a partir de investigaciones previas como son: Artículos de revistas, proyecto de tesis, libros y documentos relacionados con el tema. Para la elección de materiales se inclinó por una examinación de componentes de hardware.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

El presente trabajo se desarrolló en base a distintas modalidades de investigación, acogido a las necesidades para solucionar problemas en captación de energía.

- Documental: El proyecto de tesis se apoyó en consultas de libros, revistas técnicas, tesis, artículos científicos y en trabajos similares relacionados a la implementación de captura de energía electromagnética mediante el uso de una matriz de rectenna logarítmica espiral y su almacenamiento en microbaterías, asistiéndose en experiencias ya realizadas.
- Experimental: Porque se realizó una serie de pruebas del prototipo de antena para captar la mayor energía, con lo cual se determinó la eficiencia del sistema generado por el espectro electromagnético en varios puntos de la ciudad de Ambato.
- Campo: Porque se analizó el sistema de captación de energía mediante la matriz de rectennas dipolos logarítmicas espirales y se evaluó el funcionamiento del prototipo.

2.2.2 Recolección de la información

Para la recolección de información se realizó mediante artículos científicos, libros, fuentes de internet y proyectos similares desarrollados, de la misma manera guías

prácticas teniendo en cuenta los datos confiables que permitieron el desarrollo del proyecto

2.2.3 Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento y análisis de datos se procedió a los siguientes pasos:

- Revisión de la documentación recolectada.
- Análisis de la información recopilada.
- Estudio de la información que permita mejorar la eficiencia y captar la mayor energía proveniente del ambiente.
- Planteamiento de la propuesta de solución.

2.2.4 Desarrollo del proyecto

En esta etapa se presenta los siguientes pasos para el desarrollo del prototipo:

- Verificación de la información recogida, para comprobar y apartar la información no acorde al trabajo de investigación.
- Analizar los diferentes tipos de sistemas de captación de energía existentes mediante antenas logarítmicas espirales.
- Ordenamiento del estándar de implementación del prototipo.
- Fabricación del modelo aplicando estándares, así como también diseño del arreglo de antenas, circuito de potencia con los componentes electrónicos.
- Diseño de los cálculos de control para el arreglo de antenas y su evaluación respectiva.
- Implementación del prototipo arreglo de antenas.
- Pruebas de análisis de la frecuencia del arreglo de antenas usando el dispositivo miniVNA Tiny.
- Programación en Matlab para el procesamiento de datos de frecuencia.
- Evaluación de frecuencia de la simulación en el software CST Studio Suite con el Analizador miniVNA Tiny.
- Realizar pruebas de funcionamiento del sistema de captación de energía.
- Evaluar la eficiencia y calidad del sistema para la mejor captación de energía.
- Análisis de resultados y la obtención de conclusiones.
- Elaboración del informe final.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de resultados

En los últimos años, el término “Energy Harvesting” ha tomado fuerza en los países con avance tecnológico cuyo objetivo se ha basado en las energías de RF, como una solución a las baterías de corta duración, el desarrollo del prototipo de captación de energía mediante un arreglo de antenas y su respectivo circuito de rectificación para convertir de señal CA a una señal DC cuyo propósito sea la de emplear en dispositivos como sensores inalámbricos, circuitos de baja potencia lo que asegura que sean escalables, compactas y de bajo costo. Se analizaron los resultados obtenidos en la simulación relacionando con las mediciones efectuadas en la práctica, se precisan las frecuencias de operación útil de las antenas, la cantidad de energía que pueden recolectar a multibanda.

La energía se propaga como ondas de RF hoy por hoy radiada por miles de radiotransmisores en el mundo los cuales están enfocados en: teléfonos móviles, radios portátiles, TV y radio. El concepto de recoger energía es para utilizarla al máximo tanto en transmisión y recepción de información, de igual manera usar esta energía a fin de cargar inalámbricamente dispositivos de bajo consumo en potencia. Por lo tanto estos estarían libre de cables, conectores, baterías y permitir así la movilidad durante la carga y uso [41].

3.2 Diseño del prototipo

Estructura para la Matriz de Rectenna Logarítmica Espiral

La estructura de la antena propuesta empieza en la siguiente ecuación, la cual define los brazos de la antena espiral usando coordenadas polares simples y cada brazo está definido ya que es una antena espiral equiangular.

$$g = 2w + 2r_{in} \quad (1)$$

$$g = [2(1) + 2(0.5)] \text{ mm} = 3 \text{ mm}$$

En la ecuación (1), w es el ancho del brazo y r_{in} es el radio interior de la antenna. El parámetro g controla la brecha entre el primer y el segundo brazo. El radio exterior de la antenna espiral crece exponencialmente a medida que gira, como se presenta a continuación:

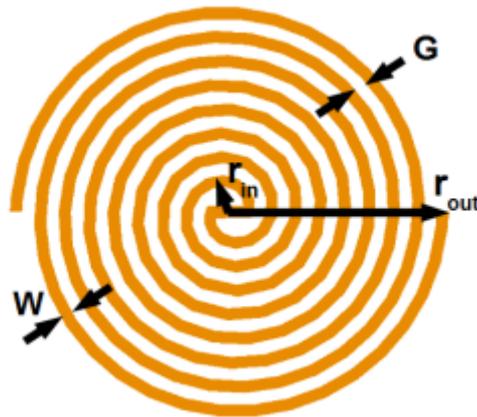


Figura 19. Parámetros fundamentales para la fabricación de la antena espiral auto-complementaria [42].

Para los cálculos se ha seleccionado un rango de frecuencia de 1 a 5 GHz. Los parámetros esenciales optados para el diseño, así como los valores de cada parámetro pertenecen para su esquema y continuamente su impresión en un sustrato epoxi RF-4. Para las medidas del ancho y longitud de la matriz de la antena mediante la utilización del software de simulación CST Studio se ha optimizado. Por otra parte, el objetivo primordial es hacer coincidir la impedancia de entrada de la antena a 50Ω para el rango deseado de frecuencias que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3. Parámetros esenciales para el diseño de la matriz de antena.

Parámetro	Valor para la matriz de antena
Frecuencia de resonancia	Multibanda 1 a 5 GHz
Permitividad relativa del sustrato	4.3
Altura del sustrato	1.6mm
Impedancia de entrada	50 Ω
Tangente de pérdidas	0.02

Elaborado por: Investigador

Una vez establecidas las frecuencias para su funcionamiento en la matriz de antena se procede a encontrar los parámetros como son radio interior r_{in} y radio exterior r_{out} .

Con la frecuencia baja de la antena espiral se establece el punto de funcionamiento y está determinada por r_{out} expresado de la siguiente manera: [35]

$$f_L = \frac{c}{2\pi r_{out} \sqrt{E_{eff}}} \quad (2)$$

$$r_{out} = \frac{c}{2\pi f_L \sqrt{E_{eff}}} = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{2\pi(1\text{GHz})\sqrt{4.3}} = 0.0227\text{m} = 22.7\text{mm}$$

Con la frecuencia alta de la antena espiral se establece el punto de funcionamiento y está determinada por r_{in} expresado de la siguiente manera: [35]

$$f_H = \frac{c}{2\pi r_{in} \sqrt{E_{eff}}} \quad (3)$$

$$r_{in} = \frac{c}{2\pi f_H \sqrt{E_{eff}}} = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{2\pi(5\text{GHz})\sqrt{4.3}} = 0.0046\text{m} = 4.6\text{mm}$$

Sustituyendo los valores de la ecuación (2) y (3) se obtiene R_M [43]

$$R_M = \frac{r_{in} + r_{out}}{2} \quad (4)$$

$$R_M = \frac{(4.6 + 22.7) \text{ mm}}{2} = 13.65 \text{ mm}$$

Considerando la ecuación (5), se obtiene la longitud de onda de la antena: [43]

$$\lambda_L = \frac{c}{f_L} \quad (5)$$

$$\lambda_L = \frac{(3 * 10^8) \text{ m/s}}{1 \text{ GHz}} = 0.3 \text{ m} = 300 \text{ mm}$$

Donde:

c = velocidad de luz

f_L =frecuencia menor de operación

Longitud total del brazo:

$$L = 1.25\lambda_L \quad (6)$$

$$L = 1.25\lambda_L = 1.25(300 \text{ mm}) = 375 \text{ mm}$$

De igual manera, de la ecuación se obtiene el número de vueltas

$$N = \frac{L}{2\pi R_M} \quad (7)$$

$$N = \frac{L}{2\pi R_M} = \frac{375 \text{ mm}}{2\pi(13.65 \text{ mm})} = 4.37$$

Para calcular el ancho del brazo de la antena espiral viene dado por:

$$g = w = \frac{r_{out} - r_{in}}{4N} \quad (8)$$

$$g = \frac{(22.7 - 4.6)mm}{4 * 10} = 0.45mm$$

Tabla 4. Resultados sobre los cálculos realizados para los parámetros de la antena logarítmica espiral.

Parámetros	Abreviatura	Valor	Rediseñada	Unidad
Velocidad de la luz	c	$3 * 10^8$	$3 * 10^8$	m/s
Frecuencia alta	f_H	5	6	GHz
Frecuencia baja	f_L	1	0.5	GHz
Radio interior	r_{in}	4.6	1	mm
Radio exterior	r_{out}	22.7	43.5	mm
Numero de vueltas	N	4.37	10	-
Ancho del brazo	w	0.45	1	mm
Separación entre los brazos	g	0.45	3	mm

Elaborado por: Investigador

3.3 Parámetros para el diseño de la matriz de antena en el software CST Studio.

Con los parámetros calculados y rediseñado se ejecuta el diseño en CST Studio, empezando desde la creación de un nuevo proyecto, una vez ejecutado el programa se escoge el área de aplicación para el proyecto.

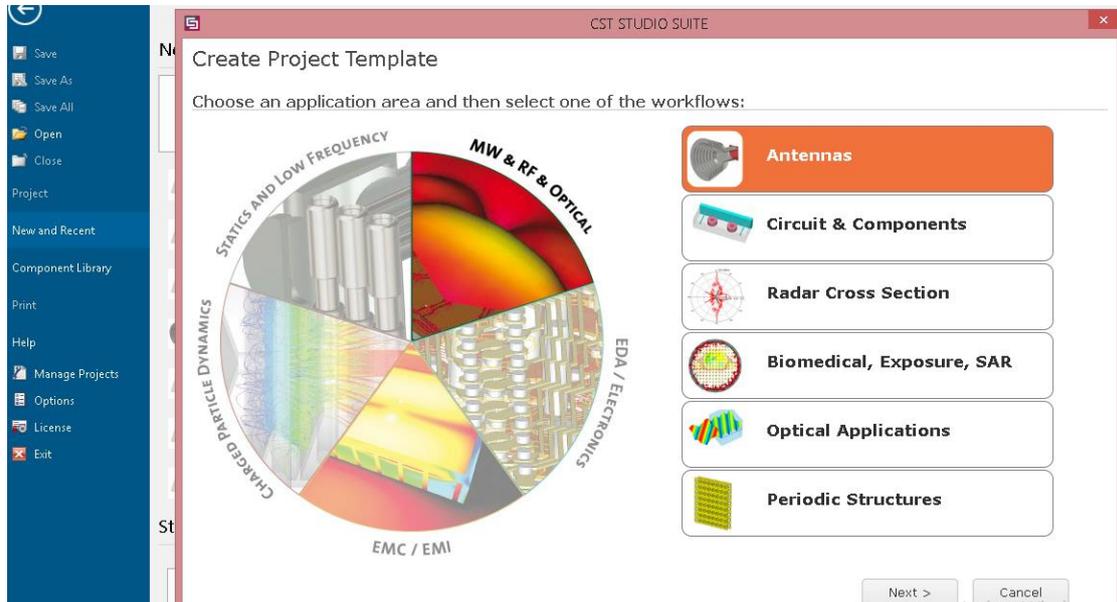


Figura 20. Creación de nuevo proyecto.

Elaborado por: Investigador.

A continuación, se selecciona el flujo de trabajo, escogiendo la opción antenas planas



Figura 21. Selección de la antena tipo parche.

Elaborado por: Investigador.

Para antenas de banda ancha o multibanda se trabaja en el dominio del tiempo.

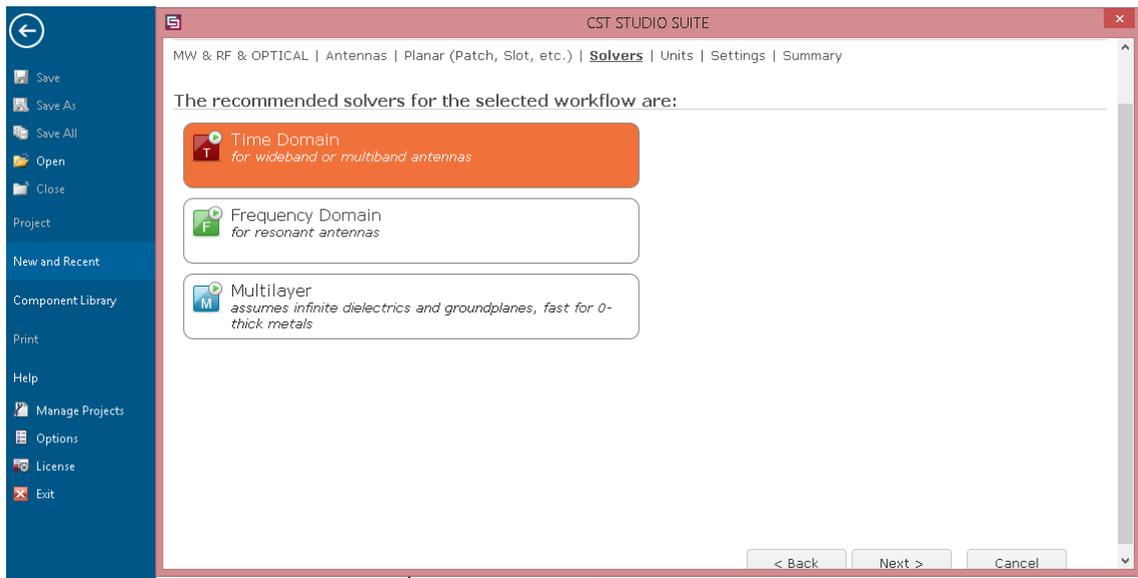


Figura 22. Selección del dominio de trabajo para la matriz de antena.

Elaborado por: Investigador.

Se ingresa los rangos de frecuencia a trabajar, es decir a la que va a resonar la matriz de antena, conjuntamente se elige el parámetro: campo eléctrico, campo magnético y campo lejano.

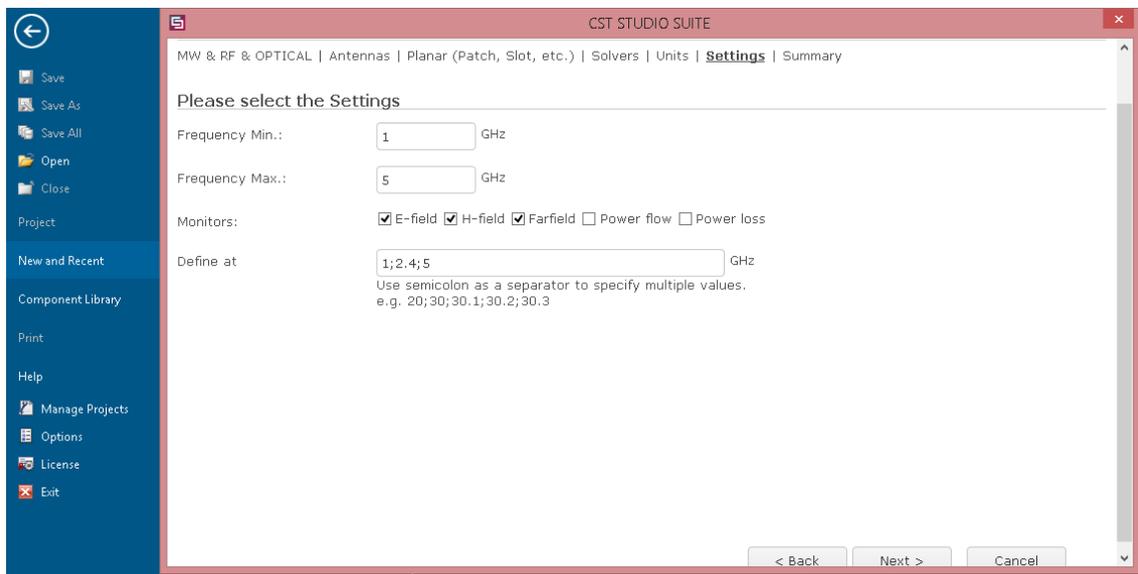


Figura 23. Selección para el rango de frecuencia.

Elaborado por: Investigador.

Luego de configurar todos los parámetros para el diseño se observa el espacio de trabajo para trazar la matriz de antena.

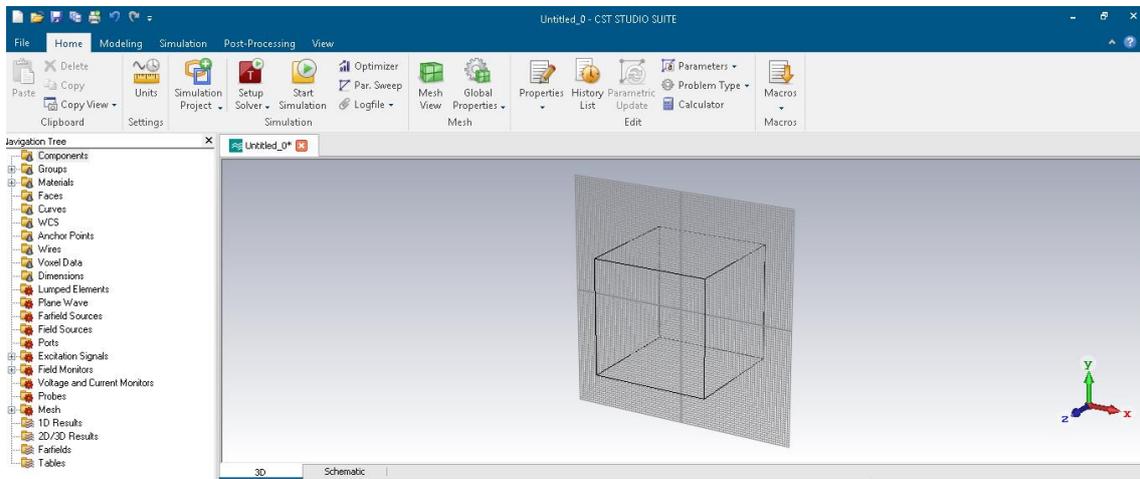


Figura 24. Modelado para el diseño de la matriz de antena.

Elaborado por: Investigador.

3.4 Diseño de la matriz de la antena logarítmica espiral.

La estructura simulada empieza por la creación de una antena espiral con los parámetros ya establecidos y verificar el funcionamiento de la antena.

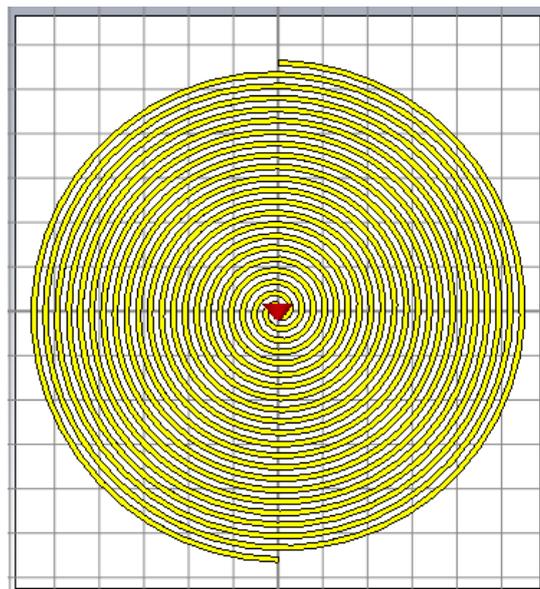


Figura 25. Modelado de la antena logarítmica espiral conforme a los cálculos rediseñados.

Elaborado por: Investigador.

Se presenta el resultado a continuación de la simulación con el parámetro S11

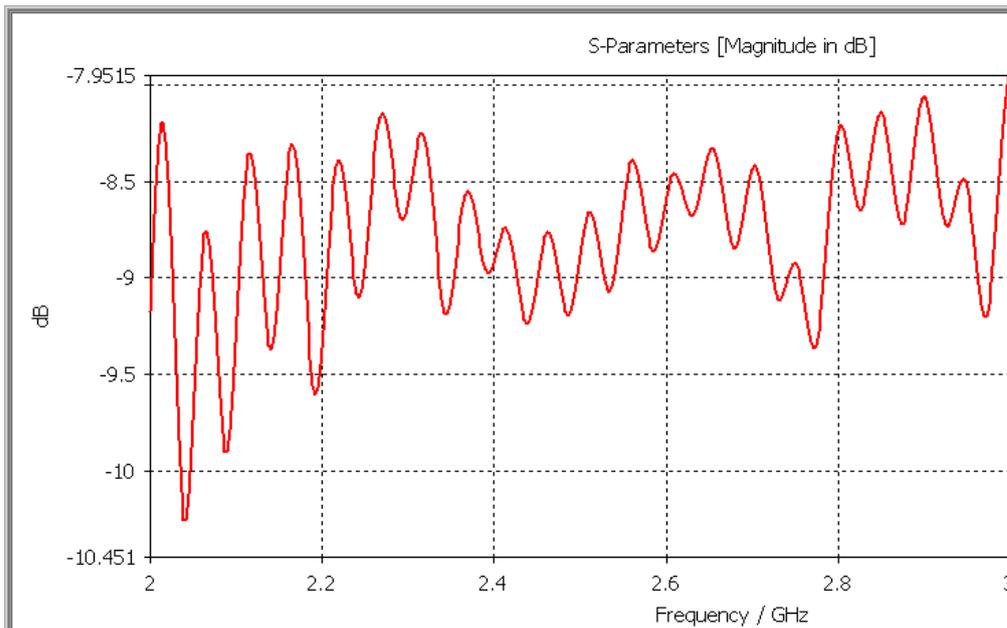


Figura 26. Parámetro S 11de la antena logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

VSWR (ROE)

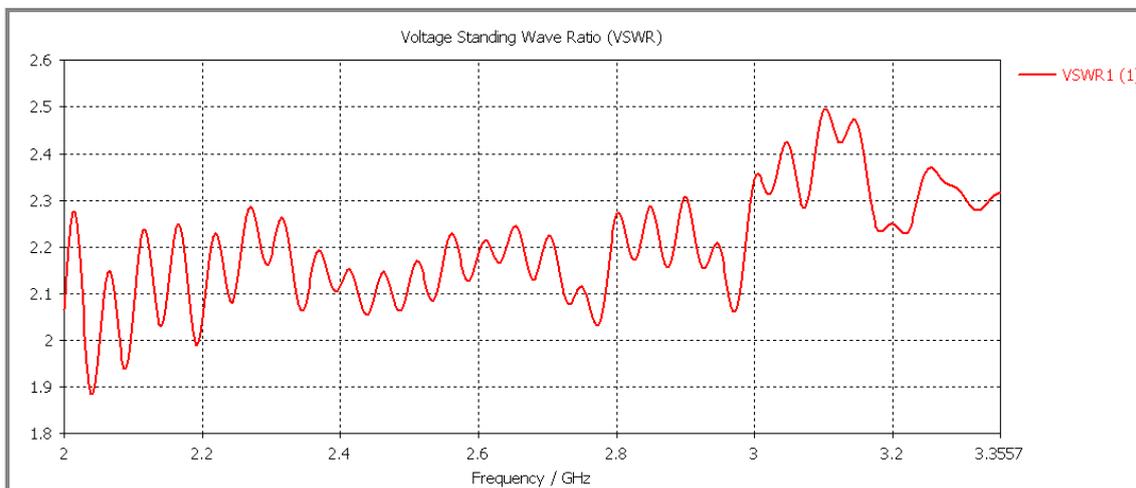


Figura 27. Parámetro VSWR de la antena logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

A continuación, se presenta una matriz de 2x1 de la antena espiral con los parámetros ya establecidos y verificar el funcionamiento de la antena.

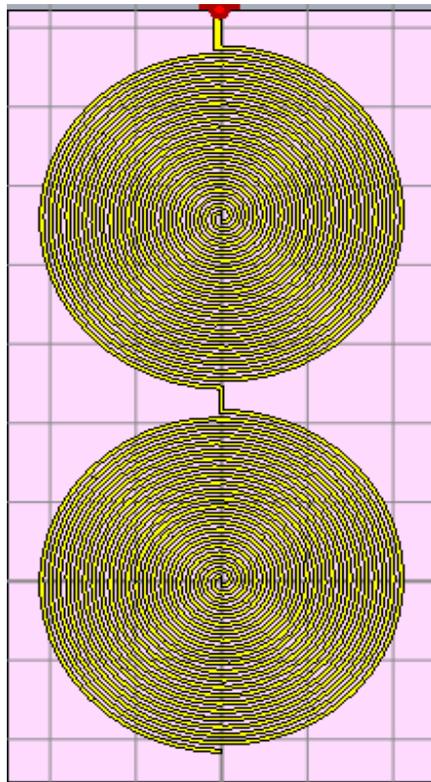


Figura 28. Modelado de la matriz de 2x1 de la antena logarítmica.

Elaborado por: Investigador.

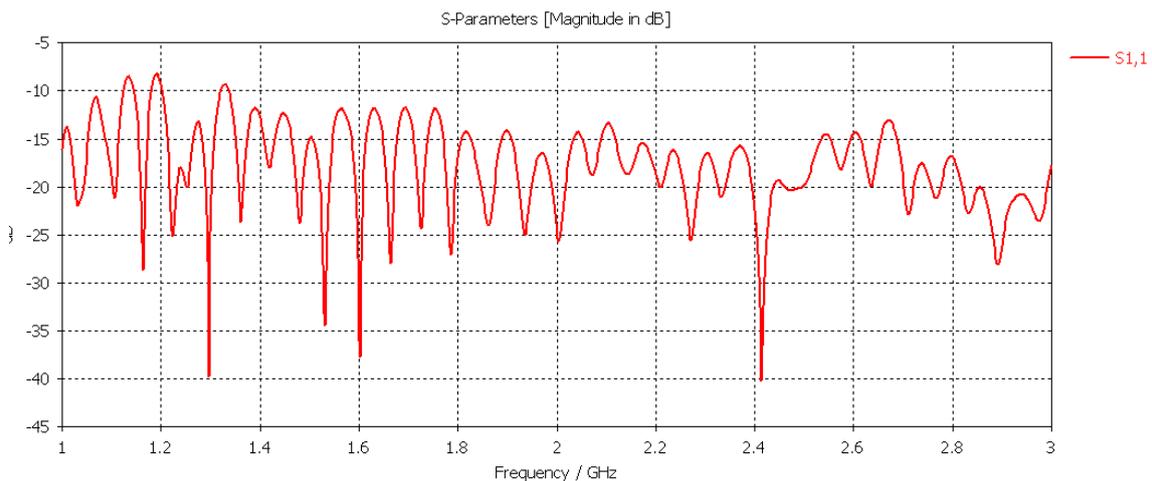


Figura 29. Parámetro S₁₁ de la matriz 2x1 antena logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

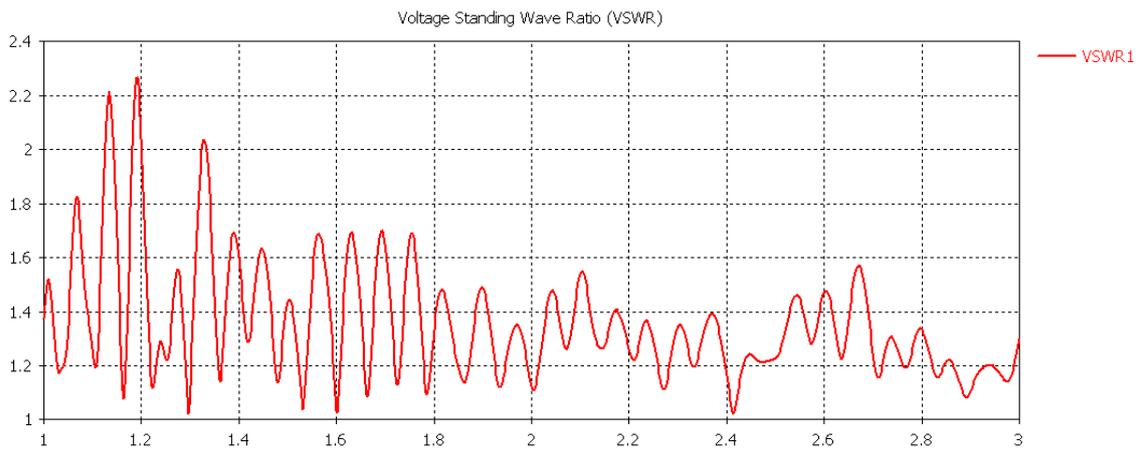


Figura 30. Parámetro VSWR de la matriz 2x1 antena logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

Finalmente se plasma la matriz de la antena y verificar su funcionamiento del arreglo, se analiza el parámetro S11, el VSWR para las frecuencias previamente establecidas en el diseño.

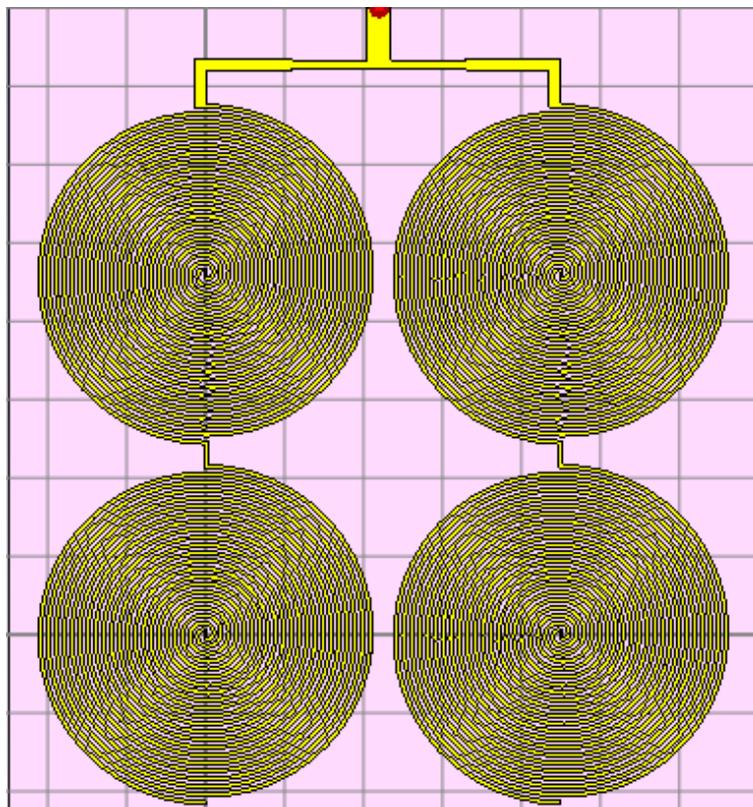


Figura 31. Modelado de la matriz de la antena logarítmica.

Elaborado por: Investigador.

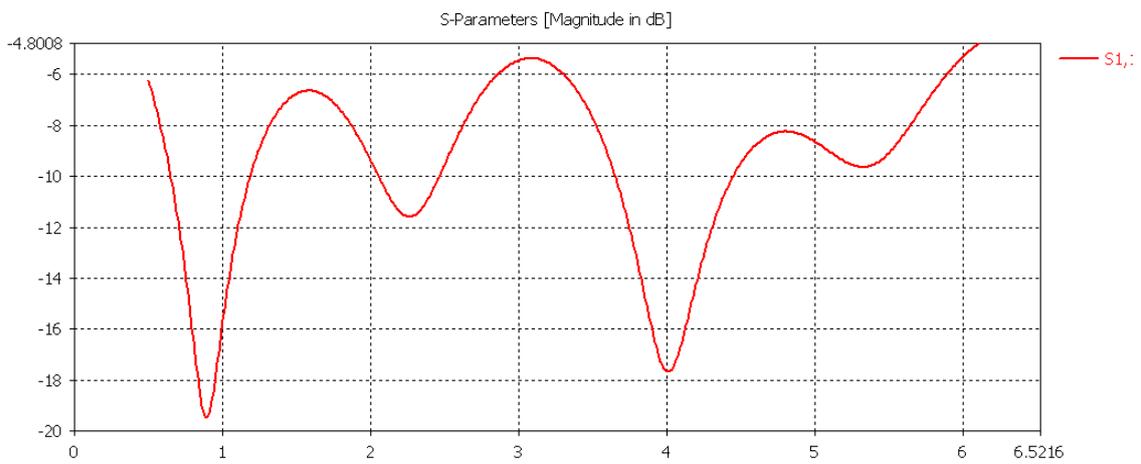


Figura 32. Parámetro S₁₁ de la matriz antena logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

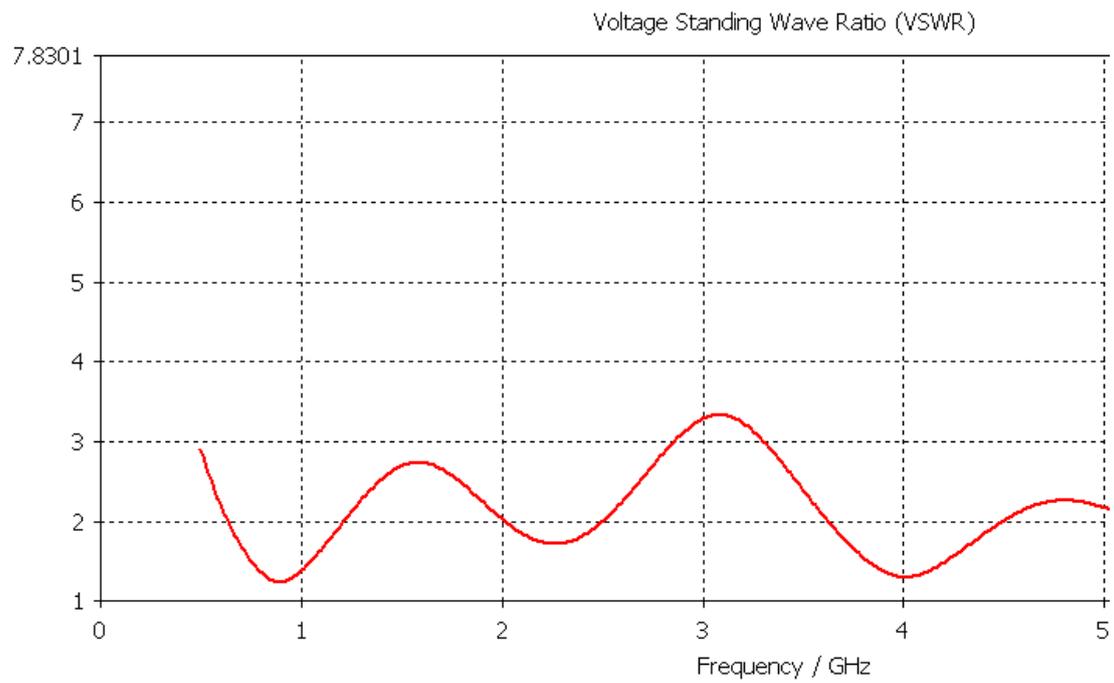


Figura 33. Parámetro VSWR de la matriz antena logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

De igual manera se presenta el campo lejano en una vista tridimensional de la matriz antenna logarítmica espiral.

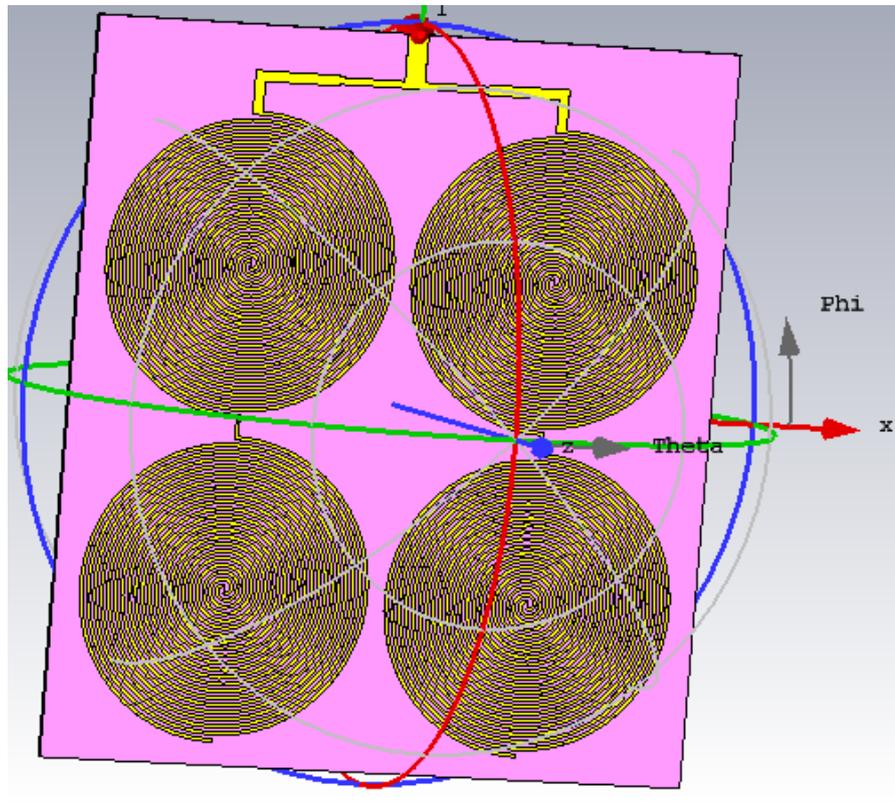


Figura 34. Vista del campo lejano.

Elaborado por: Investigador.

De igual manera se presenta los resultados del campo eléctrico radiado por las cargas.

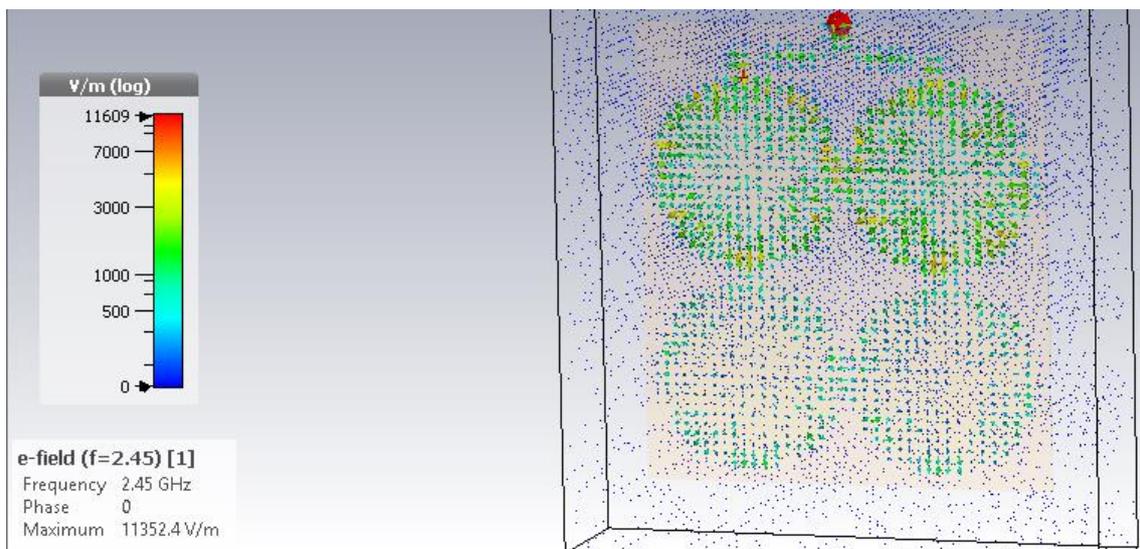


Figura 35. Vista del campo Eléctrico.

Elaborado por: Investigador.

A continuación, se muestra el campo magnético, el campo de la fuerza creado como consecuencia del movimiento de las cargas.

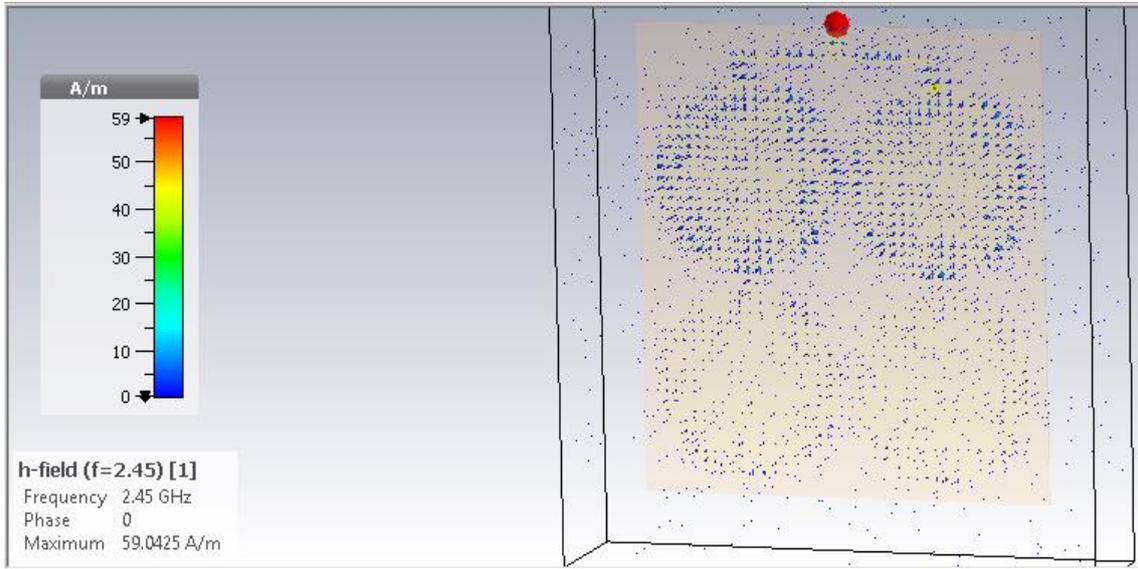


Figura 36. Vista del campo Magnético.

Elaborado por: Investigador.

Para la matriz de antena espiral logarítmica, en la simulación tridimensional, el diagrama de radiación a considerar es para aplicaciones inalámbricas estándar, para la frecuencia de 2.45 GHz, la ganancia obtenida es de 3.472 dB, valor obtenido mediante el simulador CST Studio.

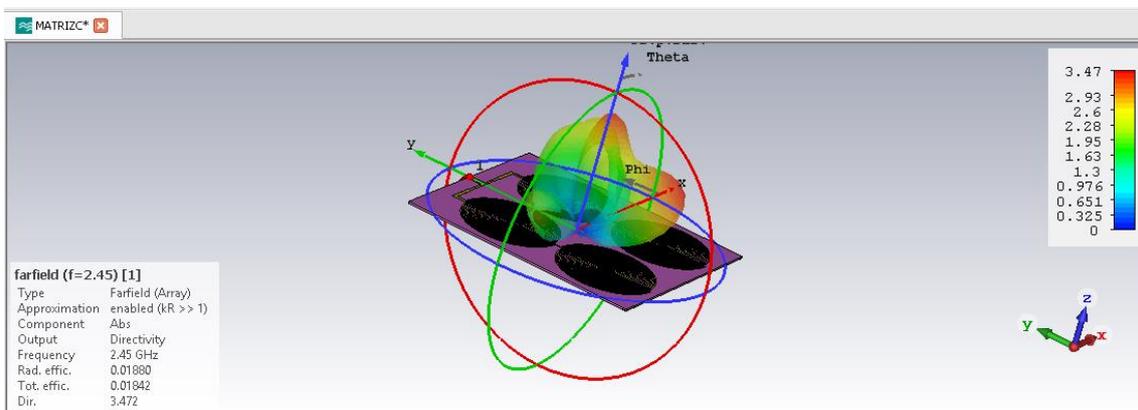


Figura 37. Vista del patrón de radiación tridimensional.

Elaborado por: Investigador.

Estructura para el rectificador de voltaje

La estructura del rectificador se realiza con la finalidad de obtener un voltaje apropiado para obtener un nivel acorde establecido en los objetivos previo a un estudio de rectificadores/multiplicadores de tensión. En la siguiente figura se observa el circuito del sistema simulado en Proteus basado en el circuito de Villard. Sus elementos son los siguientes:

1 Conector SMA macho

10 Capacitores electrolíticos de 470uF.

5 Diodos Schottky HSMS-286C

1 bornera de 2 pines

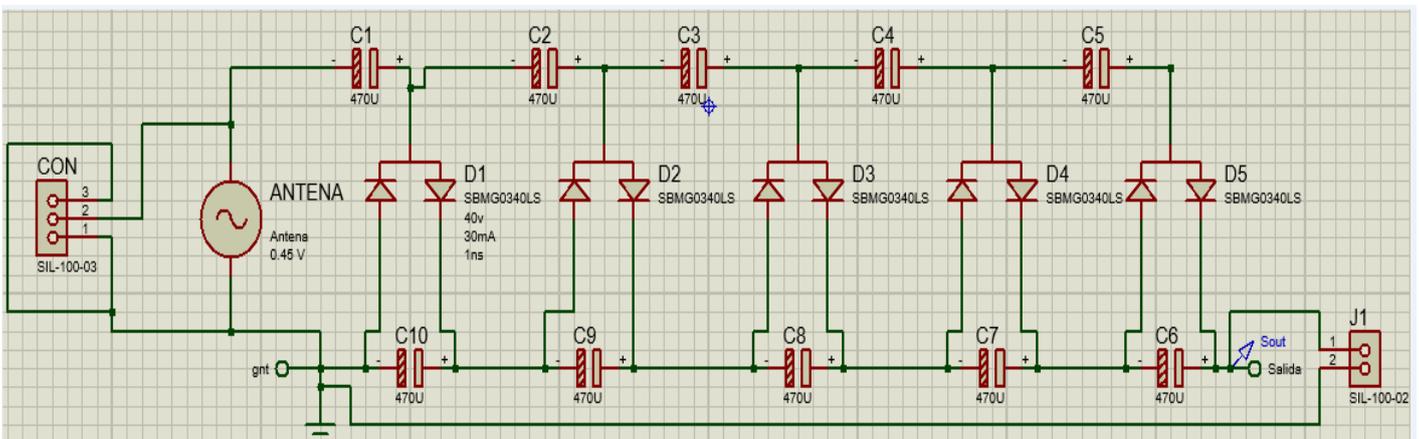


Figura 38. Esquema del circuito multiplicador diseñado en Proteus.

Elaborado por: Investigador.

El multiplicador del voltaje de Paul Villard tiene una configuración simple, es decir, consta de dos condensadores y dos diodos, la fuente de corriente alterna conectada a la entrada del multiplicador, el funcionamiento empieza cuando los ciclos altos negativos se utilizan para cargar el condensador al voltaje máximo de $CA(V_p)$, la salida es la

superposición del voltaje alterno de entrada y el voltaje continuo del condensador. El valor de la corriente continua de la forma de onda se cambia usando el efecto del circuito del mismo, dado que el diodo fija los picos negativos de la forma de onda de corriente directa al valor de 0V y los picos positivos de la forma de onda de salida tienen un valor de 2Vp. Una ventaja de este circuito multiplicador es que se puede tomar otra etapa y añadir a la anterior y así sucesivamente, pero tendrá una caída de tensión dada por los elementos y el número de etapas, para poder disminuir la pérdida de voltaje se debe aumentar la frecuencia, la capacitancia o ambas al mismo tiempo.

Cada etapa en este circuito se comporta como un cambiador de voltaje pasivo que genera un voltaje de compensación de corriente directa para la siguiente etapa [44].

A continuación, se procede a realizar la placa en PCB con sus respectivos elementos del Schematic capture diseñado en Proteus, seleccionando el ancho para la posición de los elementos y tamaño de la placa.

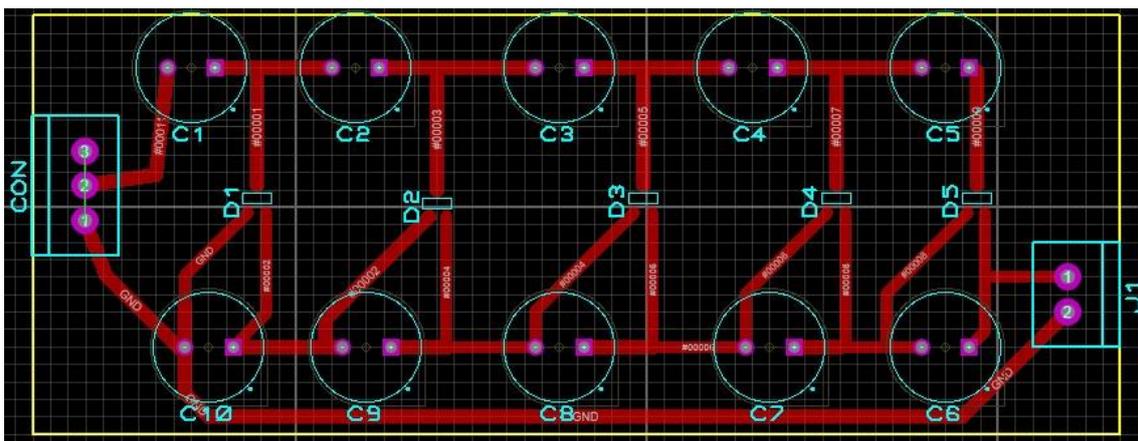


Figura 39. Diseño en PCB.

Elaborado por: Investigador.

3.5 Diseño y construcción del circuito

a) Matriz de antena espiral logarítmica.

La matriz de antena espiral logarítmica, se presenta en la figura 39, se procede con la fabricación de la matriz de antenas que se realizó su impresión en la ciudad de Quito en

la empresa APM por ser una compañía confiable para estos circuitos, para mayor detalle de su construcción se detalla en le sección de anexos.

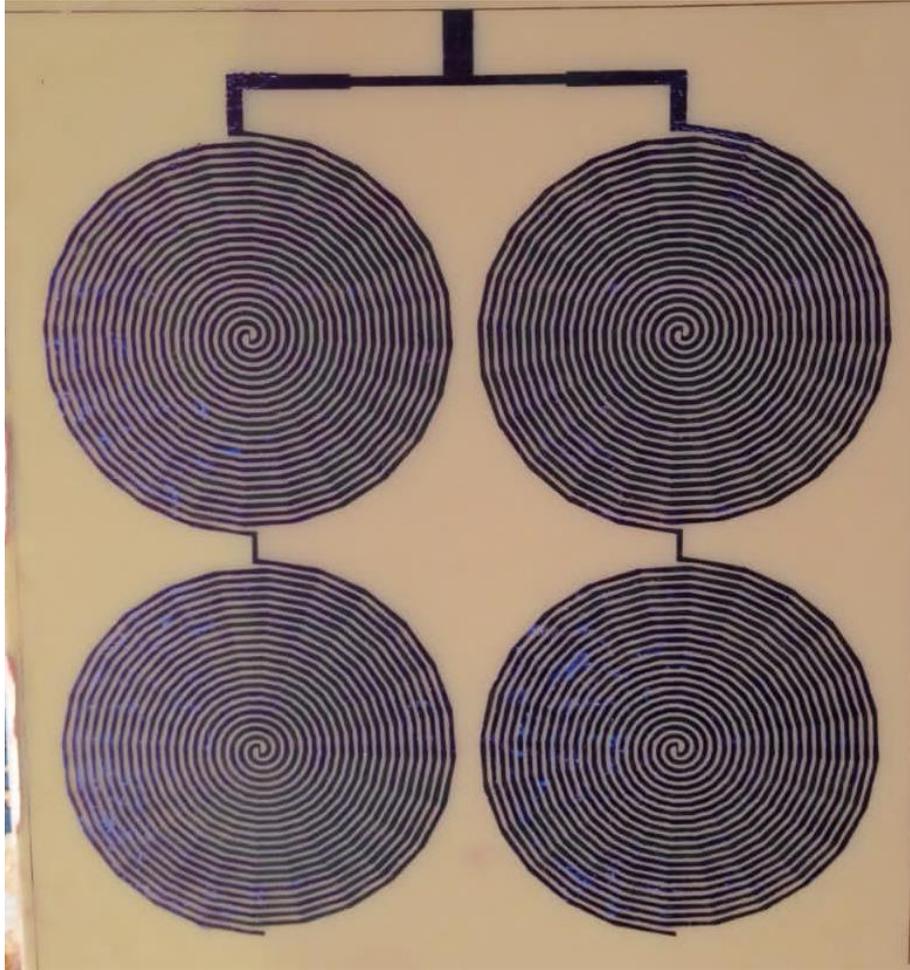


Figura 40. Prototipo fabricado de la matriz de antenas logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

b) Circuito rectificador/multiplicador

A continuación, se presenta el circuito multiplicador de voltaje.



Figura 41. Placa en baquelita de cobre.

Elaborado por: Investigador.

3.6 Pruebas de funcionamiento

Para comprobar la eficacia del diseño de la matriz de antenas se utilizó el instrumento de espectros miniVNA Tiny es un analizador de antenas muy compacto con conexión USB, trabaja en el rango de frecuencia ampliamente de 1 a 3000 MHz y sus principales características se destacan:

- Medición para el ROE.
- La impedancia se puede medir de 1Ω a 1000Ω , con un rango dinámico de hasta 70 dB.
- Se puede emplear para medidas de transmisión en filtros de banda
- Funciona como un analizador vectorial apropiado para efectuar medidas propias de cuadripolos de los parámetros S11 y S21, dicho resultado se muestra en la carta de Smith.
- Otra forma de utilizar es como un generador de alta frecuencia de baja potencia utilizando como fuente de alimentación a la interfaz USB y sin necesidad de utilizar fuente externa.

Datos técnicos miniVNA-Tiny:

- Rango de frecuencia (1-300) MHz
- Rango de impedancia (z) (1-1000) Ω
- Potencia de salida -6dBm a 500 MHz
- Rango dinámico de hasta 70 dB a 500 MHz
- Conectores 2 x SMA
- Consumo de energía 370 mA a 5v
- Peso de 70 g
- Dimensiones (66 x 66 x 28) mm

Para realizar la medición del miniVNA- Tiny, necesita un conjunto de calibración que consta de un terminador de 50 Ω , SMA uno abierto y uno en corto, así mismo la actualización de software se suministra a través de la misma interfaz. VA/J es el software adecuado y está disponible para MAC, Windows y Linux. Como nueva aplicación par Android esta la aplicación BlueNVA disponible en Google Play Store [45].



Figura 42. Analizador de antenna MiniVNA- Tiny [45].

Conectores SMA

En sus siglas en ingles Sub- Miniature versión A. Conocido como conector coaxial de RF de semipresición, su impedancia característica es de 50Ω , su rango de frecuencia normalmente es de (0 – 18) GHz, comúnmente utilizados para la alimentación de antenas [46].



Figura 43. Conector SMA hembra.

Para obtener los resultados se ingresa el rango de frecuencia para analizar el parámetro S11 y obtener el resultado de la medición con la ayuda del analizador de antenas miniVNA-Tiny.

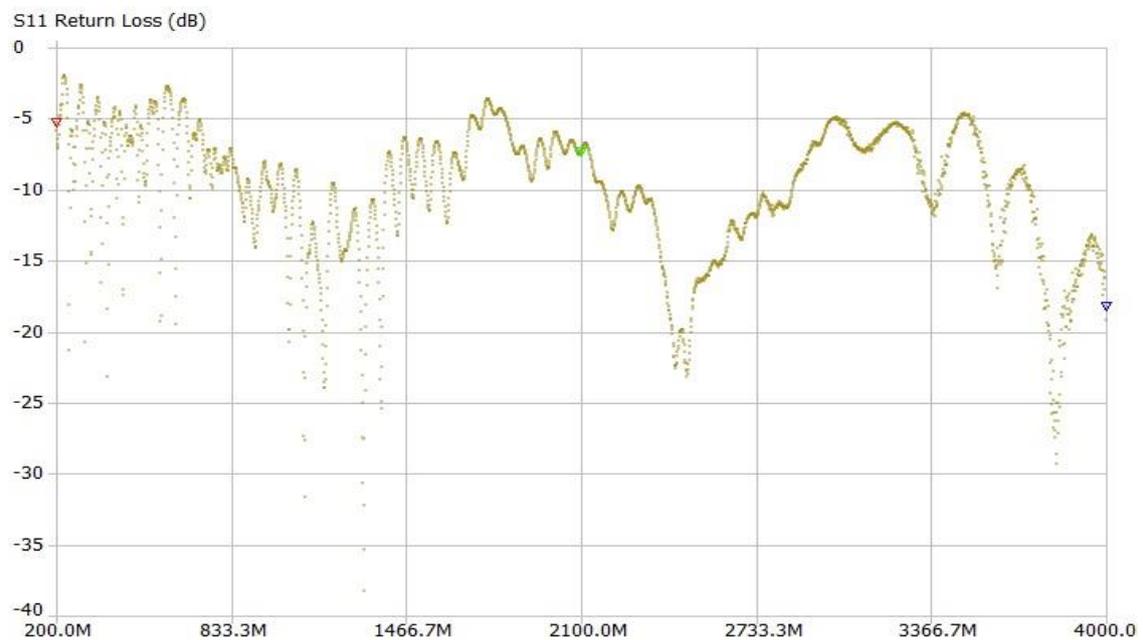


Figura 44. Resultado S11 de la matriz de antenas logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

Caracterización

Matlab es una herramienta fundamental la cual proporciona graficas comparativas, mediante este software se realiza la comparativa de los parámetros S11 de la simulación en CST Studio y los datos arrojados del analizador miniNVA-Tiny

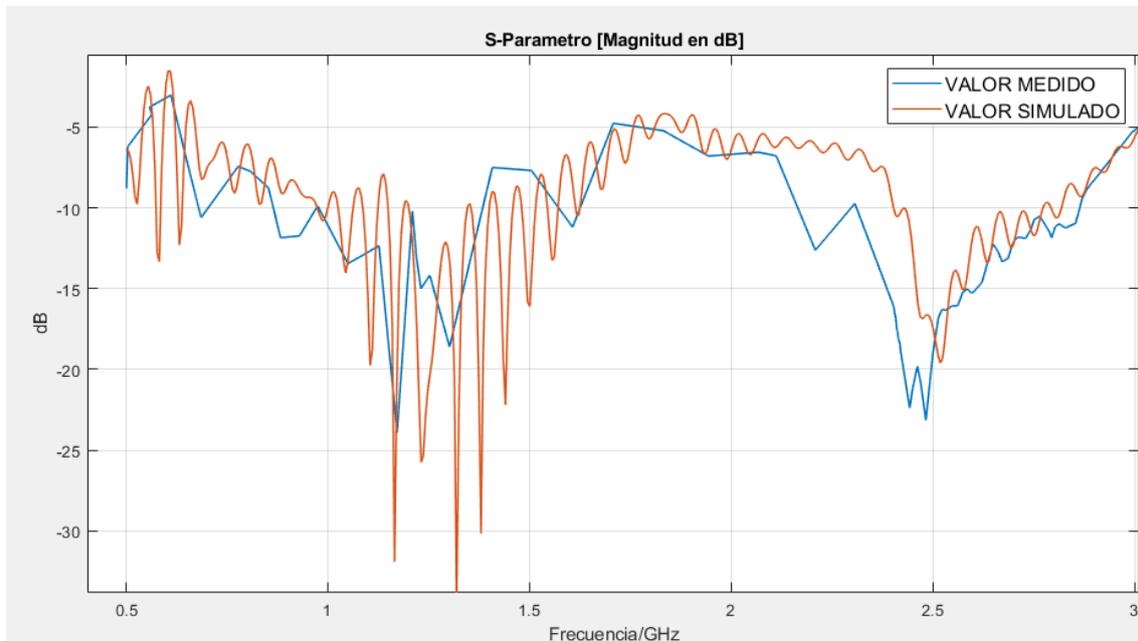


Figura 45. Gráfica de S11 de la matriz de antenas logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

3.7 Comparación de valores medidos y simulados.

Análisis de la matriz de antenas logarítmica espiral.

El coeficiente de reflexión en la simulación y en valor real medido de la estructura en la matriz de antenas se utiliza principalmente para realizar una comparación. El valor obtenido en la medición real respecto a la simulación demuestra que la matriz de antenas funciona de manera óptima establecido en la frecuencia de 2.4 GHz. Las pequeñas alteraciones con relación a la frecuencia deseada son mínimas, esto se debe al material de la placa, la soldadura y factores propios del medio ambiente.

Para calcular el error entre el valor de simulación y el valor medido real se emplea la siguiente ecuación:

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

En la simulación el porcentaje de error con respecto a la frecuencia de resonancia pretendida (2.45GHz) es:

$$\% \text{ error} = \frac{|2.475 \text{ GHz} - 2.45 \text{ GHz}|}{2.45 \text{ GHz}} * 100\% = 1.02 \%$$

En el valor medio real el porcentaje de error con respecto a la frecuencia de resonancia pretendida (2.45GHz) es:

$$\% \text{ error} = \frac{|2.49 \text{ GHz} - 2.45 \text{ GHz}|}{2.45 \text{ GHz}} * 100\% = 1.63 \%$$

En la simulación el porcentaje de error con respecto a la frecuencia de resonancia pretendida (2.4GHz) es:

$$\% \text{ error} = \frac{|2.47 \text{ GHz} - 2.4 \text{ GHz}|}{2.4 \text{ GHz}} * 100\% = 2.91 \%$$

En el valor medio real el porcentaje de error con respecto a la frecuencia de resonancia pretendida (2.4GHz) es:

$$\% \text{ error} = \frac{|2.49 \text{ GHz} - 2.4 \text{ GHz}|}{2.4 \text{ GHz}} * 100\% = 3.75 \%$$

Luego de realizar las comparaciones se puede evidenciar claramente que el porcentaje de error es mínimo en la parte real, para la frecuencia de 2.45 GHz es menor a 2% y para la frecuencia de 2.4 GHz es menor a 4%, teniendo en cuenta que el error porcentual debe ser menor a 5%. Lo que convierte a esta matriz de antenas que operen normalmente a la frecuencia de trabajo deseada.

3.8 Acoplamiento y análisis del circuito rectificador/multiplicador de voltaje con la matriz de antenas logarítmica espiral.

La figura 46 muestra el montaje del circuito con la matriz de rectenna logarítmica espiral, la medición obtenida es de 568 mV. Este valor es la medición directa de salida del rectificador/multiplicador de voltaje.

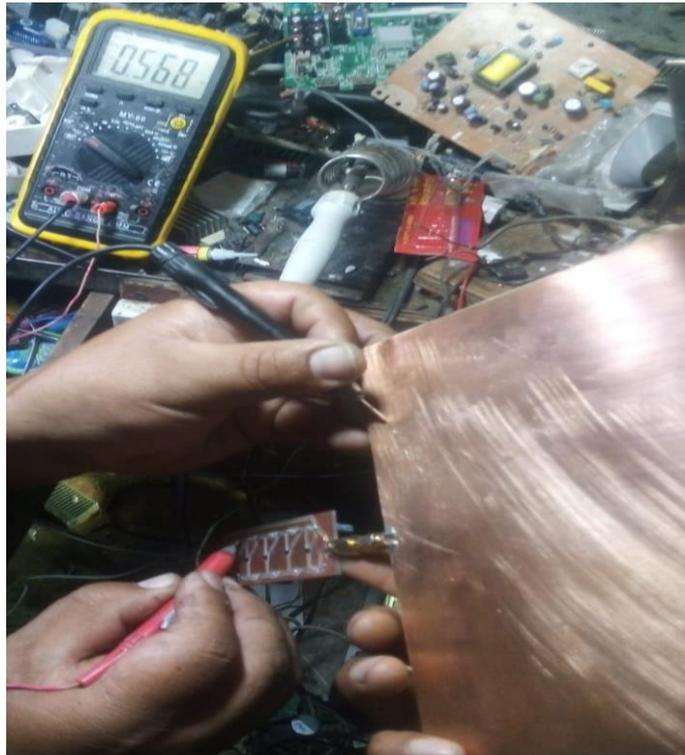


Figura 46. Salida de voltaje directa empleando la matriz de rectenna logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

La siguiente figura muestra el sistema completo y empleando la batería para su respectiva recarga, se visualiza la conexión del sistema completo para la recolección de energía con la integración de una batería de la marca GP HI-POWER MIMH BATTERY de 9V a 170 mAh.



Figura 47. Salida de voltaje directa empleando la matriz de rectenna logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

La siguiente figura muestra el sistema completo y empleando la batería para su respectiva recarga, se visualiza la conexión del sistema completo para la recolección de energía con la integración de una batería recargable de 3.6Va 80 mAh Ni-Mh.



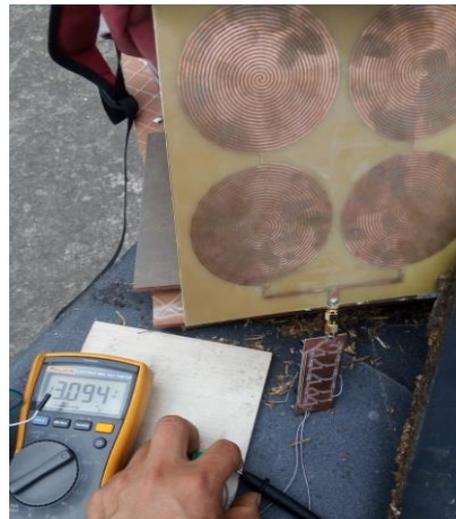
Figura 48. Salida de voltaje directa empleando la matriz de rectenna logarítmica espiral.

Elaborado por: Investigador.

Implementada la conexión del sistema completo: Matriz de antenas, rectificador/multiplicador de voltaje y las baterías, se procedió a realizar las mediciones de voltaje. En la figura 49(a) muestra la medición en la batería de 9V un voltaje de 6.365 V y en la figura 49(b) muestra la medición en la batería de 3.6V un voltaje de 3.094 V



(a)



(b)

Figura 49. Medición de voltaje: (a) Medición directa empleando la batería de 9V, (b) Medición directa empleando la batería de 3.6 V.

Elaborado por: Investigador.

3.9 Pruebas de almacenamiento

Los valores de medición se realizaron en ambientes diferentes debido a la presencia de distintos campos electromagnéticos así para obtener datos reales. Para cada prueba de almacenamiento se determinó la capacidad en la batería recargable de 9V y de 3.6V, antes y después del proceso de recolección de energía. La comprobación en la matriz de rectenna se detalla en las siguientes tablas con sus tiempos transcurridos de carga.

Tabla 5: Almacenamiento en la batería de 9V con la matriz de antena logarítmica espiral

Ambiente	Batería	Voltaje Inicial (mV)	Tiempo 30 (min)	Tiempo 60 (min)	Tiempo 120 (min)	Voltaje almacenado (mV)
Modem de internet	9V	732	773	786	806	74
Internet biblioteca	9V	728	741	785	810	72
Antenas offset	9V	6024	6129	6241	6365	341

Elaborado por: Investigador

Tabla 6: Almacenamiento en la batería de 3.6 V con la matriz de antena logarítmica espiral

Ambiente	Batería	Voltaje Inicial (mV)	Tiempo 30 (min)	Tiempo 60 (min)	Tiempo 120 (min)	Voltaje almacenado (mV)
Modem de internet	3.6V	2654	2690	2697	2702	48
Internet biblioteca	3.6V	3654	3660	3710	3727	73
Antenas offset	3.6V	2366	2409	2808	3552	1186

Elaborado por: Investigador

Las pruebas realizadas en los diferentes ambientes, con la batería, con la matriz de antenas, el rectificador/multiplicador de voltaje, estos dan como resultado mediciones de acuerdo a los diseños realizados en cada simulación. El sistema acoplado a la batería otorga tiempo de carga lenta, se debe a la reacción química producida dentro de la misma, las ondas de RF tienen variación debido al tiempo climático, la terminación del prototipo y factores propios del medio ambiente. En general la rectenna y sus diseños son prometedores ya que otorgan una captación de la energía electromagnética conocida en Wi-Fi y también en otras.

Comparación Antena con trabajo similar

Considerando el proceso de la matriz de rectenna se usa como referencia el estudio realizado por la Ing. Evelyn Freire [47], donde elabora 2 antenas, una de ellas la antena logarítmica espiral, la cual se compara con la matriz de rectenna logarítmica espiral aquí fabricada, se analizan los resultados obtenidos en las mediciones prácticas reales y posteriormente haciendo pruebas de recolección de energía electromagnética con la ayuda de los circuitos del trabajo realizado por el Ing. Dario Balarezo [36], utilizando las condiciones del medio ambiente mencionados anteriormente.

A continuación, se presenta las Antenas fabricadas a comparar:



(a) Antena Ing. Evelyn Freire



(b) Matriz de antenas Dario Pillajo

Figura 50. Antenas logarítmicas espirales a comparar.

En [47], la Ing. Evelyn Freire diseña 2 antenas, una de ellas es la antena logarítmica espiral, la cual se compara con la matriz de antenas aquí fabricada, se analizan los resultados obtenidos en la medición práctica con el analizador Mini NVA-Tiny con relación al parámetro S_{11} obteniendo un valor de -10 dB, y en el presente trabajo de -18dB. La etapa de multiplicador de voltaje en [47], realiza un análisis de simulación en el software Proteus, con un circuito de 2 etapas de multiplicación. Por el contrario, en el presente proyecto realiza el circuito de 5 etapas de multiplicación analizando en el mismo

software. Cabe indicar que las mediciones se realizaron en los mismos ambientes y bajo las mismas condiciones. La tabla 7 resume las características y valores obtenidos en la medición real en relación al trabajo de la Ing. Evelyn Freire [47] existente en la Universidad Técnica de Ambato, muestra la comparativa del producto final y del presente trabajo.

Tabla 7: Comparativa de trabajos previos dentro de la UTA.

Ambiente	Antena logarítmica espiral	Matriz de rectenna
Módem de Internet	47mV	74 mV
Internet de la Biblioteca	23 mV	72 mV
Terraza con antenas offset	69 mV	341 mV

Elaborado por: Investigador.

3.10 Figura de almacenamiento con batería recargable

Se puede observar en las figuras a continuación la tendencia lineal de color azul(voltaje) y la línea de tendencia de color anaranjado. La tendencia es una herramienta de análisis la cual permite reflejar dos o más puntos de una serie de una gráfica que interpretan más allá de los datos reales permitiendo representar los posibles valores futuros de acuerdo a su tendencia.

Para la batería de 9V

a) Módem de Internet

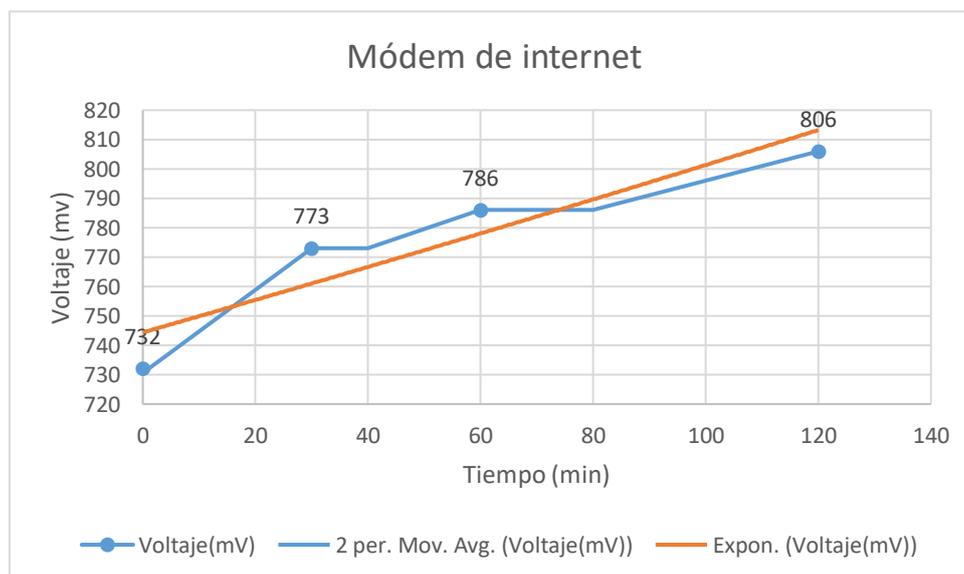


Figura 51. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en el ambiente frente a un módem de internet.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 51 se presenta la matriz de rectenna frente a un módem de internet y muestra el almacenamiento del voltaje de 74 mV, se realizaron muestras en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente. Al iniciar el proceso la carga en la batería fue de 732 mV, y la carga final trascurrido dos horas fue 806 mV.

b) Internet en la biblioteca

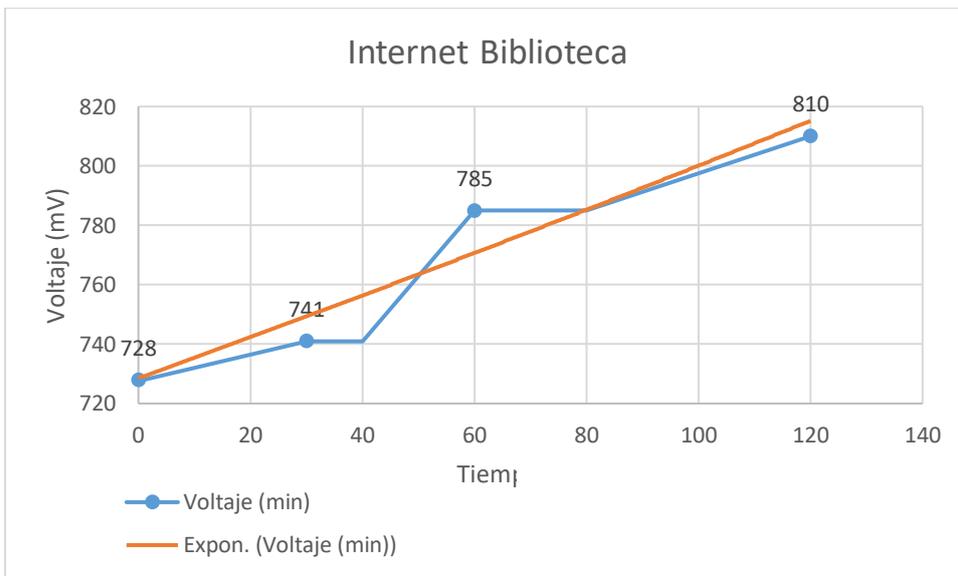


Figura 52. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en la biblioteca.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 52 se presenta la matriz de rectenna en la biblioteca y muestra el almacenamiento del voltaje de 72 mV, se realizaron muestras en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente. Al iniciar el proceso la carga en la batería fue de 728 mV, y la carga final trascurrido dos horas fue 810 mV.

c) Antena Offset

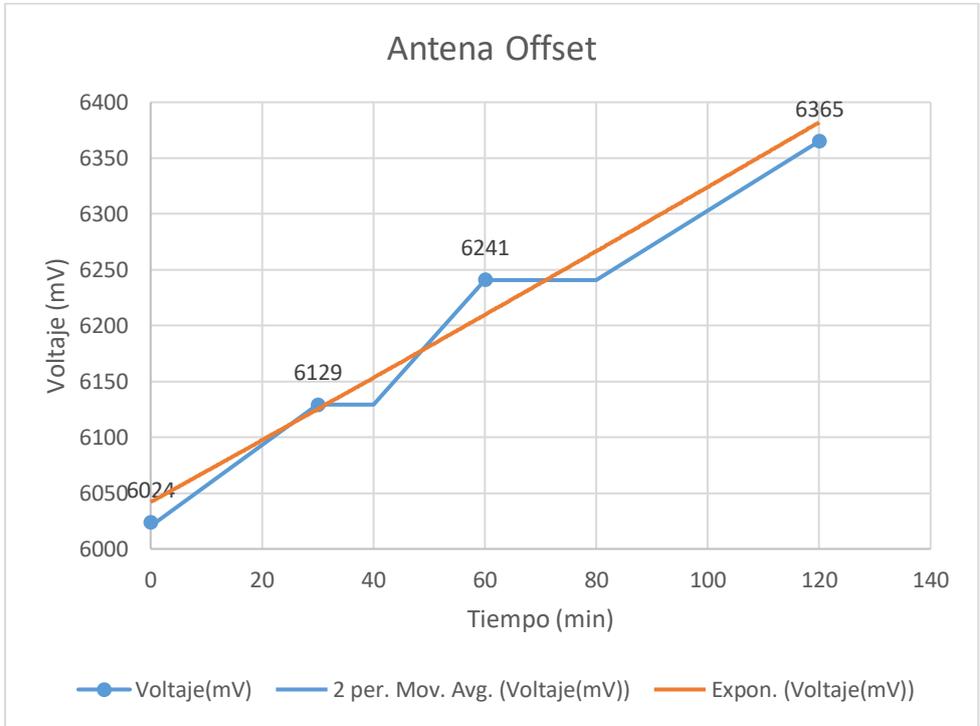


Figura 53. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en el ambiente frente a las antenas offset.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 53 se presenta la matriz de rectenna frente a las antenas offset y muestra el almacenamiento del voltaje de 341 mV, se realizaron muestras en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente. Al iniciar el proceso la carga en la batería fue de 6024 mV, y la carga final trascurrido dos horas fue 6365 mV.

Para la batería de 3.6 V

a) Internet del módem

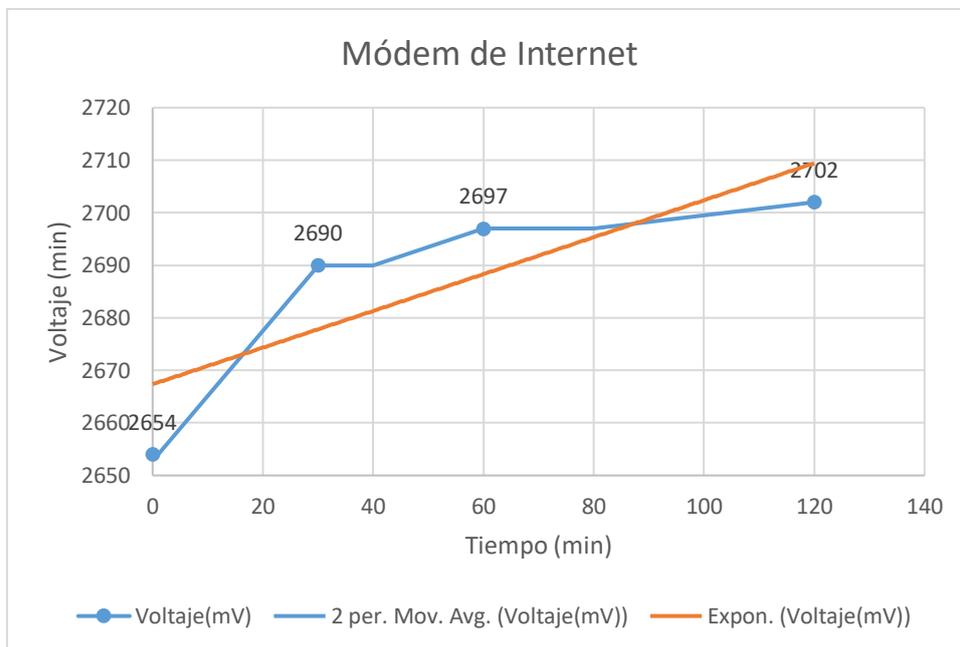


Figura 54. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en el ambiente frente a un módem de internet.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 54 se presenta la matriz de rectenna frente a un módem de internet y muestra el almacenamiento del voltaje de 48 mV, se realizaron muestras en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente. Al iniciar el proceso la carga en la batería fue de 2654 mV, y la carga final trascurrido dos horas fue 2702 mV.

b) Internet de la Biblioteca

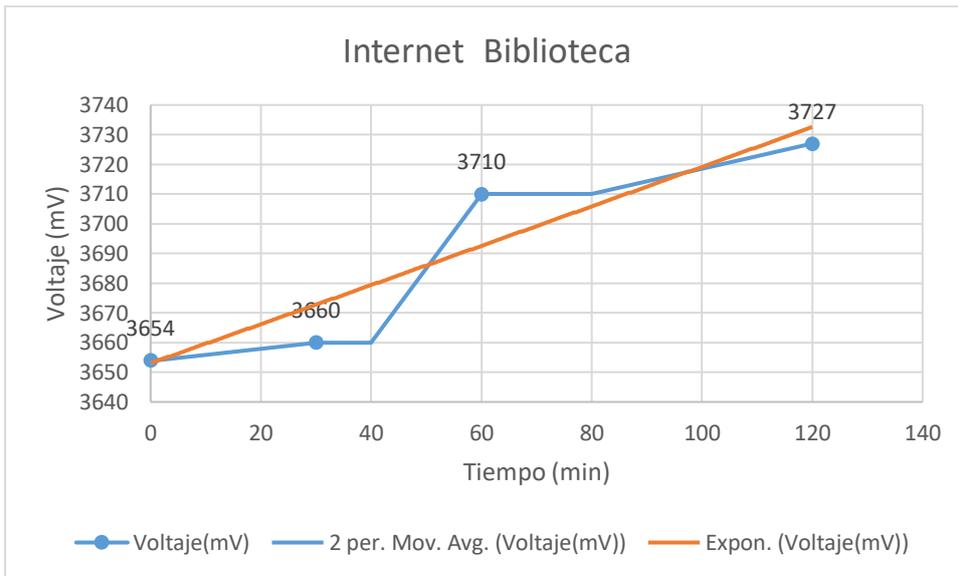


Figura 55. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en la biblioteca.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 55 se presenta la matriz de rectenna en la biblioteca y muestra el almacenamiento del voltaje de 73 mV, se realizaron muestras en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente. Al iniciar el proceso la carga en la batería fue de 3654 mV, y la carga final trascurrido dos horas fue 3727 mV.

c) Antena offset

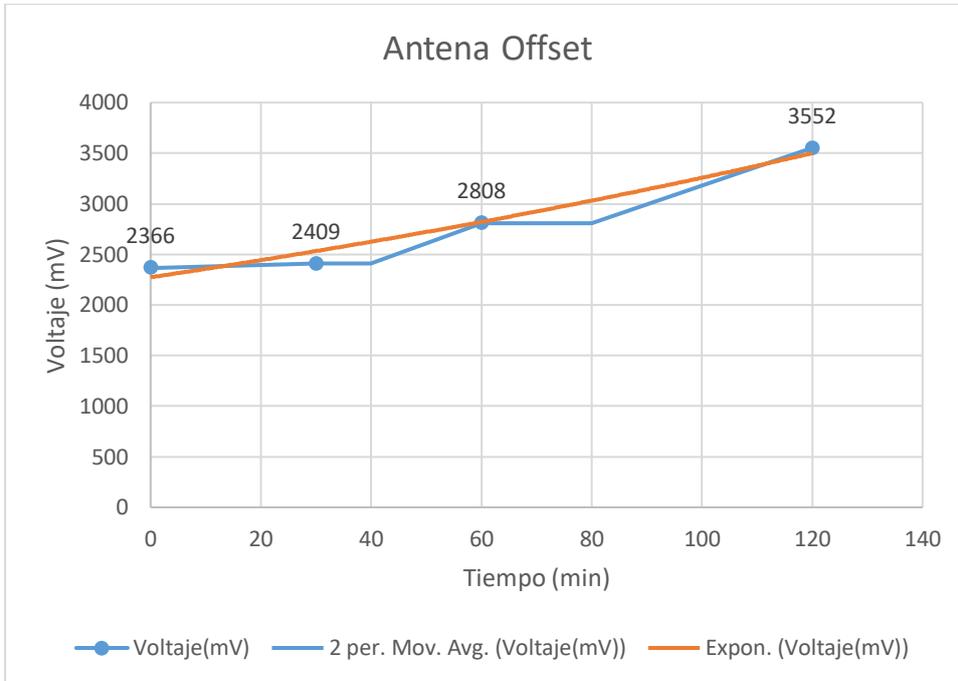


Figura 56. Voltaje almacenado de la matriz de rectenna en el ambiente frente a las antenas offset.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 56 se presenta la matriz de rectenna frente a las antenas offset y muestra el almacenamiento del voltaje de 1186 mV, se realizaron muestras en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente. Al iniciar el proceso la carga en la batería fue de 2366 mV, y la carga final trascurrido dos horas fue 3552mV.

Comparativa de almacenamiento de voltaje entre el prototipo de la ing. Evelyn Freire y este trabajo.

a) Internet de modem

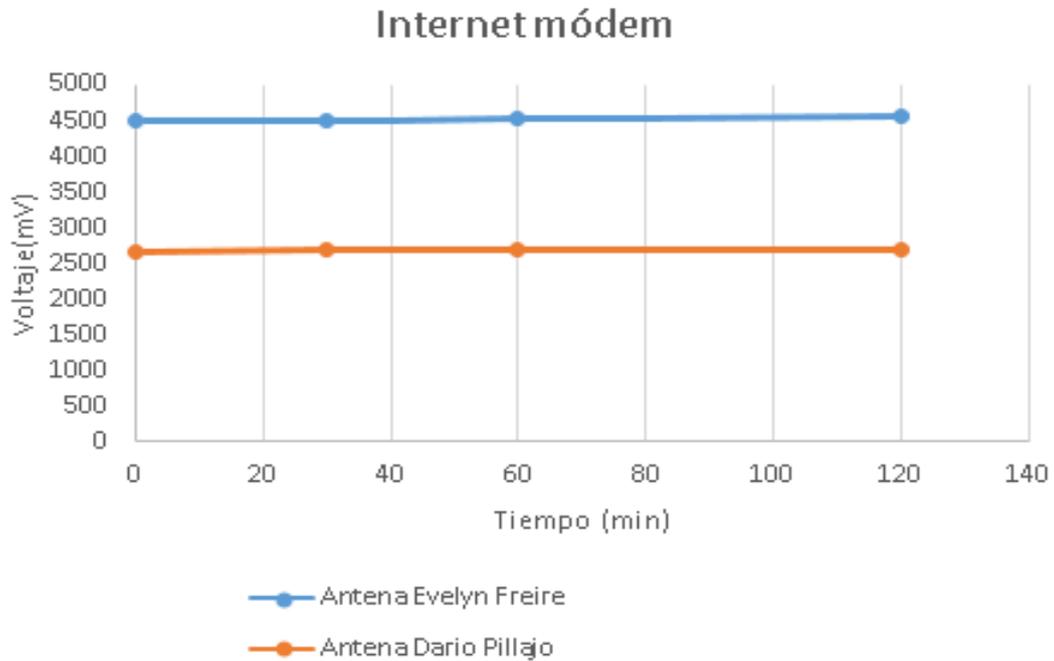


Figura 57. Voltaje almacenado en el ambiente frente internet de módem.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 57 se presenta la comparación entre la antena de la ing. Evelyn Freire y la matriz de rectenna frente al internet de un módem, cabe resaltar que en la antena de la ing. Evelyn Freire la carga al iniciar el proceso fue de 4500 mV, en el presente trabajo la carga inicial fue de 2500 mV en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente y la carga final trascurrido dos horas en la antena de la ing. Evelyn Freire fue 47 mV, mientras en este proyecto fue de 48 mV.

b) **Internet de biblioteca**

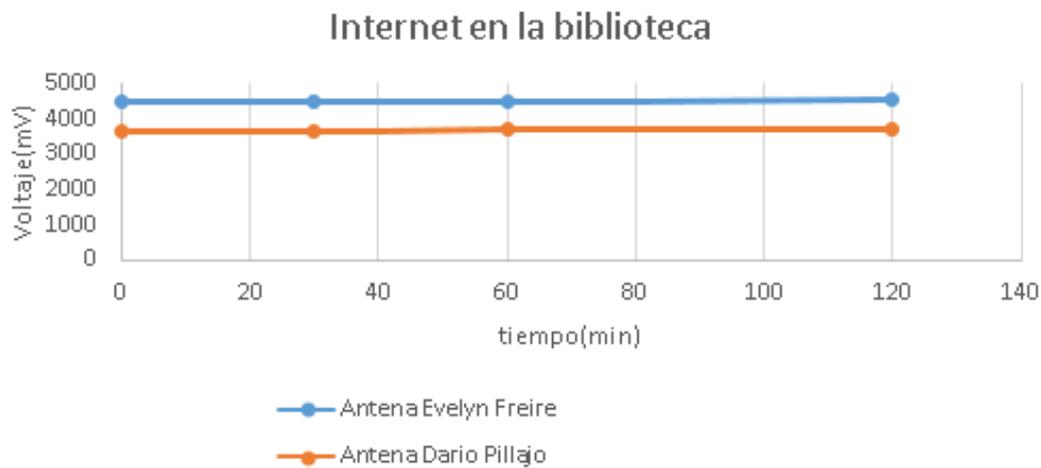


Figura 58. Voltaje almacenado en el ambiente en de la biblioteca.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 58 se presenta la comparación entre la antena de la ing. Evelyn Freire y la matriz de rectenna frente en la biblioteca, cabe resaltar que en la antena de la ing. Evelyn Freire la carga al iniciar el proceso fue de 4500 mV, en el presente trabajo la carga inicial fue de 3600 mV en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente y la carga final trascurrido media hora en la antena de la ing. Evelyn Freire fue 23 mV, mientras en este proyecto fue de 73 mV.

c) **Antenas offset**

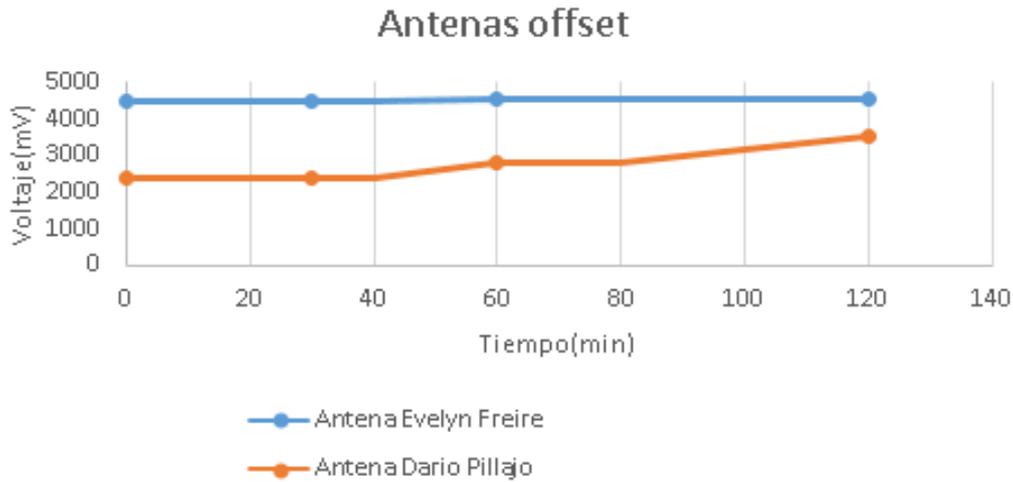


Figura 59. Voltaje almacenado en el entorno frente a las antenas offset.

Elaborado por: Investigador.

En la figura 59 se presenta la comparación entre la antena de la ing. Evelyn Freire y la matriz de rectenna frente a las antenas offset, cabe resaltar que en la antena de la ing. Evelyn Freire la carga al iniciar el proceso fue de 4500 mV, en el presente trabajo la carga inicial fue de 2300 mV en los siguientes tiempos: (0-30) min, (30-60) min, (60-120) min respectivamente y la carga final trascurrido media hora en la antena de la ing. Evelyn Freire fue 69 mV, mientras en este proyecto fue de 1186 mV.

3.11 Presupuesto

En la implementación del prototipo matriz de rectenna logarítmica espiral para la captación de energía RF es importante valorar el aspecto económico. Para lo cual se utilizó materiales de uso comercial, el valor final no refleja al valor comparable de los cargadores comerciales los cuales se distribuyen en las empresas de venta al público. En la tabla siguiente se detallan los costes de cada uno.

Tabla 8: Presupuesto de fabricación de la matriz rectenna logarítmica espiral.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	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
Total					197,23

Elaborado por: Investigador

Finalmente, para tener el presupuesto total se analiza el proyecto desde el inicio hasta su finalización presentado en la tabla 8. Presupuesto que asciende a CIENTO NOVENTA Y SIETE DOLARES CON VEINTE TRES CENTAVOS, financiado por el investigador.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- En este proyecto se presenta la matriz de antenas espirales logarítmicas diseñadas y fabricadas para ser utilizadas en la captación de energía electromagnética en la frecuencia de 2.4 GHz con ancho de banda considerable. Este conjunto de antenas está compuesto de cuatro antenas espirales conectadas entre sí empleando tecnología microstrip. Una vez realizados los cálculos: ancho en cada brazo de las antenas, espacio entre ellos, distanciamiento entre cada antena y parámetros de acople, se concluye que los valores en la simulación, los valores medidos con el instrumento miniNVA Tiny y los valores medidos reales presentan resultados válidos y demostrando su eficacia aplicados en este diseño. Además, al ser una matriz de antenas tipo parche hará que sea muy útil y fácil de incorporar con otros dispositivos.
- Mediante las investigaciones realizadas fue posible determinar cada uno de los parámetros y adaptar de manera eficiente al presente proyecto, la simulación se realizó con la ayuda del software especializado CST Studio 2018 siendo un programa robusto para diseñar antenas, esta herramienta permitió variar los parámetros de construcción de la matriz de antenas espirales, analizando secuencialmente los resultados principalmente del parámetros S11 y del valor del VSWR hasta conseguir resultados óptimos dentro de la frecuencia centralizada de 2.4 GHz al ser la frecuencia más explorada en el espectro electromagnético.
- Para el diseño del rectificador/multiplicador de voltaje se realiza de manera correcta con resultado óptimo cabe resaltar que tiene relación directa con la matriz de antenas espirales logarítmicas, la simulación se realizó en el software Proteus de manera correcta, la energía captada por el arreglo de antenas suele ser pequeña es por ello se implementa el circuito basado en el multiplicador de Villard puesto que es una topología excelente por ende entrega voltaje de salida más altos.

- Mediante el diseño y el análisis de la matriz de rectennas se alcanzaron los objetivos planteados y se verificó que trabaja en la frecuencia de 2.4GHz. Se realizó las mediciones en diferentes ambientes dando como resultado en el entorno cercano a un módem de internet de casa una carga de 48 mV, cercano al Internet en la biblioteca la carga fue de 73 mV y en antenas offset de la Facultad(FISEI) la carga fue de 1186mV trascurridos dos horas en el tiempo de carga, de esta manera opera en los sistemas de comunicación en tecnología 4G LTE y Wi-Fi. Esta matriz de rectennas son compactas y de un costo aceptable.

4.2 Recomendaciones

- Un planteamiento claro y necesario para futuras investigaciones se encuentra en el diseño de sistemas capaces de captar energía a otras frecuencias, como lo es hoy en la actualidad la tecnología llamada 5G, de igual manera con antenas y arreglos de antenas para obtener una mejor captación de señal.
- Investigadores a futuro deben tener en cuenta las características mínimas de carga, para así tener un valor promedio evitando emplear circuitos adicionales o realizar circuitos de acoplamiento más eficientes para regular la tensión de salida y tener un consumo más óptimo y sin que afecte el rendimiento del sistema.
- Analizar los diseños, simulaciones y fabricación de las antenas o rectennas sobre los materiales dieléctricos y que permitan una recolección y carga de baterías más eficiente y de menor tiempo posible.
- La cantidad de energía electromagnética que se puede recolectar está directamente relacionada con la potencia de la fuente, la forma de suministro energético para los dispositivos es pequeña debido a que los componentes electrónicos que existen en el mercado son solo de uso comercial y no están adecuados para aplicaciones de este tipo. Pero la tecnología día a día avanza y está creando muchos dispositivos cuyo régimen de trabajo exige mínima energía.

Bibliografía

- [1] M. Fayos José, «Diseño de antenas compactas para aplicaciones de Energy Harvesting,» Valencia, 2015.
- [2] C. Zavala David, «Estudio y desarrollo de un sistema de captación de energía RF en redes WSN,» Catalunya, 2018.
- [3] A. Contreras, «Rectennas for Energy Harvesting from RF Communication Systems: A Review/Rectenas para el Cosechamiento de Energía de los Sistemas de Comunicaciones en RF: Una Revisión.,» Maracaibo- Venezuela, 43, 2020.
- [4] J. Aguila Alonso, «Diseño y fabricación de arreglo de antenas impresas para microondas,» Universidad Nacional de Cuyo, Instituto Balseiro, 2020.
- [5] O. Edison Andrés Zapata, G. Francisco López y G. Germán David, «Simulation of a Rectangular Spiral Microstrip Multiband Antenna for Radio Frequency Energy Harvest,» Colombia, 2021.
- [6] S. Fatima KhalidAna Noshawan, «Quad-Band 3D Rectenna Array for Ambient RF Energy Harvesting,» *Hindawi*, p. 23, 2020.
- [7] S. Chaoyun, H. Yi y M. Senior, «A Hgh-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting,» *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, vol. 63, nº 8, 2015.
- [8] S. Keyan, Y. Kou y D. Hongsheng, «The design of phase change materials with carbon aerogel composites for multi-responsive thermal energy capture and storage,» *JournalofMaterialsChemistry A*,, 2021.
- [9] A. Mohamed, M. Islam, M. Mohamed y B. Adel, «Dual-band Rectenna Using Voltage Doubler Rectifier and Four-SectionMatching Network,» *Conferencia de transferencia de energía inalámbrica IEEE*, p. 4, 2018.

- [10] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, México, Juárez:: Pearson Educación, 2003.
- [11] P. David Michael, *MicrowaveEngineering*, 2011.
- [12] N. Figaro, «Propagación de ondas electromagnéticas,» Hawaii, USA, 2006.
- [13] P. Navarro Antoni, *Ondas electromagnéticas. Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas*, Catalunya: ouc, 2011.
- [14] M. Huidobro José, «Antenas de telecomunicaciones,» *CEDRO*, p. 19, 2013.
- [15] F. Sears, H. Young y R. Eredman, *Física Universitaria con Física Moderna*, Mexico: Pearson, 2005.
- [16] A. Bava, *ANTENAS REFLECTORAS EN MICROONDAS*, Buenos aires, Argentina: Edulp, 2013.
- [17] M. Freire Néstor Guillermo, «CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA PRÁCTICAS DE PROPAGACION DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN LA FACULTAD DE INGENIERIA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL,» Ambato, Ecuador, 2015.
- [18] S. John Wiley, «ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN,» THIRD EDITION, 2016.
- [19] A. Chávez Oscar Andrés, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA YAGI UDA MEDIANTE EL USO DE ALGORITMO GENÉTICOS PARA EL LABORATORIO DE ANTENAS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA,» Quito, 2015.
- [20] L. Manuel Gilberto Fernández, «MANUAL PARA LA CORRECTA SELECCIÓN DE ANTENAS EN PROYECTOS DE TELEFONÍA MÓVIL, A TRAVÉS DE LA CORRECTA COMPARACIÓN DE SUS PARÁMETROS BÁSICOS Y LA SIMULACIÓN DE SU PATRÓN DE RADIACIÓN POR SOFTWARE,» Guatemala, 2020.

- [21] M. Emilio, F. Ana Maria y C. Guillermo, «Conceptos generales de Antenas,» Tucumán, 2011.
- [22] C. Trujillo Raúl, «ANTENAS MIMO MULTIBANDA,» Madrid, 2019.
- [23] Z. Bryan Javier Cerquera, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RECTENNA PARA COSECHAR ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA A 2.4 GHZ.,» Bogota, 2020.
- [24] N. Karen Nallely Olan, «Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas.,» Karen Nallely Olan Nuñez, 2019.
- [25] S. Simon y Z. Alejandro Aragón, *Antennas and propagation for wireless communication Systems*, Mexico: Second Edition, 2007.
- [26] S. Warren L y T. Gary A, *Antenna theory and design*, John Wiley & Sons, 2012.
- [27] P. Castiella Miguel Angel, «DESARROLLO DE UNA ANTENA ESPIRAL DE DOBLE BANDA TRABAJANDO EN EL RANGO DE LAS SUB-MILIMÉTRICAS,» Pamplona, 2014.
- [28] A. Bautista, C. Carolina y M. Edgar Javier, «DISEÑO Y ANÁLISIS DE ARREGLO LINEAL DE ANTENAS DIPOLO,» *Revista de Investigaciones*, vol. 10, nº 10, 2017.
- [29] M. Abraham Alejandro Cruz, *Arreglo de antenas parches de banda ancha para la frecuencia de 5Ghz*, Santa Clara, Cuba, 2019.
- [30] D. M. Poza, *Microwave Engineering*, 3e. Wiley, 32006.
- [31] B. Arteaga José Daniel, *PRODUCCIÓN Y RECOLECCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES: COSECHA ENERGÉTICA*, NEIVA - HUILA, 2020.
- [32] P. Siljeström Galiana, *Diseño de una "rectenna" en la banda WiFi de 2.45GHz para aplicaciones de captación de energía electromagnética : energy harvesting*, Cartagena, 2015.

- [33] R. Fredy Alexander Jiménez, *Análisis del estado actual de la tecnología Energy Harvesting (Recolectores de energía) basados en piezoelectricidad.*, Bogotá, Colombia , 2018.
- [34] P. Vargas Quilla Juan, *Estudio de la cosecha energética aplicando la razón electromagnética de energía infinita de tesla en la biotecnología*, PUNO – PERÚ, 2019.
- [35] I. Criollo Paredes Walter, «SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA PARA ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EN DISPOSITIVOS MÓVILES,» Ambato-Ecuador, 2021.
- [36] J. Ángel Dario Blarezo, «Optimización del sistema de acondicionamiento para un dispositivo de captación de energía electromagnética,» Ambato- Ecuador, 2021.
- [37] B. Newton C., «Institute NCB,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.incb.com.mx/index.php/articulos/53-como-funcionan/9674-como-funciona-el-diodo-schottky-art826s..>
- [38] L. Diana Magally Barrón, N. Enrique Stevens y C. Armando Arce, «COMPARACION DE CIRCUITOS MULTIPLICADORES DE VOLTAJE PARA COSECHA DE ENERGIA EN RF,» México, 2020.
- [39] D. Pazmiño Rodríguez Guillermo, «ANÁLISIS COMPARATIVO DE ANTENAS TIPO PATCH CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP EN LA BANDA X,» SANGOLQUÍ, 2018.
- [40] A. Constantine Balanis, «Theory: Analysis and Design,» 4th Edición, 1999.
- [41] V. Christoper Emmanuel Moreno, A. Edgar Mauricio Ortiz y V. Rubén Ismael Rojas, «Cosecha de energía por medio de señales de radiofrecuencia,» Ciudad de México, 2016.
- [42] I. Hinostroza, «Design of wideband arrays of spiral antennas.,» HAL open science, 2013.
- [43] R. Alvera Raxel, «“Diseño de antena espiral de Arquímedes”,» Santa Clara, 2009.

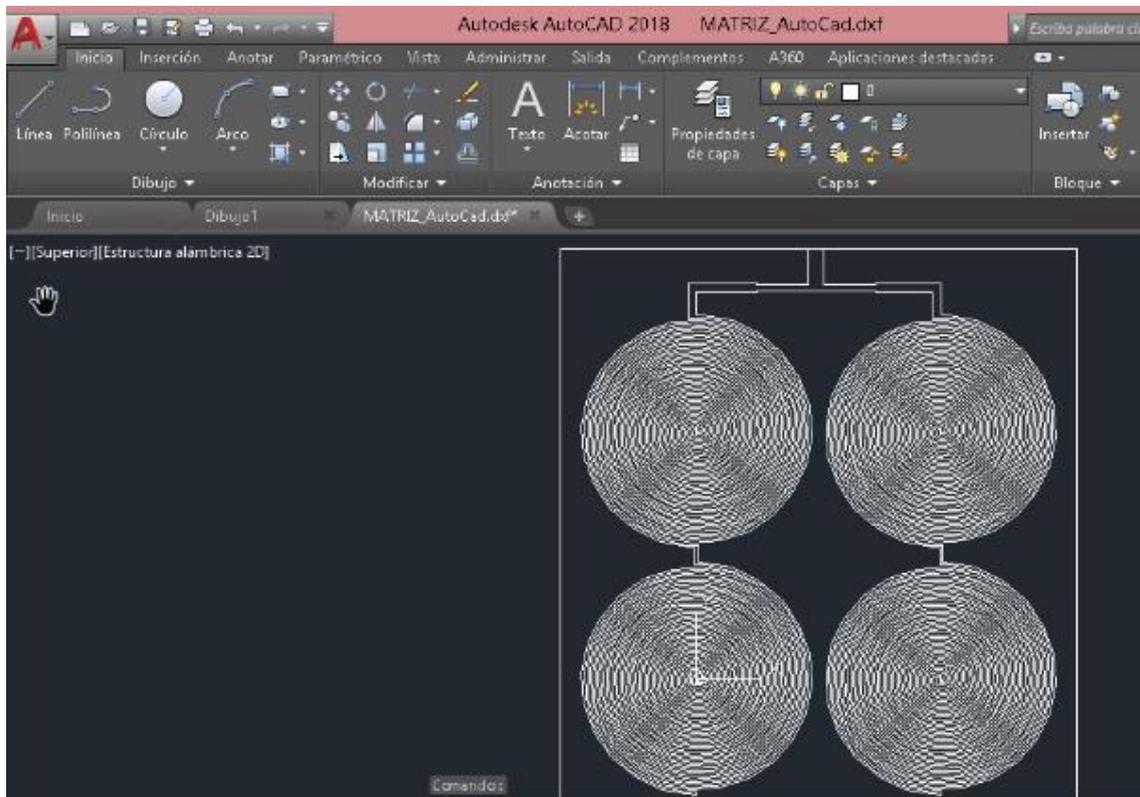
- [44] R. V. Martínez, «Diseño y construcción de una rectena de alta eficiencia para la recuperación y transformación de energía de RF y microondas en energía eléctrica,» CICESE, México, 2022.
- [45] «WiMo Antennen und Elektronik GmbH,» WIMO , 30 junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.wimo.com/en/minivna-tiny>.
- [46] S. Félix Saúl Reinoso, «"Optimización de antenas para sistemas de captación de energía electromagnética",» Ambato-Ecuador, 2021.
- [47] C. Evelyn Lisseth Freire, «ANTENAS LOGARÍTMICAS PARA APLICACIONES DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA.,» Ambato - Ecuador, 2021.

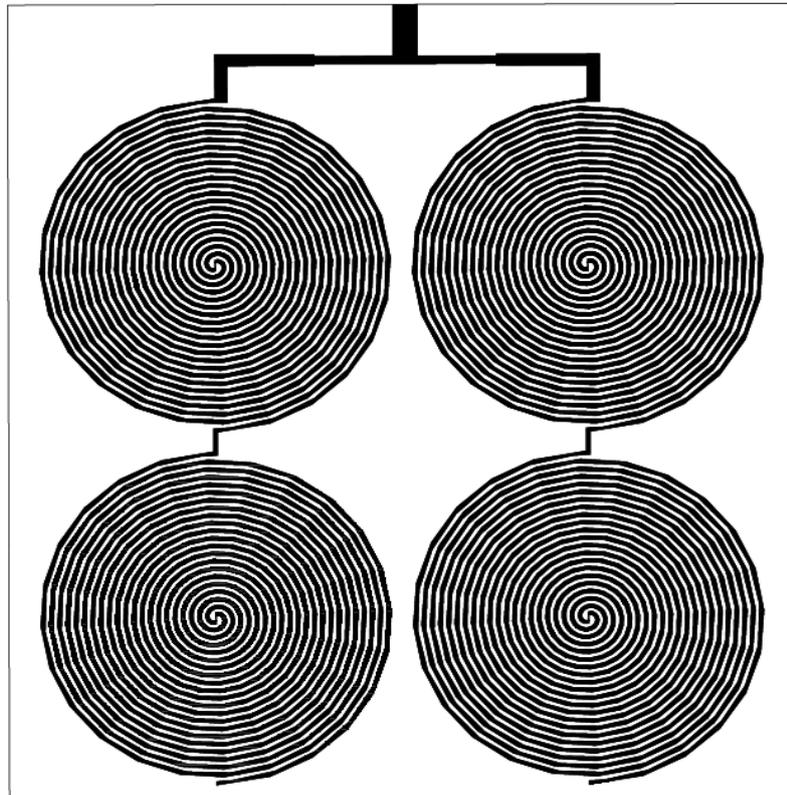
ANEXOS

ANEXO 1: PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA MATRIZ DE ANTENAS

La antena se envió a fabricar sobre sustrato RF-4 a la ciudad de Quito en la empresa APM la cual tiene un gran prestigio y experiencia, su trabajo es de forma artesanal para lo cual se envió el diseño con las dimensiones obtenidas en el software CST Studio 2018, los cuales fueron exportados hacia AutoCAD y verificar sus dimensiones y pasar a pdf posteriormente enviar a la empresa en mención.

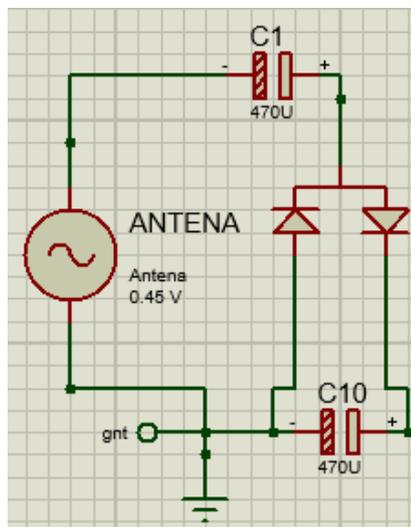
La comunicación se la realizo mediante correo electrónico y la aplicación WhatsApp debido a las limitaciones de movilidad por el tema del paro efectuado desde el 13 de junio finalizando el jueves 30 de junio del año en curso. Se presenta a continuación se presenta el diseño en AutoCAD y luego en pdf. Esta información previa a las emitidas por la empresa encargada de la impresión en el sustrato.



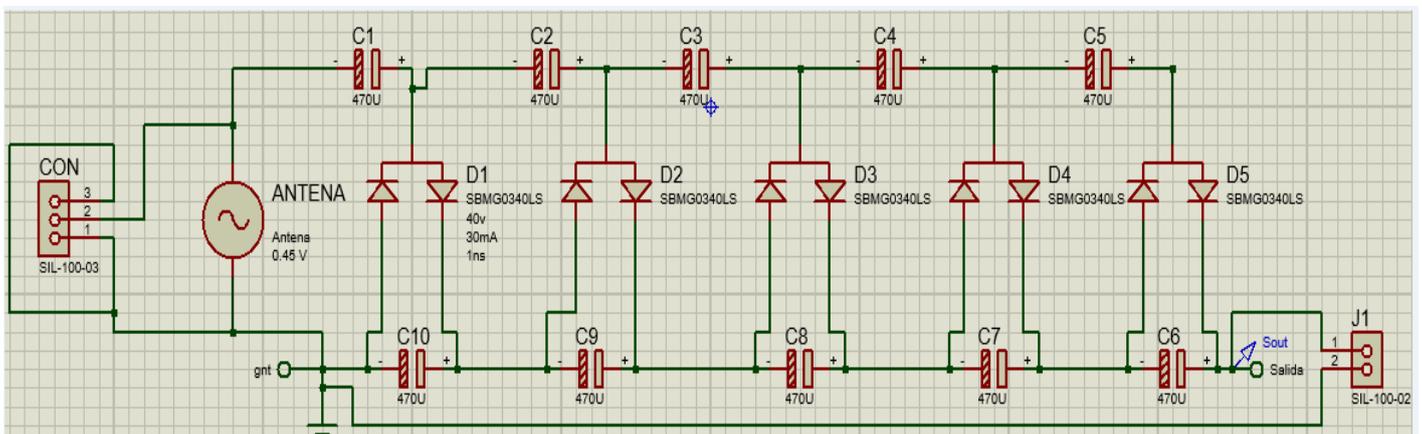


ANEXO2: PROCESO DE FABRICACIÓN DEL RECTIFICADOR/MULTIPLICADOR

Para la realización del multiplicador se basa en el circuito de Villard. Es un multiplicador sencillo y de uso aplicable, el cual consta de dos diodos y dos capacitores conectados como se indica en la figura



A partir de este circuito se procede a realizar el circuito multiplicador de 5 etapas con los elementos: capacitores de 470 Uf, diodos Schottky, conector SMA macho y una bornera de 2 pines.

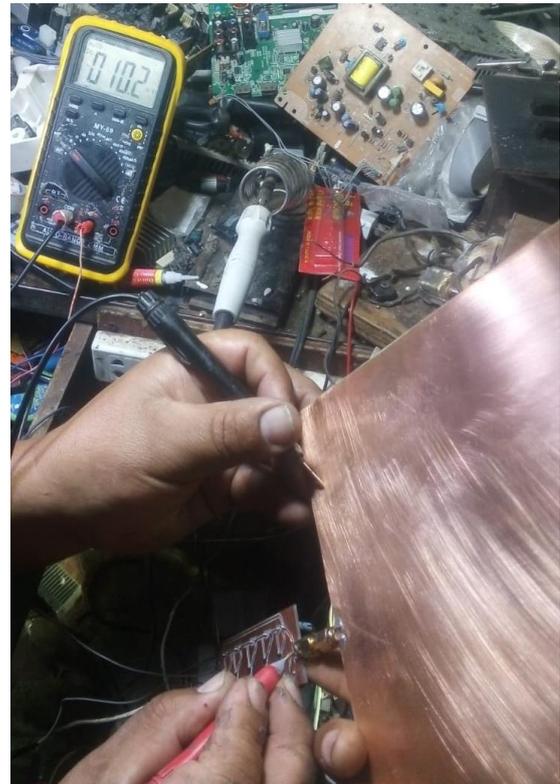


Luego de realizar la simulación se efectúa la placa con sus respectivos elementos



Las simulaciones muestran de forma correcta el voltaje duplicado en cada etapa, pero hay que tener en cuenta no sucede lo mismo en la práctica debido a parámetros del material, elementos por su consumo mínimo de energía para trabajar.

A continuación, se presenta las mediciones en cada etapa verificando su funcionamiento.



ANEXO 3: DATASHEET DIODO SCHOTTKY HSMS286 SERIE X



Surface Mount Microwave Schottky Detector Diodes

Technical Data

HSMS-2850 Series
HSMS-2860 Series

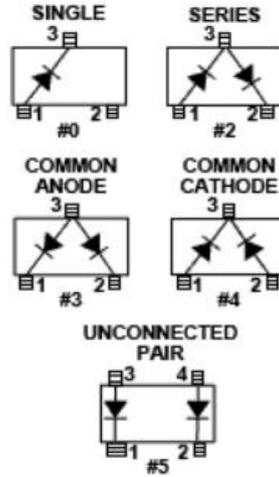
Features

- Surface Mount SOT-23/
SOT-143 Package
- 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 Flicker Noise:
-162 dBV/Hz at 100 Hz
- Low FIT (Failure in Time)
Rate*
- Tape and Reel Options
Available

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

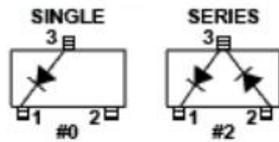
HSMS-2860

Package Lead Code Identification



HSMS-2850

Package Lead Code Identification



Description

Hewlett-Packard's HSMS-2850 family of zero bias Schottky detector diodes and the HSMS-2860 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 requiring small and large signal detection, modulation, RF to DC conversion or voltage doubling.

Available in various package configurations, these two families of detector diodes provide low cost solutions to a wide variety of design problems. Hewlett-Packard's manufacturing techniques assure that when two diodes are mounted into a single SOT-23 or SOT-143 package, they are taken from adjacent sites on the wafer, assuring the highest possible degree of match.

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

Part Number HSMS-	Package Marking Code ^[1]	Lead Code	Configuration	Maximum Forward Voltage V_F (mV)		Typical Capacitance C_T (pF)
				$I_F = 0.1 \text{ mA}$	$I_F = 1.0 \text{ mA}$	
2850	P0	0	Single	150	250	0.30
2852	P2	2	Series Pair ^[2,3]			
2855	P5	5	Unconnected Pair ^[3,3]			
2860	T0	0	Single	250	350	0.30
2862	T2	2	Series Pair ^[2,3]			
2863	T3	3	Common Anode ^[2,3]			
2864	T4	4	Common Cathode ^[2,3]			
2865	T5	5	Unconnected Pair ^[3,3]			
Test Conditions				$I_F = 0.1 \text{ mA}$	$I_F = 1.0 \text{ mA}$	$V_R = -0.5 \text{ V to } -1.0 \text{ V}$ $f = 1 \text{ MHz}$

Notes:

1. Package marking code is in white.
2. ΔV_F for diodes in pairs is 15.0 mV maximum at 1.0 mA.
3. ΔC_T for diodes in pairs is 0.05 pF maximum at -0.5 V.

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

Part Number HSMS-	Typical Tangential Sensitivity TSS (dBm) @ $f =$			Typical Voltage Sensitivity γ (mV/ μW) @ $f =$			Typical Video Resistance RV (K Ω)
	915 MHz	2.45 GHz	5.8 GHz	915 MHz	2.45 GHz	5.8 GHz	
2850 2852 2855	-57	-56	-55	40	30	22	8.0
Test Conditions	Video Bandwidth = 2 MHz Zero Bias			Power In = -40 dBm $R_L = 100\text{ K}\Omega$, Zero Bias			
2860 2862 2863 2864 2865	-57	-56	-55	50	35	25	5.0
Test Conditions	Video Bandwidth = 2 MHz $I_b = 5\ \mu\text{A}$			Power In = -40 dBm $R_L = 100\text{ K}\Omega$, $I_b = 5\ \mu\text{A}$			

Absolute Maximum Ratings, $T_a = +25^\circ\text{C}$, Single Diode

Symbol	Parameter	Absolute Maximum ⁽¹⁾	
		HSMS-285x	HSMS-286x
P_T	Total Device Dissipation ⁽²⁾	75 mW	250 mW
P_{IV}	Peak Inverse Voltage	2.0 V	4.0 V
T_J	Junction Temperature	150°C	150°C
T_{STG}	Storage Temperature	-65°C to 150°C	-65°C to 150°C
T_{OP}	Operating Temperature	-65°C to 150°C	-65°C to 150°C

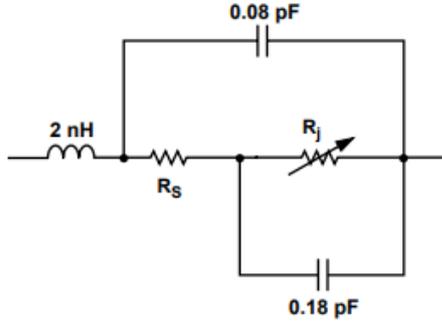
Notes:

- Operation in excess of any one of these conditions may result in permanent damage to the device.
- CW Power Dissipation at $T_{LEAD} = +25^\circ\text{C}$. Derate linearly to zero at maximum rated temperature.

ESD WARNING: Handling Precautions Should Be Taken To Avoid Static Discharge.

Equivalent Circuit Model

HSMS-2850, HSMS-2860;
Singles



R_S = series resistance (see Table of SPICE parameters)

$$R_j = \frac{8.33 \times 10^{-5} \text{ nT}}{I_b + I_s}$$

where

I_b = externally applied bias current in amps

I_s = saturation current (see table of SPICE parameters)

T = temperature, °K

n = identity factor (see table of SPICE parameters)

SPICE Parameters

Parameter	Units	HSMS-285X	HSMS-286X
B_V	V	3.8	7.0
C_{J0}	pF	0.18	0.18
E_G	eV	0.69	0.69
I_{BV}	A	$3 \times 10E-4$	$10E-5$
I_S	A	$3 \times 10E-6$	$5.0 \times 10E-8$
N		1.06	1.08
R_S	Ω	25	5.0
P_B (VJ)	V	0.35	0.65
P_T (XTI)		2	2
M		0.5	0.5

Typical Parameters, Single Diode

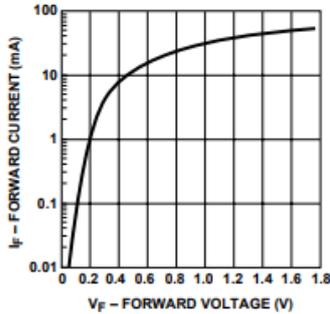


Figure 1. Typical Forward Current vs. Forward Voltage, HSMS-2850 Series.

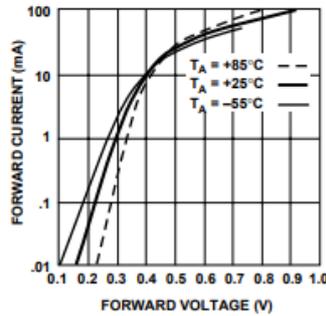


Figure 2. Typical Forward Current vs. Forward Voltage at Temperature, HSMS-2860 Series.

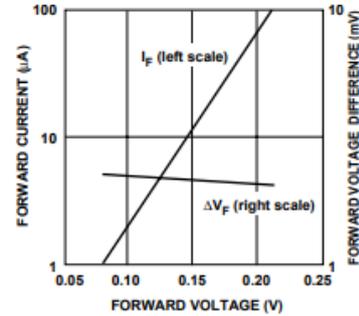


Figure 3. Typical Forward Voltage Match, HSMS-2860 Pairs.

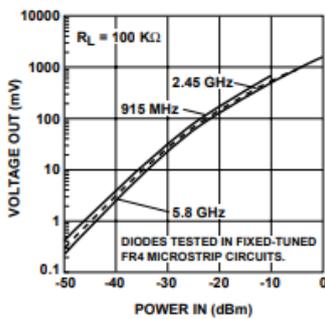


Figure 4. +25°C Output Voltage vs. Input Power, HSMS-2860 at 3 μ A Bias.

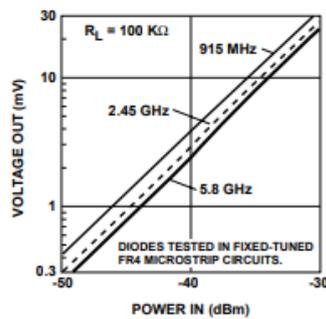


Figure 5. +25°C Expanded Output Voltage vs. Input Power. See Figure 4.

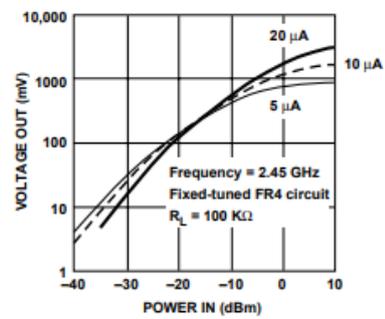
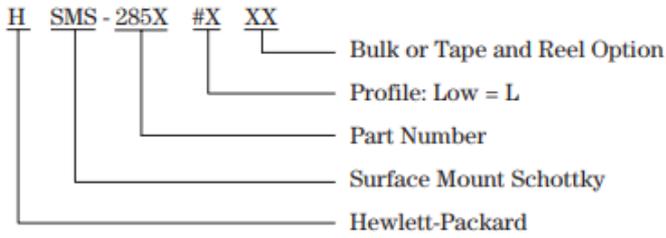


Figure 6. Dynamic Transfer Characteristic as a Function of DC Bias, HSMS-2860.

Ordering Information

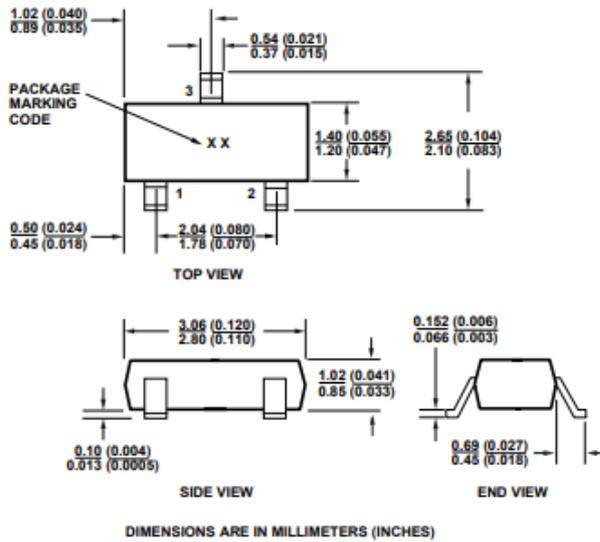
Specify part number followed by option. For example:



Profile Option Descriptions

#L30 = Bulk
 #L31 = 3K pc. Tape and Reel, Device Orientation Figures 9, 10
 Tape and Reeling conforms to Electronic Industries RS-481, "Taping of Surface Mounted Components for Automated Placement."

Package Dimensions Outline 23 (SOT-23)



ANEXO 4: MANUAL DEL ANALIZADOR MININVATINY



PC Based Vector Network Analyzers

miniVNA Tiny



The miniVNA Tiny, is a handheld pc based Vector Network Analyzer that makes available a multitude of features and capabilities which are perfect for checking antennas and RF circuits for hams and commercial users **from HF to SHF.**

Together with your PC/Laptop, you can add to your laboratory the further advantages of having this first-class VNA instrument.

This is the world's first analyzer with very extended frequency range up to 3GHz.

Specifications

- Frequency range from 1MHz to 3GHz
- Frequency step of 10Hz
- Range of Z from 1 to 1000 ohm
- RF Generator power output of -6dBm @ 500 MHz
- **Dynamic range of up to 70 dB @ 500 MHz**
- Supply is Powered from USB

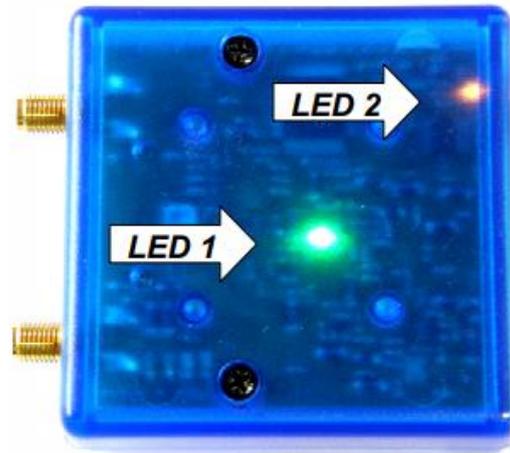
Features

- SMA connectors for better isolation
- Calibration using open-short-load for accurate results
- Two ports VNA with S11 and S21; displayed and save results
- Full Phase measurement
- Export data in several formats JPEG, EXCEL, ZPLOT, S2P, PDF
- Boot loader for future firmware upgrades
- User friendly interface for PC Windows Linux and Mac
- Integrated Smith chart in software
- Android Mobile Phone software free

Manual miniVNA Tiny Hardware

Software for MiniVNA by DL2SBA

LED Placement and meaning.
Led 1, green: Analog POWER ON
Led 2, orange: blinks during serial communication



Suggested Option:
CALIBRATION KIT, containing SMA open / short /
50Ohm termination
part no. 21010.SMA



ANEXO 5: FOTOGRAFÍAS DEL FUNCIONAMIENTO Y LA PRUEBA DE ALMACENAMIENTO

