

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA
E INDUSTRIAL.

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES.

TEMA: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA
ELECTROMAGNÉTICA PARA ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA
EN DISPOSITIVOS MÓVILES.

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Grado Académico de
Magister en Telecomunicaciones

MODALIDAD DE TITULACIÓN: PROYECTO DE
DESARROLLO.

Autor: Ing. Criollo Paredes Walter Iván.

Director: Ing. Carlos Diego Gordon Gallegos, PHD.

Ambato-Ecuador

2021

APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

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

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Magíster, e integrado por los señores Ingeniero Mario Geovanny García Carrillo Magíster e Ingeniero Julio Enrique Cují Rodríguez Magíster, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: **“SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA PARA ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EN DISPOSITIVOS MÓVILES”**, elaborado y presentado por el señor, Ingeniero, Walter Iván Criollo Paredes, para optar por el Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa.

Ing. Mario Geovanny García Carrillo, Mg.

Miembro del Tribunal de Defensa.

Ing. Julio Enrique Cují Rodríguez, Mg.

Miembro del Tribunal de Defensa.

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “**SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA PARA ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EN DISPOSITIVOS MÓVILES**”, le corresponde exclusivamente al: Ingeniero Walter Iván Criollo Paredes Autor, bajo la Dirección del Ingeniero Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD, director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Walter Iván Criollo Paredes.

AUTOR

Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PHD.

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Quien suscribe, **Criollo Paredes Walter Iván**, con C.C.: **1803696424**, autor del presente trabajo de investigación titulado: **“SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA PARA ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EN DISPOSITIVOS MÓVILES”**, cedo a título gratuito y en forma voluntaria los derechos a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas y regulaciones de la Institución.

Conforme a lo anteriormente expuesto y expresado, otorgo a la Universidad Técnica de Ambato, la facultad de comunicar la obra, divulgarla, publicarla y reproducirla en soportes analógicos o digitales en la oportunidad que así lo estime conveniente. Siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ing. Walter Iván Criollo Paredes.

C.C.: 1803696424

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios, por haberme dado la vida, por permitirme llegar a este momento muy importante en la formación profesional en mi vida, por otorgarme la salud, fuerza, fortaleza, guía en todo momento en especial en los peores momentos que a punto de caer he estado, con toda mi fe y desde lo más profundo de mi corazón mi dedicatoria a Dios por todo lo bueno y malo en mi vida.

A mi única guía en todo momento malo o bueno de mi vida, ya que desde niño de forma sabia supo formarme de la mejor manera en todo ámbito y a pesar de todos mis defectos y obstáculos en mi vida, siempre me guio para ser un hombre con buenos sentimientos y valores, el cual me ha permitido desarrollar como persona de bien y salir adelante en especial en los momentos difíciles de mi vida. Para mi abuelito que desde el cielo me sigue guiando con su presencia espiritual.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre y en especial a mi abuelito que en paz descanse, quien fue la persona que me motivo a continuar con mis estudios, el cual siempre me brindó su apoyo en todo momento. Aunque no está a mi lado, siempre me apoyo en mis momentos de derrotas y triunfos.

A mi querida institución la Universidad Técnica de Ambato que me acogió para poder realizar una meta que no creí posible, pero que con su apertura de formar y desarrollar profesionales de calidad y de cuarto nivel veo reflejado una meta más en mi vida.

A mi amigo y tutor Ing. Carlos Diego Gordon Gallegos, PHD, por su paciencia, apoyo y guía durante todo el proceso de desarrollo del presente trabajo.

A mis amigos y compañeros de clase que me brindaron todo su apoyo y conocimientos, en todo momento.

Índice

PORTADA	I
APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	I
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	II
DERECHOS DE AUTOR	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN EJECUTIVO	XV
EXECUTIVE SUMMARY	XVII
CAPÍTULO I	1
1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Justificación.	2
1.3. Objetivos.	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específico.	3
CAPÍTULO II	4
2. ESTADO DEL ARTE.	4
2.1. Antecedentes Investigativos.	4
2.2. Fundamentación teórica.	8
2.2.1. Principios.	8
2.2.2. Radio Sistemas y Antenas.	9
2.2.3. Ecuaciones de Maxwell	12
2.2.4. Parámetros fundamentales de antena.	13
2.2.5. Tipos de Antenas	18
2.2.6. Antenas Microstrip.	19
2.2.7. Técnicas de alimentación.	19
2.2.8. Alimentaciones de línea coaxial.	21
2.2.9. Antena espiral.	23
2.2.10. Técnicas de adaptación de impedancia.	25
2.2.11. Recolección o cosecha de energía.	31
2.2.12. Métodos de rectificación.	33
2.3. Solución a la propuesta.	35

CAPÍTULO III	36
3. METODOLOGÍA.	36
3.1. Enfoque.	36
3.2. Alcance.	36
3.3. Modalidad de la investigación.	37
3.3.1. Investigación bibliográfica.	37
3.3.2. Investigación de campo.	37
3.3.3. Investigación experimental.	37
3.4. Nivel o tipo de investigación.	37
3.5. Recolección de información.	38
3.6. Procesamiento y análisis	38
CAPÍTULO IV	39
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1. Resultados	39
4.1.1. Introducción.	39
4.1.2. Diseño estructural, cálculo y geometría de Antenas.	41
4.1.3. Resultados de simulación.	45
4.1.4. Fabricación de antenas.	51
4.1.5. Diseño e implementación de rectificadores.	52
4.2. Análisis de Resultados.	61
4.2.1. Comparación entre valor simulado y valor medido de las antenas.	61
4.2.2. Acoplamiento y análisis de sistema rectificación doblador de voltaje con las antenas HRPSA y ASMA.	63
CAPÍTULO V	70
5. Conclusiones y Recomendaciones.	70
5.1. Conclusiones.	70
5.2. Recomendaciones.	71
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	76
ANEXO 1: Diseño y Medidas de Antena de Estructura Planar con Resonador Híbrido (HRPSA) y Antena Multibanda Espiral de Arquímedes (ASMA).	76
ANEXO 2: Cálculo del ancho pistas para circuito rectificador doblador de voltaje empleando el software SATURN PCB DESIGN.INC.	77
ANEXO 3: Diseño, Medidas, Fabricación de circuito Rectificador, doblador de voltaje.	79
ANEXO 4: Diseño, Medidas, Fabricación caja acrílica montaje de circuito.	80

ANEXO 5: Comparativa producto final desarrollado en la UTA.	81
ANEXO 6: Datasheet diodo Schottky HSMS286 Serie X.	82

ÍNDICE DE TABLAS

1.	Ecuaciones de Maxwell diferencial e integral [1].	12
2.	Rango de densidades de potencia de energía recolectada de fuentes ambientales [2].	32
3.	Información Estadística de generación Eléctrica [3].	39
4.	Consumo de energía eléctrica servicio público [3].	40
5.	Parámetros fundamentales para diseño de HRPSA	41
6.	Parámetros fundamentales para diseño de ASMA.	44
8.	Parámetros de modelado SPICE de diodos schottky serie HSMS-286x.	56
9.	Elementos del circuito rectificador de voltaje.	61
10.	Voltaje de almacenamiento medido en cada antena con sistema acoplado.	67
11.	Comparativa con trabajos previos dentro de la UTA.	69

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Geometría de la antena GSM Printed-IFA [4].	4
2.	Geometría de la antena WiFi cuasi-Yagi (dimensiones en milímetros) [4].	5
3.	Prototipos del multiplicador de voltaje Dickson de cinco etapas con coincidencia de impedancia [5].	5
4.	Antena de banda ultra ancha (UWB) con características de muesca de banda cuádruple [6].	6
5.	Antenas con geometría circular implementada en serie [7].	6
6.	Configuración y geometría de antena de doble banda [8].	7
7.	Antena de línea Microstrip serpenteada (a) Vista superior (b) Vista inferior [9].	8
8.	Espectro Electromagnético [10]	10
9.	Línea de transmisión equivalente de Thevenin de antena en modo de transmisión [11].	11
10.	Antena como dispositivo de transferencia [11].	12
11.	Sistema de coordenadas para análisis de antenas [10].	13
12.	Lóbulos de radiación y ancho de haz de un patrón de campo eléctrico de antena [10].	14
13.	Patrón de radiación 2 D con lóbulos y ancho de haz [10].	15
14.	Terminales de referencia de antena [11].	16
15.	Pérdidas de una antena [11].	17
16.	Microstrip antena patch [12].	19
17.	Técnicas de alimentación en antenas de parche Microstrip. (a), (b) y (c) alimentaciones directas [13].	20
18.	Técnicas de alimentación en antenas de parche Microstrip. (a), (b) y (c) alimentaciones electromagnéticas acopladas; y (d) antena con abertura de alimentación acoplada [13].	21
19.	Alimentación coaxial [11].	22
20.	Geometría de la antena espiral de Arquímedes a dos brazos [14].	24
21.	Red sin pérdidas que une una impedancia de carga arbitraria con una línea de transmisión [10].	25
22.	Redes de emparejamiento de sección en L. (a) Red para Z_L dentro del círculo $1 + jX$. (b) Red para Z_L fuera del círculo $1 + jX$ [10].	26
23.	Adaptación de impedancia con transformador a cuarto de onda [10].	27
24.	Acoplamiento de stub serie-paralelo [10].	28
25.	Acoplamiento de stub paralelo [10].	29

26.	Circuito de acoplamiento Stub serie [10].	30
27.	Dispositivos para recolección de energía [15].	31
28.	Cantidad intermitente de energía que se genera a partir de fuentes de energía ambiental comunes [16].	32
29.	Arquitectura de recolección de energía [17].	33
30.	Rectificador de media onda [18].	34
31.	Rectificador de onda completa [18].	34
32.	Duplicador de Voltaje [18].	35
33.	Estructura y dimensiones de antena a 900 MHz. Elaborado por: Investigador	43
34.	Geometría de ASMA DE 1 a 3 GHz. Elaborado por: Investigador	45
35.	Geometría de HRPSA simulada en CST Software. Elaborado por: Investigador	46
36.	Pérdida de retorno parámetro S11 a 900 MHz. Elaborado por: Investigador	46
37.	Pérdida de retorno parámetro S11 a 900 MHz. Elaborado por: Investigador	47
38.	Patrón de radiación simulado de la antena a 900 MHz (a) patrón 3-D, (b) plano xz 2-D. Elaborado por: Investigador	47
39.	Geometría de ASMA diseñada en CST software. Elaborado por: Investigador	48
40.	Patrones de radiación tridimensional (3-D) ASMA (a) 900 MHz, (b) 1.2 GHz, (c) 1.8 GHz, (d) 2.4 GHz, (e) 2.6 GHz, (f) 3 GHz. Elaborado por: Investigador	49
41.	Patrones de radiación 2-D ASMA (a) 900 MHz, (b)1.2 GHz, (c) 1.83 GHz, (d) 2.4 GHz, (e) 2.6 GHz, (f) 3 GHz. Elaborado por: Investigador	50
42.	Parámetros S11 de ASMA con valor a 1.17 GHz. Elaborado por: Investigador	51
43.	Prototipo fabricado de antena de estructura planar con resonador híbrido: (a) vista frontal, (b) vista posterior. Elaborado por: Investigador	51
44.	Prototipo fabricado de antena multibanda en espiral de Arquímedes: (a) vista frontal, (b) vista posterior. Elaborado por: Investigador	52
45.	Rectificador de doble tensión [19].	52
46.	Rectificador de señal de RF positiva [19].	53
47.	Rectificador de señal de RF negativa [19].	53
48.	Rectificador multietapas [19].	54
49.	Curva característica Diodo Schottky.	55
50.	Circuito lineal equivalente Modelo de chip HSMS-286x	55

51. Esquemático del sistema de rectificación duplicador de voltaje simulado en ADS. Elaborado por: Investigador	57
52. Salida de voltaje a 900 MHz simulación ADS. Elaborado por: Investigador	57
53. Salida de voltaje a 2.4 GHz simulación ADS. Elaborado por: Investigador	58
54. Rectificador duplicador de voltaje: (a) fuente a 2 dbm:(b) fuente a 12 dbm: (c) fuente a 20 dbm:(d) fuente a 25 dbm. Elaborado por: Investigador	59
55. Geometría circuito rectificador implementado en ADS software. Elaborado por: Investigador.	60
56. Prototipo fabricado, circuito rectificador duplicador de voltaje: (a) vista frontal, (b) vista posterior. Elaborado por: Investigador . . .	60
57. Coeficiente de reflexión simulado y medido de la antena de estructura planar con resonador híbrido. Elaborado por: Investigador. .	61
58. Coeficiente de reflexión simulado y medido de la antena espiral de Arquímedes multibanda. Elaborado por: Investigador	62
59. Salida de voltaje directa empleando la antena HRPSA. Elaborado por: Investigador	63
60. Salida de voltaje directa empleando la antena ASMA. Elaborado por: Investigador.	64
61. Conexión de sistema empleando una batería y la antena HRPSA. Elaborado por: Investigador.	64
62. Conexión de sistema empleando una batería y la antena ASMA. Elaborado por: Investigador.	65
63. Medición de voltaje empleando una batería y la antena HRPSA: (a) Medición directa de batería,(b) Medición acoplado a sistema. Elaborado por: Investigador.	65
64. Medición de voltaje empleando una batería y la antena ASMA: (a) Medición directa de batería,(b) Medición acoplado a sistema. Elaborado por: Investigador.	66
65. Diseño de caja para alojamiento de prototipo. Elaborado por: Investigador.	66
66. Prototipo final. Elaborado por: Investigador.	67
67. Diseños y medidas de antenas elaboradas en CST STUDIO y AUTOCAD: a) Antena HRPSA, b) Antena ASMA. Elaborado por: Investigador.	76
68. Resultados alcanzados con el software SATURN PCB DESIGN con los parámetros del FR4 a 900 MHz para HRPSA y 3 GHz para ASMA. Elaborado por: Investigador.	77

69. Resultados alcanzados para características de pista con el software SATURN PCB DESIGN con los parámetros del FR4 a 900 MHz para HRPSA y 3 GHz para ASMA. Elaborado por: Investigador. .	78
70. Diseños, medidas y fabricación de circuito rectificador doblador de voltaje: a) Diseño en ADS Y AUTOCAD, b) Circuito impreso en FR4. Elaborado por: Investigador.	79
71. Diseños, medidas y fabricación caja acrílica. Elaborado por: Investigador.	80
72. Producto final: (a) prototipo Criollo Walter, (b) prototipo Jorge Mendoza. Elaborado por: Investigador.	81

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

TEMA:

**SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA PARA
ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA EN DISPOSITIVOS MÓVILES.**

AUTOR: Ing. Criollo Paredes Walter Iván.

DIRECTOR: Ing. Carlos Diego Gordon Gallegos, PHD.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

- Tecnologías, Seguridad y Gestión de Redes de Comunicación.

RESUMEN EJECUTIVO

El crecimiento constante de la demanda de energía y su visión futura de abastecimiento energético en muchas áreas de la ciencia, ingeniería y tecnología, en especial en dispositivos móviles. Hacen que la recolección de energía electromagnética amigable con el medio ambiente y que no afecte a este último, sea una alternativa de alta demanda en la generación de energía. Por consiguiente, el presente trabajo se centra en el desarrollo, diseño, simulación de dos antenas Microstrip para sistemas de captación de energía electromagnética. La primera, es la Antena de Estructura Planar con Resonador Híbrido (HRPSA) que opera en una frecuencia específica de 900 MHz, mientras que la otra es una Antena Multibanda Espiral de Arquímedes (ASMA) que trabaja en un rango de frecuencias de 1 a 3 GHz, ambas fueron desarrolladas para sistemas de recolección de energía. Las antenas se diseñaron utilizando el software CST Studio y se fabricaron en un sustrato FR4 de bajo coste con un grosor de 1,6 mm, una constante dieléctrica de 4.4 y una impedancia de entrada de 50 Ω . La antena de estructura resonadora planar híbrida con unas dimensiones de 40x50 mm, resuena a una frecuencia de 900 MHz, cuya pérdida de retorno alcanzada es de -30 dB, con una directividad de 3.17 dBi. La Antena Multibanda Espiral de Arquímedes con dimensiones de 80x80 mm, resuena en múltiples frecuencias desde 1 GHz hasta 3 GHz. La directividad obtenida en estas frecuencias es de 2,62 dBi, con un rango de pérdidas de hasta -25 dB. Las frecuencias conseguidas con las antenas son muy prometedoras, ya que ofrece un buen rendimiento para aplicaciones de captación de energía electromagnética que opera en frecuencias estándar como GSM, Wi-Fi, LTE y UMTS que están disponibles en el entorno y permiten cosechar su energía en cualquier lugar y en todo momento. La obtención de energía eléctrica, parte del diseño de un rectificador de frecuencia el cual se optimiza con la aplicación del diodo Schottky HSMS serie 286x. Se emplea un rectificador de varias etapas para poder obtener máxima conversión de potencia y poder obtener voltaje de corriente directa (VDC), el cual será almacenado en una batería para emplear en la carga de un dispositivo móvil. Los resultados simulados permiten obtener hasta 6 V de salida, con una potencia de entrada de 25 dBm. Los valores obtenidos en campo dan como resultado de hasta 2.2 V, en almacenamiento para HRPSA y 0.46 V para ASMA.

Palabras claves: Recolección de energía, energía electromagnética, rectificador, diodo Schottky, Microstrip, antena, GSM, Wi-Fi, LTE Y UMTS.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA
E INDUSTRIAL**
PROGRAMA DE MAestrÍA EN TELECOMUNICACIONES
INFORMACIÓN GENERAL

THEME:

ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTING SYSTEM FOR POWER
SUPPLY IN MOBILE DEVICES.

AUTHOR: Ing. Criollo Paredes Walter Iván.

DIRECTED BY: Ing. Carlos Diego Gordon Gallegos, PHD.

LINE OF RESEARCH.

- Technologies, Security and Management of Communication Networks.

EXECUTIVE SUMMARY

The constant growth of energy demand and its future vision of energy supply in many areas of science, engineering and technology, especially in mobile devices, make environmentally friendly and environmentally friendly electromagnetic energy harvesting a high demand alternative in energy generation. They make environmentally friendly and environmentally friendly electromagnetic energy harvesting a high demand alternative in power generation. Therefore, the present work focuses on the development, design, simulation of two Microstrip antennas for electromagnetic energy harvesting systems. The first, is the Hybrid Resonator Planar Structure Antenna (HRPSA) that operates at a specific frequency of 900 MHz, while the other is an Archimedean Spiral Multiband Antenna (ASMA) that works in a frequency range of 1 to 3 GHz, both were developed for energy harvesting systems. The antennas were designed using CST Studio software and fabricated on a low-cost FR4 substrate with a thickness of 1.6 mm, a dielectric constant of 4.4 and an input impedance of 50 Ω . The hybrid planar resonator structure antenna with dimensions of 40x50mm, resonates at a frequency of 900MHz, whose achieved return loss is -30 dB, with a directivity of 3.17 dBi. The Archimedes Spiral Multiband Antenna with dimensions of 80x80mm, resonates at multiple frequencies from 1 GHz to 3 GHz. The directivity obtained at these frequencies is 2.62 dBi, with a loss range of up to -25 dB. The frequencies achieved with the antennas are very promising as it offers good performance for electromagnetic energy harvesting applications operating on standard frequencies such as GSM, Wi-Fi, LTE and UMTS that are available in the environment and allow harvesting its energy anywhere and anytime. The electrical energy harvesting, starts from the design of a frequency rectifier which is optimized with the application of the Schottky HSMS 286x series Schottky diode. A multistage rectifier is used to obtain maximum power conversion and to obtain direct current voltage (VDC), which will be stored in a battery to be used to charge a mobile device. The simulated results allow obtaining up to 6 V output, with an input power of 25 dBm. The values obtained in the field result in up to 2.2 V, in storage for HRPSA and 0.46 V for ASMA.

Keywords: Energy harvesting, electromagnetic energy, rectifier, Schottky diode, Microstrip, antenna, GSM, Wi-Fi, LTE and UMTS.

CAPÍTULO I

1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción.

Es evidente ver con el paso y desde la invención de la energía eléctrica, los avances significativos y continuos en lo concerniente a tecnologías. Por lo que constantemente se están creando, mejorando y desarrollando un sin fin de dispositivos eléctricos y electrónicos que mejoran la calidad de vida de la sociedad en sí, lo cual conlleva a un consumo energético en constante crecimiento. La demanda excesiva de la misma, ha generado la necesidad de diseñar, explorar y desarrollar nuevas fuentes de energías alternativas, garantizando el uso de recursos naturales. Por consiguiente el futuro energético mundial que permitan satisfacer la demanda eléctrica de una manera responsable y amigable con el medio ambiente está encaminado a buscar nuevas forma de proveerlos [20].

Los dispositivos de comunicaciones como teléfonos celulares a la par con otras tecnologías están evolucionando constantemente para convertirse en poderosas herramientas en diferentes ámbitos de aplicación como; Educación, Internet de las Cosas (IoT), salud, la agricultura, ganadería, la ingeniería, automóviles, el control del medio ambiente, etc., [21]. Por lo que su demanda se ha visto reflejado en el crecimiento exponencial de dichos dispositivos y sensores embebidos de baja potencia durante los últimos años. Actividades diarias como navegación por Internet, uso de aplicaciones, recopilación de información, juegos online etc., ha generado un aumento significativo en la transmisión y recepción de voz, datos, imágenes, videos entre dispositivos móviles [22]. La demanda de sistemas inalámbricos ha tenido un crecimiento muy significativo, misma que ha generado un crecimiento en sistemas móviles de varias generaciones (1 G, 2 G, 3 G, 4 G, 5 G), Wi-Fi, Bluetooth y otros. Esto ha provocado una saturación del espectro radioeléctrico. Sin embargo, los consumidores requieren una vida útil significativo de la batería de estos dispositivos y ciclos de cargas menos frecuentes con cualquier nueva generación de nuevos productos [23].

Minimizar la dependencia de fuentes de energía tradicionales, voluminosas y derrochadoras, por baterías de alta capacidad amigable con el medio ambiente y de fácil acceso es el gran reto, por lo que la energía debe provenir de alguna fuente tangible y universalmente disponible [24]. El principal problema es que las baterías poseen un tiempo limitado de descarga, por ende tiene caducidad, los dispositivos móviles con el pasar de los años han cambiado de manera significativa, de poseer baterías extraíbles a no extraíbles incorporadas directamente en el dispositivo [25]. En la actualidad ya sea por trabajo, educación, diversión o uso personal usan diferentes dispositivos como teléfonos móviles, laptop, Tablet, Smartband, entre otras, con una característica que

las distingue la necesidad de tener una batería y la utilización fuera de casa, por lo que poseer los dispositivos con batería suficiente con una fuente de fácil acceso es de suma importancia.

La captación de energía puede ser de diversos tipos entre la cuales se destacan la energía eólica, energía solar, de luz, de temperatura, de movimiento y energía electromagnética en el rango de radiofrecuencia (RF) [26]. Todas ellas denominadas fuentes de energía ecológicas o amigables con el medio ambiente, entre las fuentes antes mencionadas, la energía electromagnética tanto en interiores como en exteriores están disponibles a todas horas en diferentes bandas de frecuencia, debido al crecimiento significativo de las instalaciones inalámbricas comerciales y personales conlleva a la captación de energía de RF, mismas que son emanadas de estaciones bases, puntos de acceso Wi-Fi, radio AM/FM, transmisión de televisión, redes móviles, etc.

1.2. Justificación.

El desarrollo inevitable de la tecnología es evidente día a día, los dispositivos de comunicaciones a la par con otras tecnologías están evolucionando más allá de su origen para convertirse en poderosas herramientas en diferentes ámbitos de aplicación, permitiendo a través de estas obtener una serie de ventajas como reducción de costes, reducción de tiempo, reducción de riesgos laborales, movilización, etc. Con la aplicación de elementos más ligeros y la necesidad de recargar sin necesidad de conectar a una fuente de alimentación tradicional se busca brindar una alternativa con la finalidad de proveer de energía eléctrica sostenible, es por ello la búsqueda de nuevas alternativas para la generación y captación de energía.

La demanda de dispositivos móviles ha dado un salto significativo al mercado de consumo. La cobertura es mucho más amplia, por medio de la conexión inalámbrica facilitando la comunicación de dos o más dispositivos, el acceso y uso de Internet, intercambio de información y trabajo colaborativo, por lo que es mucho más efectivo y ahora están siendo puestas en aplicaciones muy esenciales, para dotar un conjunto amplio de aplicaciones coincide en dotar de una batería duradera y por el uso excesivo es necesario poseer una fuente de alimentación móvil, diferente a la tradicional. Este proyecto busca incurrir en la energía electromagnética, un tipo de energía alterno a los convencionales.

El presente trabajo se origina debido al interés de realizar un estudio que permita proveer de energía para dispositivos móviles a través del diseño y el arreglo de antenas para la captación de energía electromagnética, la importancia del estudio radica en el mejoramiento de un sistema a fabricar y que pueda adquirir energía a frecuencias existentes en el medio y de mayor uso, la factibilidad para realizar el presente trabajo investigación es viable ya que cuenta con bibliografía especializada, recursos tecnológicos y económicos necesarios acordes al tema de estudio, contribuyendo con utilidad teórica y práctica para el presente estudio.

1.3. Objetivos.

1.3.1. General

- Desarrollar un sistema de captación de energía electromagnética para abastecimiento de energía en dispositivos móviles.

1.3.2. Específico.

- Elaborar el estado del arte de dispositivos electrónicos para captación de energía.
- Diseñar el modelo óptimo de dispositivo electrónico captador de energía.
- Implementar el modelo óptimo del dispositivo electrónico captador de energía.
- Evaluación de desempeño del captador de energía electromagnética desarrollado.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1. Antecedentes Investigativos.

Como soporte al proyecto propuesto, se ha realizado la investigación bibliográfica correspondiente y ha llamado la atención de artículos científicos y tesis previos que son de gran relevancia en el desarrollo del presente trabajo y aportan con datos relevantes para la investigación.

En “Efficient compact dual-band antennas for GSM and Wi-Fi energy harvesting”, desarrollada por Hoang, Phan, Van Hoang, & Vuong, 2014, con la finalidad de recolectar energía de radiofrecuencia (RF), propusieron dos antenas, la primera para la banda de GSM con ganancia de 1.3 dBi para la banda de 900 MHz y 5,9 dBi de ganancia para la banda de 1800 MHz; la segunda antena es una cuasi-Yagi en concreto para la bandas de WiFi, elaboradas para las bandas de 2.45 GHz y 5.3 GHz, con ganancias de 5.7 y 5.9 dBi respectivamente, las figuras 1 y 2 muestran el diseño de las antenas antes descritas [4].

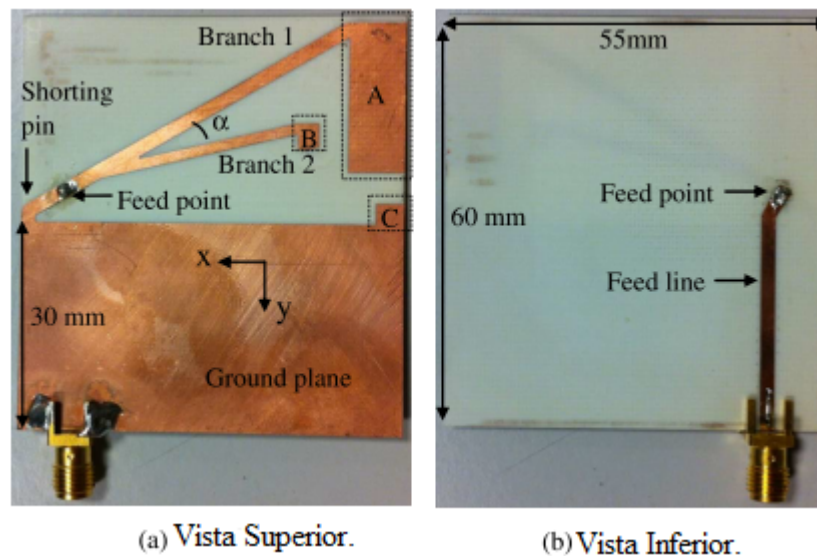


FIGURA 1: Geometría de la antena GSM Printed-IFA [4].

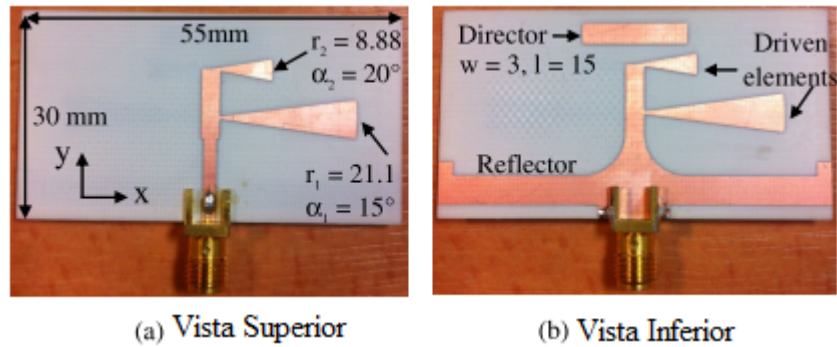


FIGURA 2: Geometría de la antena WiFi cuasi-Yagi (dimensiones en milímetros) [4].

En “Design and evaluation of multi-band RF energy harvesting circuits and antennas for WSNs”, desarrollada por (Borges et al., 2014), propusieron tres prototipos, cuya característica principal es que posee un multiplicador de voltaje Dickson a 5 etapas con impedancias coincidentes, capaz de suministrar energía al sensor IRIS, de las cuales se destacan potencias recibidas de radiofrecuencia de -4, -5 y -6 dBm con eficiencias de conversión 20, 26 y 32 %, respectivamente, la antena diseñada para bandas de frecuencia GSM (900/1800), con ganancias en el orden de 1.8-2.06 dBi y una eficiencia entre 77.6-82 %, la figura 3 muestra el diseño de la antena antes descrita [5].

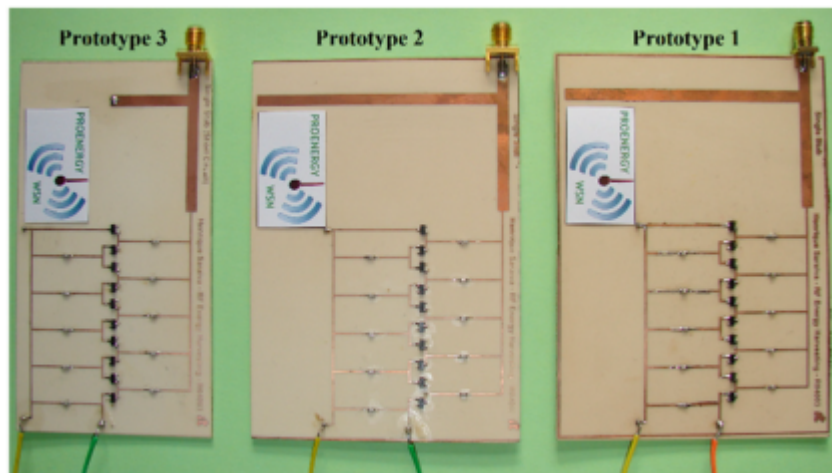


FIGURA 3: Prototipos del multiplicador de voltaje Dickson de cinco etapas con coincidencia de impedancia [5].

En “Ultrawideband microstrip patch antenna with quadruple band notch characteristic using negative permittivity unit cells”, desarrollada por (Min Joo Jeong et al., 2019), presento el diseño e implementación de una antena parche en banda ultra ancha (UWB) microstrip, cuyo diseño se destaca por muescas de banda cuádruple de impedancia controlable, caracterizada por un parche rectangular, una línea de alimentación microstrip, cuatro resonadores de anillo partido complementario (CSRR) y un

plano de tierra. Para obtener un UWB cortaron las esquinas inferiores del parche, la antena, ver figura 4 , posee un tamaño compacto de $40 \times 30 \times 0,81 \text{ mm}^3$, con ancho de banda comprendidos entre 2.85 a 11.52 GHz, adecuadas para aplicaciones UWB al evitar individualmente las interferencias del 5 G, IEEE 802.11a WLAN a 5.2 GHz, IEEE 802.11a WLAN a 5.8 GHz, y Sistemas ITU de 8 GHz que utilizan CSRR con características de metamaterial [6].

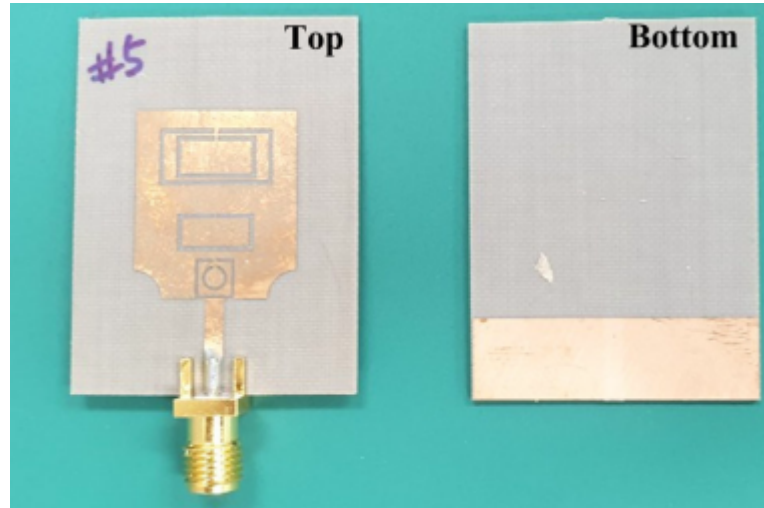


FIGURA 4: Antena de banda ultra ancha (UWB) con características de muesca de banda cuádruple [6].

En “Sistema electrónico portátil para la recarga eléctrica de dispositivos móviles mediante la captación de energía electromagnética.”, elaborada por Jorge Mendoza, (2019), plantea un sistema para captación de energía electromagnética de WiFi, International Mobile Telecommunications (IMT) y telefonía móvil, las cuales se les aplica un multiplicador de tensión de Villard para ser almacenado en baterías recargables. Las antenas antes mencionadas están diseñadas con una geometría circular, ver figura 5, la cual se conecta en serie, para un aprovechamiento máximo del espectro de radiofrecuencia [7].



FIGURA 5: Antenas con geometría circular implementada en serie [7].

En “Design and Analysis of A Novel Miniaturized Dual-Band Omnidirectional Antenna for WiFi Applications”, elaborado por Ya-Bing Yang(2020), planteo una antena de doble banda para aplicaciones WiFi, la cual consta de dos pares de dipolos con longitudes de ondas diferentes. La dimensión de la antena consta de las siguientes dimensiones $50\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, cuya geometría se puede observar en en la figura 6. Los resultados obtenidos es de 19.2% para $IS_{11} \leq 10\text{ dB}$ que va de 2.24 a 2.70 GHz centrado en 2.4 GHz, y más del 17.4% para $IS_{11} \leq -10\text{ dB}$ que va de 4.73 a 5.6 GHz centrado en 5 GHz [8].

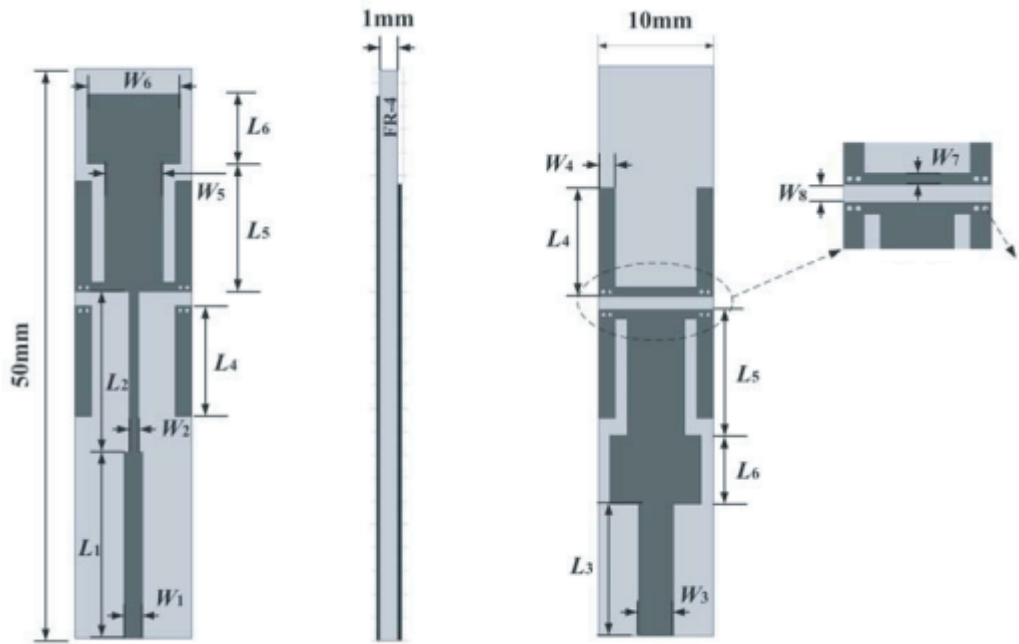


FIGURA 6: Configuración y geometría de antena de doble banda [8].

En “Design of a Meandered Line Microstrip Antenna with a Slotted Ground Plane for RFID Applications”, elaborada por (Tanmaya Kumar Das et al, 2020), implementaron una antena monopolo de línea serpenteada con estructura de tierra defectuosa (DGS), el cual cubre la banda ISM de 5.8 GHz, con características de radiación estables en el rango de frecuencias de 5.74 a 6 GHz, cuya ganancia es de 5.1 dBi con niveles de lóbulos posterior reducidos, la figura 7, muestra como está diseñada la antena, su gran ventaja radica en que puede evitar interferencias con otros dispositivos inalámbricos como Bluetooth, WiFi, ZigBee, etc., destacándose como lectores de RFID para aplicaciones biomédicas [9].

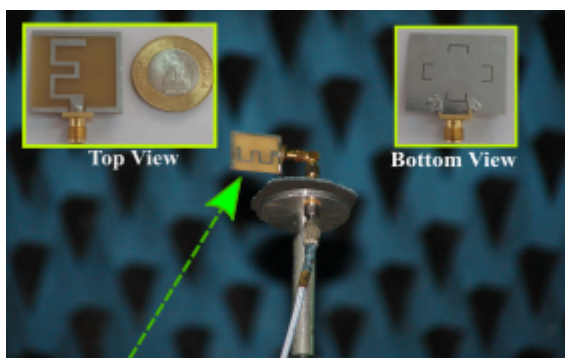


FIGURA 7: Antena de línea Microstrip serpenteada (a) Vista superior (b) Vista inferior [9].

2.2. Fundamentación teórica.

2.2.1. Principios.

La industria de las comunicaciones móviles ha sido el ente catalizador del reciente crecimiento explosivo en las necesidades de diseño de diferentes gamas de antenas de acuerdo a su aplicación [27]. Ciertamente, la última década ha visto un uso notorio de antenas en diferentes equipos entre las cuales se destacan para celulares, GPS, satélite, Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth, dispositivos de identificación por radiofrecuencia (RFID), WiMAX, tecnologías 1 G, 2 G 3 G, 4 G, 5 G, etc. Sin embargo, las necesidades de integrar una gran variedad de dispositivos portátiles, sensores para monitoreo y recopilación de información, se ha visto en la necesidad de crear y desarrollar antenas multifuncionales, de óptima calidad y utilizando el menor espacio posible en su diseño [28].

Hasta finales de la década de 1970, el diseño de la antena se basaba principalmente en enfoques prácticos que utilizan antenas estándar como varias geometrías de cable (dipolos, Yagi-Uda, log-periodics, espirales), bocinas, reflectores y ranuras / aberturas, así como matrices de algunos de estos [29]. La invención o desarrollo de la antena requirió pruebas y experimentación muy extensas y de gran costo, financiado principalmente por los gobiernos o industrias privadas. Sin embargo, en los últimos años, el crecimiento dramático en la velocidad de envío en tiempo real de la información y el desarrollo continuo de las comunicaciones inalámbricas ha dado lugar a la introducción de una multitud de nuevos diseños de antenas principalmente en la última década, así como el deseo insaciable de utilizar técnicas informáticas modernas para diseños de bajo costo. Los requisitos para antenas como ancho de banda y multifuncionalidad han dado lugar a antenas impresas de distintos materiales, principalmente empleando el de tipo parche u otras antenas tipo ranura, diseños basados en estructura fractal, entre otras que aprovechen al máximo el espectro radioeléctrico dando lugar al uso de potentes herramientas informáticas para el diseño de antenas.

En este apartado, se realiza un estudio de los fundamentos de la antena y analiza los

parámetros fundamentales que se usan típicamente para caracterizar las propiedades de la antena a menudo empleadas para evaluar todo el sistema de radio.

2.2.2. Radio Sistemas y Antenas.

Se considera un sistema de radio, como un sistema electrónico que emplea ondas de radio, un tipo de onda electromagnética de frecuencias expresada en Hz. Una antena, como parte esencial del sistema de radio, se define como un transductor especializado que transforma una corriente eléctrica alterna en energía electromagnética de manera eficiente y deseada o viceversa. Dado que los sistemas de radio poseen algunas ventajas únicas y atractivas sobre los sistemas cableados, se han desarrollado numerosos sistemas de radio. Los sistemas de comunicación móviles, televisión, radio, radar, etc. son solo algunos ejemplos. Las ventajas de estos sistemas incluyen:

- Movilidad: parte esencial para las comunicaciones móviles;
- Óptima cobertura: la radiación de una antena puede cubrir un área muy grande.
- Baja pérdida de ruta: esto depende de la frecuencia.

El objetivo de la antena es radiar la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas a la aplicación en concreto. Existen, pues, dos misiones básicas las cuales debe cumplir una antena en específico: transmitir y recibir, imponiendo cada aplicación condiciones particulares sobre la direccionalidad de la antena, niveles de potencia que debe soportar, frecuencia de trabajo y otros parámetros que se definirán más adelante. Esta diversidad de situaciones da origen a un gran número de tipos de antenas. Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia (f) y longitud de onda (λ):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Donde c es la constante de la velocidad de propagación de la luz en el medio cuyo valor ($\sim 3 \times 10^8 m/s$ en el espacio libre).

El conjunto de todas las frecuencias conocido como espectro radioeléctrico se divide en bandas, la figura 8 el cual detalla de forma clara el rango de frecuencias, cada una de las cuales presenta características únicas que dan origen a una gama de antenas muy diversas de acuerdo a su área de aplicación. Por lo que cada antena está diseñada para operar en una específica banda de frecuencia y de rechazar señales provenientes de otras bandas operativas.

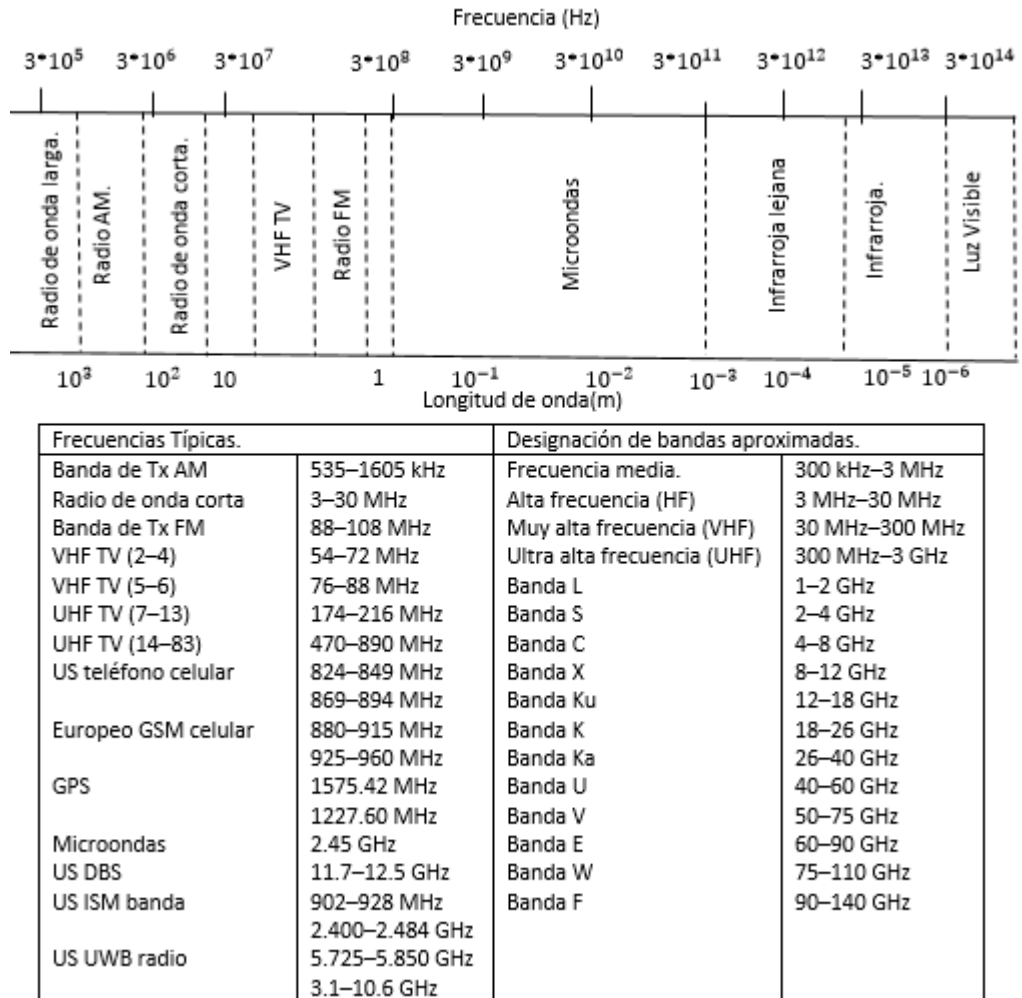


FIGURA 8: Espectro Electromagnético [10]

La antena es un dispositivo transceptor, puede emplearse como transmisor o como receptor dependiendo la necesidad de aplicación. El cual se puede modelar en el equivalente del sistema de antena en el modo de transmisión como el equivalente de Thevenin, el cual se muestra en la Figura 9, donde la fuente es un generador ideal, la línea de transmisión representada por una línea con impedancia característica Z_c , y la antena es representado por una carga Z_A conectada a la línea de transmisión.

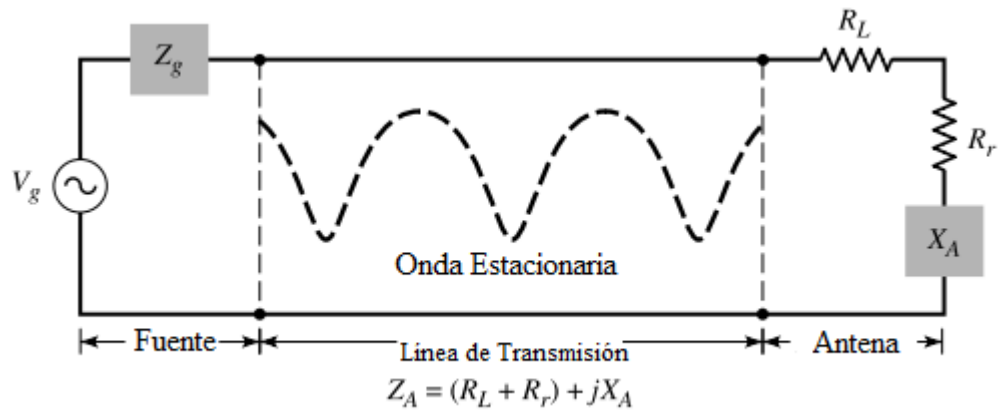


FIGURA 9: Línea de transmisión equivalente de Thevenin de antena en modo de transmisión [11].

$$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A \quad (2)$$

La ecuación 2 representada por una parte real y una parte imaginaria, donde R_L es la resistencia de la carga, se usa para representar las pérdidas dieléctricas y de conducción fijadas lado a lado con la estructura de la antena, mientras que R_r se utiliza para representar la radiación de la antena. La reactancia X_A representa la parte imaginaria de la impedancia asociada con la radiación realizada por la antena [11].

Concretamente, a diferencia de una línea de transmisión que se destaca ya que se emplea para bajas frecuencias a cortas distancias, una antena cuya aplicación es esencialmente para altas frecuencias a largas distancias, la antena convierte las ondas guiadas presentes en una guía de ondas, la Figura 10 muestra cómo los campos presentes en la línea de transmisión viajan en una dimensión hacia la antena, lo que los convierte en ondas radiantes, llevando la energía del transmisor en tres dimensiones al espacio libre. Las antenas en concreto toman ventaja frente a las líneas de transmisión por que no están sometidas a interferencias, por lo que posee un mayor ancho de banda. Un concepto oficial de una antena establecida por la IEEE y definidas por Stutzman y Thiele mencionan: "Esa parte de un sistema de transmisión o recepción que está diseñado para irradiar o recibir ondas electromagnéticas" [11].

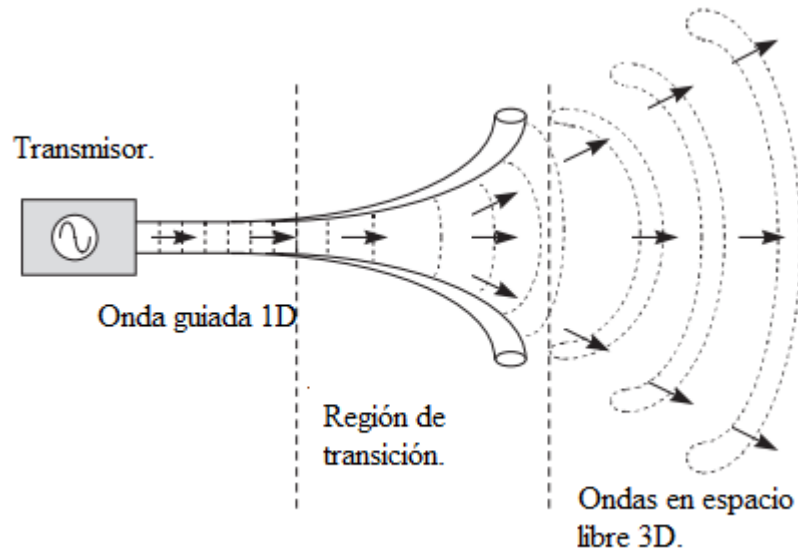


FIGURA 10: Antena como dispositivo de transferencia [11].

2.2.3. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell especifican la relación entre la variación del campo eléctrico E , el campo vectorial H y los cambios entre sí, en el tiempo y espacio dentro de un medio, compuesta de 4 ecuaciones que describen dichos campos antes mencionado que surgen de cargas y corrientes eléctricas. La unidad de medida para E (V/m) es Voltio por metro y para H (A/m) es amperio por metro, dichas ecuaciones en conjunto con la ley de fuerza de Lorentz forman la base primordial en la teoría cuántica de campos, el electromagnetismo, circuitos eléctricos, la óptica clásica, etc. La tabla 1 muestra las ecuaciones de Maxwell, estas son el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales e integrales, el resultado primordial e importante de las ecuaciones es que explican cómo los campos eléctricos y magnéticos fluctuantes se propagan a la velocidad de la luz, conocidas como ondas de radiación electromagnética, ya que pueden surgir ondas en varias longitudes de onda para producir un espectro desde ondas de radiofrecuencia hasta rayos gamma γ .

TABLA 1: Ecuaciones de Maxwell diferencial e integral [1].

Nombre	Ecuación Diferencial	Ecuación integral
Ley de Gauss	$\nabla \cdot D = \rho_v$	$\oint_S D \cdot dS = \oint_V \rho_v dV$
Ley de Gauss para Electromagnetismo	$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_S B \cdot dS = 0$
Ecuación Maxwell-Faraday	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_L E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int S B \cdot dS$
Ley de Ampere	$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_L H \cdot dl = \int_S \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS$

Las unidades de medidas para para la carga eléctrica o densidad de carga ρ es (coulomb/ m^3) y la densidad de corriente (ampere/ m^2). Además, la densidad de flujo

eléctrico ($\text{coulomb}/\text{m}^2$) y B conocida como la densidad de flujo magnético o Tesla cuya unidad es (weber/m^2).

2.2.4. Parámetros fundamentales de antena.

- **Patrón de radiación.**

Un patrón de radiación es una característica fundamental de la antena, el cual se conoce como la representación gráfica o función matemática de las propiedades de radiación de la antena con cierta direccionalidad en función de las coordenadas espaciales, el cual concentra la energía a radiar en una dirección del espacio o medio. Las propiedades de radiación de una antena implican intensidad de radiación, densidad de flujo de potencia, directividad, intensidad de campo, polarización. El patrón de radiación define en sí la potencia en función de la dirección desde la antena, misma que posee un patrón tridimensional. El campo eléctrico (E) y el campo magnético (H) ilustran el patrón de radiación ver figura 11, donde el plano E consiste en un vector de campo E y el plano H consiste en un vector de campo H, con un conjunto apropiado de coordenadas ver figura. La propiedad de radiación más importante es la distribución espacial 2 D o 3 D de la energía radiada [10].

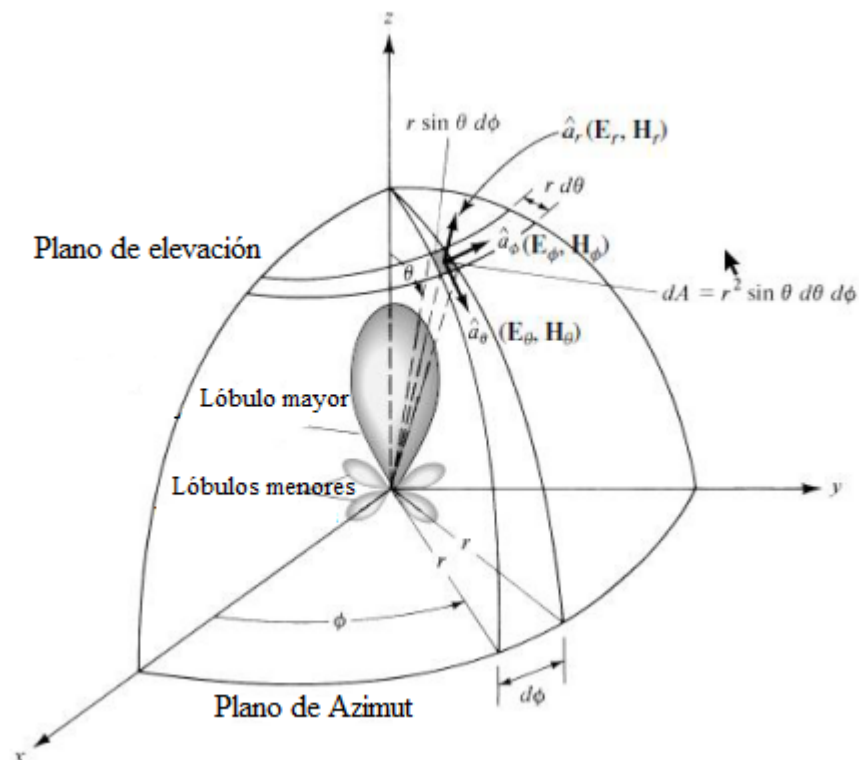


FIGURA 11: Sistema de coordenadas para análisis de antenas [10].

- **Lóbulos de patrón de radiación**

Los lóbulos de radiación se definen como “la parte del patrón de radiación delimitada por regiones de intensidad de radiación relativamente débil” [11]. Es decir, son picos de intensidad rodeados con regiones de menor intensidad. La figura 12 muestra un patrón polar 3 D simétrico que incluye una serie de lóbulos de radiación con varios lóbulos constituidos por: El lóbulo principal que es el lóbulo de radiación en la dirección de radiación máxima, también llamada haz directa, puede haber más de un lóbulo principal. Un lóbulo menor es cualquier lóbulo de radiación que no sea el lóbulo principal. Un lóbulo lateral es un lóbulo de radiación en cualquier dirección que no sea en la dirección de la radiación prevista o en la dirección inversa al lóbulo principal. El lóbulo posterior es el lóbulo de radiación en la dirección opuesta a los lóbulos principales. El ancho del haz de media potencia (HPBW) es el ancho angular del haz principal en los puntos de media potencia. El primer ancho de haz nulo (FNBW) es el ancho angular entre los primeros nulos a cada lado de los haces principales.

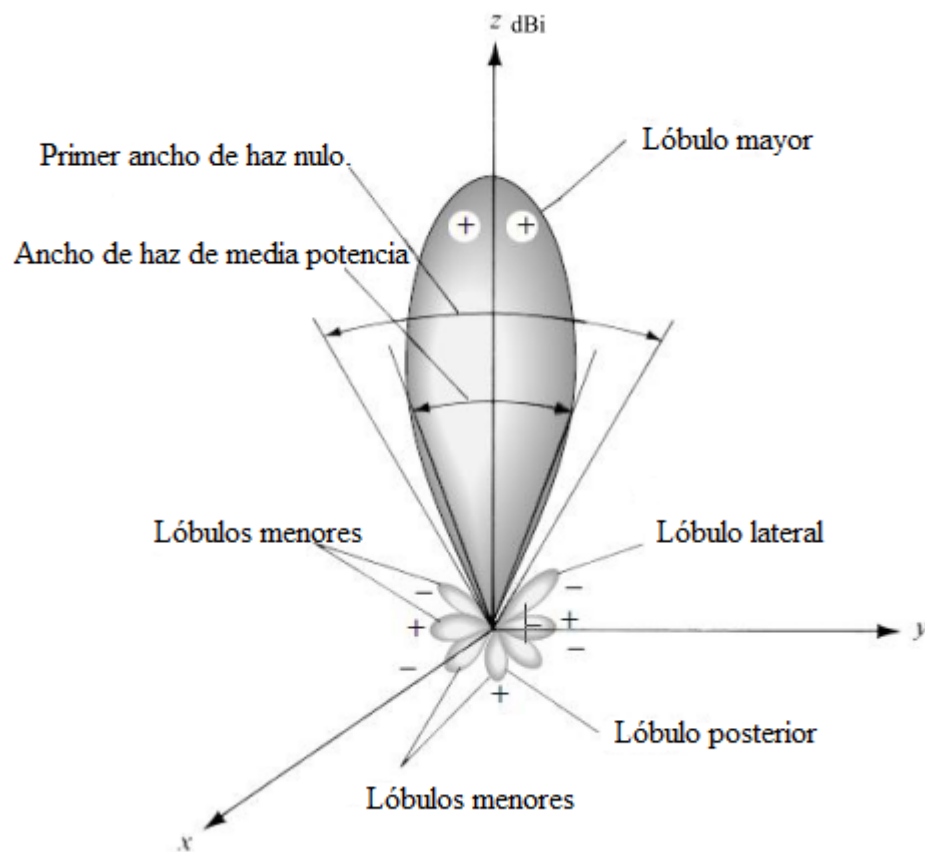


FIGURA 12: Lóbulos de radiación y ancho de haz de un patrón de campo eléctrico de antena [10].

La Figura 13, aclara de forma específica el diagrama 2 D para los lóbulos del patrón de radiación y el ancho del haz.

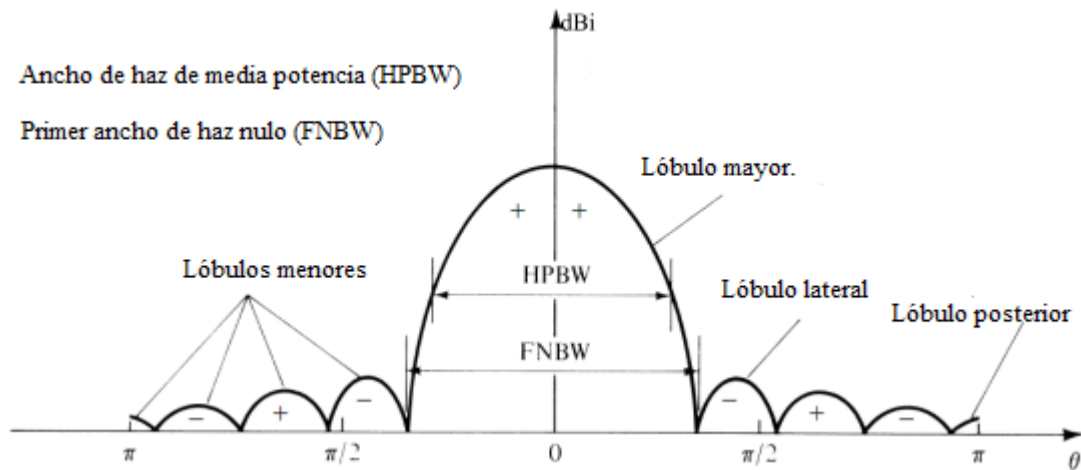


FIGURA 13: Patrón de radiación 2 D con lóbulos y ancho de haz [10].

▪ Directividad

La directividad (D) de una antena se define como la relación de la energía de radiación en una dirección dada desde la antena a la intensidad de radiación promediada en todas las direcciones, la intensidad de radiación promedio es igual a la potencia radiada total por la antena dividida por 4π . La dirección de la intensidad de la radiación, si no se especifica, es la dirección de la radiación máxima. La directividad de una fuente no isotrópica es igual a la relación de su intensidad de radiación en una dirección dada sobre la de una fuente isotrópica. En forma de ecuación matemática, dada por:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3)$$

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (4)$$

D = Directividad sin dimensiones.

$D_0 = D_{max}$ = Directividad máxima sin dimensiones.

U = Intensidad de radiación (W/Unidad de ángulo sólido) se puede obtener multiplicando la densidad de radiación (W_{rad}) por el cuadrado de la distancia (r^2), donde $U = r^2 W_{rad}$.

U_{max} = Intensidad de radiación máxima (W/unidad de ángulo sólido).

U_0 = Intensidad de radiación de la fuente isotrópica (W/unidad de ángulo sólido)

P_{rad} = Potencia radiada total (W)

Ancho de banda.

Parámetro de antena muy importante a la hora de diseñar, el ancho de banda cuya característica principal debido a que posee una geometría finita, está limitada a operar en una banda en específico o en rangos de frecuencias, que a menudo se usa como una

compensación entre ella y el nivel de los lóbulos laterales. El ancho de banda es el rango de frecuencias a ambos lados de una frecuencia central, donde el valor aceptable de las características de la antena en la frecuencia central (como el ancho del haz de entrada, el patrón, la impedancia, la polarización, la ganancia, el nivel de lóbulos laterales, la eficiencia de radiación, la dirección del haz). También, se utiliza para aclarar las capacidades de resolución de la antena para diferenciar entre dos fuentes de radiación adyacentes.

El ancho de banda especificada por la relación entre los rangos de frecuencias en que se cumplen las especificaciones de diseño y la frecuencia central. Dicha relación expresada en forma de porcentaje.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad (5)$$

Existen diversos tipos de anchos de banda en un diagrama de radiación de antena. Entre las cuales se destacan el ancho de banda de media potencia (HPBW) como el más importante, definida como un plano que contiene la dirección del máximo de ancho y el ángulo entre las dos direcciones en las que la intensidad de radiación es la mitad del valor del haz. El primer ancho de haz nulo (FNBW) se define como la separación angular entre los primeros nulos del patrón. Tanto el HPBW como el FNBW se muestran en la figura 13 [11].

▪ Eficiencia de la antena.

Distintas eficiencias mismas que están asociadas con una antena y su equivalencia se puede definir utilizando la figura 14. La eficiencia total de la antena determinada por e_0 se emplea considerando las pérdidas en los terminales de entrada y la estructura de antena. Estas pérdidas pueden deberse, referidas por las reflexiones ocurridas debido a un desajuste entre la antena y la línea de transmisión ver figura 15, y pérdidas por dieléctrico y conducción, que pueden calcularse por ecuación I^2R [11].

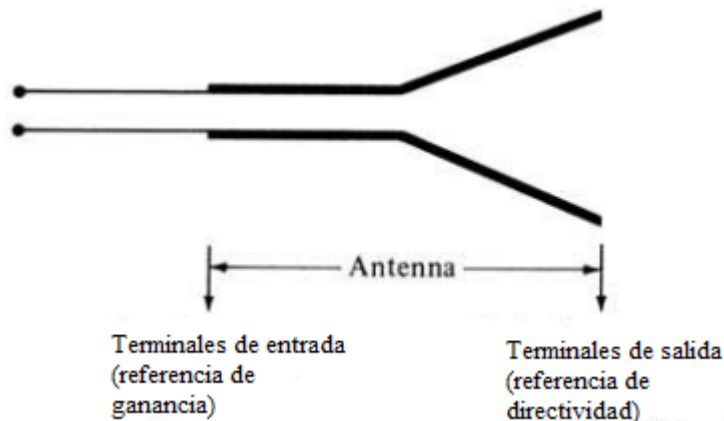


FIGURA 14: Terminales de referencia de antena [11].



FIGURA 15: Pérdidas de una antena [11].

Concretamente la eficiencia se puede expresar por:

$$e_0 = e_r * e_c * e_d \quad (6)$$

Donde:

e_0 = Eficiencia total (sin dimensiones)

e_r = Eficiencia de reflejo (desajuste) = $(1 - |\Gamma|^2)$ sin dimensiones.

e_c = Eficiencia de conducción (sin dimensiones)

e_d = Eficiencia dieléctrica (sin dimensiones)

Γ = Coeficiente de reflexión de voltaje en los terminales de entrada de la antena

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (7)$$

Donde:

Z_{in} = Impedancia de entrada en la antena.

Z_0 = Características de impedancia en la línea de transmisión.

$VSWR$ = Relación de onda estacionaria de voltaje = $\frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$

Debido a su dificultad de cálculo tanto e_c como e_d , se deben calcular experimentalmente, incluso con este tipo medidas no se puede separar, por lo que es más apropiado escribir la ecuación 6 como la ecuación 7, dada por:

$$e_0 = e_r * e_{cd} = e_{cd} |\Gamma|^2 \quad (8)$$

Tomando en cuenta que la igualdad de $e_{cd} = e_c * e_d$ es la eficiencia de radiación de la antena, que se utiliza para relacionar entre ganancia y la directividad BALANIS.

▪ Eficiencia de Radiación.

De forma general el factor de eficiencia es la relación entre la potencia deseada y la potencia total suministrada.

$$e_r = \frac{P}{P_{in}} = \frac{P}{P + P_o} \quad (9)$$

donde:

P =Potencia radiada.

P_o = Potencia disipada en pérdidas óhmicas en la antena.

P_{in} =Potencia de entrada.

$P + P_o$ = Potencia aceptada por la antena.

2.2.5. Tipos de Antenas

Los tipos de antenas se pueden dividir dependiendo de muchos factores como aperturas, frecuencia, polarización o radiación. Algunos tipos básicos de antena son dipolos, monopolos, antena de bucle, antena de microstrip, antena helicoidal, antena de bocina, entre otras [11], la clasificación de las antenas están dadas a partir de su geometría y su comportamiento.

Por su geometría.

- Antenas de cable entre las cuales se destacan los monopolos, dipolos, espirales, helicoidales.
- Antenas de tipo apertura entre las cuales se destacan los de tipo bocina, las de ranuras y las antenas microstrip.
- Antenas tipo reflectores, aquellas formados por reflectores de tipo parabólico con su antena situada en el foco del reflector, ejemplo antenas de observación del espacio.
- Antena de tipo lente, como su nombre lo especifica formada por una lente cuyo objetivo es conformar la radiación de una determinada forma.
- Antenas de tipo Array, cuya principal característica es agrupar dos o más antenas con la finalidad de obtener determinadas características de radiación.

Por su comportamiento.

- Antenas de banda ancha, denominadas así por que su principal función es trabajar en un rango de frecuencias.
- Antenas tipo miniatura, son de dimensiones mucho más pequeñas que la longitud de onda, entre las cuales se destacan las de terminales móviles.
- Antenas multifrecuencia, son aquellas que trabajan con características similares para sistemas diferentes en telecomunicaciones.

2.2.6. Antenas Microstrip.

El uso de antenas microstrip aumentó con el rápido despliegue de sistemas de comunicación inalámbrica en particular sistemas de comunicación personal, comunicaciones móviles por satélite, redes inalámbricas de área local y sistemas inteligentes de autopistas de vehículos, entre otras.

Las antenas microstrip o patch basadas en tecnología de circuito impreso, con la finalidad de crear estructuras planas radiantes en la parte superior constituida de sustratos dieléctricos, líneas de alimentación y un plano de tierra, la figura 16 muestra como está constituido una antena tipo patch. Son cada vez más útiles, su aplicación, así como su estudio está generalizado en ambientes inalámbricos debido a sus ventajas y características atractivas. Son más livianos, de bajo volumen, de bajo costo, de bajo perfil, de dimensiones más pequeñas y fáciles de fabricar. Con un buen manejo de técnicas diseño y las mejoras en las propiedades de los materiales dieléctricos, el ancho de banda, así como su eficiencia son aceptablemente altos [12].

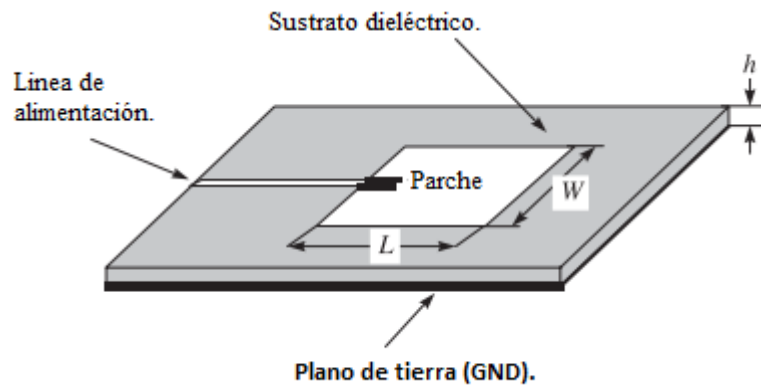


FIGURA 16: Microstrip antena patch [12].

2.2.7. Técnicas de alimentación.

Las antenas tipo patch debido a que poseen elementos radiantes, la alimentación se logra mediante líneas a través del plano de tierra y su elemento radiante, entre las cuales se destacan un sinnúmero variado para la alimentación de este tipo de antenas. En el siguiente apartado se describirá los más relevantes para la investigación, sin menospreciar una gran variedad de alimentación para su empleo de acuerdo a las necesidades de la investigación.

En la figura 17, muestra las tres técnicas principales de alimentación de parches, conocidas como acoplamientos directos. Este tipo de alimentación son fáciles de aplicar, pero su desventaja es la libertad limitada de ajuste de impedancia en la entrada y su ancho de banda estrecho el cual puede compensarse aumentando el grosor de sustrato. En 17(a) la sonda permite una alimentación de acceso desde la parte baja hacia arriba del

parche, muy sencilla de implementar, su impedancia puede ajustarse con una ubicación óptima del punto de fijación de la sonda. En 17(b) el cual incluye un transformador de cuarto de onda muy empleados en sistemas de microondas y 17(c) su alimentación muy empleadas para acoplamientos planas de bajo perfil a una sola capa.

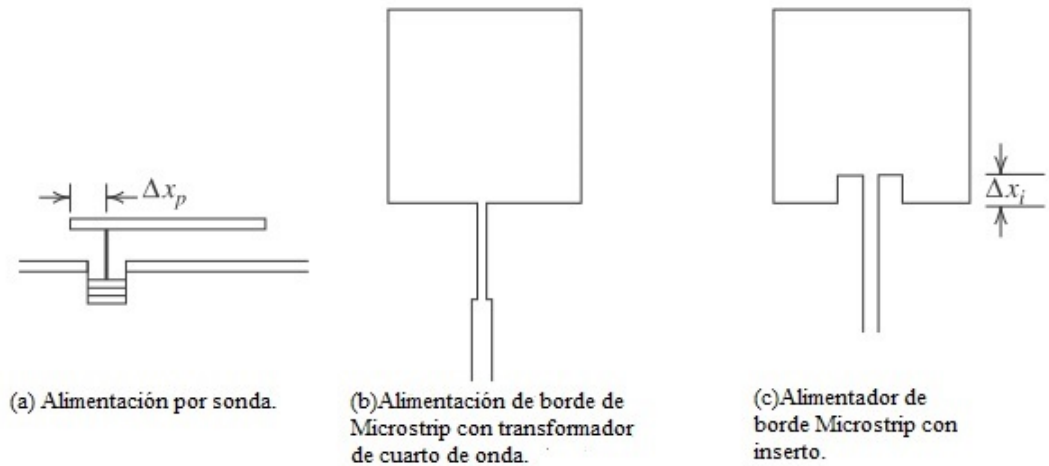


FIGURA 17: Técnicas de alimentación en antenas de parche Microstrip. (a), (b) y (c) alimentaciones directas [13].

Otra técnica de alimentación es la de tipo electromagnéticas acopladas, ver figura 18, este tipo de alimentadores no entra en contacto directo con el parche y posee al menos dos parámetros de diseño. Su principal ventaja con respecto a las de alimentación directa es la de ser menos sensibles a errores dimensionales del proceso de grabado. En la figura 18(a) el alimentador con sonda se realiza desde abajo, el hueco entre el extremo de la sonda y el parche con la finalidad cancelar parcialmente la inductancia se introduce una capacitancia, permitiendo el uso de sustratos más gruesos. En la figura 18(b) el alimentador de borde con hueco es fácil de implementar y es totalmente plana. En la figura 18(c) el alimentador de dos capas es esencialmente útil en conjuntos de parches microstrips con una capa superior en los parches y una segunda extra para las redes de alimentación de microstrips.

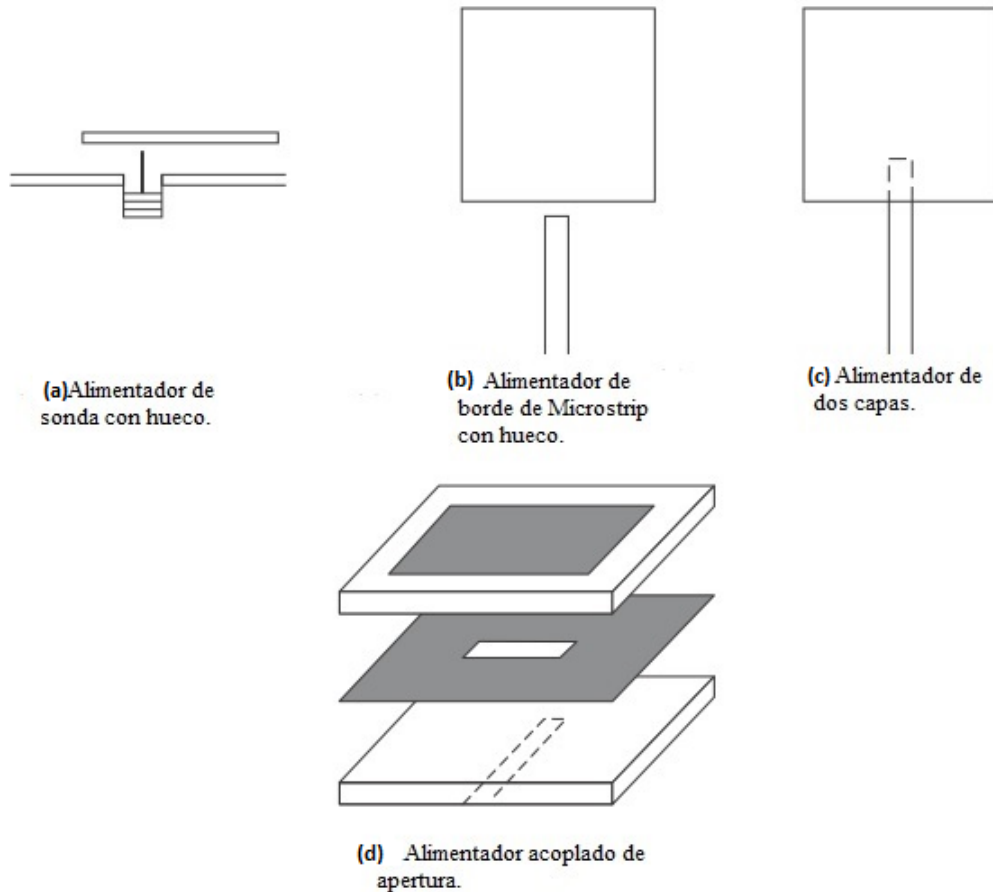


FIGURA 18: Técnicas de alimentación en antenas de parche Microstrip. (a), (b) y (c) alimentaciones electromagnéticas acopladas; y (d) antena con abertura de alimentación acoplada [13].

2.2.8. Alimentaciones de línea coaxial.

La figura 19 muestra la alimentación de tipo coaxial, técnica muy empleada para alimentar una antena de parche Microstrip, por su fácil combinación y fabricación, así como sus bajas pérdidas de radiación. El conductor externo del conector coaxial está conectado al plano de tierra y el interno se extiende a través del dieléctrico y se suelda al elemento radiante. La mayor ventaja 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.

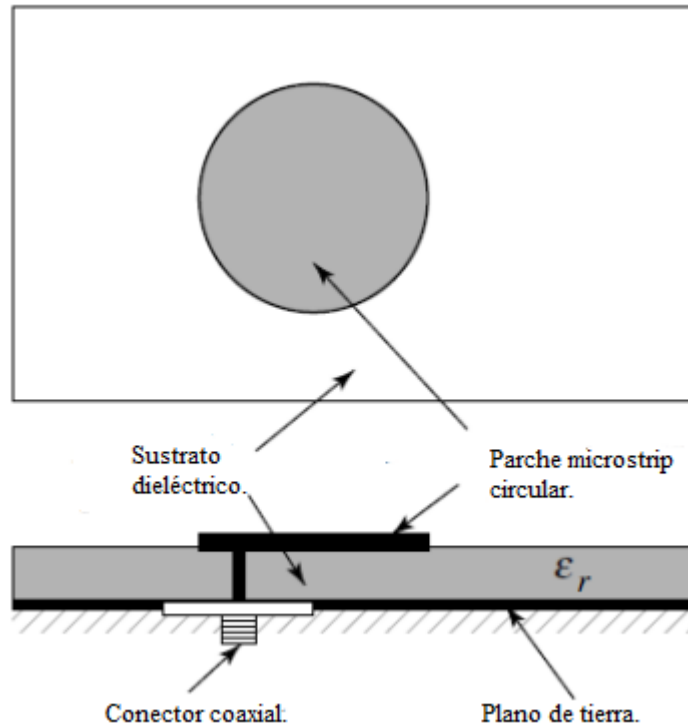


FIGURA 19: Alimentación coaxial [11].

Una desventaja que presenta, la antena introduce una inductancia que puede evitar que el parche resuene si t es 0.1λ o más. Además, la sonda misma irradiará, lo que aumentará la polarización cruzada. Proporcionando un ancho de banda estrecho especialmente en antenas fractales. Otra desventaja es difícil modelación debido a que requiere un agujero en el sustrato y el conector sobresalen del plano de tierra, lo que interfiere con un sustrato grueso y hace que pierda las propiedades de ser completamente plano. Los diseños de las antenas de tipo Microstrip planar para su respectiva fabricación parte de las ecuaciones que se detallan a continuación [30]:

a) Cálculo de ancho de la antena (W).

El cálculo del ancho de banda en antenas tipo patch está definida por:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (10)$$

Donde c es la velocidad de la luz, f_r la frecuencia de resonancia y ϵ_r es la constante dieléctrica del material.

b) Cálculo constante de eficiencia dieléctrica.

Dicha constante se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{reff} = \frac{E_r + 1}{2} + \frac{E_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

c) Cálculo de longitud efectiva.

Para el cálculo de la longitud efectiva a una frecuencia específica se emplea la siguiente ecuación:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{E_{reff}}} \quad (12)$$

d) Cálculo de extensión de longitud.

Las antenas tipo patch y su respectiva extensión de longitud está dada por:

$$\Delta L = 0,412 \frac{h(E_{reff} + 0,3) \left[\frac{W}{h} + 0,264 \right]}{(E_{reff} - 0,258) \left[\frac{W}{h} + 0,8 \right]} \quad (13)$$

e) Cálculo de longitud de antena.

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (14)$$

2.2.9. Antena espiral.

Las antenas de tipo espiral denominadas antenas independientes de la frecuencia cuyo ancho de banda puede alcanzar hasta 40:1 tanto en la impedancia de entrada como para el diagrama de radiación. Las frecuencias de corte superior e inferior están determinadas por la circunferencia menor y mayor [31]. Su diseño está basado en un patrón en espiral de lámina metálica fina cuya radiación es en dos direcciones, en el caso de diseños para radiaciones unidireccionales se lo puede resolver integrando una cavidad con pérdidas a la antena en espiral, respaldada por un conductor o en su defecto integrando materiales absorbente. Este material deberá absorber la radiación posterior de la espiral y proporciona un amplio ancho de banda al reducir la reflexión del plano de tierra.

Dentro de las antenas espirales la más popular es la antena de Arquímedes, debido a su gran ancho de banda. Sin embargo, existen otras antenas que se destacan entre las antenas de tipo espiral entre las cuales se tiene la espiral cuadrada y la espiral equiangular.

▪ **Antena espiral de Arquímedes.**

La antena espiral de Arquímedes fue desarrollada por E.M Tuner [32]. Es una antena el cual puede ser diseñada y fabricada con técnicas de circuitos impresos, el espacio entre los brazos adyacentes está especificado por una constante y no por un ángulo. Dicha antena muy empleada por su amplio ancho de banda, alta eficiencia, polarización

circular, impedancia estables, de geometría pequeñas de bajo perfil y peso ligero [33]. La figura 20, muestra una antena en espiral de dos brazos. La antena espiral de dos brazos cuya irradiación parte desde una región donde la circunferencia de la espiral es aproximadamente igual a una longitud de onda. Esta región se denomina región activa de la espiral. En concreto la antena está constituida por dos brazos (W), la separación entre los brazos S, radio interno y finalmente por su radio externo [14].

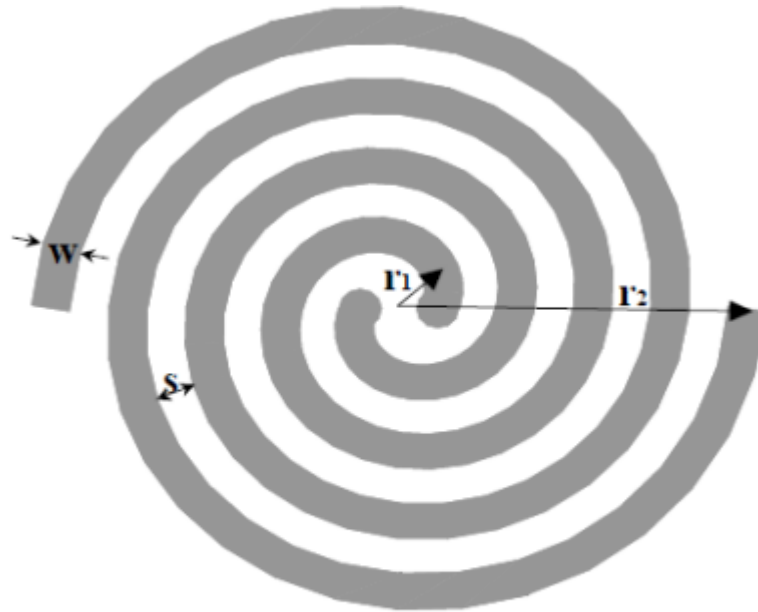


FIGURA 20: Geometría de la antena espiral de Arquímedes a dos brazos [14].

Las dimensiones para la antena de Arquímedes se calculan a partir de la frecuencia más baja a la más alta en el rango funcionamiento de dicha antena. El punto de funcionamiento a baja frecuencia de la espiral está determinado matemáticamente por el radio exterior r_2 y está dado por:

$$f_L = \frac{c}{2\pi r_2 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (15)$$

El punto de funcionamiento de alta frecuencia se basa en el radio interior r_1 , y está dada por:

$$f_H = \frac{c}{2\pi r_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (16)$$

donde c es la velocidad de propagación en el espacio libre o velocidad de la luz y ϵ_{eff} es la constante dieléctrica relativa efectiva.

La medición del radio interior parte desde el centro de la espiral hasta el centro

de la primera vuelta. Por otro lado, el radio exterior es medido desde el centro de la espiral hasta el centro de la vuelta más exterior. Para una estructura equitativa entre los espacios adyacentes S y el ancho de los brazos W deben ser iguales y se pueden calcular a partir de la ecuación 17.

$$S = W = \frac{r_2 - r_1}{4N} \quad (17)$$

donde N es el número de espiras de la antena.

2.2.10. Técnicas de adaptación de impedancia.

Dentro del proceso de diseño de un componente o sistema de microondas es de suma relevancia el estudio de la adaptación de impedancia, este define el proceso o pasos a seguir que una impedancia sea similar a otra impedancia terminal, cuyo objetivo primordial se ilustra en la figura 21, que muestra una red de adaptación de impedancia sin pérdidas colocada entre una impedancia de carga y una línea de transmisión.

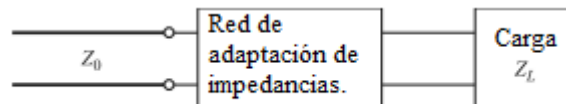


FIGURA 21: Red sin pérdidas que une una impedancia de carga arbitraria con una línea de transmisión [10].

La igualdad de impedancia ocurre cuando $Z_0 = Z_L$, que satisface la potencia máxima entregada en este punto, este diseño es ideal para obtener un sistema sin pérdidas o mitigar la misma, eliminando los reflejos en la línea de transmisión.

▪ Red de adaptación con elementos agrupados (redes tipo L).

Una técnica de adaptación simple y conocida es la de sección en L, el cual emplea elementos reactivos agrupados (inductores o capacitores), con la finalidad de coincidir entre la impedancia de carga y la línea de transmisión como se muestra en la figura 22, existe dos formas de cómo implementar este tipo de configuración, la primera es cuando la impedancia se normaliza a $Z_L = Z_L/Z_0$, dentro del círculo $1 + jX$ de la carta de Smith, el cual se ilustra en la figura 22(a), la segunda forma de impedancia normalizada en $1+jX$ fuera del círculo de la carta de Smith, misma que se ilustra en la figura 22(b), donde $\gamma = 1$, γ es el coeficiente de reflexión complejo [10].

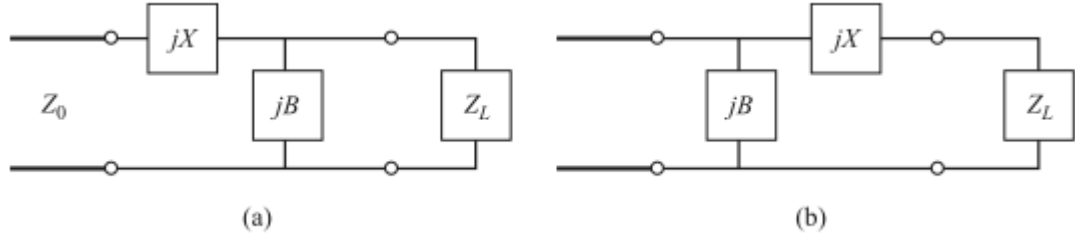


FIGURA 22: Redes de emparejamiento de sección en L. (a) Red para Z_L dentro del círculo $1 + jX$. (b) Red para Z_L fuera del círculo $1 + jX$ [10].

El análisis para la red (a) de la figura 22, la impedancia total de la sección L más Z_L debe ser igual a Z_0 , para cumplir tal igualdad debe satisfacer lo siguiente:

$$Z_0 = jX + \frac{1}{jB + 1/(R_L + jX_L)} \quad (18)$$

Reorganizando la ecuación 18 y separando la parte real de la imaginaria se obtiene dos ecuaciones de incógnitas X y B:

$$B(XR_L - X_L Z_0) = R_L - Z_0 \quad (19)$$

$$X(1 - BX_L) = BZ_0 R_L - X_L \quad (20)$$

Al resolver la ecuación 19 para X y sustituyendo en la ecuación 20, se obtiene una ecuación cuadrática para B. La ecuación 18 hay dos posibles soluciones para B y X, realizando estas soluciones físicamente si los valores negativos y positivos de X y B son posibles, los valores obtenidos muestran características según el signo, el valor positivo de X significa inductor y el valor negativo de X significa condensador, mientras que el valor positivo de B significa condensador y el valor negativo de B significa inductor. Ambas soluciones se muestran en las ecuaciones siguientes, dadas por:

$$B = \frac{X_L \pm \sqrt{R_L/Z_0} \sqrt{R_L^2 + X_L^2 - Z_0 R_L}}{R_L^2 + X_L^2} \quad (21)$$

Como $R_L > Z_0$, entonces la segunda raíz cuadrada es siempre positiva, La reactancia en serie está determinada por:

$$X = \frac{1}{B} + \frac{X_L Z_0}{R_L} - \frac{Z_0}{BR_L} \quad (22)$$

Si Z_L está fuera del círculo de $1 + jX$ en la gráfica de Smith, entonces significa que $R_L < Z_0$, para lo cual se emplea la red de la figura 22b, la admitancia debe ser igual a $1/Z_0$, para una condición de adaptación de impedancia, seguida de la impedancia de carga como se muestra:

$$\frac{1}{Z_0} = jB + \frac{1}{R_L + j(X + X_L)} \quad (23)$$

Ordenando la ecuación 23 y realizar la separación de la parte imaginaria y real, se obtiene dos ecuaciones con dos incógnitas, B y X:

$$BZ_0(X + X_L) = Z_0 - R_L \quad (24)$$

$$X + X_L = BZ_0R_L \quad (25)$$

Resolviendo se obtiene:

$$X = \pm \sqrt{R_L(Z_0 - R_L)} - X_L \quad (26)$$

$$B = \pm \frac{\sqrt{(Z_0 - R_L)/R_L}}{Z_0} \quad (27)$$

Tanto como positivo o negativo sean las soluciones son posibles. Las raíces serán positivas si $R_L < Z_0$, se debe tomar en cuenta que para que coincida la carga con la línea de impedancia Z_0 , la parte imaginaria debe ser igual a cero.

▪ **Adaptación con transformador de cuarto de onda.**

Este tipo de adaptación, emplea una línea de transmisión con un cuarto de la longitud de onda, cuya finalidad es cambiar la impedancia de la carga a otro valor que sea posible la implementación, la figura 23 muestra la adaptación, donde Z_1 es el resultado de colocar la impedancia de carga R_L y la impedancia característica Z_0 .

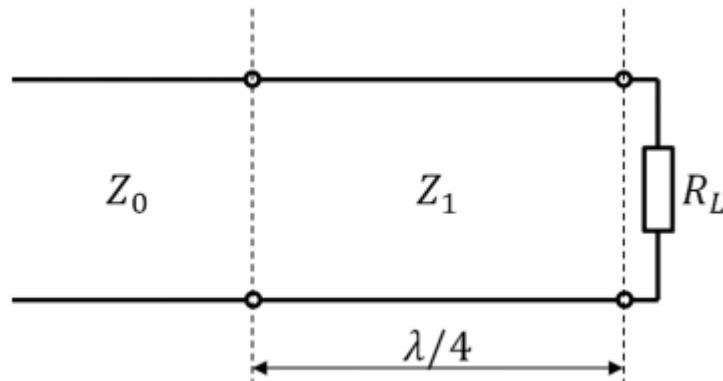


FIGURA 23: Adaptación de impedancia con transformador a cuarto de onda [10].

La ecuación 28 permite determinar el valor de Z_1 :

$$Z_{in} = Z_1 + \frac{R_L + jZ_1 \tan \beta l}{Z_1 + jR_L \tan \beta l} \quad (28)$$

Pero $\beta l = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{\lambda}{4}\right) = \frac{\pi}{2}$ para $\tan \beta l = \infty$, entonces $Z_{in} = \frac{Z_1^2}{R_L}$

Para poder obtener $Z_{in} = Z_0$, la condición que se requiere parte de la ecuación 29:

$$Z_{in} = \frac{Z_1^2}{R_L} = Z_0 \Rightarrow Z_1 = \sqrt{Z_0 R_L} \quad (29)$$

▪ Adaptación de stub o ramal.

Esta técnica de adaptación de impedancias permite el acoplamiento en la carga compleja del stub y la línea de transmisión, sea este en circuito abierto o cerrado, conectada de forma paralela o en serie con la línea de alimentación de la transmisión de la carga. Si se emplea las terminales en cortocircuito estos trabajan como antena desde sus terminales abiertos, empleados en aplicaciones de cable coaxial o de línea dos hilos. El stub o ramal en paralelo son acoplamientos para líneas de microcintas o línea banda y los stub en serie empleados como línea de ranuras o guías de onda coplanar.

La reactancia o susceptancia posee un valor que representa la longitud y el ancho del stub, la distancia desde la posición desde el stub hasta la carga, d , ver figura 24. Las variaciones de circuito abierto es un cuarto de la longitud de onda dada para la reactancia resultante.

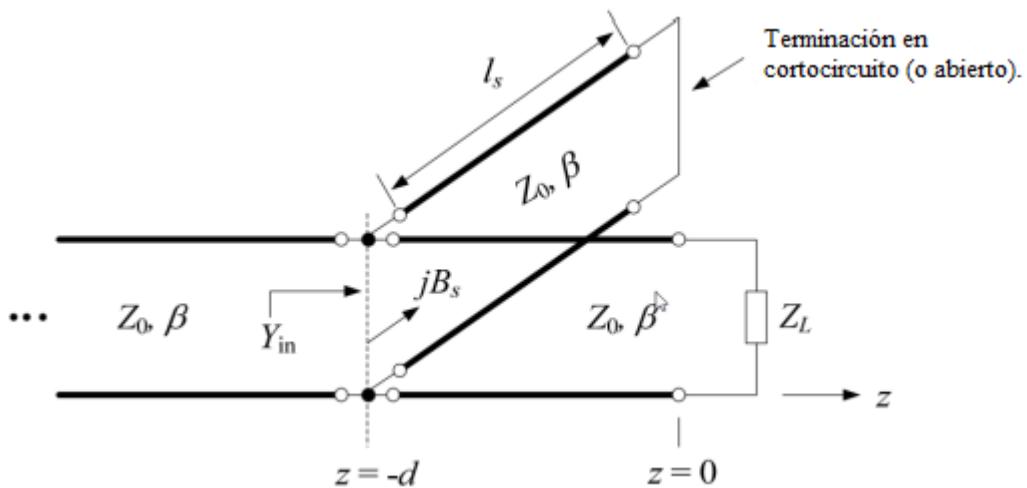


FIGURA 24: Acoplamiento de stub serie-paralelo [10].

▪ Acoplamiento de stub en derivación o paralelo.

Si se trabaja en este tipo de derivación el primer paso a seguir será la de seleccionar una longitud (d), el cual satisfaga el valor de la admittance, Y_0 dentro de la línea a la distancia d de la carga el cual posee la forma $Y_0 + jB$, misma que se ilustra en la figura 25, la resultante de la susceptancia del stub se selecciona como $-jB$.

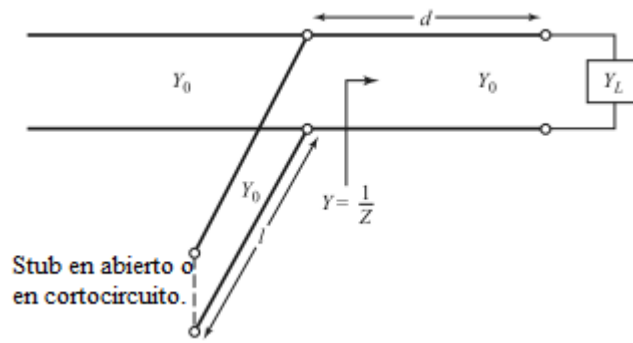


FIGURA 25: Acoplamiento de stub paralelo [10].

La obtención de las fórmulas para trabajar bajo este tipo de derivación con base en los parámetro d y l , la impedancia es $Z_L = 1/Y_L = R_L + jX_L$, por consiguiente la impedancia Z hacia abajo de la longitud d en la línea de carga se puede desarrollar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Z = Z_0 \frac{(R_L + jX_L) + jZ_0 \tan \beta d}{Z_0 + j(R_L + jX_L) \tan \beta d} \quad (30)$$

$$Y = G + jB = \frac{1}{Z} \quad (31)$$

$$G = \frac{R_L (1 + (\tan \beta d)^2)}{R_L^2 + (X_L + Z_0 \tan \beta d)^2} \quad (32)$$

$$B = \frac{R_L^2 \tan \beta d - (Z_0 - X_L \tan \beta d) (X_L + Z_0 \tan \beta d)}{Z_0 [R_L^2 + (X_L + Z_0 \tan \beta d)^2]} \quad (33)$$

si $R_L = Z_0$, entonces $\tan \beta d = -X_L/2Z_0$, las soluciones para d son:

$$\frac{d}{\lambda} = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \tan \beta d & \tan \beta d \geq 0 \\ \frac{1}{2\pi} (\pi + \tan^{-1} \tan \beta d) & \tan \beta d < 0 \end{cases} \quad (34)$$

La susceptancia del stub $B_s = -B$, para encontrar la longitud del stub para circuito abierto está dada por:

$$\frac{l_0}{\lambda} = \frac{-1}{2\pi} \tan^{-1} \frac{B}{Y_0} \quad (35)$$

Y para corto circuito está dada por:

$$\frac{l_s}{\lambda} = \frac{-1}{2\pi} \tan^{-1} \frac{Y_0}{B} \quad (36)$$

En caso de obtener valores negativos en las ecuaciones 35 y 36 se deberá agregar $\lambda/2$, para obtener valores positivos.

▪ **Acoplamiento de stub en serie.**

Continuando con los tipos de acoplamientos en stub, en este apartado se analiza el acoplamiento en serie, el cual se ilustra en la figura 26, misma que muestra como está constituida el acoplamiento de circuito stub en serie, con la finalidad de obtener las fórmulas para los parámetros d y l .

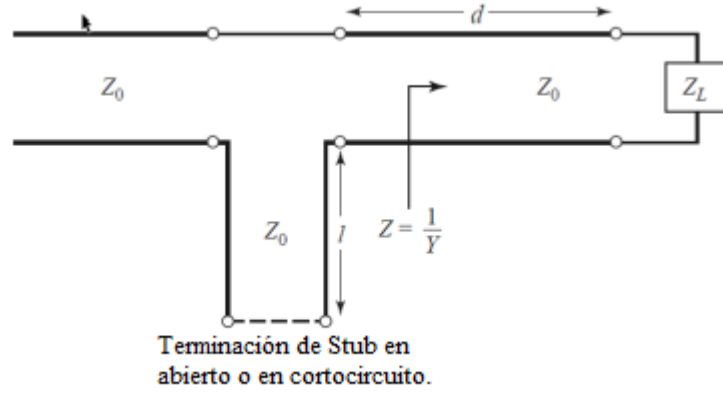


FIGURA 26: Circuito de acoplamiento Stub serie [10].

La distancia d , determina la impedancia Z , de la distancia de la carga igual a $Z_0 + jX$, para eliminación de la reactancia se aplica el stub en serie cuyo valor será el opuesto igual a $-jX$.

La entrega de la carga escrita por $Y_L = 1/Z_L = G_L + jB_L$, la admitancia Y en el origen antes de la longitud d de la línea de carga escrita por:

$$Y = Y_0 \frac{(G_L + jB_L) + jY_0 \tan \beta d}{Y_0 + j(G_L + jB_L) \tan \beta d} \quad (37)$$

$$Z = R + jX = \frac{1}{Y} \quad (38)$$

$$R = \frac{G_L (1 + (\tan \beta d)^2)}{G_L^2 + (B_L + Y_0 \tan \beta d)^2} \quad (39)$$

$$X = \frac{G_L^2 \tan \beta d - (Y_0 - B_L \tan \beta d) (B_L + Y_0 \tan \beta d)}{Y_0 \left\{ G_L^2 + (B_L + Y_0 \tan \beta d)^2 \right\}} \quad (40)$$

Si $G_L = Y_0$, entonces la $\tan \beta d = -B_L/2Y_0$, el resultado a obtener para d son dos soluciones posibles:

$$\frac{d}{\lambda} = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \tan \beta d & \tan \beta d \geq 0 \\ \frac{1}{2\pi} (\pi + \tan^{-1} \tan \beta d) & \tan \beta d < 0 \end{cases} \quad (41)$$

Se calcula el valor de la reactancia X , para el valor de stub necesario, esta reactancia debe poseer un valor igual al negativo del stub requerido X_S , e igual al stub en cortocircuito, determinada por:

$$\frac{l_s}{\lambda} = \frac{-1}{2\pi} \tan^{-1} \frac{X}{Z_0} \quad (42)$$

Para un stub a circuito abierto, esta dada por:

$$\frac{l_s}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \frac{Z_0}{X} \quad (43)$$

En caso de obtener valores negativos en las ecuaciones 42, 43, entonces se debe agregar el valor de $\lambda/2$, para obtener resultados positivos (Poazar, 2012).

2.2.11. Recolección o cosecha de energía.

En cuanto a la recolección o cosecha de energía, el constante avance tecnológico en la actualidad y el inevitable crecimiento de la demanda energética, el mundo actual se ve en la necesidad de nuevas formas de captación energética. El cual permita satisfacer la demanda de las mismas, sin causar daño alguno al medio ambiente, por ello nuevas formas de captar energía son esenciales, la figura 27 muestra las diferentes fuentes de energía las cuales se deben aprovechar para el mejoramiento de la calidad de vida de la humanidad. Si bien existen un sinnúmero de formas de captación de fuentes de energía, la solución más viable es la de energías renovables, las cuales poseen ventajas, entre las cuales se destacan; por su accesibilidad sin limitaciones geográficas, no producen subproductos nocivos que afecten negativamente al medio ambiente, son fuentes inagotables a diferencia de los combustibles fósiles, este último causante del calentamiento global [34].

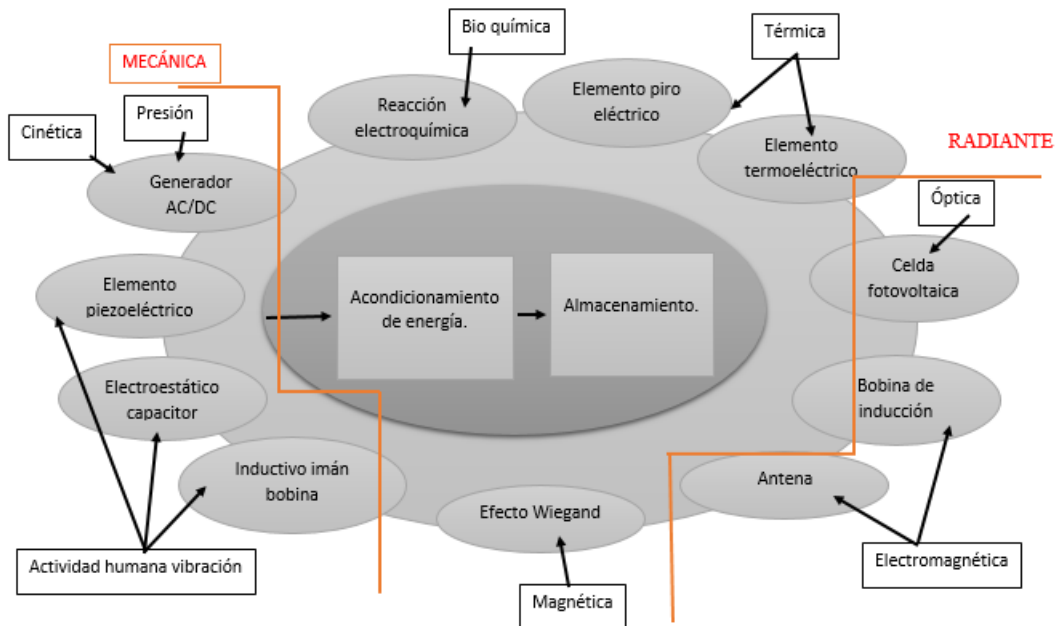


FIGURA 27: Dispositivos para recolección de energía [15].

Por efectos evidentes del cambio climático, la captación de energía ha sido el foco primordial de investigadores y definida como una técnica o proceso por el cual se extrae la energía de fuentes externas, las cuales se emplea en dispositivos de electrónica portátil y en sensores de IoT [21]. En cuanto a la potencia o cantidad a obtener en lo concerniente a energía, la potencia puede variar entre las fuentes de energía ambiental, la figura 28 muestra el rango de variación de potencias cuya unidad de medida está dada en Watts, que va desde $0.1 \mu W$ hasta los $100 W$, el rango a tomar en cuenta estará dada de acuerdo a la fuente de captación a emplear [16].

Rango de potencia	$0.1 \mu W$	$1 \mu W$	$10 \mu W$	$100 \mu W$	$1 mW$	$10 mW$	$100 mW$	$1 W$	$10 W$	$100 W$	$<100 W$	Industrialización	
Fuente de energía.				Generador termoelectrico (TEG)								Producción generalizada	
			Energía fotovoltaica (FV)									Producción generalizada	
	Energía piroeléctrica												Etapas de investigación.
	Ondas de radiofrecuencia (RF)												Producción limitada
	Energía triboeléctrica.												Etapas de investigación
				Energía piezoeléctrica.								Producción generalizada	

FIGURA 28: Cantidad intermitente de energía que se genera a partir de fuentes de energía ambiental comunes [16].

La figura 28 describe la cantidad intermitente de energía que se puede generar a partir de algunos de las fuentes de energía ambiental populares. Por otro lado la Tabla 2 muestra detalladamente de cómo está constituida la cantidad de energía a obtener del medio sea este natural o artificial, destacando sus potencias para la optimización y aprovechamiento de la misma como fuente de energía renovable. Sin embargo la energía de radio frecuencia dada a distintas frecuencias de captación y su mínima cantidad se deberá proveer de un circuito que provea de la energía necesaria para obtener los resultados o potencias acorde al equipo o sistema a ser beneficiado [2].

TABLA 2: Rango de densidades de potencia de energía recolectada de fuentes ambientales [2].

Tipo de fuente.	Densidad de potencia
Solar	$[0.006 - 15] mW/cm^2$
Eólica	$[0.065 - 28.5] mW/cm^2$
Mecánica	$[0.11 - 7.31] mW \cdot g^2/cm^3$
Termoelectrico	$[15 - 60] \mu W/cm^3$
RF	$[1.2 * 10^{-5} - 15] mW/cm^2$

Con relación a la tabla 2 muestra las diferentes potencias a obtener de diferentes fuentes, en efecto es indudable que en la actualidad es una forma viable de captación con la finalidad de impulsar equipos de bajo consumo de energía, si bien se detalla

potencias muy bajas, el desarrollo de nuevas técnicas tecnológicas permiten una adaptación con diferentes elementos electrónicos con la finalidad de obtener una potencia adecuada de acuerdo al equipo o sensor a ser alimentado todo gracias a los avances tecnológicos que se posee en la actualidad. Si bien la energía a ser captada es de gran ayuda, su desarrollo debe ser enfocada al casi nulo o nulo uso de baterías, es por ello el diseño de las mismas debe ser la apertura a garantizar de una manera más confiable que las conexiones de batería o enchufe.

La recolección de energía y su posterior uso o aplicación debe ser enfocada a emplear en cualquier lugar y a la hora deseada, es por ello que debe proporcionar movilidad, debido a su reducido tamaño fácil de llevar, en concreto que permita mejorar la confiabilidad y prevenir la interrupción de energía y poder tener acceso ilimitado. Concretamente la cosecha provee de la energía para su posterior aplicación bajo un esquema, el cual consta partes fundamentales esenciales, la figura 29, muestra como esta constituido una arquitectura de cosecha de energía.

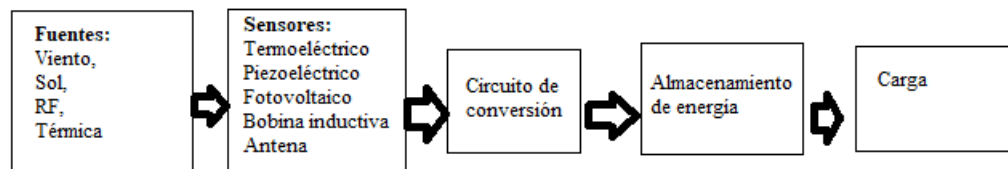


FIGURA 29: Arquitectura de recolección de energía [17].

La disponibilidad continua de la fuente de radiofrecuencia (RF), es una fuente que debe ser aprovechada al máximo, si bien provee bajos niveles de potencia, esta puede ser captada a través de una o varias antenas a una o rangos de frecuencia específicas, empleando una fuente dedicada y un circuito de conversión de RF a CC ó CD eficientes, el almacenamiento en un sistema de recolección es de suma importancia por su aplicación como fuente de energía de respaldo, para su posterior aplicación.

2.2.12. Métodos de rectificación.

El circuito rectificador forma parte del sistema de recolección de energía, siendo uno de los componentes esenciales dentro del sistema de recolección de energía electromagnética, cuya finalidad es la de transformar la tensión CA en tensión CD. El circuito rectenna puede recolectar energía de RF y consiste en la combinación de antena, circuito de adaptación y rectificador de voltaje [35][36].

Simplemente, el circuito rectificador es un dispositivo eléctrico que consta de uno o más diodos y otros elementos que transforman la RF en corriente continua (CC) [37].

Rectificador de media onda.

En el rectificador de media onda, al aplicar la tensión alterna al diodo, la mitad negativa de la onda se pierde, mientras que el ciclo positivo pasa, como se muestra en

la Figura 30. Solo en este caso, la mitad de la onda de la entrada puede alcanzar la salida, por lo que es un transformador de potencia de la mitad de eficiencia [38].

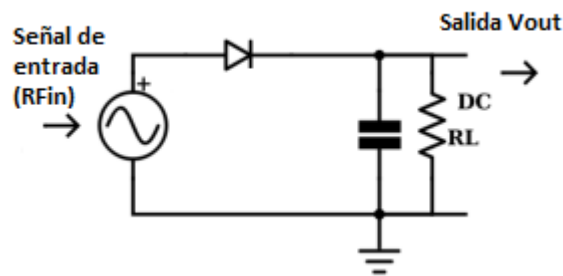


FIGURA 30: Rectificador de media onda [18].

Rectificador de onda completa

Un rectificador de onda completa permite que tanto la onda de entrada positiva como la negativa entren en la salida, como vemos en la Figura 31, mediante el uso de dos diodos que funcionan como dos válvulas, permiten usar ambas mitades de la forma de onda de CA para alcanzar la rectificación de onda completa, que es más eficiente que la media onda.

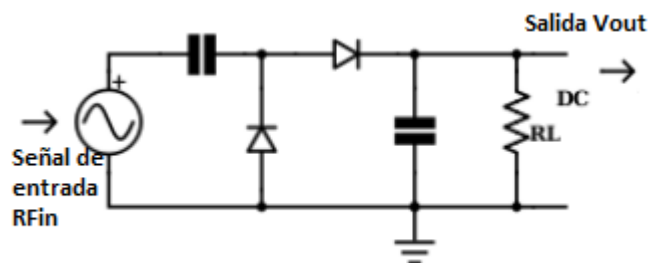


FIGURA 31: Rectificador de onda completa [18].

Rectificador duplicador de voltaje

El rectificador duplicador de voltaje consta de dos diodos y dos condensadores. La Figura 32 muestra dos diodos conectados en paralelo, de modo que la corriente directa pueda pasar solo desde tierra al terminal de voltaje de salida positivo V_{out} usando D2 y luego D1. Por lo tanto, el condensador C1 bloqueó el paso de la corriente CC hacia la fuente.

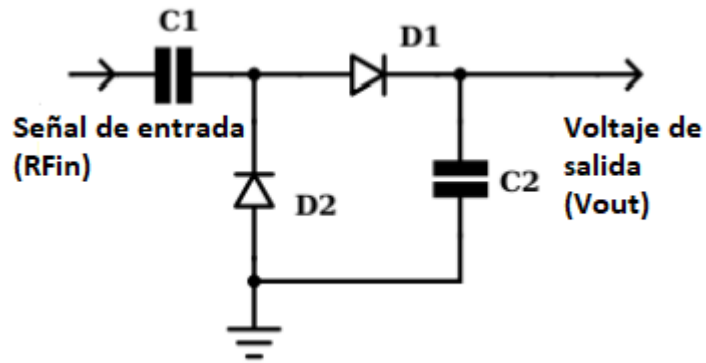


FIGURA 32: Duplicador de Voltaje [18].

2.3. Solución a la propuesta.

El uso convencional de fuentes de energía ha creado un deficiente uso de energías alternativas amigables con el medio ambiente, como la captación de energía electromagnética. El diseño de un sistema capaz de proveer energía eléctrica para alimentación de dispositivos móviles a partir del uso de antena tipo parche y el respectivo acoplamiento con un circuito rectificador, es viable como energía alternativa que puede ser aprovechado por la energía electromagnética presente en el medio, para recarga de dispositivos electrónicos móviles.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA.

3.1. Enfoque.

Si bien la captación de energía electromagnética no es una tecnología completamente nueva, su desarrollo en los últimos años ha tomado auge y su evolución se ha visto de manera significativa, el cual puede emplearse de manera independiente o a través de combinaciones con otras tecnologías, con un único objetivo, transformar de energía electromagnética presente en el medio en diferentes bandas de frecuencia a corriente directa (DC), y su posterior almacenamiento en condensadores y baterías. La presente propuesta de investigación se basa en un enfoque cualitativo-cuantitativo, bajo estas dos premisas y su respectiva importancia se da porque es necesario conocer cuan esencial es un dispositivo que permita proveer de energía a los dispositivos móviles que a diario circulan en el medio, con un sinnúmero de bandas, misma que permita la no dependencia de un cargador eléctrico común, a través de estas necesidades de análisis y desarrollo se busca la mejor opción en la elaboración de un sistema de antenas capaz de proveer la energía requerida para alimentación de dispositivos, el cual permita obtener una solución óptima y que ayude a mitigar la dependencia de fuentes de alimentación comunes conectadas al sistema eléctrico convencional.

3.2. Alcance.

El sistema a desarrollar con antenas tipo patch Microstrip de diferentes modelos, en base a modelos matemáticos y de simulación a través del software CST STUDIO, ADS, SATURN PCB DESIGN, MATLAB Y AUTOCAD, herramientas esenciales para el diseño del prototipo, con la finalidad de simular y diseñar diferentes comportamientos de distintas antenas a frecuencias que se establecieron en base a estudio, por ejemplo, Wi-fi, GSM, etc y su respectivo estudio de radiación. Por lo que su respectivo diseño, acoplamiento y construcción de un prototipo que permita la mayor captación de energía electromagnética presente en el medio y su respectivo acondicionamiento de voltaje para aplicarse como fuente DC y su respectiva aplicación en dispositivos móviles, posee un alcance factible para el investigador, los elementos necesarios a emplear son accesibles en centros electrónicos dentro y fuera del país y económicamente sustentable, así como una literatura de fácil acceso para el acoplamiento del sistema acorde a los objetivos planteados dentro de la investigación, así como sus respectivas mediciones se los puede realizar en base a equipos disponibles como lo son analizador de espectro.

3.3. Modalidad de la investigación.

Tomando en cuenta diferentes campos de exploración muy esenciales para la presente investigación, su modalidad está enfocada en aspectos como:

3.3.1. Investigación bibliográfica.

En base a búsqueda técnica y profunda de diferentes estudios anteriores como: artículos científicos, documentación técnica, revistas, perfiles técnicos (tesis), informes y cualquier documentación permitieron coadyuvar al desarrollo integro que avale el desarrollo minucioso a detalle, es parte esencial para el desarrollo de la presente investigación. Dicha información a obtener se realiza con la finalidad de un estudio preliminar de sistemas de captación de energía, conceptos básicos de antenas y sus principales características, conversión de energía electromagnética a eléctrica, el cual proporcione información útil, a detalle, esencial y relevante que permita un diseño acorde a las necesidades como lo es la captación de la energía electromagnética a través de sistemas de antenas tipo patch, para su utilización en dispositivos móviles.

3.3.2. Investigación de campo.

El campo de estudio se centra en todo el medio donde las bandas de frecuencias esten presentes, en la cual se analiza las principales frecuencias esencialmente WI-FI, GSM, AM/FM u otras.

3.3.3. Investigación experimental.

Seguido de la fundamentación teórica y su estudio de campo respectivo, ofrecen una visión adecuada, acorde a lo que se espera obtener en base a la captación de energía electromagnética a una frecuencia determinada y su posterior conversión a eléctrica, una visión técnica de un sistema de antenas que permita captar la mayor energía posible a través de simulaciones y técnicas de diseño, para su posterior implementación, mismos que son analizados en base a pruebas de funcionamiento, el cual ofrezca información verídica del sistema y la herramienta de simulación en diseño de antenas para un óptimo desarrollo del prototipo y permita alcanzar los objetivos antes planteados en base a resultado y conclusiones obtenidos en el presente trabajo de investigación.

3.4. Nivel o tipo de investigación.

La presente investigación está encaminada bajo un nivel descriptivo, exploratorio y explicativo, con la finalidad de proveer una solución al problema actual de los sistemas de captación de energía a través de sistemas modernos y amigables con el medio ambiente, mismos que conllevan a cumplir aspectos como:

- La realidad energética.
- Desarrollo de antenas óptimas.
- Aceptación de la tecnología.

3.5. Recolección de información.

Se busca realizar la recolección o captación de energía electromagnética existentes en el medio, para su respectiva conversión en energía eléctrica. La recolección de información tuvo como partida la consulta de repositorios digitales, bibliografías y base de datos que permitieron acceder a tesis, artículos científicos, hojas técnicas de componentes (datasheets), etc., permitiendo conocer y ampliar la realidad del tema de estudio. Se realizó las pruebas necesarias en cada etapa del prototipo comprobando resultados y funcionamiento, con la finalidad de proveer un sistema amigable con el medio ambiente y beneficiarios de este sistema.

3.6. Procesamiento y análisis

Al obtener una información acorde al tema de estudio, para un desarrollo de un prototipo capaz de proveer la energía requerida para la carga de dispositivos móviles a una frecuencia específica o rangos de frecuencia, se realizó la comparación de como diseñar antenas a diferentes frecuencias con la mayor concentración de energía posible. Los resultados obtenidos en la parte de simulación y fabricación del prototipo serán puestos a consideración con sistemas de medición y su análisis en patrón de radiación de diferentes antenas a elaborar, para un análisis de acuerdo a los objetivos y ver la capacidad de proveer de energía capaz de alimentar un dispositivo móvil sin ningún inconveniente.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Introducción.

Si bien en los últimos años, el termino referido a la recolección de energía a tomado auge en países desarrollados, principalmente por investigadores, cuyo objetivo principal de la investigación se ha basado en las energías de RF, como una solución para las baterías de corta duración. La extracción o cosecha de señales de RF a través de una antena o arreglo que conjuntamente con un circuito de adaptación y su respectiva rectificación para convertir de señal de CA a una de señal en CC cuyo propósito sea la de emplear en dispositivos como sensores inalámbricas, implantes médicos, y la aplicación en otras fuentes que se requiera, caso particular del presente trabajo en la alimentación de dispositivos móviles. Por el contrario, caso particular según datos proporcionados por la ARCONEL, presenta un Balance Nacional de Energía Eléctrica (BNEE) misma que se detalla en la tabla 3, el cual detalla la potencia de generación eléctrica tanto para energía renovable y no renovable, cada una de ellas con su respectivo porcentaje.

TABLA 3: Información Estadística de generación Eléctrica [3].

Potencia Nominal de Generación E. Eléctrica		MW	%
Energía Renovable	Hidráulica	5098.75	58.51 %
	Eólica	21.15	0.24 %
	Fotovoltaica	27.63	0.32 %
	Biomasa	144.30	1.66 %
	Biogás	7.26	0.08 %
Total Energía Renovable		5299.09	60,81 %
No Renovable	Térmica MCI	2031.08	23.31 %
	Térmica Turbogás	921.85	10.58 %
	Térmica Turvovapor	461.63	5.30 %
Total energía no Renovable		3414.55	39.19 %
Total Potencia Nominal		8713.64	100.00 %

El Ecuador tiene como fuente principal y tradicional la hidroeléctrica, conjuntamente con la térmica el cual proviene de combustibles fósiles, y otras fuentes no muy explotadas, el constante avance tecnológico, el crecimiento y asentamiento poblacional en el país, si bien cuenta con un sinnúmero de recursos no renovables, se ve en la necesidad de crear nuevas fuentes para generar y satisfacer la demanda energética , según datos de la ARCONEL , el país está en constante crecimiento en lo relacionado

a consumo de energía eléctrica, la tabla 4 muestra en detalle como está distribuido el consumo, si bien es cierto que el desarrollo de nuevas políticas en el país de generación de energías a partir de fuentes renovables ha tomado auge, todo con la finalidad de atraer inversionistas, generación de empleos y flexibilidad de tecnologías, todo está basado en energías hidroeléctricas, en lo relacionado a RF los estudios con respecto a este tema solo se ha desarrollado poco o casi nulo trabajo y no han sido desarrollados como una energía alternativa de impacto que promueva el desarrollo del país, al contrario solo se ha visto enfocado en un número significativo, muy reducido el empleo de la cosecha de energía electromagnética aprovechando el rango de frecuencias existentes a nivel nacional, que solo se ha dado en instituciones educativas.

TABLA 4: Consumo de energía eléctrica servicio público [3].

Consumo Servicio Publico		GWh	%
A nivel Nacional	Residencial	8074.93	36.97 %
	Comercial	3382.24	15.48 %
	Industrial	5103.93	23.37 %
	A. Público	1441.70	6.60 %
	Otros	2324.27	10.64 %
TOTAL		20327.07	93.06 %
Pérdidas de Distribución	Técnicas	1701.27	6.76 %
	No Técnicas	1556.43	6.18 %
Total pérdidas de distribución		3257.70	12.94 %
Recaudación	USD Millones	1874.68	
USD Recaudado		1675.00	89.35 %

El aprovechamiento de la energía electromagnética está basada en el diseño de antenas con tecnología microstrip, cuya finalidad es la captación de ondas electromagnéticas a diferentes rangos de frecuencia o en su defecto la captación en múltiples bandas. Los diseños de antenas para bandas únicas se ha visto reflejada en (Al-Azawy, Musaab Mohammed and Sari, 2019, [39]; Gupta, Aggraj and Pattapu, 2018, [40]); para bandas duales trabajos desarrolladas por (Amjad, Osama and Munir, 2018 [41], Pinto, Diffa and Arun, 2021 [42]), dichos investigadores enfocados en la cosecha de energía y el aprovechamiento del ancho de banda para diferentes rangos de frecuencia, los diseños enfocados a conseguir una alta gama de frecuencias y configuración de las mismas para proveer un prototipo que genere la cantidad necesaria para energizar un equipo, caso particular en la alimentación para dispositivos móviles.

Se propone dos antenas microstrip para la captación de energía de RF. La primera una antena de estructura planar con resonancia híbrida (HRPSA), el cual debe operar a única frecuencia, para el cual se ha elegido opere a 900 MHz, debido a su gran cobertura. La segunda antena a diseñar se basa en una antena multibanda espiral de Arquímedes (ASMA), el cual debe operar en un rango de frecuencias de 1 a 3 GHz. Este rango de frecuencias propuesta para el diseño incluye una gran variedad de aplicaciones inalámbricas e incorpora señales GSM, WiMAX, Wi-Fi, LTE and UMTS.

Con el amplio ancho de banda que la espiral de Arquímedes cubre la convierten en un elemento óptimo para aplicaciones de recolección de energía electromagnética. Las aplicaciones inalámbricas estándar que opera en el rango de frecuencias indicados son: GSM-900 MHz, GSM-1800 (1710 MHz-1880 MHz), UMTS (1920 MHz-2170 MHz), LTE, WiFi 2.45 GHz y WiMAX 2.3 GHz y 2.5 GHz.

4.1.2. Diseño estructural, cálculo y geometría de Antenas.

1. Diseño antena de estructura planar con resonador híbrido (HRPSA).

La estructura de las antenas propuestas parte del diseño básico especificada en la sección 2.2.8. Para un uso óptimo del espectro electromagnético, los cálculos a una frecuencia estándar, cuyo rango de trabajo es de 900 MHz dicha antena de estructura planar con resonador híbrido. La tabla 5, muestra los parámetros fundamentales elegidos para este diseño, los valores de cada parámetro corresponden para su diseño y posterior impresión en un sustrato epoxi FR4. Las medidas de longitud y anchura de la antena se han optimizado utilizando software de simulación CST, el objetivo principal de optimización es hacer coincidir la impedancia de entrada de la antena a 50Ω en el rango deseado de frecuencias de funcionamiento.

TABLA 5: Parámetros fundamentales para diseño de HRPSA

Parámetro	Valor para antena HRPSA
Frecuencia de resonancia(f_r)	900 MHz
Permitividad relativa del sustrato(ϵ_r)	4.3
Altura de sustrato(h)	1.6 mm
Impedancia de entrada	50Ω
Tangente de pérdidas	0.02

Elaborado por: Investigador.

a) Cálculo antena de estructura planar con resonador híbrido (HRPSA).

Los cálculos para los diseños tienen su sustento de las ecuaciones, 10, 11, 12, 13, 14 especificada en la sección 2.2.8.

- Cálculo de anchura de antena:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{E_r + 1}{2}}}$$

$$W = \frac{3 * 10^8}{2 * 0.9GHz \sqrt{\frac{4.3 + 1}{2}}}$$

$$W = 0.010144m = 10.14mm$$

- Cálculo de la eficiencia dieléctrica:

$$E_{reff} = \frac{E_r + 1}{2} + \frac{E_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$E_{reff} = \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1.6mm}{10.14mm} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$E_{reff} = 3.7$$

- Cálculo de la longitud efectiva:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{E_{reff}}}$$

$$L_{eff} = \frac{3 * 10^8 \frac{m}{s}}{2 * 0.9GHz \sqrt{3.7}}$$

$$L_{eff} = 0.08665m = 86.65mm$$

- Cálculo de la extensión de Longitud:

$$\Delta L = 0,412 \frac{h(E_{reff} + 0,3) \left[\frac{W}{h} + 0,264 \right]}{(E_{reff} - 0,258) \left[\frac{W}{h} + 0,8 \right]}$$

$$\Delta L = 0,412 \frac{1.6mm(3.7 + 0,3) \left[\frac{10.14mm}{1.6mm} + 0,264 \right]}{(3.7 - 0,258) \left[\frac{10.14mm}{1.6mm} + 0,8 \right]}$$

$$\Delta L = 0.71mm$$

- Cálculo de longitud de antena:

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

$$L = 86.65mm - 2 * 0.71mm$$

$$L = 85.23mm$$

b) Geometría antena de estructura planar con resonador híbrido (HRPSA).

La geometría de la antena propuesta se muestra en la Figura 33 correspondiente a la antena de estructura planar con resonador híbrido, desarrollada y simulada en el software CST, cuyo rango de trabajo es de 900 MHz.

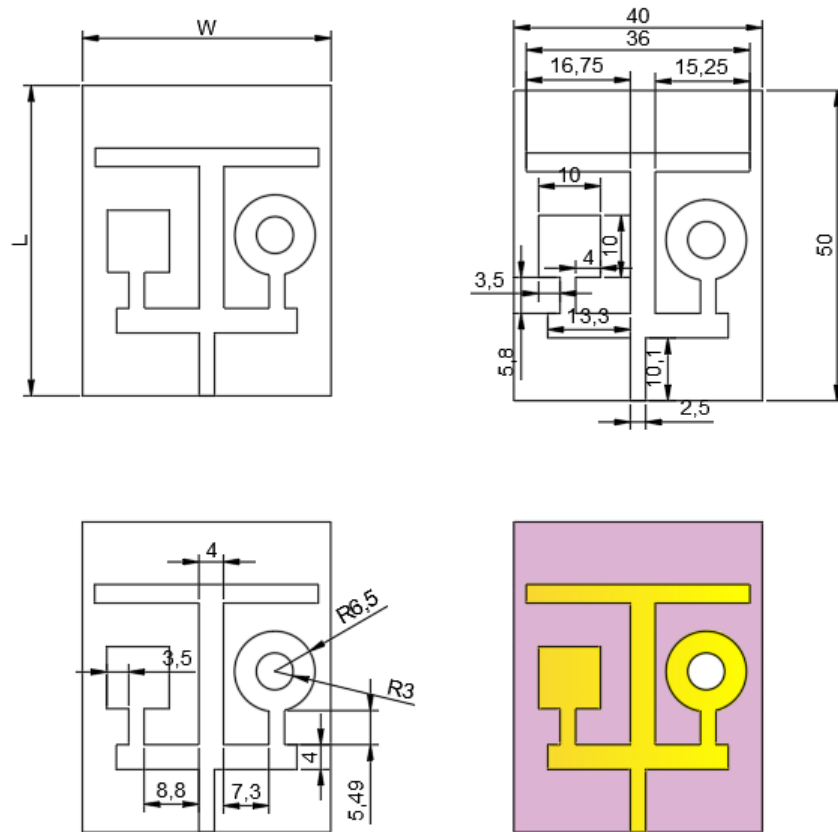


FIGURA 33: Estructura y dimensiones de antena a 900 MHz. **Elaborado por:** Investigador

2. Antena espiral de Arquímedes multibanda (ASMA).

La estructura de las antenas propuestas parte de las ecuaciones especificada en la sección 2.2.9, cuyas medidas son esenciales para el diseño de la antena. Los cálculos para la obtención de las medidas de cada brazo de la antena de Arquímedes parte de la necesidad de operación en un rango de frecuencia a trabajar. Para los cálculos se ha optado por trabajar en un rango de frecuencias de 1 a 3 GHz. La tabla 6, muestra los parámetros fundamentales elegidos para este diseño, los valores de cada parámetro corresponden para su diseño y posterior impresión en un sustrato epoxi FR4. Las medidas de longitud y anchura de la antena se han optimizado utilizando software de simulación CST, el objetivo principal de amortización es hacer coincidir la impedancia de entrada de la antena a 50Ω en el rango deseado de frecuencias de funcionamiento.

TABLA 6: Parámetros fundamentales para diseño de ASMA.

Parámetro	Valor para antena ASMA.
Frecuencia de resonancia(f_r)	Multibanda de 1 a 3 GHz.
Permitividad relativa del sustrato(ϵ_r)	4.3
Altura de sustrato(h)	1.6 mm
Impedancia de entrada	50 Ω
Tangente de pérdidas	0.02

Elaborado por: Investigador.

a) Calculo antena espiral de Arquímedes multibanda.

Los cálculos para los diseños tienen su sustento de las ecuaciones, 15, 16, 17 especificada en la sección 2.2.9.

▪ **Calculo de radio interno y externo, rango de operación de 1 a 3 GHz:**

$$f_L = \frac{c}{2\pi r_2 \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$$r_2 = \frac{c}{2\pi f_L \sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 1 \text{GHz} \cdot \sqrt{4.3}} = 0.0227 \text{m} = 2.27 \text{mm}$$

$$f_H = \frac{c}{2\pi r_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$$r_1 = \frac{c}{2\pi f_H \sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 3 \text{GHz} \cdot \sqrt{4.3}} = 0.00086 \text{m} = 0.86 \text{mm}$$

▪ **Cálculos de brazo de la antena espiral de Arquímedes multibanda.**

$$S = W = \frac{r_2 - r_1}{4N} = \frac{2.27 \text{mm} - 0.86 \text{mm}}{4 \cdot 5} = 0.08 \text{mm}$$

b) Geometría antena espiral de Arquímedes multibanda.

La geometría de la antena propuesta se muestra en la figura 34, correspondiente a la antena multibanda en espiral de Arquímedes, desarrollada y simulada en el software CST, cuyo rango de trabajo es de 1 a 3 GHz, que dispone de los valores de medición de cada dimensión. La antena se diseña sobre un sustrato con unas dimensiones de 80 mm de largo, 1.6 mm de ancho y 80 mm de alto. En este caso el mismo software CST proporciona los valores de L y W.

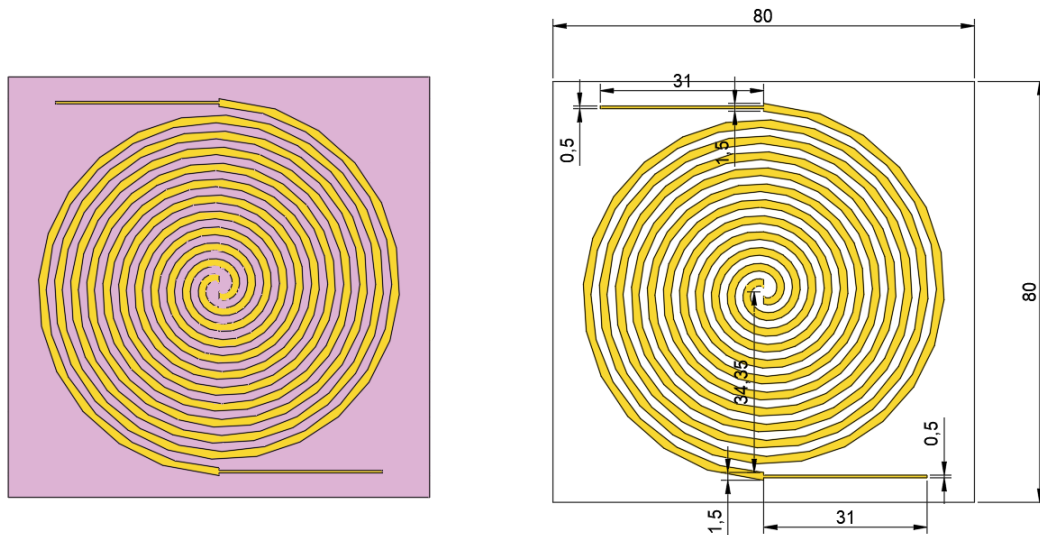


FIGURA 34: Geometría de ASMA DE 1 a 3 GHz. **Elaborado por:** Investigador

4.1.3. Resultados de simulación.

Cada una de las antenas propuestas ha sido diseñada, simulada y medida. El diseño y la simulación se realizaron en el software CST. La impresión como proceso práctico para realizar las mediciones reales de las antenas se realizó en FR4. Una vez impresas las antenas, se realizaron las medidas utilizando un ordenador, un cable USB y el MiniVNA-TINY que es un analizador de antenas muy compacto con conexión USB, que permite obtener los parámetros S11, impedancias, entre otros. A continuación se explica el diseño de la antena y la discusión de los resultados de la simulación y de las pruebas de la antena de estructura planar con resonador híbrido y de la antena multibanda con espiral de Arquímedes.

a) Simulación de HRPSA.

El prototipo diseñado para análisis y simulación se ejecuta utilizando el software CST, su geometría se muestra en la Figura 35. El prototipo se construye en base al software en el que se examina la pérdida de retorno simulada a 900 MHz.

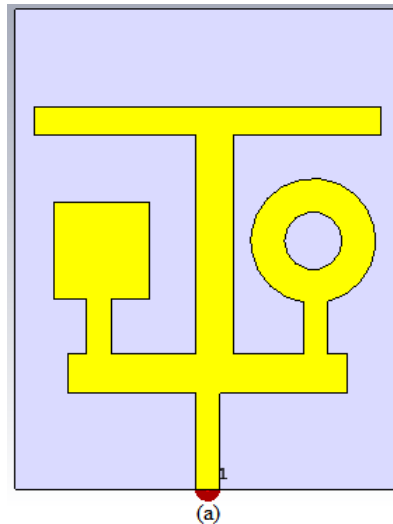


FIGURA 35: Geometría de HRPSA simulada en CST Software. **Elaborado por:** Investigador

Se analizan las simulaciones correspondientes a cada antena para su estudio y verificación de datos, los parámetros S o parámetros de dispersión para caracterizar un dispositivo lineal de uno o más puertos, en este caso particular un puerto discreto. El parámetro S11 mide la cantidad de energía entre la energía reflejada y la energía que se aplica al puerto.

El parámetro S11 de la HRPSA se representa en la figura 36, donde se muestra una línea negra vertical que corresponde a la frecuencia de funcionamiento a 900 MHz. Aunque la figura 37 muestra una frecuencia de funcionamiento a 2.2 GHz cuyo valor de adaptación es de -8.9 dB, no se tiene en cuenta. Al trabajar con reflexiones inferiores a -10 dB correspondientes a la décima parte de la potencia de transmisión, es óptimo operar en la banda de 900 MHz, por lo que se considera esta simulación como la adecuada para la implementación de la antena ya que funciona correctamente en la frecuencia deseada, sin mencionar que puede ser optimizada para futuros trabajos.

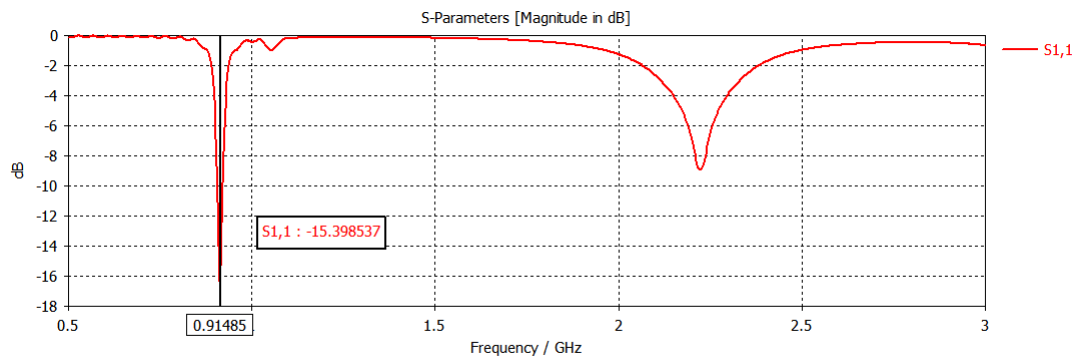


FIGURA 36: Pérdida de retorno parámetro S11 a 900 MHz. **Elaborado por:** Investigador

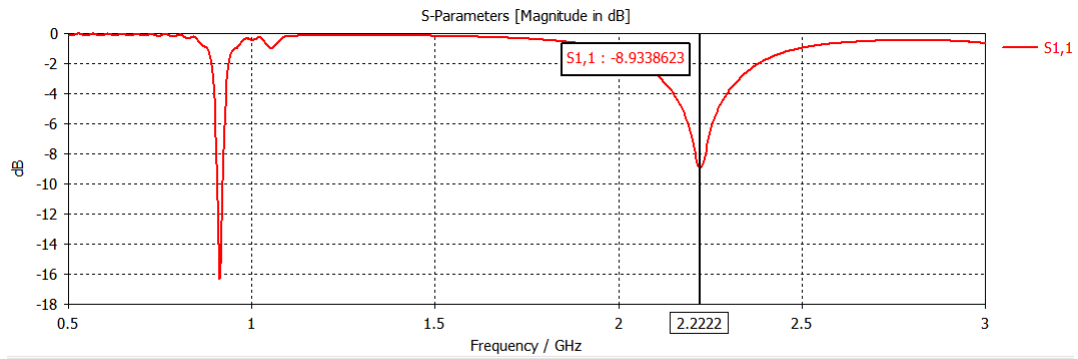


FIGURA 37: Pérdida de retorno parámetro S11 a 900 MHz. **Elaborado por:** Investigador

En la simulación tridimensional 3D de la antena de estructura planar con resonador híbrido simulada en CST software. La figura 38 (a), muestra el diagrama de radiación a la frecuencia deseada que es 900 MHz y muestra un diagrama omnidireccional con una directividad máxima de 3.17 dBi y un ancho de banda de 13.5 MHz. La simulación de los patrones de radiación, ver Figura 38 (b), para el plano xz ($\phi = 0$), así como en el plano yz ($\phi = 90$) ver en la Figura 38 (c). Analizando el diagrama de radiación a 900 MHz en el plano yz, se observa un nulo en $\theta = 90$ y la máxima radiación se observa en la dirección lateral en $\theta = 0$ y $\theta = 180$.

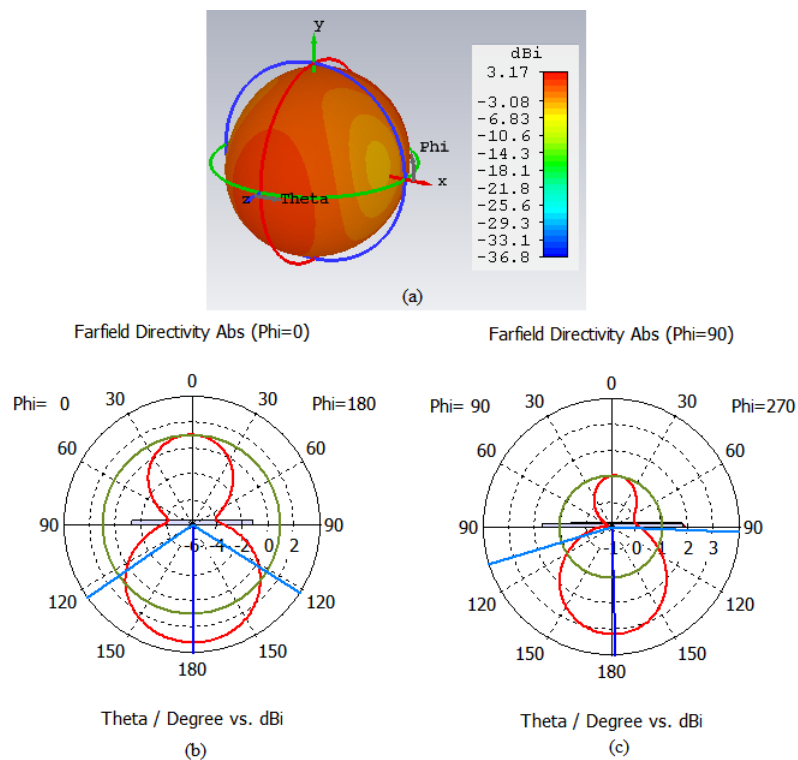
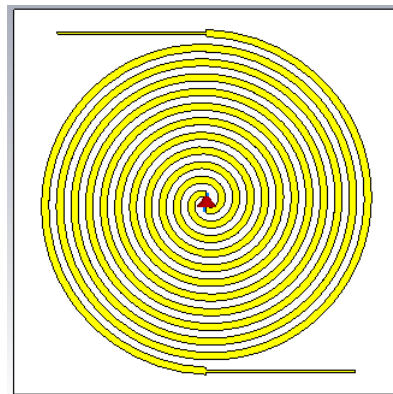


FIGURA 38: Patrón de radiación simulado de la antena a 900 MHz (a) patrón 3-D, (b) plano xz 2-D. **Elaborado por:** Investigador

b) Simulación de ASMA.

La estructura simulada del ASMA en el software CST se representa en la figura 39, cuya principal característica a destacar es que fuera de los brazos espirales se implementan dos terminales en horizontal para obtener un mayor ancho de banda a múltiples frecuencias y resonar en el rango de 1 a 3 GHz.



(b)

FIGURA 39: Geometría de ASMA diseñada en CST software. **Elaborado por:** Investigador

En la simulación tridimensional para la antena espiral multibanda de Arquímedes, siendo una antena multibanda entre 1 y 3 GHz. Los diagramas de radiación tridimensionales a considerar son para aplicaciones inalámbricas estándar y se muestran en la Figura 40 (a) a la Figura 40 (f) para las frecuencias de 900 MHz, 1.2 GHz, 1.8 GHz, 2.4 GHz, 2.6 GHz y 3 GHz. Las ganancias obtenidas a estas frecuencias son 2.62 dBi, 3.16 dBi, 3.63 dBi, 4.24 dBi, 4.27 dBi y 4.58 dBi, respectivamente, valores obtenidos en la simulación con el software CST. Sin embargo, esta antena omnidireccional puede funcionar de forma silenciosa en todo el rango de frecuencias mencionado anteriormente, ya que tiene un amplio ancho de banda con bajas ganancias que la convierten en una antena óptima para la captación de energía electromagnética.

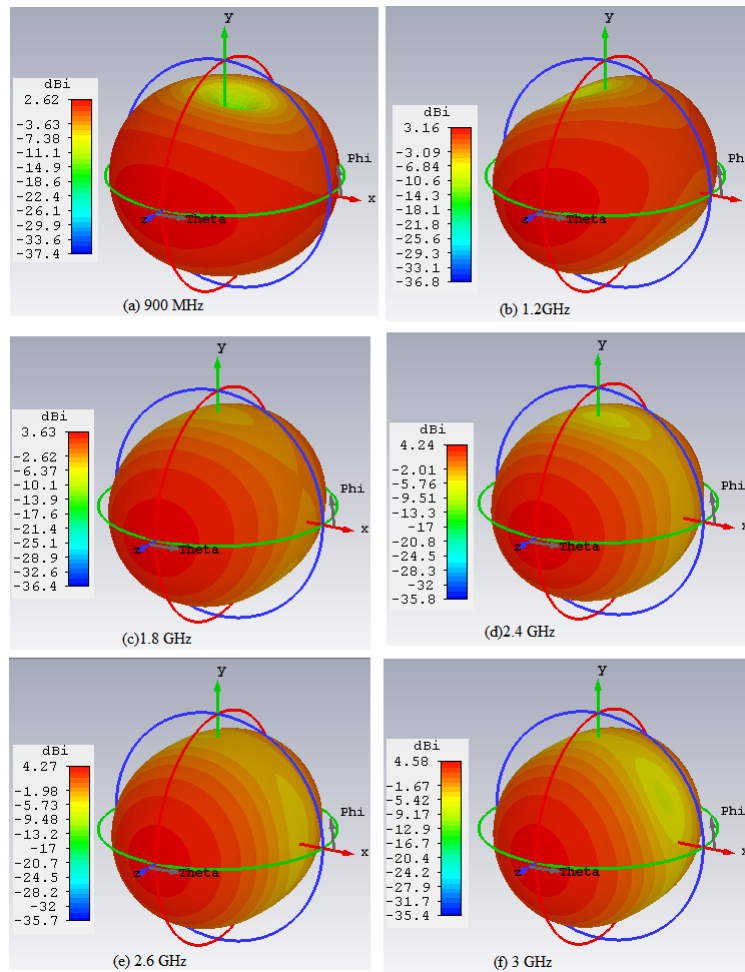


FIGURA 40: Patrones de radiación tridimensional (3-D) ASMA (a) 900 MHz, (b) 1.2 GHz, (c) 1.8 GHz, (d) 2.4 GHz, (e) 2.6 GHz, (f) 3 GHz. **Elaborado por:** Investigador

La figura 41, muestra el diagrama de radiación simulado en CST en el plano yz ($\phi = 90$), para las frecuencias mencionadas en las que se observan nulos en $\theta = 90$.

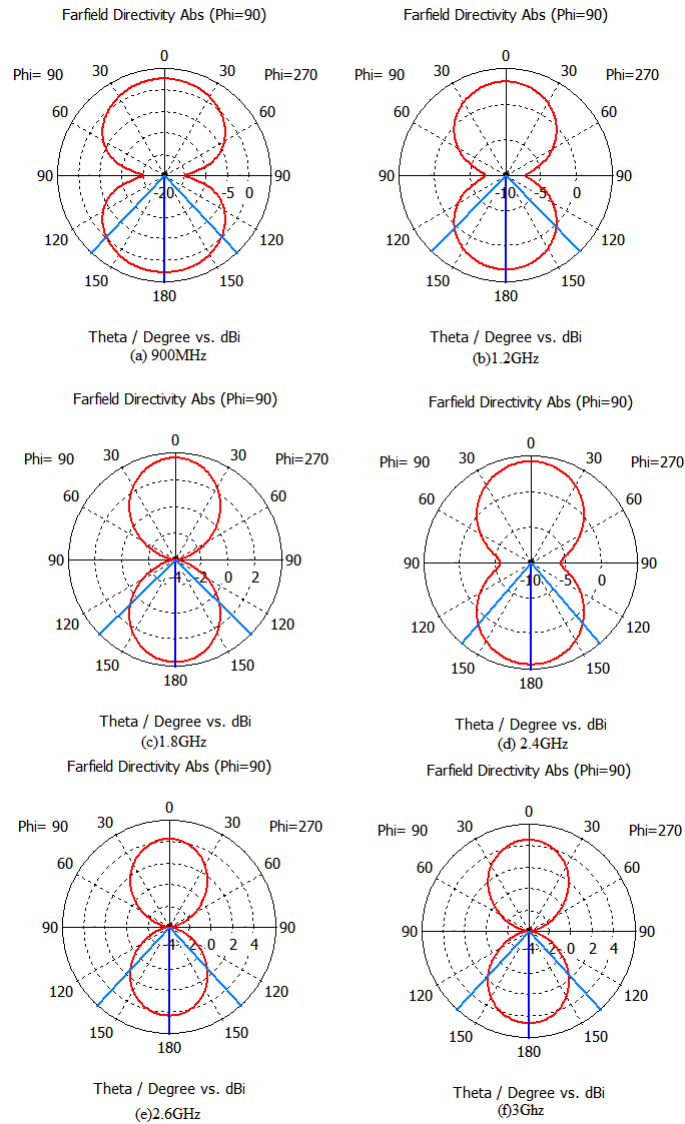


FIGURA 41: Patrones de radiación 2-D ASMA (a) 900 MHz, (b) 1.2 GHz, (c) 1.83 GHz, (d) 2.4 GHz, (e) 2.6 GHz, (f) 3 GHz. **Elaborado por:** Investigador

Figura 42, correspondiente al parámetro S11 de la antena multibanda en espiral de Arquímedes. Esta antena está diseñada para operar en un rango de frecuencias, el diseño se hizo para operar de 1 a 3 GHz. El parámetro S da como resultado una frecuencia de funcionamiento de 1.17 GHz a -25.11 dB. Al ser una antena multibanda, el diseño está acoplado para un rango de trabajo de 1 a 3 GHz como resultado del CST.

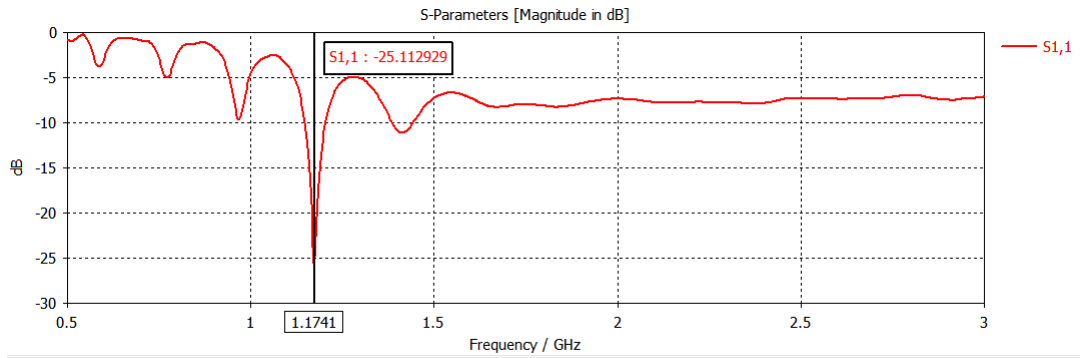


FIGURA 42: Parámetros S11 de ASMA con valor a 1.17 GHz. **Elaborado por:** Investigador

4.1.4. Fabricación de antenas.

a) **Fabricación de antenas de estructura planar con resonador híbrido.**

El diseño de la antena de estructura planar con resonador híbrido, cuya estructura de tierra y parche se imprimen a cada lado del sustrato dieléctrico FR4. En la Figura 43 se ilustra la vista frontal y posterior del prototipo fabricado de las antenas alimentadas con líneas de microbanda. La parte frontal muestra la geometría de la antena, y la parte posterior muestra la parte metálica impresa en toda la geometría de la antena, soldada a un conector RG8, que se utiliza para conectar al MiniVNA-TINY, con la finalidad de obtener datos reales de la antena.

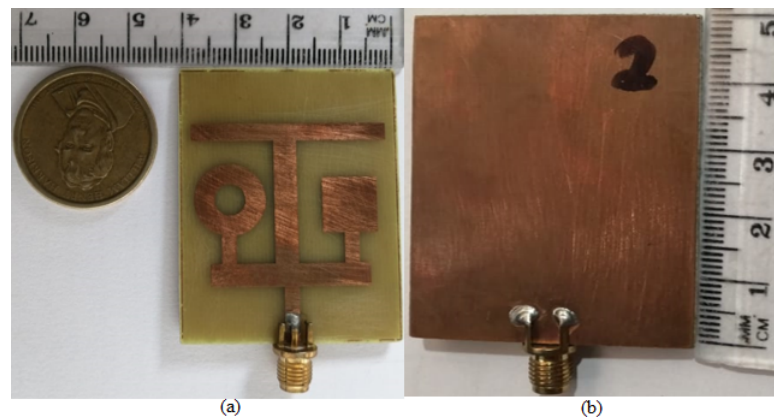


FIGURA 43: Prototipo fabricado de antena de estructura planar con resonador híbrido: (a) vista frontal, (b) vista posterior. **Elaborado por:** Investigador

b) **Fabricación de antena espiral de Arquímedes multibanda.**

La antena multibanda en espiral de Arquímedes, cuyo prototipo se muestra en la figura 44, corresponde a una antena en espiral terminada en una línea horizontal con el fin de mejorar la obtención del rango de frecuencias correspondiente de 1 a 3 GHz.

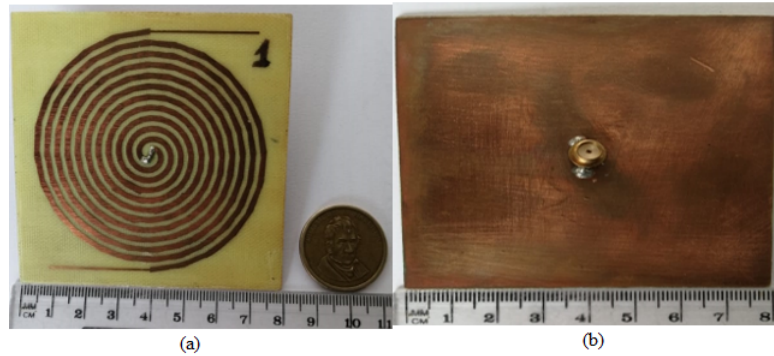


FIGURA 44: Prototipo fabricado de antena multibanda en espiral de Arquímedes: (a) vista frontal, (b) vista posterior. **Elaborado por:** Investigador

4.1.5. Diseño e implementación de rectificadores.

- **Análisis previo de rectificadores.**

Con la finalidad de obtener un voltaje adecuado el cual permita obtener un nivel de tensión acorde con lo establecido en los objetivos. En primera instancia se procede hacer un estudio previo de un rectificador doblador de tensión el cual como se puede observar en la figura 45, está formado por dos diodos y dos condensadores, cuyo principal objetivo es que la corriente pueda pasar de la tierra al terminal positivo del voltaje de salida empleando los diodos D2 y D1.

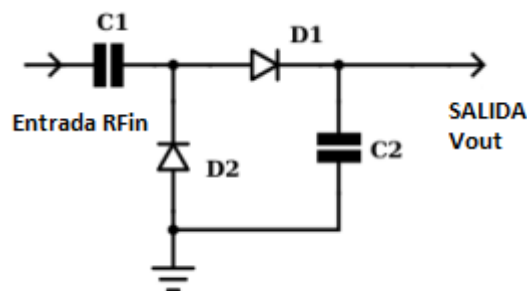


FIGURA 45: Rectificador de doble tensión [19].

El condensador C1 cuyo principal objetivo es la de permitir el paso de corriente a altas frecuencias y almacenamiento de carga, y el condensador C2 almacena la tensión resultante, el cual suaviza a la salida Vout. Así pues, el trabajo que realiza C1 y D2 es permitir el paso de nivel de corriente continua y el condensador C2 y D1 la de detectar picos de tensión.

En primera instancia si la señal de RFin es positiva y de mayor capacidad que la tensión deseada por D1 se activa, por lo que D2 trabaja como un interruptor abierto y D1 está activo permitiendo obtener un voltaje de salida misma que se muestra en la figura 46.

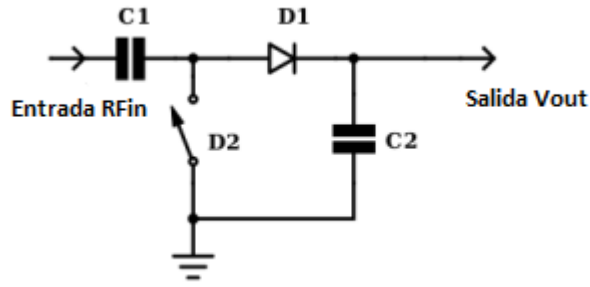


FIGURA 46: Rectificador de señal de RF positiva [19].

En segunda instancia si la señal de RFin es negativa y de mayor capacidad que la tensión deseada por D2, la corriente recorre desde la tierra por D2 la cual es almacenada en C1, ver figura 47.

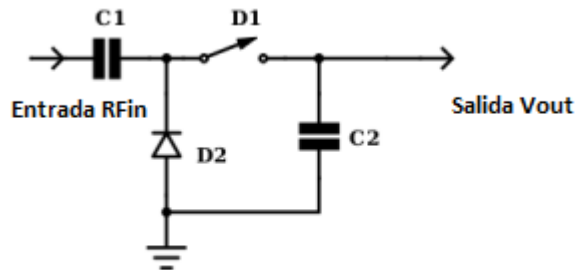


FIGURA 47: Rectificador de señal de RF negativa [19].

Analizando por ecuación, la tensión en C1 está determinada por la ecuación 44, la cual es la diferencia del pico negativo y la tensión de conexión del diodo en el pico negativo.

$$V_1 = V_{pn} - V_{on} \quad (44)$$

Tomando de referencia del primer caso para el ciclo positivo de RFin, se calcula la tensión en D1.

$$V_{out} = V_1 + V_{pn} - V_{on} \quad (45)$$

$$V_{out} = 2(V_{pn} - V_{on}) \quad (46)$$

Al constituir una etapa y su baja producción de tensión, la cual no permita activar un sistema de carga necesario en un sistema de almacenamiento se deben emplear rectificadores duplicadores multietapas, este último viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_{out} = 2N(V_{pn} - V_{on}) \quad (47)$$

Donde N es el número de etapas del rectificador. De manera que su diseño para N etapas puede ser implementada como se muestra en la figura 48, misma que muestra la forma de como diseñar las etapas de un rectificador en cascada.

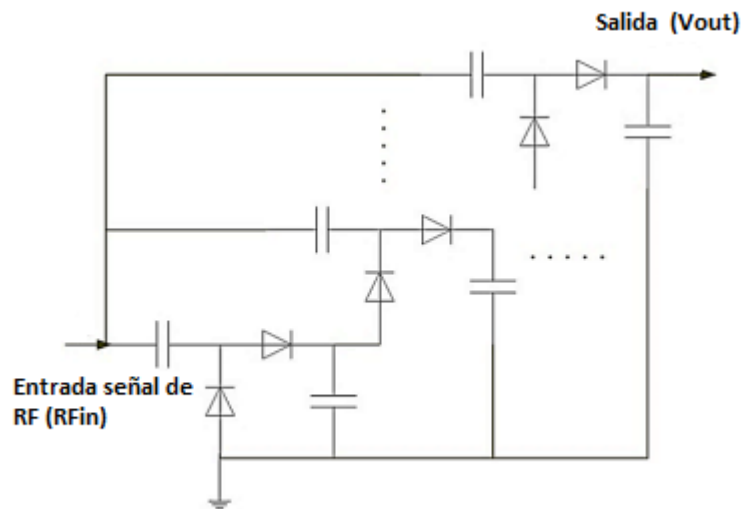


FIGURA 48: Rectificador multietapas [19].

▪ Diodos Schottky.

Tomando como voltaje de salida V_{out} de la ecuación 46, se concluye que su voltaje de entrada V_{on} debe ser lo más bajo posible, la mejor opción y elección de diodos es el Diodo Schottky de polarización cero. Así, la V_{out} puede duplicar la tensión de pico de la señal de entrada de RF cuando su V_{on} sea lo más bajo posible.

Los diodos Schottky también conocidos como diodos de barrera, es un dispositivo el cual posee una caída de tensión muy pequeña en el orden de 0.3 V o menos, que lo diferencia de otros diodos, cuya curva característica de operatividad lo diferencia de otros diodos comunes en el mercado, la figura 49 se puede observar la curva característica. Por poseer características de operatividad a muy altas velocidades se emplean en fuentes de potencia en radiofrecuencia, circuitos de alta frecuencia, sistemas digitales, etc. Otra característica que le hace especial al ser fabricados de diferentes materiales como el arseniuro de galio (GaAs) posee una barrera de potencial baja, el cual lo hace o posee una alta sensibilidad que lo hace capaz de detectar señales muy débiles.

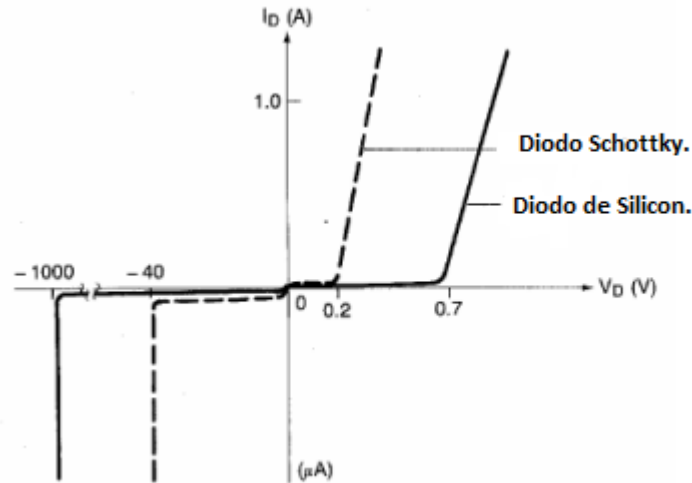


FIGURA 49: Curva característica Diodo Schottky.

Se ha optado por emplear el Diodo Schottky HSMS-286x de polarización cero para la elaboración de la etapa de rectificación en el sistema para recolección de energía de radio frecuencia. Dicha elección está dada por su rápida conmutación y bajas pérdidas en el sustrato, muy empleados para sistemas de recolección de energía a frecuencias que parte desde 915 MHz hasta 5.8 GHz. Otras aplicaciones en las cuales destacan estos diodos son para detección de grandes señales, para modulación, duplicadores de tensión. Esta última característica de mayor relevancia para el diseño óptimo del presente trabajo. La figura 50 muestra la conexión del circuito lineal equivalente del diodo a emplear.

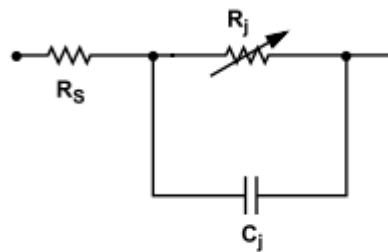


FIGURA 50: Circuito lineal equivalente Modelo de chip HSMS-286x

A partir de la gráfica 50, los parámetros está dada por las constantes R_s que representa la resistencia en serie del circuito, C_j el cual representa al capacitor, y la frecuencia de funcionamiento es un valor variable (ω), a mayor frecuencia el valor de Z respecto a la resistencia en serie del diodo R_s . La resistencia R_j está dada por:

$$R_j = \frac{8.33 \cdot 10^{-5} nT}{I_b + I_s} \quad (48)$$

Donde:

I_b = es la corriente de polarización aplicada externamente(A).

I_s = es la corriente de saturación.

T = es la temperatura dada en $^{\circ}K$

n = factor de idealidad.

La impedancia total está dada por:

$$Z_T = R_s + \frac{R_j}{j\omega c_j + 1} \quad (49)$$

El diodo Schottky HSMS-286x, esta modelado bajo parámetros que están dados en la tabla 8. Dichos parámetros empleados para simular en el Software ADS el funcionamiento del rectificador.

TABLA 8: Parámetros de modelado SPICE de diodos schottky serie HSMS-286x.

Parámetros	Unidades	Valores de HSMS-286x
B_v	V	3.8
C_{J0}	pF	0.18
E_G	eV	0.69
I_{BV}	A	$3E^{-4}$
I_s	A	$3E^{-6}$
N	Sin Unidad	1.06
R_s	Ω	25
$P_B(V_j)$	V	0.35
$P_T(XTI)$	Sin Unidad	2
M	Sin Unidad	0.5

Elaborado por: Investigador.

▪ Diseño circuito rectificador duplicador de voltaje.

La figura 51 muestra el diagrama esquemático de cómo está conformado el sistema de rectificación y sus respectivos elementos. Este circuito diseñado a 50Ω con una etapa de adaptación, duplicador de voltaje y resistencia de carga. La simulación del sistema de rectificación opera sobre el sustrato FR4 de 1.6 mm de espesor, constante dieléctrica de 4.4. Como potencia de entrada se ha simulado hasta 25 dBm a 50Ω de impedancia con frecuencia de operación para 900 MHz y de 1 a 3 GHz. El sistema consta de un diodo Schottky, se emplea estos diodos por su rápida conmutación y voltaje de encendido muy bajo.

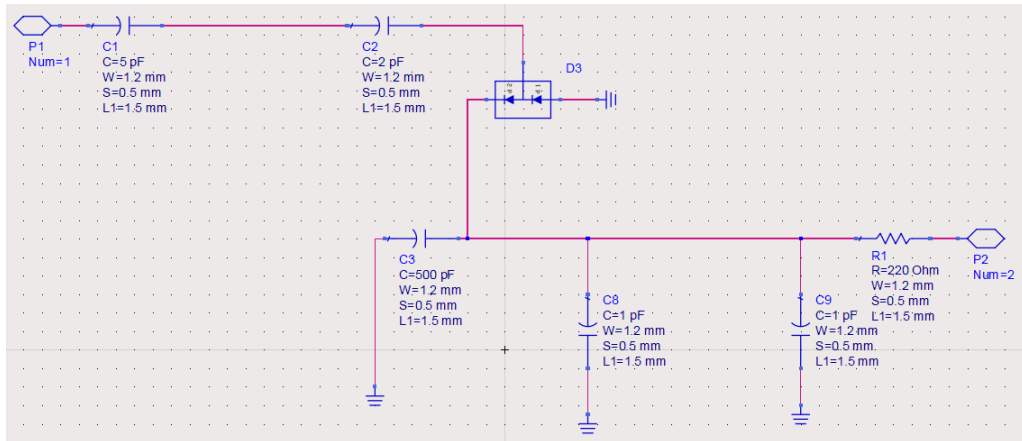


FIGURA 51: Esquemático del sistema de rectificación duplicador de voltaje simulado en ADS. **Elaborado por:** Investigador

En término de velocidad el diodo Schottky ofrece una gran ventaja, otra característica de este diodo tiene una mayor densidad de corriente. Además, el sistema consta con un condensador de derivación y la resistencia de carga, cuya finalidad es la de reducir la pérdida de la señal. La simulación en el software ADS permite obtener resultados óptimos por su gran capacidad de rectificación y obtención de voltaje, la simulación otorga un voltaje de salida de hasta 12 mV, ver figura 52, misma que muestra el valor de salida del voltaje, con una fuente a 900 MHz, a -10 dBm, y tiempo de rectificación de 2.5 μ seg, para la antena **HRPSA**.

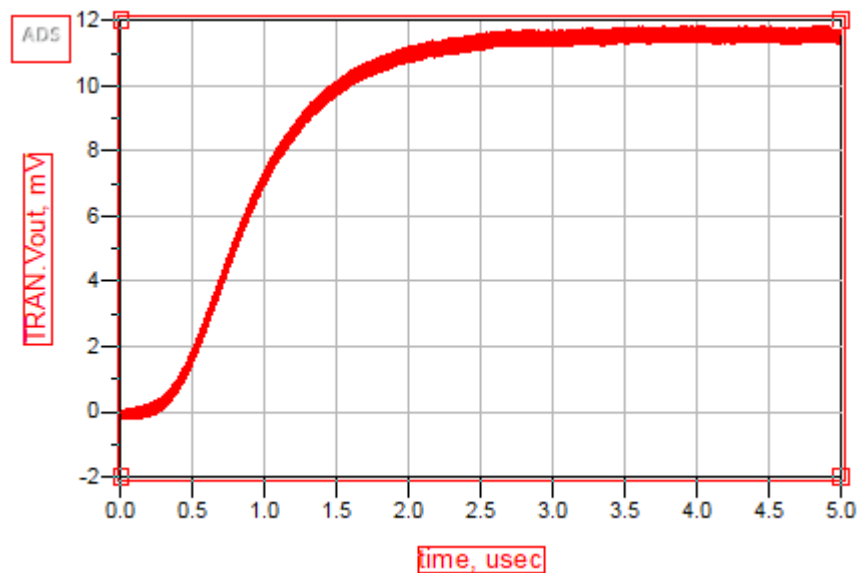


FIGURA 52: Salida de voltaje a 900 MHz simulación ADS. **Elaborado por:** Investigador

La figura 53 muestra como varia el voltaje de salida al aplicar una fuente, en este caso la antena espiral de Arquímedes (**ASMA**), el valor de salida de 10 mV, con una frecuencia a 2.4 GHz a -10 dBm y tiempo de rectificación de 2.5 μ seg.

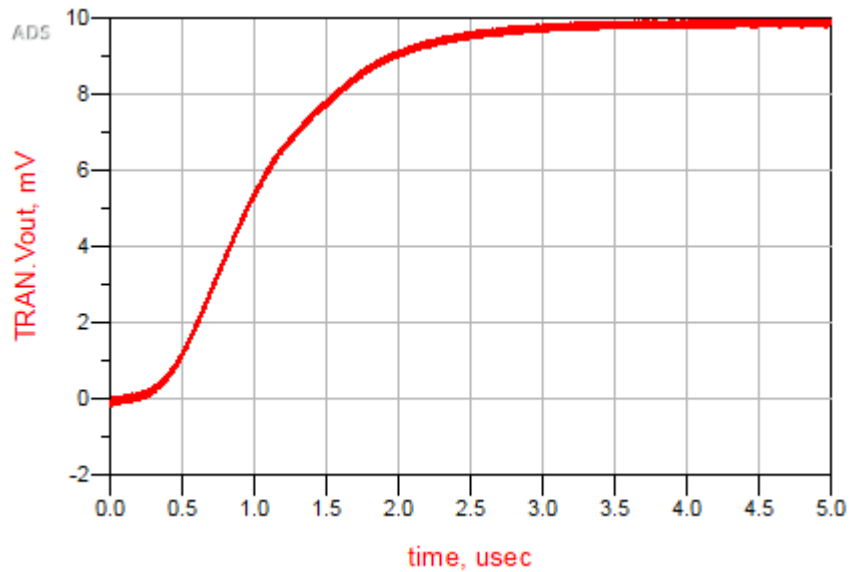


FIGURA 53: Salida de voltaje a 2.4 GHz simulación ADS. **Elaborado por:** Investigador

La gran ventaja de este circuito rectificador, doblador de voltaje y por simulación se puede obtener valores de salida prometedores, la figura 54 se ve reflejado como al variar la potencia de entrada en la fuente se obtiene salidas de voltaje muchos mayores, misma que se lo puede emplear en otros proyectos de mayor escala que otorgue una mayor cantidad de salida de voltaje, además otorga tiempos más rápido de rectificación. La figura 54(a), otorga un valor de salida de 360 mV con un tiempo de rectificación de 1 μ seg, en la figura 54(b) con valor de salida de 1.5 V y rectificación de 1 μ seg, en la figura 54(c) con valor de salida de 4.2 V y rectificación de 0.8 μ seg., en la figura 54(d) con valor de salida de 6 V y rectificación de 0.3 μ seg.

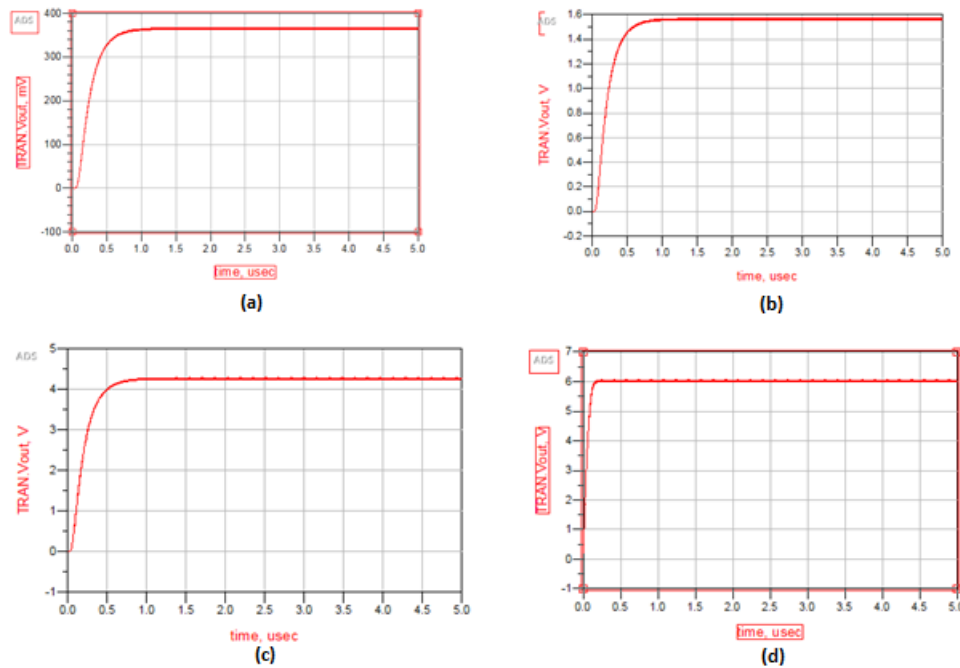


FIGURA 54: Rectificador duplicador de voltaje: (a) fuente a 2 dbm:(b) fuente a 12 dbm: (c) fuente a 20 dbm:(d) fuente a 25 dbm. **Elaborado por:** Investigador

▪ **Geometría circuito rectificador duplicador de voltaje.**

El circuito rectificador duplicador de voltaje simulado en el software ADS se representa en la figura 55, cuya principal característica a destacar es su diseño sencillo y fácil de implementar. La placa posee dimensiones de 6x1.5 cm.

Para el cálculo del ancho de las pistas se ha basado en:

$$Ancho = \frac{\text{área}}{\text{grosor} * 1.378} \tag{50}$$

$$\text{área} = \left[\frac{I}{K_1 * \nabla T K_2} \right]^{\frac{1}{K_3}} \tag{51}$$

Donde:

I=1 A

$K_1=0.0647$ para capa externa de la pista.

$K_2=0.4281$ para capa externa de la pista.

$K_3=0.6732$ para capa externa de la pista.

Grosor=1.6 mm por el FR4, material empleado en la elaboración del circuitos impreso.

∇T = Diferencia de temperatura=Temperatura Máxima- Temperatura Ambiente= $35^\circ - 15^\circ = 20$

Reemplazando en la ecuación 50 se obtiene un valor de 8.68 mm^2 , para el área resultante de la pista.

Reemplazando en la ecuación 51 se obtiene un valor de 3.93 mm, para el ancho resultante de la pista.

El diseño de las pistas en el circuito rectificador, doblador de voltaje, parte de los cálculos antes descritos y con ayuda del software ADS y SATURN PCB DESIGN, se obtiene un circuito como se observa en la figura 55, muy viable a la hora de soldar los elementos dentro del circuito.



FIGURA 55: Geometría circuito rectificador implementado en ADS software. **Elaborado por:** Investigador.

▪ Fabricación circuito rectificador duplicador de voltaje.

El diseño del circuito rectificador duplicador de voltaje, cuya estructura de tierra y parche se imprimen a cada lado del sustrato dieléctrico FR4. En la Figura 56 se ilustra la vista frontal y posterior del prototipo fabricado. La parte frontal muestra la geometría del circuito, y la parte posterior muestra la parte metálica impresa en toda la geometría de la placa, soldada a un conector RG8, cuyo fin es acoplar la antena con el sistema rectificador.

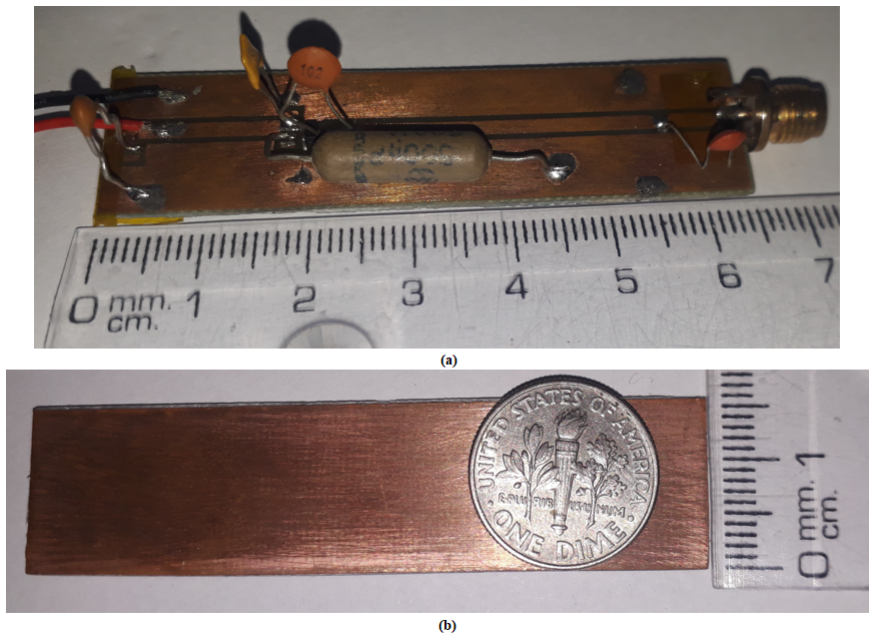


FIGURA 56: Prototipo fabricado, circuito rectificador duplicador de voltaje: (a) vista frontal, (b) vista posterior. **Elaborado por:** Investigador

El circuito fabricado consta de elementos que ayuda a rectificar y duplicar el voltaje, dichos elementos están detallados en la tabla 9, los elementos descritos son de fácil adquisición en el mercado.

TABLA 9: Elementos del circuito rectificador de voltaje.

Item	Descripción	cantidad
1	Capacitor Cerámico 10nF	1
2	Capacitor Cerámico 1nF	1
3	Capacitor Cerámico 500pF	1
4	Capacitor Cerámico 7pF	1
5	Capacitor Cerámico 10pF	1
6	Conector RG8	1
7	Placa RF4	1

Elaborado por: Investigador.

4.2. Análisis de Resultados.

Realizado el diseño y fabricación de ASMA y HRPSA en un sustrato FR-4 y el circuito rectificador. Los resultados de la medición y simulación de la pérdida de retorno S11 obtenidos se analizan mediante una comparación para cada antena.

4.2.1. Comparación entre valor simulado y valor medido de las antenas.

a) **Análisis de HRPSA.** En la figura 57 se muestra el coeficiente de reflexión simulado y medido de la antena de estructura planar con resonador híbrido. Se compara principalmente entre los valores simulados y los medidos. Los valores obtenidos en la medición respecto a los simulados, funcionan de forma óptima ya que trabajan a la frecuencia deseada a 900 MHz, la pequeña variación respecto a la frecuencia deseada es debida a las pérdidas en el material, soldadura y conector. Su valor de hasta -30 dB de la antena son óptimos para implementar.

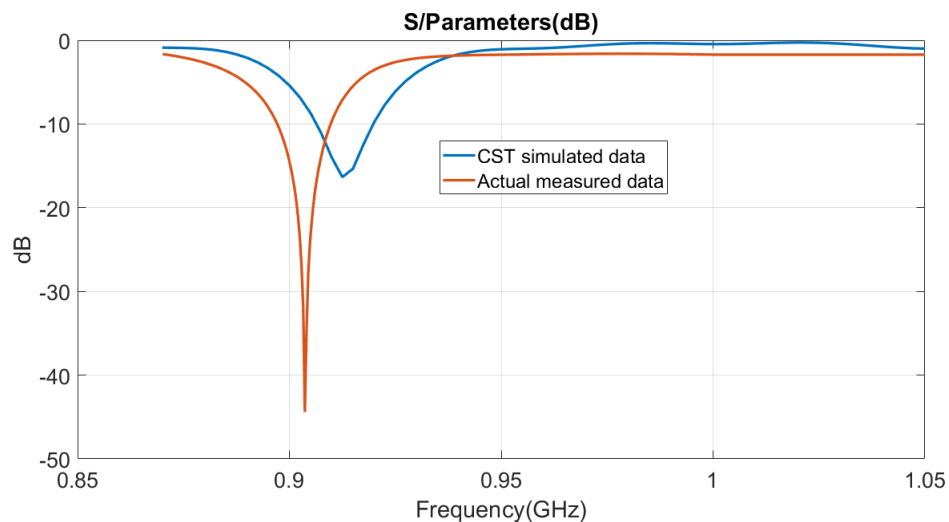


FIGURA 57: Coeficiente de reflexión simulado y medido de la antena de estructura planar con resonador híbrido. Elaborado por: Investigador.

Para calcular el error entre los valores de la simulación y la medición real, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%error = \frac{|V_{aprox.} - V_{real}|}{V_{real}} * 100 \% \quad (52)$$

En la simulación el porcentaje de error con respecto a la frecuencia de resonancia deseada (900 MHz) es:

$$\%error = \frac{914MHz - 900MHz}{900MHz} * 100 \% = 1.55 \%$$

En el valor medido el porcentaje de error con respecto a la frecuencia de resonancia deseada (900MHz) es:

$$\%error = \frac{|903|MHz - 900MHz}{900MHz} * 100 \% = 0.33 \%$$

Comparando entre el valor de la simulación y el valor real medido, se ve claramente que su porcentaje de error es mínimo en la parte real, lo que la convierte en una antena que opera normalmente a 900 MHz que es la frecuencia de trabajo deseada.

b) Análisis de ASMA. Para la antena multibanda de espiral de Arquímedes, la simulación del coeficiente de reflexión y su respectiva comparación entre los valores medidos, ver figura 58 y la forma de onda obtenida con los datos reales, opera normalmente en un rango de frecuencias de 1 a 3 GHz con valores de -25 dB. Al diseñar e implementar esta antena se obtiene en la parte real múltiples frecuencias de operación que la convierten en una antena de alta gama para un propósito específico en este caso para la captación de energía electromagnética. Al tratarse de una antena multibanda, para el cálculo del error se ha considerado a una frecuencia de 1.2 GHz.

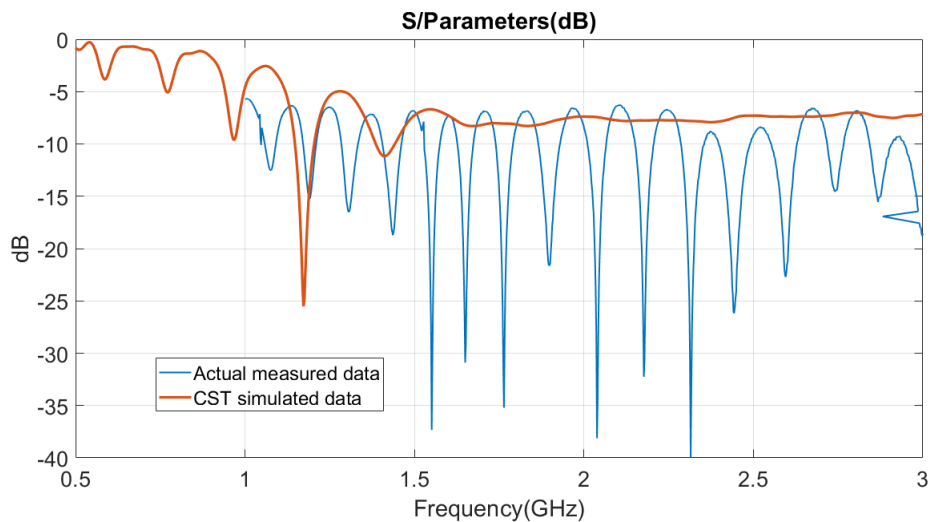


FIGURA 58: Coeficiente de reflexión simulado y medido de la antena espiral de Arquímedes multibanda. **Elaborado por:** Investigador

En la simulación el porcentaje de error con respecto a la frecuencia de resonancia deseada (1.2 GHz) es:

$$\%error = \frac{|1.1741GHz - 1.2GHz|}{1.2GHz} * 100\% = 2.15\%$$

En el valor medido el porcentaje de error con respecto a la frecuencia de resonancia deseada (1.2 GHz) es:

$$\%error = \frac{|1.1975GHz - 1.2GHz|}{1.2GHz} * 100\% = 0.21\%$$

En la simulación se obtiene una resonancia definida a 1.17 GHz, así mismo en la parte medida proporciona múltiples resonancias que operan en todo el rango de frecuencias de 1 a 3 GHz, dicha resonancia es debida al material y sus soldaduras con el conector RG8, diseño en la fabricación, lo que la convierte en una antena adecuada para la captación de energía electromagnética, especialmente a 1.19 GHz cuyo margen de error es del 0.21 %.

4.2.2. Acoplamiento y análisis de sistema rectificación doblador de voltaje con las antenas HRPSA y ASMA.

En la figura 59 se ve reflejado el montaje del circuito con la antena HRPSA, la medición obtenida es de 15.4 mV, este valor es la medición directa de salida del rectificador de voltaje.



FIGURA 59: Salida de voltaje directa empleando la antena HRPSA. **Elaborado por:** Investigador

La figura 60 muestra el montaje del circuito con la antena ASMA, la medición obtenida es de 11.6 mV, este valor es la medición directa de salida del rectificador de voltaje.



FIGURA 60: Salida de voltaje directa empleando la antena ASMA. **Elaborado por:** Investigador.

El sistema completo y empleando baterías para su respectiva recarga, se puede apreciar en la figura 61 , el cual muestra la conexión del sistema completo con la antena HRPSA y la integración de una batería de la marca Pkcell de 9 V, a 250 mAh.

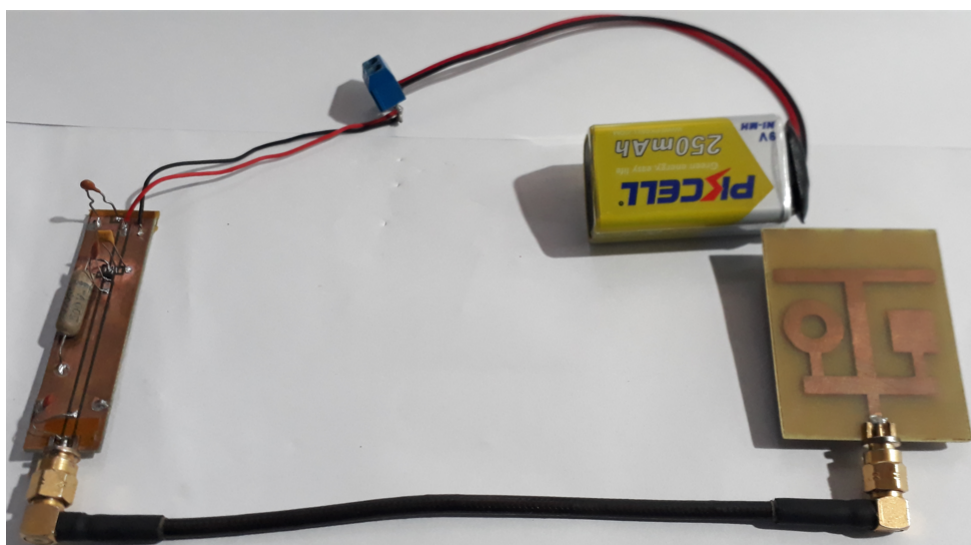


FIGURA 61: Conexión de sistema empleando una batería y la antena HRPSA. **Elaborado por:** Investigador.

De la misma forma se procede a conectar al sistema con la antena ASMA al sistema, en esta ocasión se procedió a emplear una batería NiMH Battery de 3.6 V a 300 mAh. La figura muestra la conexión del sistema mencionado.

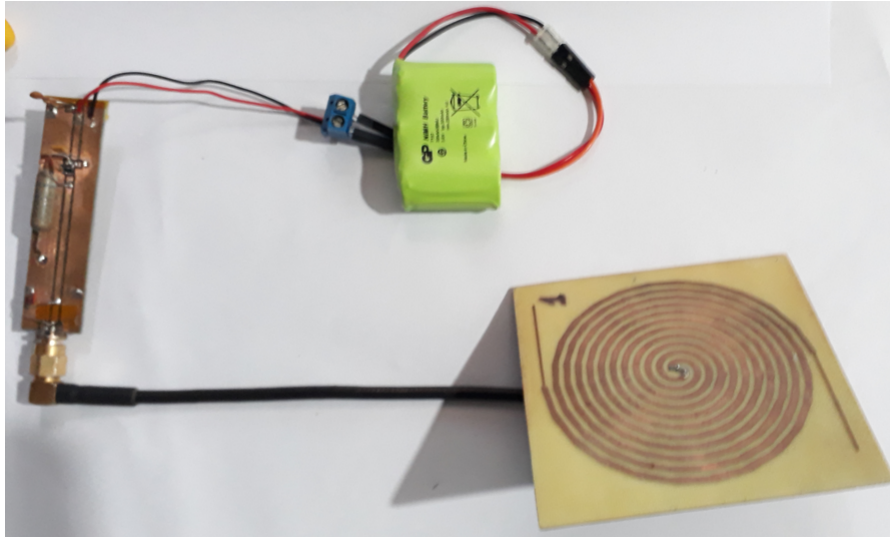


FIGURA 62: Conexión de sistema empleando una batería y la antena ASMA. **Elaborado por:** Investigador.

Implementada la conexión del sistema completo acoplado a la antena HRPSA, se procedió a realizar las mediciones de voltaje. En la figura 63(a) muestra la medición de la batería el cual marca 5.37 V y en la figura 63(b) luego de media hora de carga muestra un voltaje de 6.12 V.

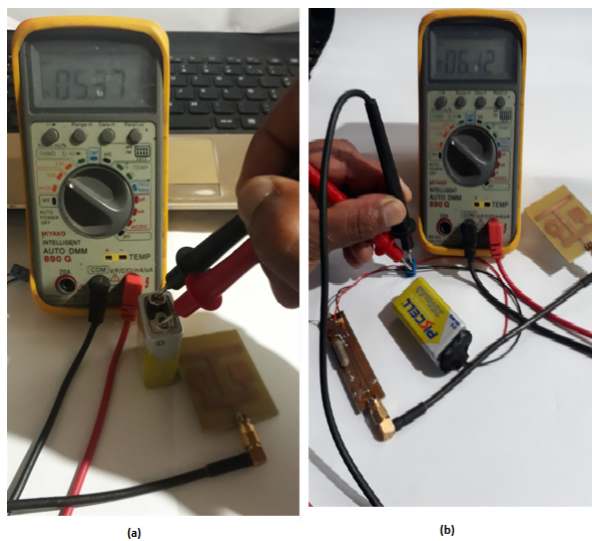


FIGURA 63: Medición de voltaje empleando una batería y la antena HRPSA: (a) Medición directa de batería,(b) Medición acoplado a sistema. **Elaborado por:** Investigador.

Implementada la conexión del sistema completo acoplado a la antena ASMA, se procedió a realizar las mediciones de voltaje. En la figura 64(a) muestra la medición de la batería el cual marca 3.272 V y en la figura 64(b) luego de media hora de carga muestra un voltaje de 3.507 V.

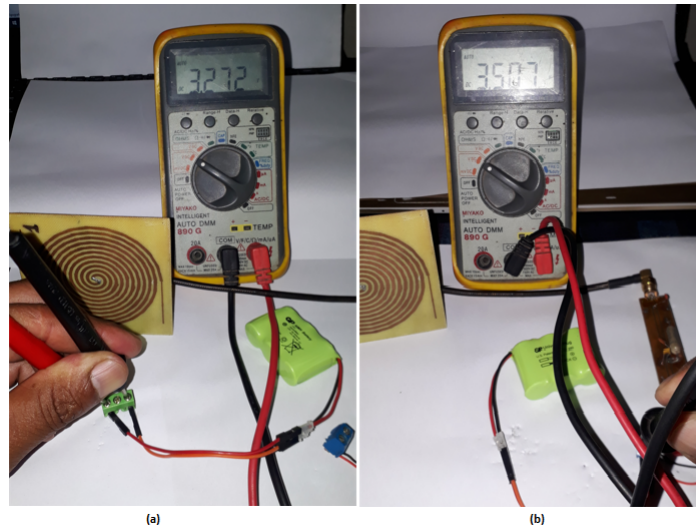


FIGURA 64: Medición de voltaje empleando una batería y la antena ASMA: (a) Medición directa de batería,(b) Medición acoplado a sistema. **Elaborado por:** Investigador.

Para alojar el prototipo se construyó una caja en acrílico tomando en cuenta los elementos a emplear, en la figura 65, se puede ver el diseño de la caja a emplear cuyas dimensiones están dadas por: largo de 20.5 cm, altura de 3 cm y ancho de 9.5 cm. La tapa esta estampada el nombre de las Universidades de quienes se tuvieron colaboraciones en el desarrollo de este proyecto. El prototipo final está dado en la figura 66 el cual muestra el alojamiento cada elemento del sistema captador de energía.

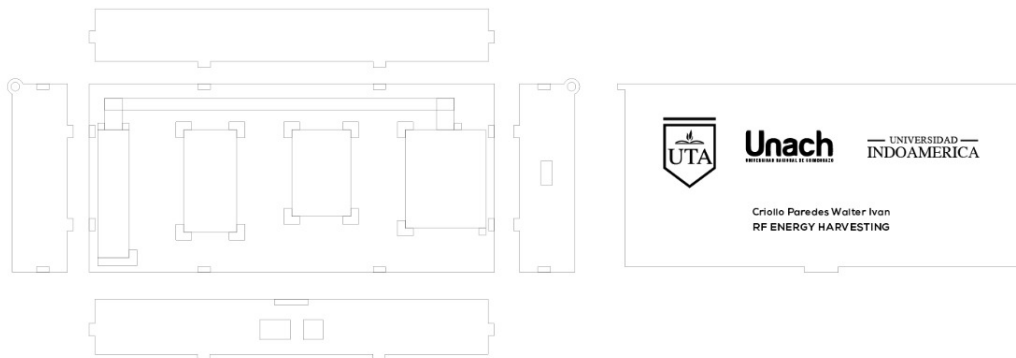


FIGURA 65: Diseño de caja para alojamiento de prototipo. **Elaborado por:** Investigador.



FIGURA 66: Prototipo final. **Elaborado por:** Investigador.

La comprobación de las antenas diseñadas y fabricadas se detallan en la tabla 10, con sus respectivos tiempos de recarga para cada batería, obtenidos en la práctica, comprobando que el sistema opera de manera satisfactoria, en especial para HRPSA.

TABLA 10: Voltaje de almacenamiento medido en cada antena con sistema acoplado.

Antena	Batería	Tiempo (min)	Voltaje Inicial(V) Batería.	Voltaje Final(V) Batería.	Carga
HRPSA	PKCELL 9V	30	5.37	6.12	0.75
		60	6.12	6.88	0.76
		90	6.88	7.62	0.74
				Total Almacenamiento.	2.25
Antena	Batería	Tiempo (min)	Voltaje Inicial(V) Batería.	Voltaje Final(V) Batería.	Carga
ASMA	NiMH Battery 3.6V	30	3.272	3.507	0.235
		60	3.507	3.722	0.215
		90	3.722	3.732	0.01
				Total Almacenamiento.	0.46

Elaborado por: Investigador.

Las pruebas realizadas en todas las etapas tanto de las antenas, rectificación y doblador de voltaje, dan como resultado mediciones acorde a los diseños en simulaciones. El sistema acoplado a una batería otorga tiempos de carga lentos, esto debido a la reacción

química que se produce dentro de las mismas para su posterior conversión de voltaje DC. Las antenas simuladas y diseñadas son prometedoras ya que otorgan una captación de la energía de RF conocidas como GSM, WIFI.

En [7], el autor diseña tres antenas tipo parche circulares para WI-FI, Telefonía Móvil e IMT, cuya frecuencia está dada en 2442 MHz, 1850 MHz y 1472.5 MHz, respectivamente, empleando una fibra de vidrio con Permitividad relativa de 5.5 con altura de sustrato de 1.5 mm y su modo de empleo conectado en serie. En comparativa con las antenas diseñadas antes mencionadas, el presente trabajo desarrolla dos antenas tipo parche de material FR4 de permitividad relativa de 4.4 con altura de sustrato de 1.6 mm: Antena de Estructura Planar con Resonador Híbrido (HRPSA), con frecuencias a 900 MHz y Antena Multibanda Espiral de Arquímedes (ASMA), con un rango de frecuencias que cubre de 1 a 3 GHz, antenas diseñadas las cuales pueden operar normalmente en sistemas de comunicación como GSM, WiFi, LTE y UMTS. La etapa denominada “multiplicador de tensión” en [7], realiza un análisis de simulación en el software Proteus Design Suite, obteniendo valores de salida de hasta 5.35 V con un circuito de 4 etapas de multiplicación. Por el contrario el presente trabajo realiza un análisis en Advanced Design System software de automatización de diseño electrónico obteniendo valores de salida de hasta 6 V a una etapa del rectificador multiplicador de voltaje.

Entre los valores obtenidos en la práctica en [7], al conectar las tres antenas al multiplicador de voltaje obtiene para 1 etapa 21.1 mV, 2 etapas 42.3 mV, 3 etapas 28.6 mV y para 4 etapas 20.3 mV. Por el contrario con una sola antena el presente trabajo, se ha obtenido valores, para HRPSA de 15.4 mV y para ASMA de 11.6 mV a una sola etapa del rectificador doblador de voltaje.

La tabla 11 resume las características y valores obtenidos en la práctica, con una previa existente en la Universidad Técnica de Ambato [7], muestra la comparativa de los dos productos finales tanto del presente trabajo y [7].

TABLA 11: Comparativa con trabajos previos dentro de la UTA.

Antena Característica.	HRPSA	ASMA	PROTOTIPO[7]
Banda de frecuencias operativa.	900 MHz	1-3 GHz	2442 1850 [MHz] 1472.5
Tecnología.	GSM	Wi-Fi Telefonía Móvil IMT LTE UMTS	Wi-Fi Telefonía Móvil IMT
Ganancia de Irradiación (dBi).	3.17	3.16-4.18	1.61 1.31 1.04
Returnloss (dB)	-30	-25	- - -
Voltaje de carga capacitor.	0.9 V/(30min)	0.2 V/(30min)	1040 mV/(30min)
Voltaje de carga batería.	1.51 V/h	0.5V/h	13.567 mV/h
Circuito de acondicionamiento	1 etapa	1 etapa	2 etapas

Elaborado por: Investigador.

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y Recomendaciones.

5.1. Conclusiones.

- A día de hoy son inevitables las formas de apreciar la captación de energía del ambiente, con la finalidad de satisfacer las necesidades energéticas. La captación de energía se ha visto principalmente en las industrias y en la actualidad son muchas las formas de captación, dependiendo del tipo de energía. La ciencia, tecnología y avances técnicos permite absorberlas en mayor o menor escala. Con el transcurso de los años, nuevas formas con mayor grado de eficiencia, los dispositivos de captura de energía para su posterior conversión en energía eléctrica se ven reflejados de manera satisfactoria por la gran ventaja y de carácter primordial por ser amigables con el medio ambiente. Los sistemas de captación de energía son indudablemente mejores y van mejorando día a día, ya que otorgan resultados acordes a las necesidades del ser humano.
- El sistema desarrollado, parte del estudio y diseño de las antenas, siendo desarrolladas en el software HFSS, esta herramienta permitió diseñar y fabricar las antenas acorde a las necesidades de implementación que está basado para la captación de energía electromagnética. Se ha demostrado que con un diseño óptimo se puede conseguir antenas acorde a la frecuencia de trabajo esperado, por ello se ha diseñado dos antenas. La primera, es la antena de estructura planar con resonador híbrido que resuena a una sola frecuencia que es 900 MHz con una pérdida de retorno de hasta -30 dB e irradia ganancias con un valor de 3.17 dBi. La segunda, se basa en una antena multibanda de espiral de Arquímedes, que resuena en un rango de 1 a 3 GHz y puede operar normalmente en sistemas de comunicación como GSM, WiFi, LTE y UMTS con diferentes valores de ganancia. Siendo una antena multibanda, los valores de frecuencia estándar de 900 MHz, 1.2 GHz, 1.83 GHz, 2.4 GHz, 2.6 GHz, 3 GHz y las ganancias de irradiación de 2.62 dBi, 3.16 dBi, 3.63 dBi, 4.24 dBi, 4.27 dBi y 4.58 dBi, respectivamente. La transformación de la energía electromagnética captada, se lo analizo en el software ADS misma que permitió demostrar cómo se puede pasar de energía electromagnética a corriente continua mediante el uso de un diodo rectificado de frecuencia HSMS serie 286X.
- Durante la implementación del sistema captador de energía electromagnética, se concluyó que cada una de las etapas comprendidas dentro del sistema es esencial, la antena el cual debe proveer la mayor captación de la energía capaz de alcanzar

distancias mayores para una ejecución adecuada y óptima en zonas de máxima cobertura y acoplamiento para zonas de menor cobertura, debido a la necesidad de alimentación continua de equipos móviles. Se ha obtenido variaciones en las mediciones de simulación y la parte real debido a factores de diseño, soldadura.

- Un sistema capaz de captar la energía de RF del entorno para aplicaciones de baja potencia y en especial para carga de batería DC, y su posterior aplicación en dispositivos móviles, requiere de tres etapas bien definidas: la antena, duplicador de tensión y rectificador conectado a la carga. La recolección de energía basadas en dos antenas independientes a distintas frecuencias de operación, permite una recarga óptima de energía en las baterías, con la aplicación de elementos adecuados. El sistema desarrollado permite realizar recarga de las baterías en tiempos deseados, mismas que poseen un despliegue no solamente para aplicaciones móviles, sino para otros proyectos o aplicaciones.
- El sistema implementado cuya finalidad recolectar energía electromagnética con aplicación de dos antenas de tipo Microstrip, se concluyó, que la Antena de Estructura Planar con Resonador Híbrido (HRPSA), otorga mayor fiabilidad por los datos obtenidos tanto de simulación y valores reales medidos.
- La pandemia que se vive a día de hoy, el Covid 19, factor no prevista por el investigador limitaron el desarrollo normal del proyecto, principalmente en la adquisición de los diodos Schottky, elemento esencial en la fabricación del rectificador de RF a voltaje DC.

5.2. Recomendaciones.

- Un enfoque claro y preciso para futuras investigaciones se encuentra en el diseño de sistemas capaces de captar energía a otras frecuencias o bandas que a día de hoy suena mucho y es la de 5 G, con antenas o arreglos de antenas , para una mejor captación de la señal.
- El diseño de un sistema captador de energía no solo debe centrarse a dispositivos móviles, existen otras equipos en las cuales la captación de energía de RF, puede ser esencial , a modo de ejemplo, se puede realizar estudios que permitan alimentar dispositivos de IoT o sensores.
- El sistema captador de energía debe promover una salida acorde a las necesidades, con un mayor estudio se puede desarrollar sistemas que otorguen mayor energía, por ello se recomienda a futuros investigadores centrarse en sistemas más óptimos con acoplamientos de antenas o stub, que permitan una recolección y carga de baterías al menor tiempo posible.

- Por análisis de simulación se demostró que los sistemas de captación se pueden generar mayor voltaje de salida, por ello se recomienda a futuros investigadores, con un estudio previo se puede alcanzar esta meta, al emplear elementos más óptimos que permitan alcanzar dichos objetivos.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias

- [1] M Sadiku. the oxford series in electrical and computer engineering. In *Elements of Electromagnetics*. Oxford University Press, 2014.
- [2] Pietro Tedeschi, Savio Sciancalepore, and Roberto Di Pietro. Security in energy harvesting networks: A survey of current solutions and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4):2658–2693, 2020.
- [3] Gobierno de la República del Ecuador. Balance nacional de energía eléctrica (bnee), 2021.
- [4] Manh Ha Hoang, Hong Phuong Phan, Thi Quynh Van Hoang, and Tan-Phu Vuong. Efficient compact dual-band antennas for gsm and wi-fi energy harvesting. In *2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014)*, pages 401–404. IEEE, 2014.
- [5] Luís M Borges, Norberto Barroca, Henrique M Saraiva, Jorge Tavares, Paulo T Gouveia, Fernando J Velez, Caroline Loss, Rita Salvado, Pedro Pinho, Ricardo Gonçalves, et al. Design and evaluation of multi-band rf energy harvesting circuits and antennas for wsns. In *2014 21st International Conference on Telecommunications (ICT)*, pages 308–312. IEEE, 2014.
- [6] Min Joo Jeong, Niamat Hussain, Han-Ui Bong, Ji Woong Park, Kook Sun Shin, Seung Woo Lee, Seung Yeop Rhee, and Nam Kim. Ultrawideband microstrip patch antenna with quadruple band notch characteristic using negative permittivity unit cells. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(2):816–824, 2020.
- [7] Jorge Luis Mendoza Chicaiza. Sistema electrónico portátil para la recarga eléctrica de dispositivos móviles mediante la captación de energía electromagnética. B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, 2019.
- [8] Ya-Bing Yang, Fu-Shun Zhang, Yun-Qi Zhang, and Xu-Ping Li. Design and analysis of a novel miniaturized dual-band omnidirectional antenna for wifi applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 94:95–103, 2020.
- [9] Tanmaya Kumar Das, Biswajit Dwivedy, and Santanu Kumar Behera. Design of a meandered line microstrip antenna with a slotted ground plane for rfid applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 118:153130, 2020.
- [10] David M Pozar. *Microwave Engineering*. 2012.
- [11] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [12] Simon R Saunders and Alejandro Aragón-Zavala. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [13] Warren L Stutzman and Gary A Thiele. *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, 2012.
- [14] KI Jahun, AM Shire, MA Baba, UI Bature, AY Nasir, and KS Abubakar. Effects of arm width on the performance of two arm archimedean spiral antenna. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 932, page 012092. IOP Publishing, 2020.
- [15] Kenny Andre Palomino Vera. Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte. 2016.

- [16] Mahmuda Khatun Mishu, Md Rokonuzzaman, Jagadeesh Pasupuleti, Mohammad Shakeri, Kazi Sajedur Rahman, Fazrena Azlee Hamid, Sieh Kiong Tiong, and Nowshad Amin. Prospective efficient ambient energy harvesting sources for iot-equipped sensor applications. *Electronics*, 9(9):1345, 2020.
- [17] Sleebi K Divakaran and Deepti Das Krishna. Rf energy harvesting systems: An overview and design issues. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(1):e21633, 2019.
- [18] Daniel W Hart, Vuelapluma, and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, España, 2001.
- [19] Jie Wang, Qinghua Gao, Yan Yu, Hongyu Wang, and Minglu Jin. Radio-triggered power management in wireless sensor networks. *Wireless Sensor Networks-Technology and Applications*, pages 51–68, 2012.
- [20] Solahuddin Yusuf Fadhlullah and Widad Ismail. Solar energy harvesting design framework for 3.3 v small and low-powered devices in wireless sensor network. In *2015 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)*, pages 89–94. IEEE, 2015.
- [21] Omar A Saraereh, Amer Alsaraira, Imran Khan, and Bong Jun Choi. A hybrid energy harvesting design for on-body internet-of-things (iot) networks. *Sensors*, 20(2):407, 2020.
- [22] Augustus E Ibhaze, Patience E Orukpe, and Frederick O Edeko. High capacity data rate system: A review of visible light communication technology. *Journal of Electronic Science and Technology*, page 100055, 2020.
- [23] Ekaterina Otsetova-Dudin and Krasimir Markov. Mobility factor in new generations wireless networks. In *2020 IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems (IS)*, pages 601–605. IEEE, 2020.
- [24] Qiang Zeng, Yanqing Lai, Liangxing Jiang, Fangyang Liu, Xiaojing Hao, Lianzhou Wang, and Martin A Green. Integrated photorechargeable energy storage system: Next-generation power source driving the future. *Advanced Energy Materials*, 10(14):1903930, 2020.
- [25] Ashish Bijlani. *Smart Storage for Smart Mobile Devices*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2020.
- [26] Keyan Sun, Yan Kou, Hongsheng Dong, Sheng Ye, Donghui Zhao, Jian Liu, and Quan Shi. The design of phase change materials with carbon aerogel composites for multi-responsive thermal energy capture and storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(2):1213–1220, 2021.
- [27] Jorge de-J Lozoya-Santos, LC Félix-Herrán, Juan C Tudón-Martínez, Adriana Vargas-Martinez, and Ricardo A Ramirez-Mendoza. Design and implementation of an iot-oriented strain smart sensor with exploratory capabilities on energy harvesting and magnetorheological elastomer transducers. *Applied Sciences*, 10(12):4387, 2020.
- [28] Hafiz Suliman Munawar. Reconfigurable origami antennas: A review of the existing technology and its future prospects. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies (IJWMT)*, 4:34–38, 2020.
- [29] John L Volakis. *Antenna engineering handbook*. McGraw-Hill Education, 2007.

- [30] Debatosh Guha and Yahia MM Antar. *Microstrip and printed antennas: new trends, techniques and applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [31] Ashraf Aoad. Design and manufacture of a multiband rectangular spiral-shaped microstrip antenna using em-driven and machine learning. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 27(1):29–40, 2021.
- [32] Kalyani Vinayagamoorthy. *Design and implementation of wideband baluns for Archimedean spiral antennas*. PhD thesis, Queensland University of Technology, 2011.
- [33] Zhen Huang, Zhaofeng Li, Hui Dong, Fuhua Yang, Wei Yan, and Xiaodong Wang. Novel broadband slot-spiral antenna for terahertz applications. In *Photonics*, volume 8, page 123. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021.
- [34] Muhammad Shakeel, Khalid Rehman, Salman Ahmad, Mohsin Amin, Nadeem Iqbal, and Arshad Khan. A low-cost printed organic thermoelectric generator for low-temperature energy harvesting. *Renewable Energy*, 167:853–860, 2021.
- [35] Husam Hamid Ibrahim, Mandeep SJ Singh, Samir Salem Al-Bawri, and Mohammad Tariqul Islam. Synthesis, characterization and development of energy harvesting techniques incorporated with antennas: A review study. *Sensors*, 20(10):2772, 2020.
- [36] K.L. Kishore. *Electronic Devices and Circuits*. BS Publications, 2016.
- [37] Andry Contreras, Benigno Rodríguez, Leonardo Steinfeld, Javier Schandy, and Mariana Siniscalchi. Design of a rectenna for energy harvesting on wi-fi at 2.45 ghz. In *2020 Argentine Conference on Electronics (CAE)*, pages 63–68. IEEE, 2020.
- [38] Mustafa Cansiz, Dogay Altinel, and Gunes Karabulut Kurt. Efficiency in rf energy harvesting systems: A comprehensive review. *Energy*, 174:292–309, 2019.
- [39] Musaab Mohammed Al-Azawy and Filiz Sari. Analysis of dickson voltage multiplier for rf energy harvesting. In *2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, pages 10–14. IEEE, 2019.
- [40] Aggraj Gupta, Udayabhaskar Pattapu, and Sushrut Das. High efficiency low power series diode rectifier design. In *2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*, pages 1–2. IEEE, 2018.
- [41] Osama Amjad, Syeda Wajiha Munir, Sehabeddin T Imeci, and Ali Özer Ercan. Design and implementation of dual band microstrip patch antenna for wlan energy harvesting system. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2018.
- [42] Diffa Pinto, Akash Arun, Sahil Lenka, Lindsey Colaco, Shailesh Khanolkar, Santushti Betgeri, and Akhilesh Naik. Design and performance evaluation of a wi-fi energy harvester for energizing low power devices. In *2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)*, pages 1–8. IEEE, 2021.

ANEXOS

ANEXO 1: Diseño y Medidas de Antena de Estructura Planar con Resonador Híbrido (HRPSA) y Antena Multibanda Espiral de Arquímedes (ASMA)

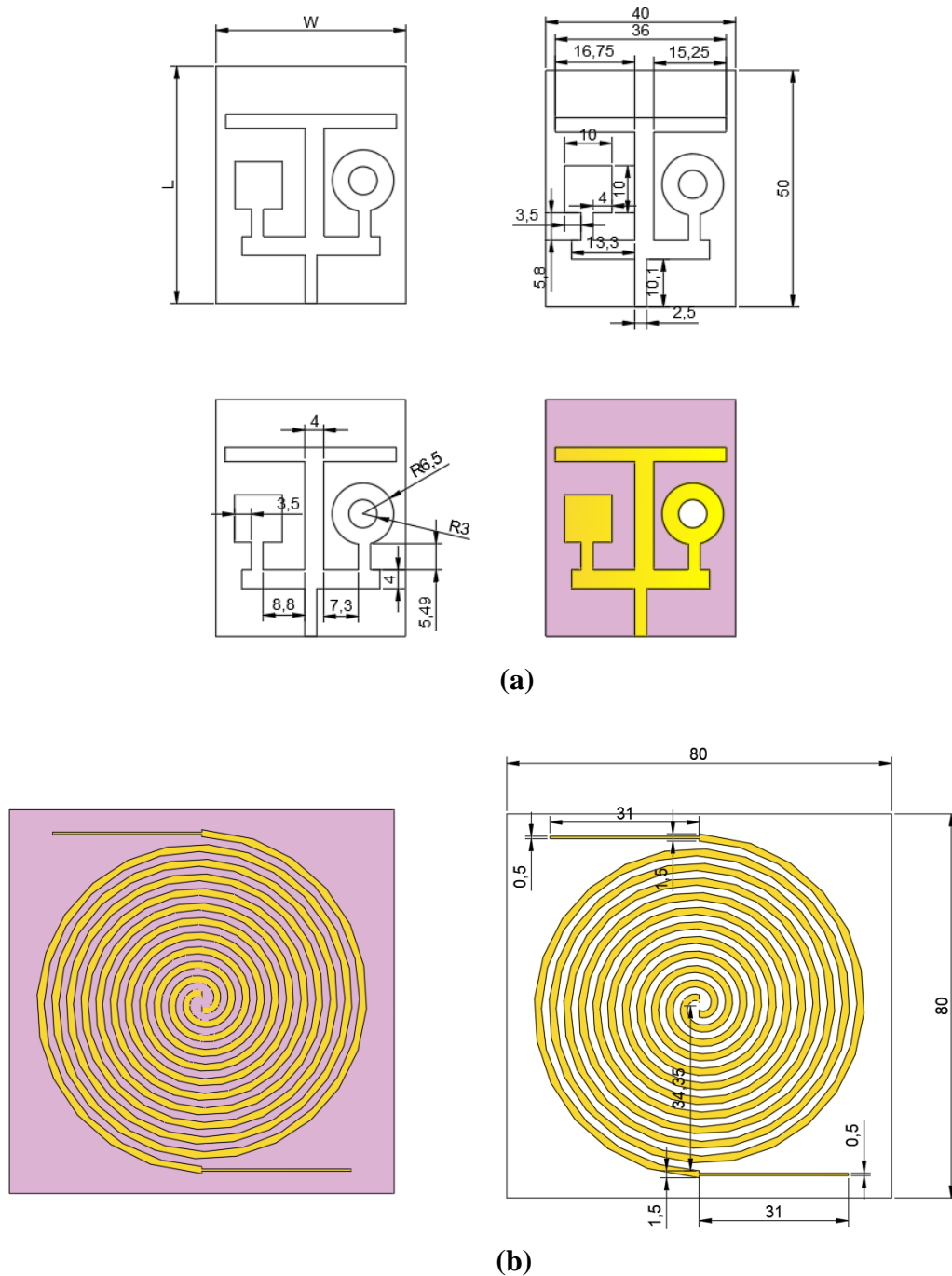


Figura 67: Diseños y medidas de antenas elaboradas en CST STUDIO y AUTOCAD: a) Antena HRPSA, b) Antena ASMA. **Elaborado por:** Investigador.

ANEXO 2: Cálculo del ancho y longitud de pistas para circuito rectificador doblador de voltaje empleando el software SATURN PCB DESIGN.INC.

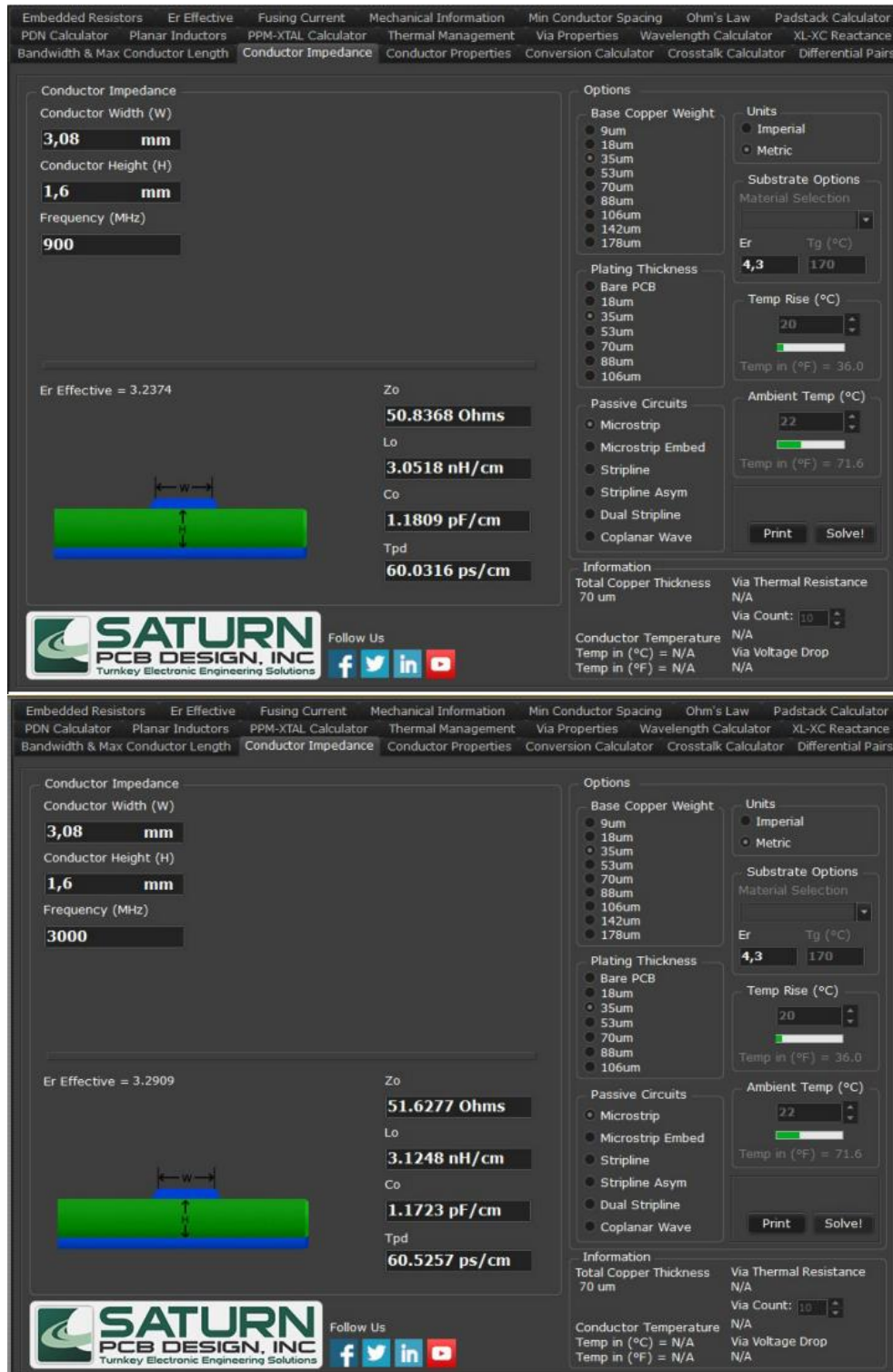


Figura 68: Resultados alcanzados de impedancia con el software SATURN PCB DESIGN con los parámetros del FR4 a 900 MHz para HRPSA y 3 GHz para ASMA. **Elaborado por:** Investigador.

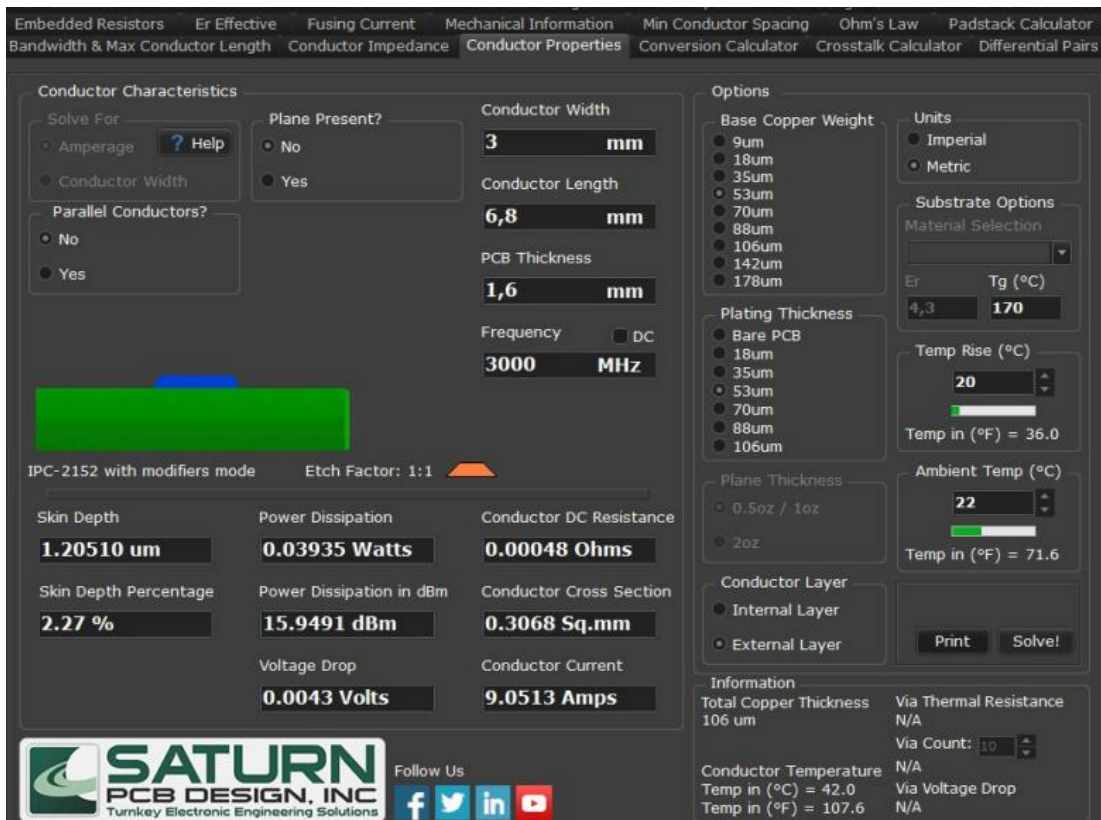
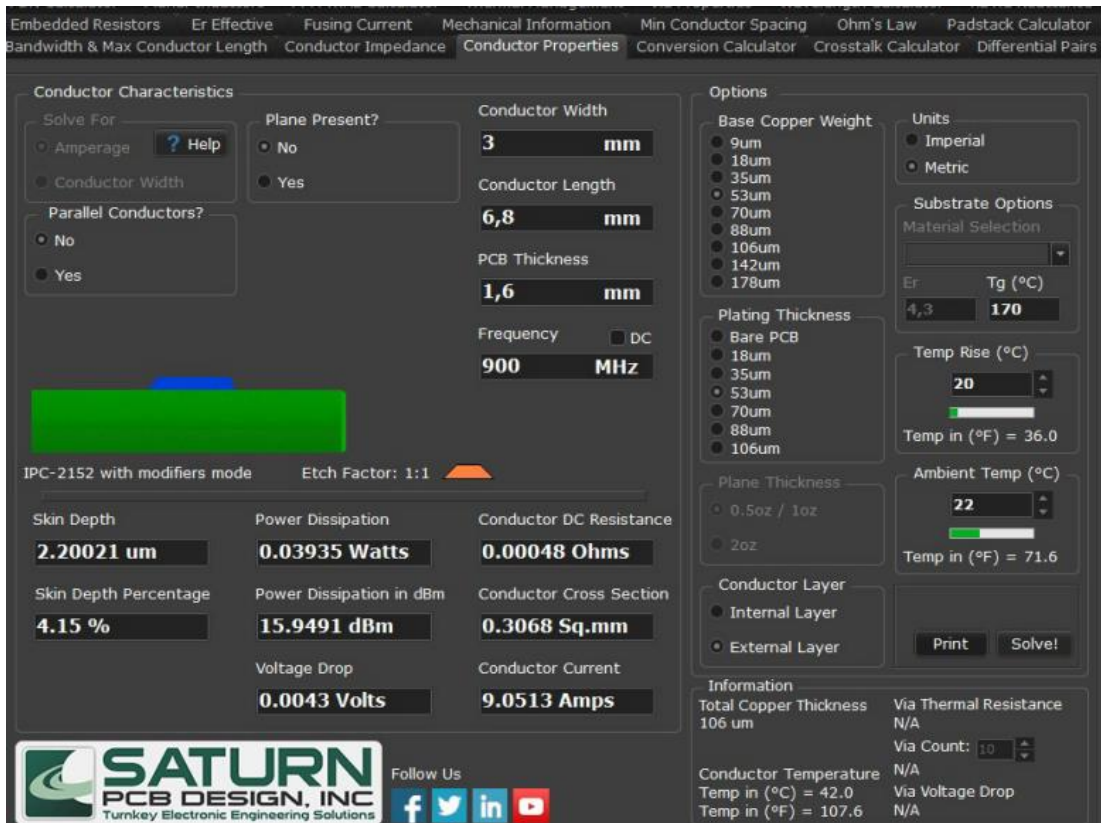
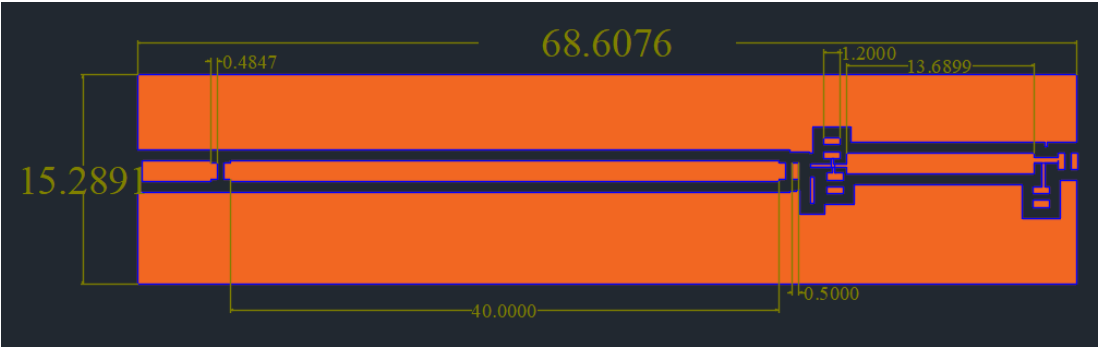


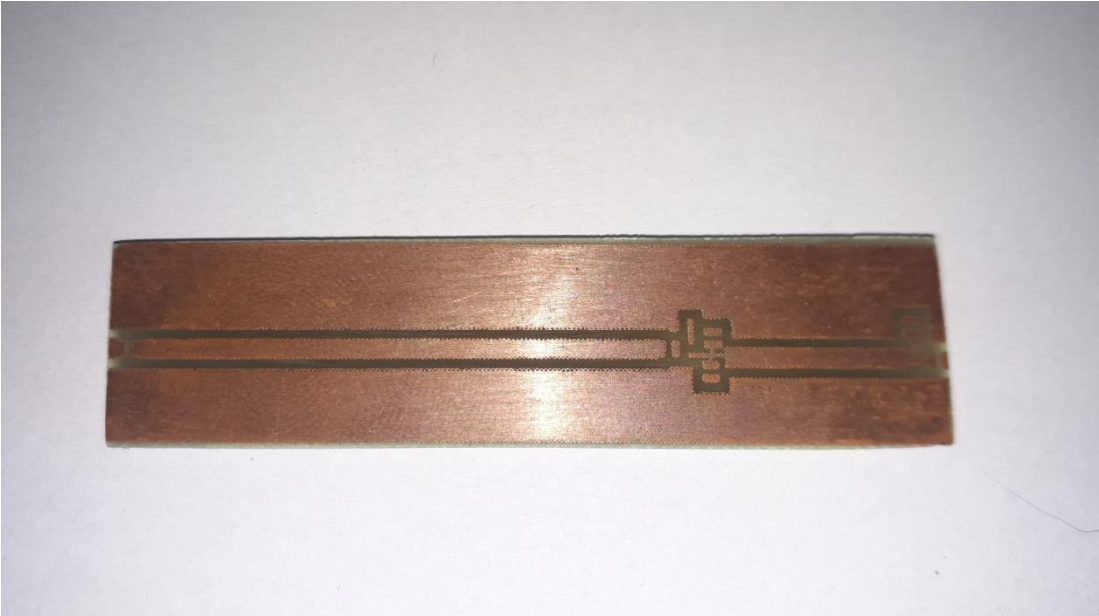
Figura 69: Resultados alcanzados para características de pista con el software SATURN PCB DESIGN con los parámetros del FR4 a 900 MHz para HRPSA y 3 GHz para ASMA. **Elaborado por:** Investigador.

ANEXO 3: Diseño, Medidas, Fabricación de circuito Rectificador, doblador de



voltaje.

(a)



(b)

Figura 70: Diseños, medidas y fabricación de circuito rectificador doblador de voltaje: a) Diseño en ADS Y AUTOCAD, b) Circuito impreso en FR4. **Elaborado por:** Investigador.

ANEXO 4: Diseño, Medidas, Fabricación caja acrílica montaje de circuito.

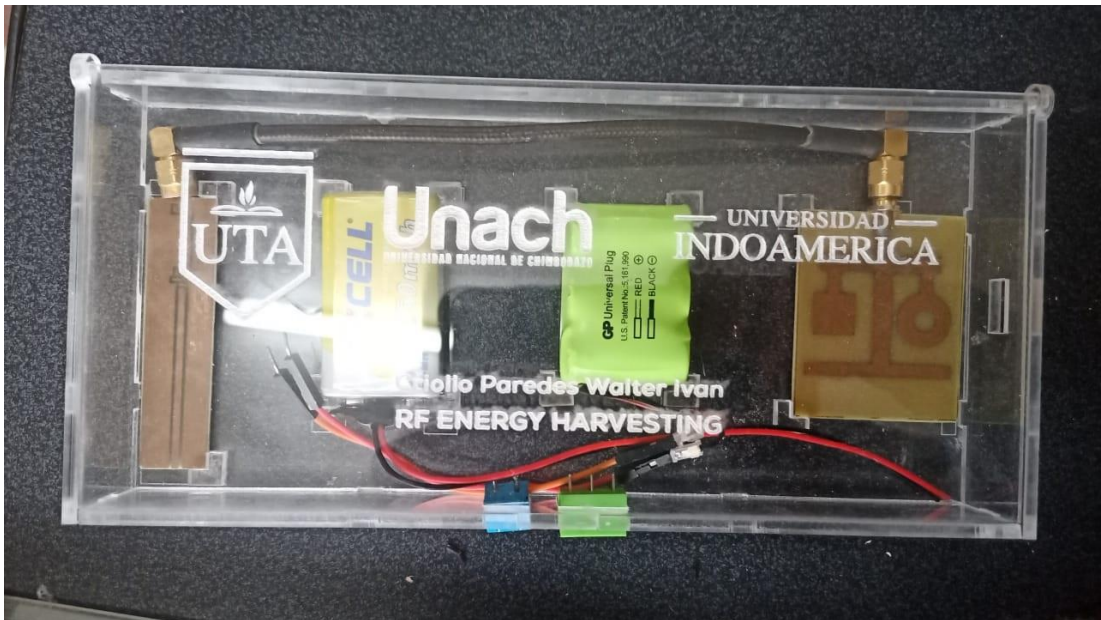
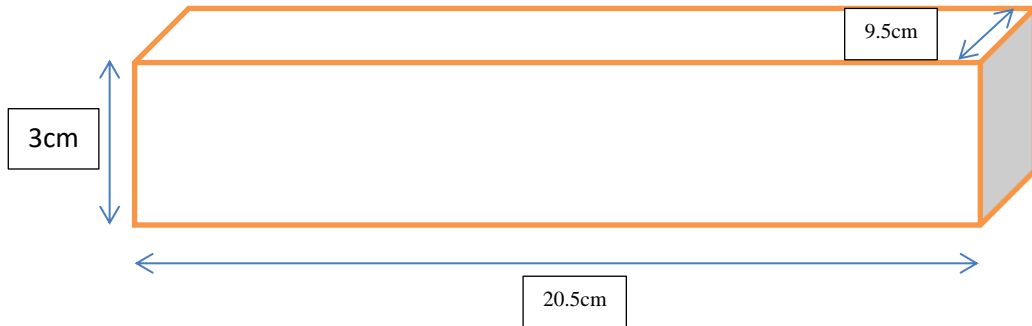


Figura 71: Diseños, medidas y fabricación caja acrílica. **Elaborado por:** Investigador.

ANEXO 5: Comparativa producto final desarrollado en la UTA.



(a)



(b)

Figura 72: Producto final: (a) prototipo Criollo Walter, (b) prototipo Jorge Mendoza. **Elaborado por:** Investigador.

Surface Mount Microwave Schottky Detector Diodes

Technical Data

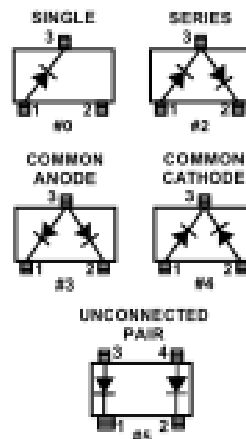
HSMS-286x Series

Features

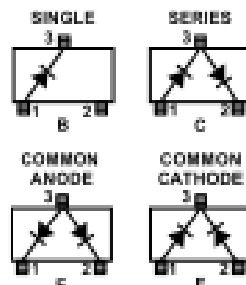
- Surface Mount SOT-23/ SOT-143 Packages
- Miniature SOT-323 and SOT-363 Packages
- High Detection Sensitivity:
 - up to 50 mV/μW at 915 MHz
 - up to 35 mV/μW at 2.45 GHz
 - up to 25 mV/μW at 5.80 GHz
- Low FIT (Failure in Time) Rate*
- Tape and Reel Options Available
- Unique Configurations in Surface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

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

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



SOT-323 Package Lead Code Identification (top view)

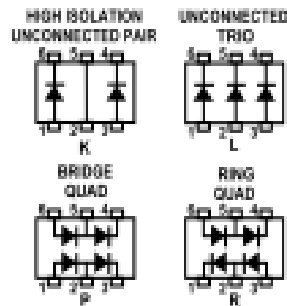


Description

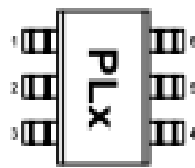
Agilent's HSMS-286x family of DC biased detector diodes have been designed and optimized for use from 915 MHz to 5.8 GHz. They are ideal for RF/ID and RF Tag applications as well as large signal detection, modulation, RF to DC conversion or voltage doubling.

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

SOT-363 Package Lead Code Identification (top view)



Pin Connections and Package Marking



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

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

Part Number HSMS-	Package Marking Code ⁽¹⁾	Lead Code	Configuration	Forward Voltage V_F (mV)		Typical Capacitance C_T (pF)
				250 Min.	350 Max.	
2860	T0	0	Single	250 Min.	350 Max.	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 ^(2,3)			
Test Conditions				$I_F = 1.0 \text{ mA}$		$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$

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.

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

Part Number HSMS-	Package Marking Code ⁽¹⁾	Lead Code	Configuration	Forward Voltage V_F (mV)		Typical Capacitance C_T (pF)
				250 Min.	350 Max.	
286B	T0	B	Single	250 Min.	350 Max.	0.25
286C	T2	C	Series Pair ^(2,3)			
286E	T3	E	Common Anode ^(2,3)			
286F	T4	F	Common Cathode ^(2,3)			
286K	TK	K	High Isolation Unconnected Pair			
286L	TL	L	Unconnected Trio			
286P	TP	P	Bridge Quad			
286R	ZZ	R	Ring Quad			
Test Conditions						

Notes:

1. Package marking code is laser marked.
2. ΔV_F for diodes in trios and quads is 15.0 mV maximum at 1.0 mA.
3. ΔC_T for diodes in trios and quads is 0.05 pF maximum at -0.5 V.

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

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

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

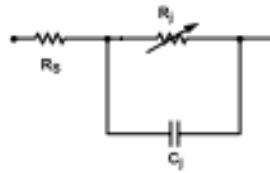
Symbol	Parameter	Unit	Absolute Maximum ⁽¹⁾	
			SOT-23/143	SOT-323/363
P_{IV}	Peak Inverse Voltage	V	4.0	4.0
T_J	Junction Temperature	$^\circ\text{C}$	150	150
T_{STG}	Storage Temperature	$^\circ\text{C}$	-65 to 150	-65 to 150
T_{OP}	Operating Temperature	$^\circ\text{C}$	-65 to 150	-65 to 150
θ_K	Thermal Resistance ⁽²⁾	$^\circ\text{C}/\text{W}$	500	150

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

Notes:

- Operation in excess of any one of these conditions may result in permanent damage to the device.
- $T_C = +25^\circ\text{C}$, where T_C is defined to be the temperature at the package pins where contact is made to the circuit board.

Equivalent Linear Circuit Model,
Diode chip



R_S = series resistance (see Table of SPICE parameters)

C_j = junction capacitance (see Table of SPICE parameters)

$$R_j = \frac{8.33 \times 10^{-9} nT}{I_b + I_s}$$

where

I_b = externally applied bias current in amps

I_s = saturation current (see table of SPICE parameters)

T = temperature, °K

n = ideality factor (see table of SPICE parameters)

Note:

To effectively model the packaged HSMS-286x product, please refer to Application Note AN1124.

SPICE Parameters

Parameter	Units	Value
B_V	V	7.0
C_{j0}	pF	0.18
E_G	eV	0.69
I_{BV}	A	1 E - 5
I_S	A	5 E - 8
N		1.00
R_S	Ω	6.0
P_E (V)	V	0.65
P_T (XT1)		2
M		0.5