



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias de la Electrónica

“DISEÑO DE UNA RECTENNA PARA LA BANDA ISM A 2.4 GHZ”

Tesis

**PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIADO EN
CIENCIAS DE ELECTRÓNICA**

PRESENTA

Marco Antonio Tecuatl Tecuatl

ASESORES

**DR. RICHARD TORREALBA MELÉNDEZ
M.C. EDNA ILIANA TAMARIZ FLORES**

**H. PUEBLA DE ZARAGOZA, PUE.,
DICIEMBRE 2023**

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y a la facultad de ciencias de la electrónica por haberme exigido tanto para poder lograr este objetivo profesional. Gracias a mis asesores, el Dr. Richard Torrealba Meléndez y la M.C Edna Iliana Tamariz, su conocimiento, comprensión han sido esenciales en este camino desafiante, su constante orientación y su confianza en mis habilidades me han llevado a alcanzar y finalizar este objetivo. Expreso mi mas profundo agradecimiento a mis amigos y amigas que compartieron conmigo esta etapa y estuvieron en los momentos de estrés y alegría a lo largo de esta extensa carrera, su ayuda, apoyo, confianza han sido invaluable.

Me siento muy agradecido con mis padres Pedro Tecuatl Itzmoyotl y Hortencia Tecuatl Moyotl por su amor incondicional y apoyo moral. Su confianza en mí, incluso en los momentos difíciles ha sido el fundamento de este logro, a mis hermanas Giovana Tecuatl y Areli Tecuatl quienes tomaron su tiempo para escucharme y brindarme su apoyo. Todo esto no habría sido posible sin su ayuda.

Índice

Capítulo 1 INTRODUCCION	9
1.1 Introducción	9
1.2 Estado del arte.....	11
1.3 Objetivo	13
<i>Objetivo General</i>	13
<i>Objetivo Específicos</i>	13
1.4 Metodología	14
1.5 Organización	15
Capítulo 2 RF, antenas, rectificadores, diodos y red de acoplamiento.....	16
Introducción	16
2.1 Radiofrecuencia	16
2.2 WIFI.....	18
2.3 Recolección de energía con señales de RF	19
2.3 Antenas	19
2.4 Parámetros de las antenas	20
2.4.1 <i>Ganancia</i>	20
2.4.2 <i>Eficiencia</i>	21
2.4.3 <i>Ancho de banda</i>	21
2.4.4 <i>Impedancia de entrada</i>	22
2.4.5 <i>Adaptación</i>	23
2.5 Tipos de antenas.....	23
2.5.1 <i>Antena de hilo</i>	23
2.5.2 <i>Antena de apertura</i>	24
2.5.3 <i>Antenas reflectoras</i>	24
2.5.4 <i>Antenas de lente</i>	25
2.5.5 <i>Antena microstrip</i>	25
2.6 Rectificadores y circuitos multiplicadores de voltaje	26
2.6.1 <i>Rectificador de media onda</i>	27
2.6.2 <i>Rectificador de onda completa</i>	28
2.6.3 <i>Circuito puente rectificador</i>	30

2.6.4 Circuito multiplicador Villard	31
2.6.5 Circuito multiplicador Greinacher	32
2.6.6 Circuito multiplicador Delon	33
2.6.7 Circuito multiplicador Cockcroft-Walton	33
2.6.8 Circuito multiplicador Dickson.....	34
2.7 Diodo Schottky	35
2.7.1 Diferencia entre diodo Schottky y diodo de unión P-N.....	36
2.8 Acopladores de impedancia	37
2.8.1 Acoplador tipo T.....	38
2.8.2 Acoplador π	39
2.8.3 Acoplador tipo L.....	41
Capítulo 3 Diseño y fabricación de la Rectenna	42
Introducción	42
3.1 Diseño del rectificador	42
3.2 Construcción del rectificador	46
3.3 Diseño de la red de acoplamiento tipo L	49
3.4 Construcción de la red de acoplamiento con el rectificador	53
3.5 Diseño de la antena	55
3.6 Construcción de la antena	63
Capítulo 4 Evaluación de la rectenna respecto a su cosechamiento de voltaje	67
Introducción	67
4.1 Resultados de la rectenna.....	67
Capítulo 5 Conclusión y trabajo a futuro.....	72
Introducción	72
5.1 Conclusiones	72
5.2 Trabajo a futuro	73
Apéndice A. Equipos de medición	74
Referencias	75

Lista de figuras

Figura 1 Ejemplo de una Rectenna.....	10
Figura 2 Espectro electromagnético [7].....	17
Figura 3 Dispositivos conectados a WIFI [8].....	19
Figura 4 Ancho de Banda de una antena [13]	22
Figura 5 Antena de hilo: a) hélice, b) dipolo y c) circular o cuadrada de bucle [6]	23
Figura 6 Antena de apertura [6]	24
Figura 7 Diferentes geometrías de antenas reflectoras [6]	25
Figura 8 geometría de un lente [12].....	25
Figura 9 Antena microstrip [4]	26
Figura 10 Diagrama a bloques del sistema de cosechamiento de energía [19]	27
Figura 11 Circuito rectificador de media onda [20]	27
Figura 12 a) Voltaje de entrada y b) de salida del rectificador de media onda [20].....	27
Figura 13 Circuito rectificador de onda completa [20]	28
Figura 14 Entrada senoidal y D1 en polarización directa [20]	28
Figura 15 Señal con D1 polarizado en directa y D2 en inversa [20].....	28
Figura 16 D1 polarizado en inversa y D2 en directa [20]	29
Figura 17 Señal con D1 en polarizado en inversa y D2 en directa [20]	29
Figura 18 Forma de onda resultante de un circuito rectificador de onda completa [20]	29
Figura 19 Circuito puente rectificador de onda completa [20].....	30
Figura 20 Funcionamiento del circuito para el ciclo positivo de la señal de entrada [20] ..	30
Figura 21 Funcionamiento del circuito para el ciclo negativo de la señal de entrada [20] ..	31
Figura 22 a) Voltajes de entrada y b) de salida del puente rectificador [20].....	31
Figura 23 Diagrama de un circuito multiplicador de voltaje Villard [24]	32
Figura 24 Diagrama del circuito multiplicador Greinacher [23]	33
Figura 25 Topología del circuito multiplicador Delton [25].	33
Figura 26 Diagrama del circuito multiplicador Cockcroft-Walton [23].....	34
Figura 27 Diagrama circuito multiplicador Dickson [23]	35
Figura 28 Construcción del diodo Schottky [30].....	36
Figura 29 Acoplador genérico de impedancias [31].....	37
Figura 30 Acoplador tipo T [31]	38
Figura 31 Acoplador tipo π [31].....	40
Figura 32 Red de acoplamiento tipo L. a) red para z_L dentro del círculo $1+jx$. b) red para z_L fuera del círculo $1+jx$ [32].....	41
Figura 33 Diagrama a bloques de la rectenna.	42
Figura 34 Diagrama circuito rectificador Dickson en el software ADS.....	44
Figura 35 Rectificador con líneas de transmisión.	45
Figura 36 Layout del rectificador	46
Figura 37 Circuito rectificador con modificaciones en CorelDRAW	46
Figura 38 a) Circuito pasando por enmicadora y b) placa después de pasar por enmicadora	47
Figura 39 Cara lateral de la placa (tierra).....	47

Figura 40 Rectificador con componentes SMD soldados	48
Figura 41 Rectificador conectado al VNA	48
Figura 42 Impedancia de entrada mostrado en el VNA	49
Figura 43 Rectificador con red de acoplamiento en ADS.....	52
Figura 44 Coeficiente de reflexión del rectificador simulad, acoplado y no acoplado.	52
Figura 45 Circuito Rectificador con red de acoplamiento tipo L construido.	53
Figura 46 Rectificador con red de acoplamiento y componentes soldados.....	53
Figura 47 parámetro de dispersión S del rectificador construido y simulado.	54
Figura 48 Diseño geométrico de la antena microstrip [4]	55
Figura 49 Antena microstrip.....	59
Figura 50 Antena simulada en HFSS.	60
Figura 51 Respuesta del coeficiente de reflexión S11 de la antena.....	60
Figura 52 Respuesta del coeficiente de reflexión s11 de la antena mejorada.	62
Figura 53 Comparación de ambos coeficientes de reflexión.....	63
Figura 54 Antena impresa en papel corte vinil.....	64
Figura 55 Antena construida.....	64
Figura 56 comparación de los coeficientes de reflexión fabricado y simulado.....	65
Figura 57 Rectenna fabricada.	66
Figura 58 Voltaje obtenido de la rectenna en el laboratorio.....	67
Figura 59 Medición fuera del edificio.	68
Figura 60 Voltaje obtenido fuera del edificio.....	68
Figura 61 Voltaje dentro del auditorio.	69
Figura 62 Todos lo voltajes obtenidos.....	70
Figura 63 Analizador vectorial de redes Anritsu MS4644b.	74
Figura 64 Analizador de señales ANRITSU MG3692C	74

Lista de tablas

Tabla 1 Diferencias entre diodo Schottky y diodo PN.	37
Tabla 2 Parámetros antena microstrip.	59
Tabla 3 Parámetros de la antena mejorados.	61
Tabla 4 Voltajes promedio de los diferentes lugares de medición.	70
Tabla 5 comparación de trabajos	71

Resumen

La energía de radiofrecuencia ambiental puede ser capturada y convertida en una señal continua para alimentar ciertos circuitos. El dispositivo que realiza esta conversión se conoce como un dispositivo "rectenna," que proviene de la combinación de "rectificador" y "antena." Una rectenna convencional está compuesta por una antena, una red de adaptación y un rectificador.

Este proyecto se enfoca en el diseño e implementación de una rectenna que opera en la banda ISM de 2.4 GHz para evaluar su eficiencia en la recepción de señales WiFi. Se construirá la rectenna en un sustrato Rogers 4003c y los componentes a utilizar serán SMD se utilizará el diodo Schottky bas70-04 ya que los convencionales están descontinuados y todos los componentes serán de RF ya que si no lo son no funcionara la parte del rectificador. Se simulará en el rectificador en el software Advanced Design System y la antena se simulará en el software HSFF y se fabricará en el mismo sustrato Rogers pero con grosor de 1.55mm.

Capítulo 1 INTRODUCCION

1.1 Introducción

El desarrollo de sistemas inalámbricos para el intercambio de información, el monitoreo de fenómenos físicos y el control de eventos se ha acelerado en las últimas décadas. Las tasas de transmisión se han mejorado y muchos dispositivos se han conectado más fácilmente con estos sistemas [8]. Esto ha provocado que más usuarios usen estos sistemas en su vida diaria, tanto en aplicaciones comerciales como domésticas.

Sin embargo, este progreso ha resultado en una mayor ocupación del espectro de ondas electromagnéticas y, al mismo tiempo, en la emisión de energía electromagnética que no se aprovecha completamente. En consecuencia, la energía radiada en una zona puede quedar sin utilidad, y en tales casos, es posible reciclarla y convertirla en energía eléctrica para diversas aplicaciones [9]. La comprensión de la electricidad, su naturaleza y cómo interactúa con el magnetismo ha mejorado la investigación sobre cómo convertir la energía mecánica en electricidad. La energía eólica y hidráulica son fuentes de energía que generan electricidad mediante generadores y centrales eléctricas como resultado de este desarrollo. Además, las celdas solares producen energía a través del efecto fotoeléctrico.

El suministro de energía a los sensores IoT de baja potencia se ve restringido en entornos de instalación, ya que el uso de baterías a menudo afecta el funcionamiento de estos sensores debido a sus características [1]. Ante estas limitaciones, la recolección de energía se presenta como una alternativa favorable, generalmente utilizada para extraer energía de fuentes externas, almacenándola y convirtiéndola en energía eléctrica útil [2]. A partir del año 2000, diversas investigaciones se han centrado en la recolección de energía en radiofrecuencia (RF), encontrando que una fuente de energía fácilmente accesible y abundante es un punto de acceso WiFi [3].

El proceso de extraer y acumular energía del entorno ambiental para convertirla en energía eléctrica utilizable se conoce como "Cosechamiento de Energía" o "Energy Harvesting". Numerosas fuentes de energía son incluidas en este proceso, entre ellas la luz solar, la energía mecánica, la energía térmica y las señales de radiofrecuencia [5]. La urgencia de alimentar aparatos con bajo consumo de energía o cargar baterías mediante fuentes de energía limpia,

como la energía recolectada a partir de señales de radiofrecuencia (RF), ha surgido durante los tiempos recientes. Esta tecnología permite capturar energía ambiental, como radio AM con frecuencias de 533 KHz hasta 1710 KHz, radio FM con frecuencias de 87.5 MHz hasta 108 MHz y TV digital en las bandas VHF 54 MHz - 216 MHz y UHF 470 MHz - 700 MHz, además de las bandas de móvil móvil como 2G, GSM, 3G, CDMA, 4G, LTE y 5G con sus respectivas frecuencias de 850 MHz, 900 MHz, 1850 MHz, 1900 MHz, 2100 MHz hasta 2600 MHz, señales Wi-Fi IEEE 802.11b/g/n a 2.45 GHz y 802.11a a 5.8 GHz, Bluetooth BLE 2.45 GHz y WIMAX IEEE 802.16 a 3.5 GHz y 802.16d a 5.8 GHz [4]. Es necesario un dispositivo o componente que transforme energía de radiofrecuencias y microondas en un voltaje de CC para lograr recibir estas señales. A este componente se le denomina Rectenna y consta de una antena receptora que recoge energía de una fuente de radiofrecuencia, un circuito rectificador formado por una red de condensadores y diodos, y una red de acoplamiento que está colocada entre el circuito rectificador y el receptor de antena. como se muestra en la figura 1.

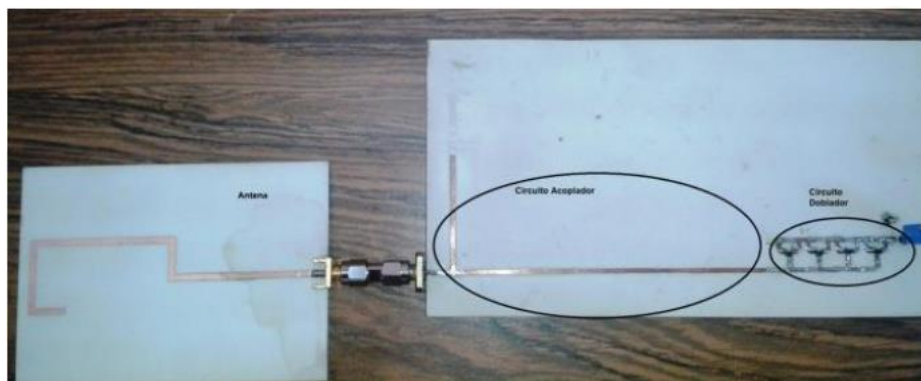


Figura 1 Ejemplo de una Rectenna

Una de las ventajas del uso de estos dispositivos es que tienen un tiempo de vida casi ilimitado, ya que no necesitan ser reemplazados, y son sostenibles debido a su capacidad para reciclar la energía electromagnética presente en el entorno [6]. No obstante, en la implementación de las rectennas, no existe un único modelo para una aplicación específica, ya que se han propuesto diversas configuraciones de antenas y rectificadores para cosechar energía en un mismo sistema. Además, se han introducido elementos adicionales para mejorar su rendimiento tales como más etapas de multiplicación de tensión.

1.2 Estado del arte

Las rectennas, dispositivos que combinan antenas con circuitos rectificadores para capturar y convertir energía electromagnética en electricidad, se encontraban en constante evolución, con investigaciones y desarrollos en curso en varios campos.

Algunos de los avances y tendencias destacados en el estado actual de las rectennas incluían:

Aumento de eficiencia: Investigadores estaban trabajando en incrementar la eficiencia de las rectennas, permitiéndoles capturar y convertir de manera más efectiva la energía electromagnética en electricidad. Esto involucraba el uso de materiales avanzados y diseños innovadores, así como técnicas de control mejoradas.

Energía inalámbrica: Se estudiaban aplicaciones de energía inalámbrica, como la carga de dispositivos electrónicos a través de señales de radiofrecuencia ambientales, con el potencial de eliminar la necesidad de cables en algunos dispositivos.

Comunicaciones de larga distancia: Se investigaba la posibilidad de utilizar rectennas para recolectar energía a partir de señales de microondas, lo que podría servir en trabajos como la monitorización de sensores remotos.

Miniaturización: Los avances en la miniaturización de componentes electrónicos estaban permitiendo la creación de rectennas más pequeñas y portátiles, lo que ampliaba sus aplicaciones en dispositivos wearables y sensores IoT.

Aplicaciones espaciales: Se estudiaba el uso de rectennas en misiones espaciales, donde la captura de energía solar y la recepción de señales de radio eran cruciales para la operación de satélites y sondas espaciales.

Materiales avanzados: Investigaciones sobre nuevos materiales, como nanomateriales y metamateriales, estaban facilitando el desarrollo de rectennas más eficientes y versátiles.

Integración con tecnologías de almacenamiento de energía: La combinación de rectennas con tecnologías de almacenamiento de energía, como baterías o supercondensadores, se exploraba para crear sistemas de energía autónomos.

Energía ambiental: Se estaban llevando a cabo investigaciones para aprovechar la energía ambiental, como las señales de radio y las microondas presentes en el entorno, con el fin de alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo.

1.3 Objetivo

Objetivo General

- Diseñar una Rectenna en la banda ISM de 2.4 GHz

Objetivo Específicos

- Diseñar un circuito rectificador en la banda ISM de 2.4 GHz.
- Implementar el circuito rectificador y medir su impedancia de entrada.
- Diseñar un circuito de acoplamiento tipo L a partir de la impedancia de entrada medida para acoplar a 50 Ω .
- Medir el coeficiente de reflexión para el rectificador acoplado.
- Diseñar una antena tipo parche a la frecuencia de funcionamiento del rectificador.
- Implementar la antena a la frecuencia de funcionamiento.

1.4 Metodología

El presente trabajo inicio con una revisión de trabajos en publicaciones o libros del estado del arte de Rectennas a una frecuencia de 2.4GHz. Una vez comprendiendo el funcionamiento de estas, se hace la simulación de la parte esencial de las rectennas que es un rectificador, para realizar la simulación en el software Advanced Design System (ADS). Este circuito se implementa en un sustrato Rogers 4003c con un grosor de 0.5 mm con una permitividad relativa de 3.6, se emplean componentes SMD ya que quiero hacer el rectificador pequeño. Se caracteriza su impedancia de entrada de manera experimental usando el analizador vectorial de redes situado en el laboratorio de caracterización de sistemas basados en microondas de la FCE. El valor impedancia es importante porque permitirá diseñar una red de acoplamiento tipo L ($R_L < R_S$) para la rectenna, Posteriormente se harán los cálculos correspondientes para la red de acoplamiento tipo L y saber el valor del capacitivo e inductivo que necesitaremos para la construcción, se vuelve a simular en el software ADS el rectificador, pero ahora agregando la red de acoplamiento tipo L para averiguar si resuena a la frecuencia requerida, se vuelve a construir el rectificador con el acoplamiento tipo L y se medirá de igual forma en el VNA para asegurar que si este en la resonancia requerida. Una vez obteniendo los resultados, el rectificador se conecta a un generador de frecuencias para descubrir si este está produciendo voltaje en su salida, para esto se hará uso de un multímetro, se espera una salida en milivolts. Se construye una antena de parche a la frecuencia de banda de Wi-Fi y se conecta a la antena para saber si aún está produciendo voltaje, finalmente se escribirá la tesis.

1.5 Organización

Este trabajo está conformado por 5 capítulos, los cuales se describen a continuación:

En el capítulo 1 se presenta una introducción del proyecto y sus objetivos. Además, se presentan de forma breve algunos antecedentes relacionados con este trabajo de investigación lo cual es el estado del arte y finalmente la metodología a seguir del trabajo.

El capítulo 2 se habla del marco teórico para entender que son las fuentes de energía de radiofrecuencia (RF) así como una pequeña introducción de lo que es el WIFI ya que ocupa esta red en el presente trabajo, se mencionaran las rectennas y las partes que la conforman como lo son la teoría de antenas la cual habla de los tipos de antenas y parámetros de antenas importantes, las variantes de circuitos rectificadores y multiplicadores de voltaje que hay para la creación de las rectennas así como la definición del diodo schottky y finalmente los diferentes tipos de red de acoplamiento de impedancia que existen.

En el capítulo 3 se trata sobre los cálculos hechos para la construcción de la rectenna, la construcción y simulación de la antena, la construcción, simulación y caracterización del circuito multiplicador de voltaje y el ensamble a la antena.

En el capítulo 4 se aborda la discusión de los resultados, presentando de manera concisa los hallazgos teóricos y experimentales.

Finalmente, el 5 capítulo discute los hallazgos de esta investigación y ofrecerá sugerencias para proyectos y estudios futuros.

Capítulo 2 RF, antenas, rectificadores, diodos y red de acoplamiento

Introducción

En este capítulo se proporcionan los conceptos y definiciones que necesito saber para la construcción de una Rectenna esto abarca desde la energía de RF (Radiofrecuencia). El texto discute los tipos de antenas y sus parámetros fundamentales. Además, se incluyen conceptos y definiciones sobre varios tipos de circuitos rectificadores y multiplicadores de voltaje, incluyendo la teoría del diodo Schottky, fundamental para el diseño de circuitos rectificadores. Finalmente, se abordan los diferentes tipos de redes de acoplamiento que se utilizan en la creación de rectennas.

2.1 Radiofrecuencia

La frecuencia se conoce como la tasa de oscilación del espectro de radiación electromagnética u ondas de radio electromagnéticas que oscila entre los 300 gigahercios (GHz) y los 3 kilohercios (KHz) se conoce como radiofrecuencia. Un espectro de radiofrecuencia se puede utilizar para una variedad de aplicaciones de telecomunicaciones inalámbricas a través de una variedad de antenas y transmisores. Debido a que varios equipos y dispositivos transmiten y operan en diferentes frecuencias, hay frecuencias bajas y extremadamente altas, así como frecuencias intermedias [7].



Figura 2 Espectro electromagnético [7]

La radiofrecuencia se mide en hercios (Hz), que representan la cantidad de ciclos por segundo que transmite una onda de radio. Las ondas electromagnéticas pueden tener un valor de kilohercio, millones de megahercios o miles de millones de gigahercios, y un hercio es equivalente a un ciclo por segundo. El ojo humano no puede ver estas frecuencias de radio. Varios dispositivos inalámbricos, incluidos teléfonos móviles, estaciones de radio y televisores, así como otros dispositivos, como walkie-talkies, Bluetooth, controles remotos, teclados, entre otros, funcionan a través de los campos de radiofrecuencia. Es importante destacar que algunas personas utilizan frecuencias infrarrojas que tienen longitudes de onda electromagnética más cortas. En general, la radiofrecuencia llega a los equipos de comunicación a través de las ondas de radio, en general [7].

El rango de frecuencia en el cual operan estas tecnologías ha propiciado su uso en una amplia variedad de aplicaciones, y hoy en día son esenciales en numerosos contextos. Algunas de las características más destacadas de las señales RF y microondas incluyen:

- Antenas con elevada ganancia y dimensiones reducidas. La ganancia de una antena está directamente relacionada con sus dimensiones eléctricas, lo que permite diseñar antenas de mayor ganancia en microondas a pesar de su tamaño compacto.
- Mayor ancho de banda relativo en comparación con frecuencias más bajas.
- Circuitos de dimensiones reducidas, gracias a las longitudes de onda más cortas en microondas.

- Dado que las dimensiones y las longitudes de onda del circuito están muy relacionadas, se requiere un enfoque diferente para el análisis y diseño de circuitos en comparación con los circuitos de baja frecuencia.
- Debido a que las señales de microondas cambian rápidamente de fase en distancias cortas, se utilizan las ecuaciones de Maxwell.
- La ionosfera es más transparente a las frecuencias de microondas.
- Propagación en línea recta y transparencia parcial de la atmósfera baja.
- La capacidad de interactuar con la materia, lo que permite que la energía de la onda se transfiera a las partículas de un material.
- Mantiene constante la frecuencia de oscilación.
- Facilitan la detección de objetivos al presentar una gran sección recta del radar (RCS).

2.2 WIFI

Wifi es un nombre comercial creado por una empresa de marketing con el objetivo de establecer un sello de interoperabilidad para las actividades de marketing, no un acrónimo [8].

Como se muestra en la Figura 3, WiFi es una tecnología de red inalámbrica que posibilita que dispositivos, como computadoras (laptops y de escritorio), teléfonos inteligentes, accesorios, y otros dispositivos, como impresoras y videocámaras, interactúen con Internet. Permite que estos dispositivos intercambien datos entre sí y creen una red [8].

Un router inalámbrico permite conectarse a Internet. Se conecta a un router inalámbrico cuando se conecta a Internet, lo que permite que los dispositivos que admiten wifi interactúen con Internet [8].



Figura 3 Dispositivos conectados a WIFI [8]

2.3 Recolección de energía con señales de RF

El cosechamiento de energía se basa en la capturar y utilizar la energía de fuentes ambientales como la solar, geotérmica, eólica, cinética y de ondas electromagnéticas para alimentar dispositivos de bajo consumo de energía electrónicos [5].

La recolección de energía de radiofrecuencia proveniente de millones de transmisores de radio en todo el mundo, incluidos celulares, radios portátiles, estaciones bases de telefonía móvil, televisión y emisoras de radiodifusión, entre otros, ofrece la posibilidad de desarrollar dispositivos electrónicos autónomos que no requieren baterías [5].

La recolección de energía del entorno mediante radiofrecuencia (RF) ha ganado popularidad como opción de fuente de energía para pequeños dispositivos electrónicos gracias a los avances recientes en la electrónica que no consume mucha energía. Esta opción presenta una ventaja en comparación con fuentes de energía como la solar, ya que funciona de noche y dentro de edificios. Además, es más atractivo para el diseño industrial porque las antenas utilizadas en dispositivos de comunicación pueden aprovecharse para captar energía sin cambiar la forma o la apariencia del dispositivo [1].

2.3 Antenas

Las antenas son dispositivos que tienen como objetivo emitir o recibir información a través de ondas electromagnéticas que viajan por el espacio. En otras palabras, la antena sirve

como un puente entre un dispositivo de guía y el espacio libre. Para transferir la energía electromagnética desde la fuente emisora hasta la antena o viceversa, desde la antena hasta el receptor, este dispositivo de guía o línea de transmisión puede tomar la forma de un tubo hueco o un cable coaxial [9].

2.4 Parámetros de las antenas

Los parámetros de la antena explican su comportamiento; sin embargo, es importante tener en cuenta que estos parámetros a menudo no están directamente relacionados entre sí y que no todos los parámetros son necesarios para explicar completamente el funcionamiento de la antena [1].

2.4.1 Ganancia

La ganancia de una antena es un factor importante para evaluar su desempeño [10]. Se define como la relación entre la directividad de la densidad de potencia radiada y la densidad de potencia radiada en una antena isotrópica. De acuerdo con [10], su ecuación es la siguiente:

$$Ganancia = 4\pi \frac{\text{Potencia radiada por angulo solido en direccion } (\theta, \phi)}{\text{Potencia entregada a la antena}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (1)$$

La siguiente ecuación [10] se utiliza en caso de que no se especifique la dirección angular, siendo la ganancia la máxima radiación [10]:

$$G = \frac{P_{max}}{\frac{W_e}{4\pi r^2}} \quad (2)$$

Según [10], la potencia de entrada de una antena es la potencia radiada. Si la antena funciona al 100%, la potencia de entrada será igual a la potencia radiada. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las pérdidas del conductor y del dieléctrico absorben una pequeña parte de esa potencia. La ganancia es una magnitud adimensional que se puede expresar en decibeles relativos a la isotrópica (dBi). Como se indica en la ecuación 2.3, su relación está relacionada con la eficiencia de la antena [10]:

$$P_{rad} = n * P_{ent} \quad (3)$$

2.4.2 Eficiencia

La eficiencia, representada por η , es un parámetro que señala la capacidad de radiación de la antena, conforme a la definición proporcionada en [11] por la ecuación 4:

$$\eta = \frac{G_{rad}}{G_{ent}} = \frac{1}{G_{ent} G_{rad}} \quad (4)$$

Definida por la potencia radiada en relación con la entrada puede definirlo o también podemos relacionarlo con la conductancia de la radiación (G_{rad}), la conductancia de la radiación (G_{ent}) y la resistencia de la radiación R_{rad} [11].

Para que el campo electromagnético se propague dentro de las antenas de microcintas, es necesario que sus sustratos tengan una alta permitividad. Sin embargo, una mayor permitividad del sustrato en comparación con la permitividad del vacío aumenta la eficiencia de la antena [11].

2.4.3 Ancho de banda

El rango de frecuencias en el que los parámetros de la antena cumplen con características específicas se conoce como ancho de banda. Como se muestra en la Figura 4, este puede incluir parámetros como la ganancia, la polarización y el ancho de banda de impedancia [6]. El ancho de banda de impedancia es un término que se usa con frecuencia en antenas y se define como el rango de frecuencias en el que la antena está adaptada, es decir, tiene un VSWR (Relación de ondas de posición de voltaje) inferior a un valor establecido [11].

La siguiente es una expresión matemática del ancho de banda:

$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (5)$$

Donde f_2 y f_1 son las frecuencias superiores e inferior y f_0 la frecuencia central.

El cálculo del ancho de banda en antenas es muy común con un VSWR < 2, lo que implica pérdidas de retorno por debajo de -9.5 dB. La siguiente ecuación [11] relaciona estas pérdidas de retorno, donde Γ es el coeficiente de reflexión:

$$RL = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (6)$$

Es relevante subrayar que el coeficiente de reflexión es comúnmente conocido en la práctica como el parámetro S_{11} de la matriz de parámetros de dispersión, también referidos como parámetros S.

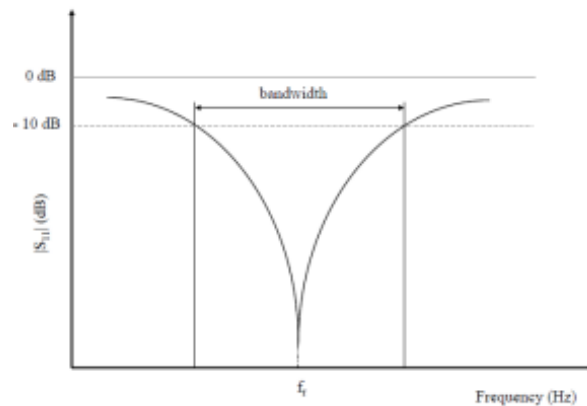


Figura 4 Ancho de Banda de una antena [13]

2.4.4 Impedancia de entrada

La relación entre el voltaje y la corriente en los terminales de entrada es su definición. En general, este obstáculo es complejo. La parte real se conoce como resistencia de la antena, mientras que la parte imaginaria se conoce como reactancia de la antena [14].

Se define la impedancia de la antena de la siguiente manera [6]:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (7)$$

La parte resistiva de la antena consiste en la suma de dos componentes [6]:

$$R_A = R_r + R_L \quad (8)$$

Donde R_r es la resistencia de radiación y R_L la resistencia de pérdidas. La resistencia de radiación es la relación entre la potencia total radiada por una antena y el valor eficaz de la corriente en sus terminales de entrada, elevada al cuadrado [14].

2.4.5 Adaptación

La antena suele estar conectada a una línea de transmisión en transmisión y recepción, ya sea directamente al transmisor o al receptor. El parámetro de dispersión S_{11} se utiliza para calcular el grado de reflexión de la potencia en una carga, que proporciona información sobre la transferencia de potencia hacia la antena. Este valor es el coeficiente de reflexión en un bipuerto, que es la relación entre la onda incidente y la onda reflejada en el caso de que no haya reflexión en la salida [6]. Este parámetro se representa mediante la siguiente fórmula:

$$S_{11} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (9)$$

Donde Z_A es la impedancia de entrada de la antena y Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión conectada a la antena.

2.5 Tipos de antenas

La variedad de antenas varía según el sistema electrónico al que se conecte. Dado que está relacionado con la longitud de onda (λ) de la señal, el tamaño de las antenas está directamente relacionado con la frecuencia con la que funcionan. Por lo tanto, la antena suele ser más pequeña cuando se trabaja con frecuencias más altas [6].

2.5.1 Antena de hilo

El dipolo (hilo recto), la hélice y el bucle son algunas de las formas que pueden tomar las antenas de hilo. Las últimas pueden tener diferentes formas geométricas además de la

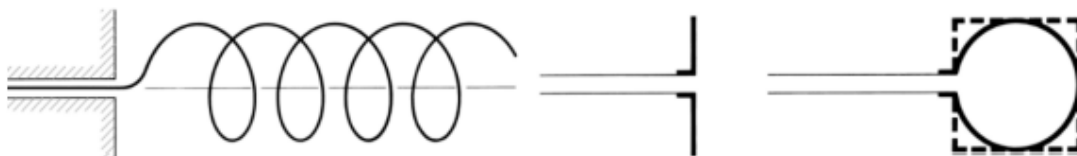


Figura 5 Antena de hilo: a) hélice, b) dipolo y c) circular o cuadrada de bucle [6]

circular (Fig. 5). Los hilos conductores delgados los construyen, y sus dimensiones diametrales son menores que la longitud de onda. Las antenas de hilo tienen una amplia gama de usos, incluidos automóviles, edificios, barcos y naves espaciales, entre otros [6].

2.5.2 Antena de apertura

La creciente demanda de este tipo de antena en la actualidad se debe a la sofisticada forma que puede adoptar y su uso en altas frecuencias. Debido a que pueden proteger y recubrir las aeronaves espaciales con materiales dieléctricos, su principal uso es en aplicaciones aeroespaciales. Como se menciona en Constantine A. [6], "Estas antenas trabajan mediante una onda radiada que se obtiene a partir de una distribución de campo soportada por la antena y suelen excitarse por guía de ondas". Las bocinas pueden ser cónicas o piramidales según su forma de apertura [6].

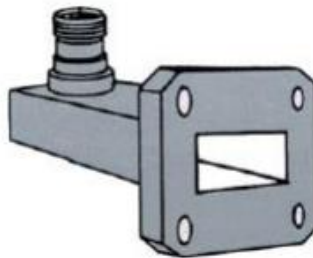


Figura 6 Antena de apertura [6]

2.5.3 Antenas reflectoras

Desde el descubrimiento de Hertz en 1888 de la propagación de ondas electromagnéticas, se han utilizado antenas reflectoras. Conseguir directividades elevadas, lo que significa disponer de geometrías capaces de concentrar la energía en regiones angulares menores, es el objetivo de un reflector. Como se muestra en la Figura 7, una antena reflectora puede tener una variedad de estructuras, pero generalmente se compone de dos partes: el alimentador y el reflector. El alimentador generalmente es una guía de onda o una corneta, pero también puede ser un dipolo. El reflector, por otro lado, confina la radiación porque tiene una directividad mucho más alta que el alimentador [6].

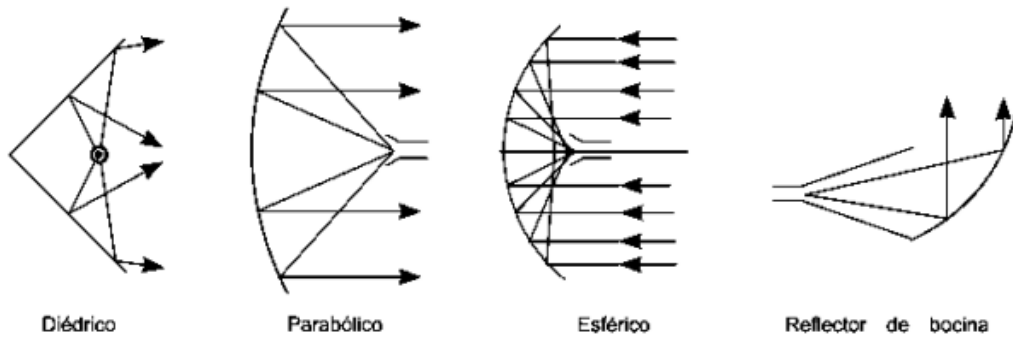


Figura 7 Diferentes geometrías de antenas reflectoras [6]

2.5.4 Antenas de lente

Las antenas de lente se utilizan principalmente para alinear la energía divergente entrante con el fin de evitar su propagación en direcciones no deseadas [6]. Este tipo de antenas constan de una lente cuya función es dar forma a la radiación de manera específica. Originadas a partir de una fuente poco directiva (que emite en varias direcciones en el espacio), permiten modificar el haz para mejorar la directividad, es decir, concentrar la radiación en direcciones específicas (ver Figura 8) [12].

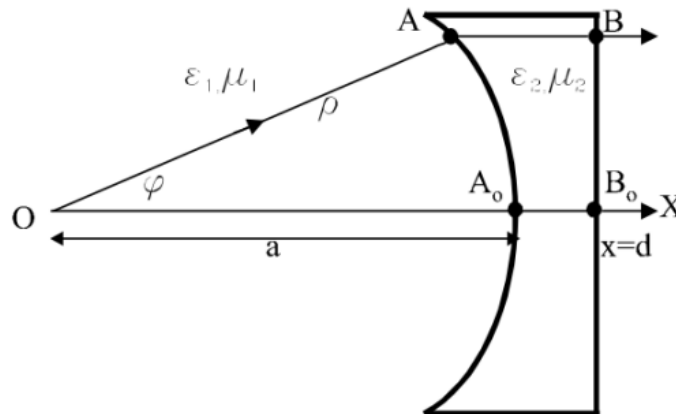


Figura 8 geometría de un lente [12]

2.5.5 Antena microstrip

Las antenas microstrip, también conocidas como antenas de parche, están compuestas por un parche de metal (normalmente cobre) y un plano de tierra (normalmente cobre) separado por una altura h del parche [4]. La constante dieléctrica del sustrato suele estar en el rango de $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ dependiendo del material. Dependiendo de su propósito, estas

antenas pueden tener una variedad de formas, como anillo, circular, rectangular, cuadrada, elíptica o triangular [15].

Las características principales de una antena microstrip son la facilidad de construcción, el tamaño reducido, el peso ligero, el bajo costo y la capacidad de ubicar tanto la antena como las líneas de alimentación en el mismo circuito. Estos tipos de antenas se han popularizado en numerosas aplicaciones de comunicaciones inalámbricas debido a estos beneficios. La frecuencia de resonancia, el ancho de banda, la ganancia y el diagrama de radiación son factores que requieren el diseño de una antena de parche [16][17].

A pesar de sus ventajas, las antenas microstrip tienen una tendencia a tener anchos de banda reducidos. Esto ha llevado a una serie de investigaciones que buscan aumentar el ancho de banda utilizando una variedad de métodos, que incluyen aumentar el grosor del dieléctrico, reducir la permitividad eléctrica o aumentar el ancho (W) del parche [18].

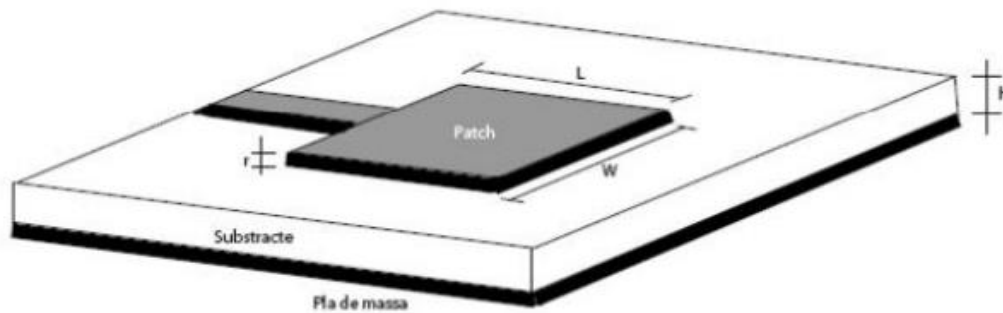


Figura 9 Antena microstrip [4]

2.6 Rectificadores y circuitos multiplicadores de voltaje

El circuito rectificador y los multiplicadores de voltaje son componentes del sistema de cosechamiento de energía de radiofrecuencia o RF. Estos últimos transforman cualquier onda de rf en corriente directa y multiplica el voltaje en su salida. Estos circuitos se crean utilizando rectificadores basados en semiconductores, como transistores, diodos Schottky y CMOS. El SMS del fabricante Skyworks y la serie HSMS de dispositivos de montaje superficial (SMD) son los diodos Schottky más comunes. Debido a que actualmente están discontinuados y se han reemplazado por nuevos diodos Schottky, este trabajo no se ocupará de ellos. La figura 10 muestra el diagrama a bloques en general de un sistema de cosecha de energía, que consta de una antena receptora, una red de acoplamiento, un circuito para convertir la energía de radiofrecuencia (RF) a corriente continua (DC) y una carga.

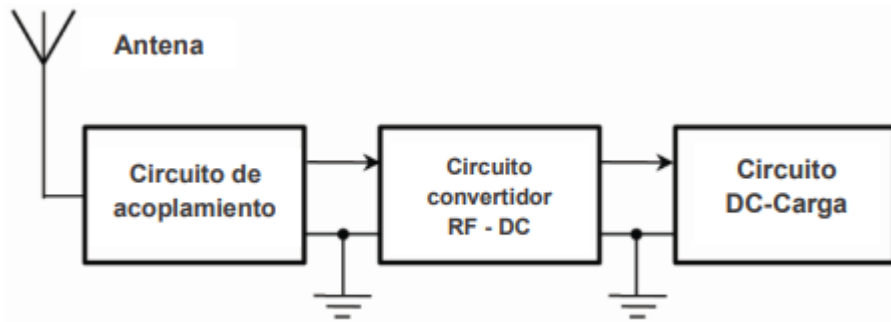


Figura 10 Diagrama a bloques del sistema de cosechamiento de energía [19]

Por lo tanto, primero veremos los tipos de circuitos rectificadores y luego veremos los multiplicadores de voltaje.

2.6.1 Rectificador de media onda

El circuito rectificador de media onda se puede ver a continuación en la figura 11:

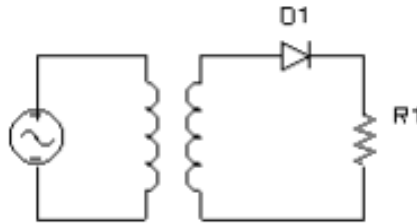


Figura 11 Circuito rectificador de media onda [20]

El diodo se polariza en directa y actúa como un interruptor cerrado en el ciclo positivo de una fuente senoidal, lo que permite que la carga reciba toda la señal. El diodo se polariza en inversa en el ciclo negativo de la fuente y actúa como un interruptor abierto, lo que evita que haya voltaje en la carga [10].

La figura 12 muestra los voltajes de entrada y salida del rectificador:

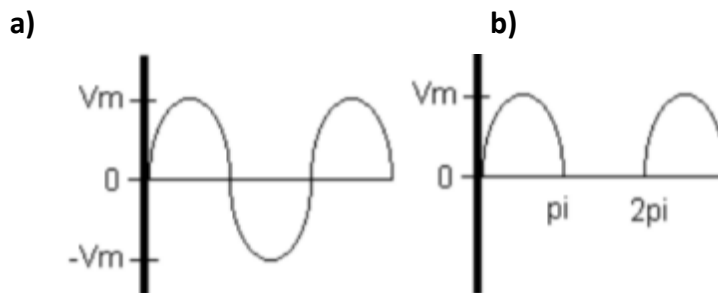


Figura 12 a) Voltaje de entrada y b) de salida del rectificador de media onda [20]

2.6.2 Rectificador de onda completa

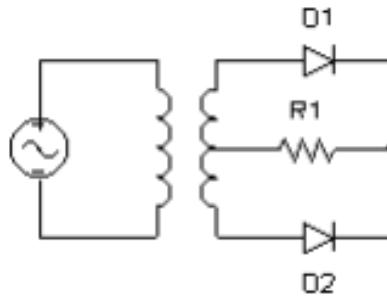


Figura 13 Circuito rectificador de onda completa [20]

En el secundario se utiliza un transformador con derivación central, como se muestra en la Figura 13. Sin embargo, esto tiene una desventaja porque la derivación actúa como un divisor de voltaje, lo que resulta en un voltaje aprovechado igual a $V_m/2$. Sin embargo, como se muestra a continuación [20], el circuito puede utilizar ambos lóbulos de la señal de entrada: Considerando la entrada senoidal y la entrada D1 en polarización directa:

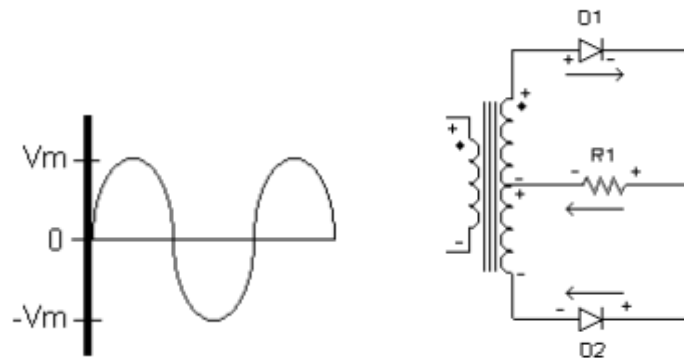


Figura 14 Entrada senoidal y D1 en polarización directa [20]

Como se muestra en la figura 15, observamos que se realiza la polarización directa del diodo D1, lo que permite el flujo de corriente, mientras que se realiza la polarización inversa del diodo D2, lo que funciona como un interruptor abierto y bloquea el flujo de corriente. Además, el voltaje máximo que alimenta a la resistencia R1 es igual a $V_m/2$ [20].

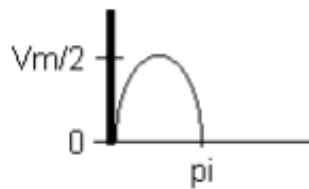


Figura 15 Señal con D1 polarizado en directa y D2 en inversa [20]

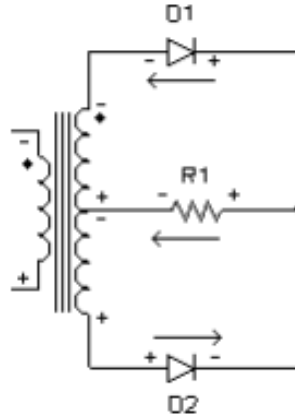


Figura 16 D1 polarizado en inversa y D2 en directa [20]

Como se muestra en la Figura 16, el diodo D1 está polarizado en inversa y, por lo tanto, no habrá flujo de corriente en ese segmento porque funciona como un circuito abierto. Mientras tanto, el diodo D2 está polarizado en directa, lo que posibilita el flujo de corriente en esa sección del circuito. Otra vez, R1 se conecta an un voltaje pico igual a $V_m/2$, y la salida de la señal de esta parte se ve en la figura 17 [20].

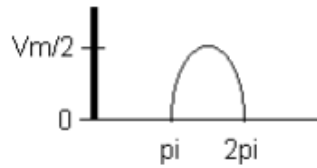


Figura 17 Señal con D1 en polarizado en inversa y D2 en directa [20]

Dado que se trata de un ciclo repetitivo, se obtiene el siguiente voltaje en R1 en la figura 18 [20]:



Figura 18 Forma de onda resultante de un circuito rectificador de onda completa [20]

2.6.3 Circuito puente rectificador

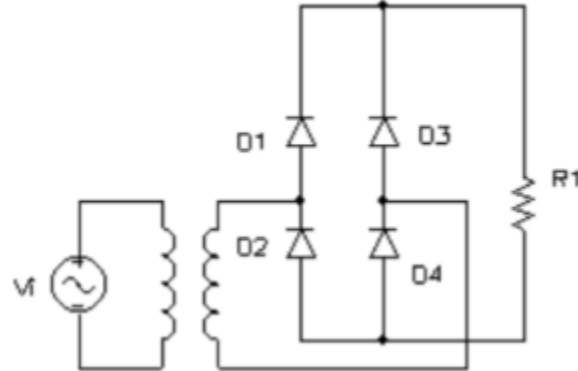


Figura 19 Circuito puente rectificador de onda completa [20]

Los diodos D1 y D4 conducen en el circuito de la figura 19, durante el ciclo positivo de la señal de entrada en ese tiempo los diodos D2 y D3 se encuentran en circuito abierto. Esto se muestra en la figura 20 [20]:

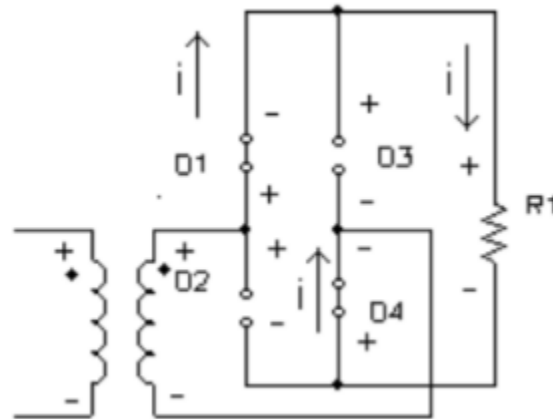


Figura 20 Funcionamiento del circuito para el ciclo positivo de la señal de entrada [20]

Por lo tanto, suponiendo las condiciones ideales de los diodos, el voltaje que se le da a la carga será el mismo que se le da a la señal de entrada [20]. D2 y D3 están polarizados en directa y permiten el flujo, mientras que D1 y D4 están polarizados en inversa y actúan como un circuito abierto para el ciclo negativo de la fuente [20]. La Figura 21 muestra el circuito equivalente.

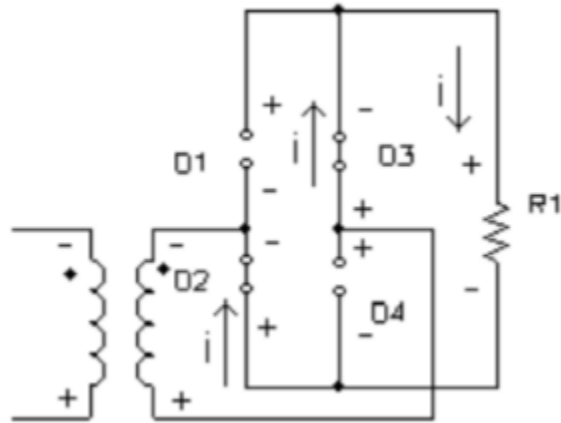


Figura 21 Funcionamiento del circuito para el ciclo negativo de la señal de entrada [20]

Una vez más, la fuente senoidal proporciona el mismo voltaje que refleja la salida del rectificador [20].

En la figura 22, se puede observar las gráficas de voltaje de entrada y salida del rectificador:

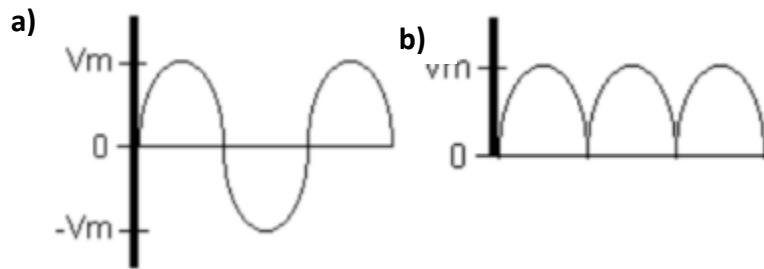


Figura 22 a) Voltajes de entrada y b) de salida del puente rectificador [20]

Este circuito mejora el rectificador con derivación central al utilizar más voltaje, ya que no se presenta el problema de que el voltaje disminuya a la mitad [10].

2.6.4 Circuito multiplicador Villard

El circuito más sencillo fue creado por Paul Ulrich Villard en 1901 [22]. Con dos capacitores y dos diodos en cada etapa, funciona de la siguiente manera: el diodo D1 opera y el diodo D2 no cuando el voltaje V_{RF} es negativo. Los dos diodos cambiarán su configuración si V_{RF} es positivo [23]. Como se ve en la figura 23, en el diagrama Villard, cada etapa está conectada en serie, lo que funciona como conectar varias baterías en cascada y multiplicar el voltaje de salida. En este circuito, cada etapa funciona como un convertidor de voltaje pasivo, generando un voltaje de compensación de DC para la etapa siguiente.

$$V_{DC} = \frac{nV_0}{nR_0 + R_L} \quad (10)$$

Donde V_0 es el voltaje de salida de una sola etapa en circuito abierto, R_0 es la resistencia interna de una sola etapa, R_L es la resistencia de carga y n el número de etapas.

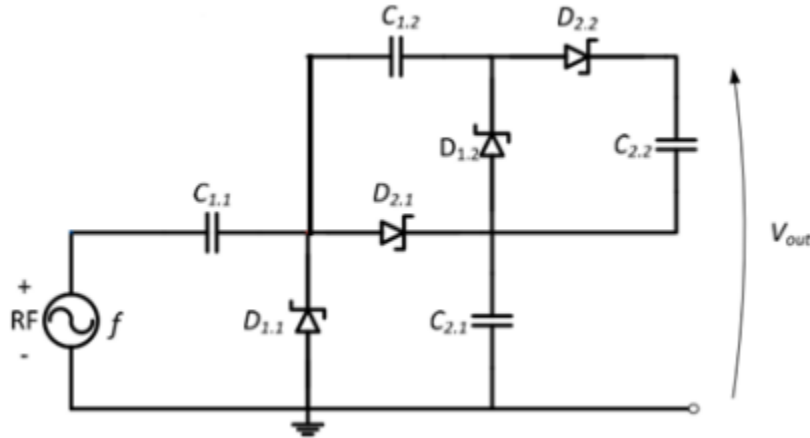


Figura 23 Diagrama de un circuito multiplicador de voltaje Villard [24]

2.6.5 Circuito multiplicador Greinacher

Esta topología fue creada por Heinrich Greinacher en 1913 con la intención de brindar energía a un ionómetro, otro de sus inventos [25]. En el circuito Greinacher, como se muestra en la figura 24, C_1 y D_1 elevan el nivel de voltaje en el nodo B mediante un desplazamiento para arriba, para que D_2 lo rectifique, mientras que C_3 y D_3 desplazan el voltaje hacia abajo en el nodo C permitiendo que D_4 y C_4 lo rectifiquen. Después de lograr el equilibrio, el circuito da a la carga un voltaje y una corriente constantes. La ecuación 11 muestra el voltaje de salida del circuito multiplicador Greinacher [23]:

$$V_{DC} = 2nV_m \quad (11)$$

Donde n representa el número de etapas y V_m denota la amplitud pico-pico del voltaje de entrada.

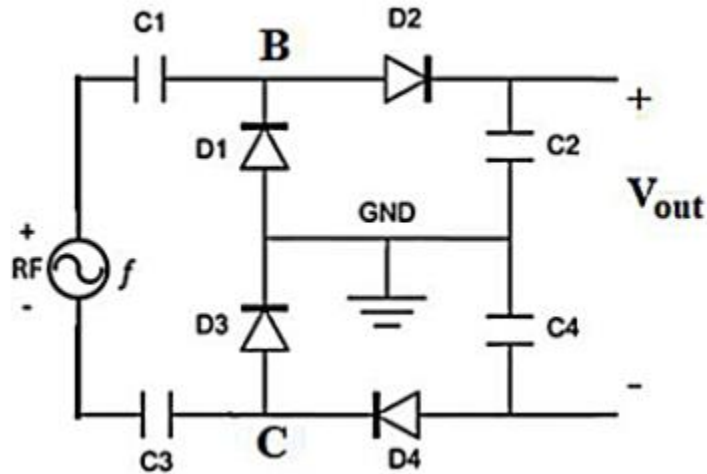


Figura 24 Diagrama del circuito multiplicador Greinacher [23]

2.6.6 Circuito multiplicador Delon

La figura 25 muestra el circuito Delon, también conocido como duplicador de tensión de onda completa o duplicador tipo puente. El capacitor C1 se carga mediante la corriente que fluye a través del diodo D1 con 100 V durante la alternancia positiva. El capacitor C2 se carga a través del diodo D2 con 100 V negativos en la alternancia negativa [25].

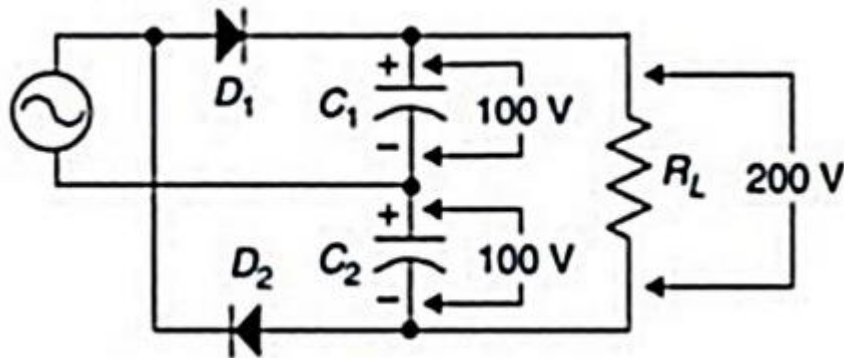


Figura 25 Topología del circuito multiplicador Delton [25].

2.6.7 Circuito multiplicador Cockcroft-Walton

Como se muestra en la figura 26, John Cockcroft y Ernest Walton crearon un tipo complejo de duplicador de voltaje en cascada en 1932. Este circuito podía generar un potencial constante de alrededor de 700 kV, tres veces mayor que el voltaje de entrada utilizado. Sin embargo, el voltaje de acoplamiento disminuye significativamente debido a la presencia de capacitancias de acoplamiento conectadas en serie. La ganancia de voltaje como

resultado de este fenómeno es pequeña, y el capacitor de salida conectado en serie reduce la capacidad de salida del circuito [23].

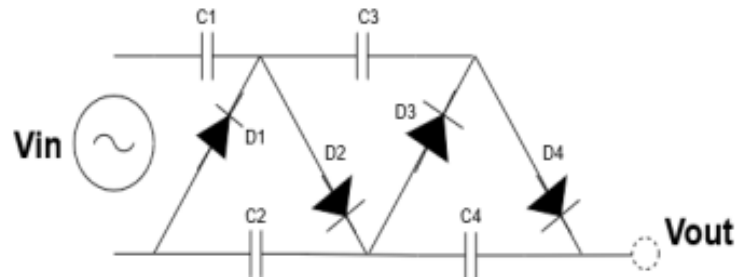


Figura 26 Diagrama del circuito multiplicador Cockcroft-Walton [23].

Cada sección del multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton (CW) está compuesta por dos capacitores y dos diodos. Este multiplicador transforma voltajes bajos en voltajes más altos, actuando como duplicador de voltaje en cada etapa del circuito. La configuración del multiplicador de voltaje CW con cuatro capacitores y cuatro diodos se presente en la figura 26. La rama que involucra los capacitores C2 y C4 indican el número de etapas del multiplicador de voltaje [26]. Durante el primer semiciclo negativo el capacitor C1 se carga a un voltaje pico V_{in} a través del diodo D1 en el multiplicador de voltaje CW.

En el siguiente semiciclo positivo, el diodo D2 carga el capacitor C2 a $2V_{in}$. El capacitor C3 se carga a $3V_{in}$ a través del diodo D3 para el siguiente pico negativo. El diodo D4 finalmente carga el capacitor C4 a $4V_{in}$ para el siguiente semiciclo positivo [27]. La ecuación 10, que es la misma que la del multiplicador Villard [28], especifica el voltaje de salida de un multiplicador CW.

2.6.8 Circuito multiplicador Dickson

Con el fin de mejorar el circuito propuesto por Cockcroft-Walton, John F. Dickson creó el circuito que se muestra en la figura 27. El dispositivo, también conocido como "bomba de carga", requiere pulsos de reloj como entrada para los capacitores de acoplamiento [27].

El funcionamiento del multiplicador de voltaje Dickson y el multiplicador de voltaje CW no es significativamente diferente. Sin embargo, adaptar las impedancias es más sencillo y la topología de capacitores en paralelo facilita los cálculos [29][23]. El diodo D1 carga el capacitor C1 con el voltaje pico de entrada V_{in} durante el primer semiciclo negativo. El capacitor C2 se carga a través del diodo D2 durante el siguiente semiciclo positivo con la

suma del voltaje cargado en C1 y V_{in} . El diodo D3 carga el capacitor C3 durante el siguiente semiciclo negativo con la suma de los voltajes de C1 y C2 y V_{in} . Para el siguiente semiciclo positivo, el diodo D4 carga el capacitor C4 con el voltaje en C3 y el voltaje de entrada V_{in} . La Figura 27 muestra el multiplicador de voltaje Dickson [23]. El voltaje de salida del multiplicador Dickson está dado por la ecuación 12.

$$V_{DC} = 2 * N * (V_{in} - V_t) \quad (12)$$

Donde N es el número de estados, V_{in} es el voltaje de entrada y V_t es el voltaje de conducción de los diodos.

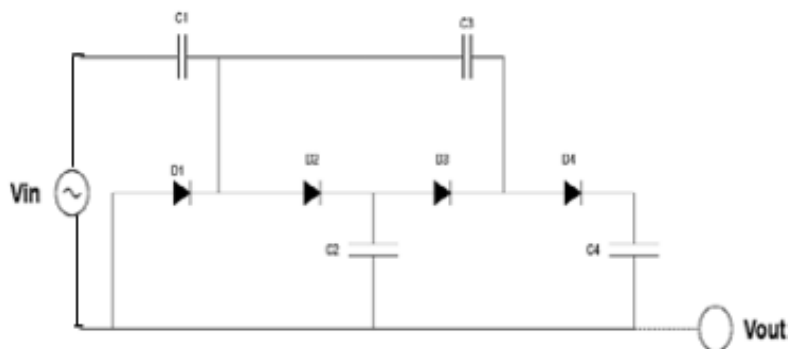


Figura 27 Diagrama circuito multiplicador Dickson [23]

La potencia de salida del multiplicador de voltaje está dada por la ecuación 13.

$$P_{out} = \frac{V_{dc}^2}{R_{carga}} \quad (13)$$

Donde V_{dc} es el voltaje de salida de corriente directa y R_{carga} valor de la resistencia de carga [23].

2.7 Diodo Schottky

Un tipo de diodo semiconductor se crea al unir un metal a un semiconductor. Se conoce también como diodo de barrera Schottky o diodo de barrera superficial. Esta unión se denomina unión de metal-semiconductor o unión de m-semiconductor. El diodo Schottky tiene una baja caída de tensión directa de 0.15 a 0.45 V en comparación con el diodo de unión P-N. Esta característica lo hace adecuado para conmutaciones de alta velocidad y aplicaciones de radiofrecuencia (RF) [30].

Sin embargo, la tensión directa de Schottky es de 0.15-0.45 V, mientras que un diodo de unión PN de silicio normalmente tiene una tensión directa de 0.6-0.75 V. Los diodos Schottky pueden encenderse y apagarse mucho más rápido que los diodos de unión p-n debido a la falta de tensión directa. Además, el diodo Schottky genera menos ruido no deseado que el diodo de unión p-n [30].

El diodo Schottky es muy útil en circuitos de potencia de conmutación de alta velocidad debido a estas dos características. El diodo Schottky se crea al unir un metal, como oro, tungsteno, cromo, platino, molibdeno o algunos otros siliciuros, con un semiconductor de silicio dopado de tipo N. El resultado de esta mezcla es una unión metal-semiconductor o una unión m-s, que es característica del diodo Schottky.

Como se observa en la figura 28, el cátodo representa el lado semiconductor y el ánodo representa el lado metálico en este caso.

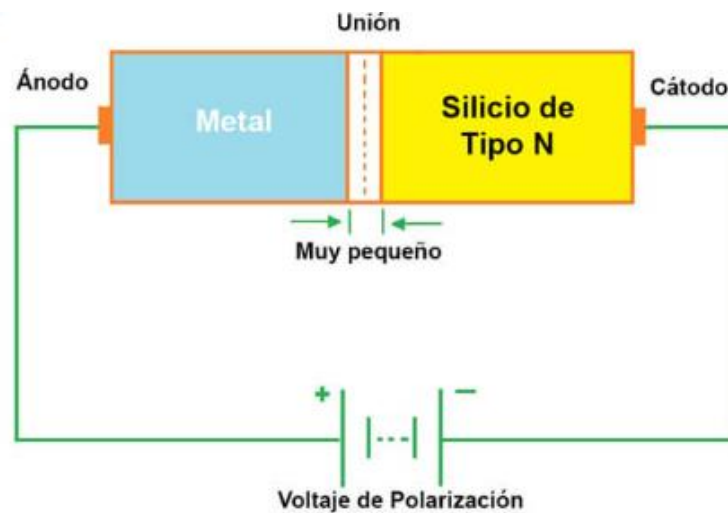


Figura 28 Construcción del diodo Schottky [30].

2.7.1 Diferencia entre diodo Schottky y diodo de unión P-N

La principal diferencia entre el diodo Schottky y el diodo de unión p-n es la siguiente:

Diodo Schottky	Diodo de unión PN
En el diodo Schottky, el semiconductor de tipo n y la placa metálica forman una unión.	Los semiconductores de tipo p y n forman una unión en este diodo.
Es baja la caída de tensión directa.	Es alta la caída de tensión directa.

El tiempo de recuperación inversa y las pérdidas por recuperación inversa son significativamente menores.	Tanto la pérdida como el tiempo de recuperación inversa son altas.
Es un dispositivo unipolar.	Es un dispositivo bipolar.
Solo el movimiento de los electrones conduce la corriente.	El movimiento de electrones y huecos conduce la corriente.
Conmutación rápida.	Conmutación lenta.

Tabla 1 Diferencias entre diodo Schottky y diodo PN.

2.8 Acopladores de impedancia

Ya sean amplificadores, osciladores, mezcladores o cualquier otro tipo de circuito, los acopladores de impedancia son esenciales para maximizar la transferencia de potencia entre ellos. El acoplamiento de antenas y líneas de transmisión es un caso de aplicación significativo. La Figura 29 muestra el concepto fundamental del acoplador: un generador de impedancia $Z_G = R_G + jX_G$ proporciona potencia a una carga de impedancia $Z_L = R_L + jX_L$ es necesario que las impedancias del generador y la carga sean complejas conjugadas, es decir, $Z_G = Z_L^*$, donde Z_L^* es el complejo conjugado de Z_L , es decir $R_L - jX_L$. Esto posibilita que la transferencia de potencia entre generador y carga alcance su nivel máximo.

Como resultado, la función del acoplador es lograr que el generador "perciba" una impedancia compleja igual al conjugado de su impedancia interna, es decir, $Z_G = Z_L^*$, y la impedancia de salida del acoplador debe ser equivalente al complejo conjugado de la impedancia de carga Z_L en el lado de la carga [31].

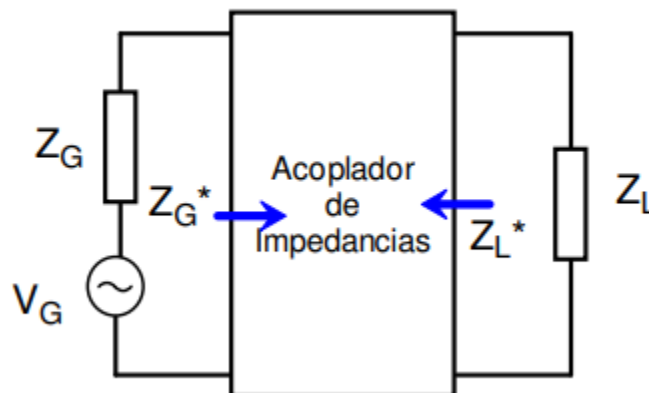


Figura 29 Acoplador genérico de impedancias [31]

2.8.1 Acoplador tipo T

Este tipo de acoplador, configurado como se observa en la figura 30, también se utiliza cuando las impedancias del generador y de la carga son puramente resistivas. Formado por dos acopladores en forma de L conectados espalda con espalda, tiene la propiedad de que el desfaseamiento no depende de la relación entre las resistencias de entrada y salida. En este circuito hay dos Q cargadas; una es la Q de entrada y la otra es la Q de salida. La Q menor debe ignorarse cuando se calcula el ancho de banda del acoplador T, pero la Q del circuito aumenta cuando aumenta el desfaseamiento [31].

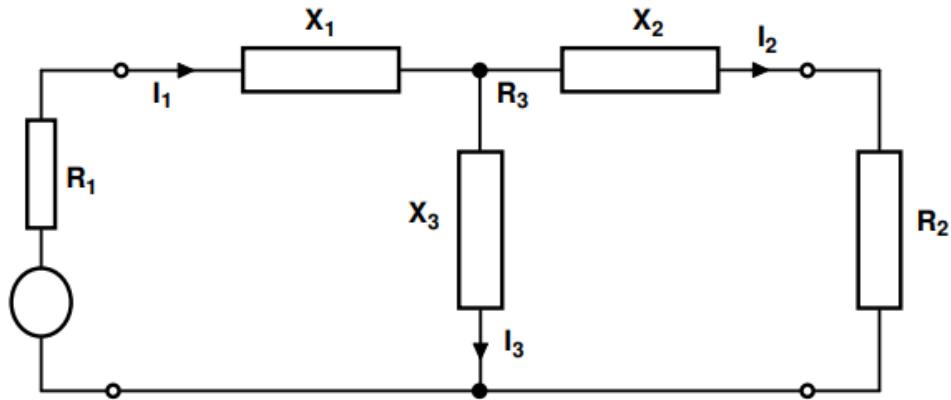


Figura 30 Acoplador tipo T [31]

Ecuación del diseño:

$$X_3 = \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{\sin(\theta)} \quad (14)$$

$$X_1 = \frac{R_1}{\tan(\theta)} - X_3 \quad (15)$$

$$X_2 = \frac{R_2}{\tan(\theta)} - X_3 \quad (16)$$

$$Q_1 = \left| \frac{X_1}{R_1} \right| \quad (17)$$

$$Q_2 = \left| \frac{X_2}{R_2} \right| \quad (18)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{W}{R_1}} \quad (19)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{W}{R_2}} \quad (20)$$

$$I_3 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 - 2I_1I_2 \cos(\theta)} \quad (21)$$

Donde:

La resistencia de entrada que "ve" la red T (Ω) es R_1

La resistencia de salida que "ve" la red T (Ω) se conoce como R_2

I_1 = Corriente de entrada a la red T (A)

I_2 = Corriente de salida de la red T (A)

La corriente que atraviesa el elemento en derivación (A) es I_3

X_1 = Reactancia del elemento de entrada de la red T (Ω)

X_2 = Reactancia del elemento de salida de la red T (Ω)

X_3 = Reactancia de elemento en derivación (Ω)

W = Potencia de entrada (w)

Q_1 = Q con carga a la entrada

Q_2 = Q con carga a la salida

2.8.2 Acoplador π

Este acoplador, ilustrado en la figura 31, también puede considerarse como formado por dos acopladores en L, y las consideraciones sobre la Q con carga para el acoplador T son válidas. Para facilitar los cálculos, en este caso se utilizan susceptancias en lugar de reactancias. R_1 o R_2 siempre son menores que la resistencia en el punto medio de una red π . Además, se considera que cuando Y_3 es positiva y viceversa, una red π es de retardo o fase negativa [31].

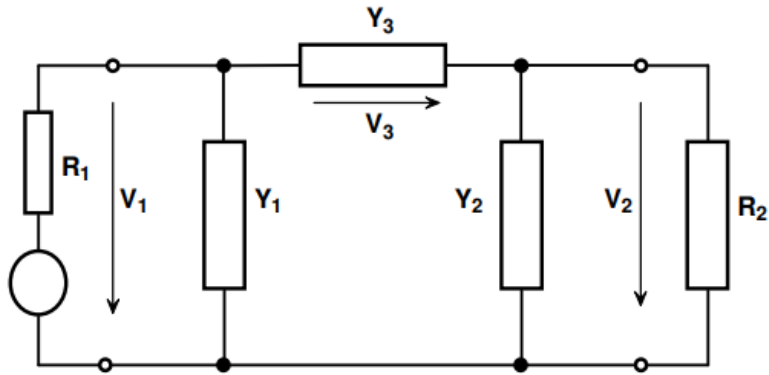


Figura 31 Acoplador tipo π [31]

Ecuaciones de diseño

$$Y_3 = \frac{1}{-\sin(\theta) \sqrt{R_1 R_2}} \quad (22)$$

$$Y_1 = \frac{\tan(\theta)}{R_1 + Y_3} \quad (23)$$

$$Y_2 = \frac{\tan(\theta)}{R_2 + Y_3} \quad (24)$$

$$Q_1 = |R_1 Y_1| \quad (25)$$

$$Q_2 = |R_2 Y_2| \quad (26)$$

$$V_1 = \sqrt{R_1 W} \quad (27)$$

$$V_3 = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(\theta)} \quad (28)$$

Lo mencionado para el acoplador en T es igualmente válido para el acoplador en π .

2.8.3 Acoplador tipo L

Probablemente el tipo más simple de red de adaptación es la sección en L, que utiliza dos elementos reactivos para hacer coincidir una impedancia de carga arbitraria con una línea de transmisión. Hay dos posibles configuraciones para esta red, como se observa en la figura 32. Si la carga normalizada impedancia, $Z_L = \frac{Z_L}{Z_0}$, está dentro del círculo $1 + jx$ en la tabla de Smith, entonces el circuito se debe utilizar el de la Figura 32a. Si la impedancia de carga normalizada está fuera del círculo $1 + jx$ en la tabla de Smith, se debe ocupar el circuito de la figura 32b. El círculo $1 + jx$ es el círculo de resistencia en la tabla de impedancia de Smith para el cual $r = 1$ [32].

Dependiendo de la impedancia de carga, los componentes reactivos pueden ser inductores o condensadores en cualquiera de las configuraciones de la figura 32. Por tanto, existen ocho posibilidades distintas para el circuito de adaptación para diversas impedancias de carga. Si la frecuencia es lo suficientemente baja y/o el tamaño del circuito es lo suficientemente pequeño, se pueden usar capacitores e inductores de elementos agrupados reales. Esto puede ser factible para frecuencias de hasta aproximadamente 1 GHz, aunque los sistemas modernos de circuitos integrados de microondas pueden ser lo suficientemente pequeños como para que se puedan utilizar elementos agrupados también a frecuencias más altas [32].

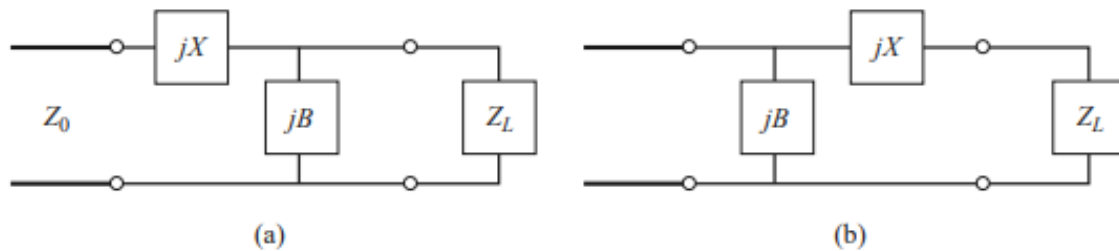


Figura 32 Red de acoplamiento tipo L. a) red para z_L dentro del círculo $1+jx$. b) red para z_L fuera del círculo $1+jx$ [32]

Capítulo 3 Diseño y fabricación de la Rectenna

Introducción

En este capítulo se diseña la rectenna como se ve en la figura 33, así como las ecuaciones y cálculos utilizados para su simulación y construcción, se construye la antena y el circuito rectificador en un sustrato Rogers 4003c con diferentes tipos de grosor para el rectificador el grosor será de 0.55 mm y la antena de 1.55 mm, los componentes a utilizar serán SMD especiales para radiofrecuencia como lo son los capacitores, inductores, diodos Schottky, para hacer la simulación de la antena para su posterior conexión con el rectificador se ocupará el programa HSFF, para la simulación del rectificador y su red de acoplamiento se ocupará el software Advanced Design System (ADS) especial para circuito de radiofrecuencia.

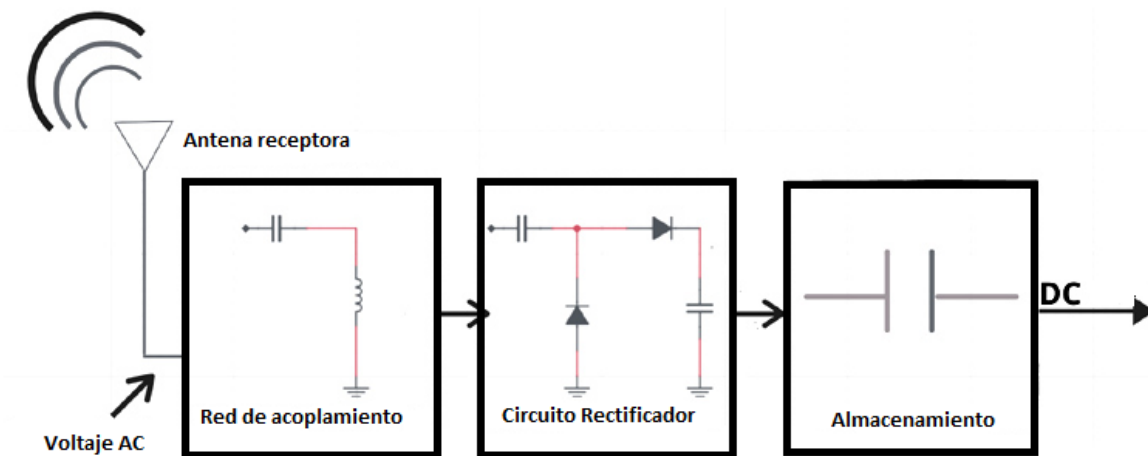


Figura 33 Diagrama a bloques de la rectenna.

3.1 Diseño del rectificador

Para los sistemas de cosechamiento de energía ambiental mediante señales de radiofrecuencia, es esencial la utilización de un componente o aparato que transforme la corriente alterna proveniente de una fuente de energía de radiofrecuencia que está capturando la antena, en corriente continua. Dado que estas señales electromagnéticas ambientales tienen niveles de potencia extremadamente bajos, se hace necesario que el rectificador tenga la

capacidad de captar señales tan débiles entre -20dB a -30 dB (1 mW) o inferiores. Además, dicho aparato debe operar en frecuencias donde se encuentren mayores niveles de potencia, tales son la banda de comunicaciones inalámbricas ISM más en específico a 2.4 GHz.

Debido al voltaje reducido de las señales, es fundamental incorporar un multiplicador de voltaje, cualquiera visto en la sección 2.6 esto con el fin de aumentar el voltaje en su salida y, de esta manera, hacer que sean útiles en aplicaciones en dispositivos de bajo consumo de voltaje, como una red sensores intercomunicados inalámbricamente estos sensores pueden estar los de temperatura o humedad. Esta tarea se puede lograr mediante la inclusión de capacitores y diodos.

La elección del diodo es de gran relevancia, ya que es necesario trabajar a altas frecuencias como es la banda ISM y con niveles de potencia muy bajos. Por lo tanto, el consumo de energía del diodo debe mantenerse en un nivel mínimo para que el sistema de conversión de CA a CC sea, como mínimo, aceptable para aplicaciones de baja potencia.

El diodo que cumple con estas funciones de operar eficientemente en situaciones de bajos niveles de potencia, que su consumo eléctrico es el más reducido posible y que las frecuencias en las que trabaje estén arriba de la banda ISM o por lo menos superiores a 2.4 GHz, son los diodos Schottky ya que presentan las características mencionadas anteriormente y además tienen una capacidad de conmutación rápida y bajos voltajes de umbral.

El diodo Schottky a utilizar en este trabajo serán los BAS 70-04 ya que estos cumple con las características que se mencionaron anteriormente y funcionan en un rango de frecuencias de hasta 15 GHz, a todo esto se opta por ocuparlo ya que fue el único que se encontró en el software de ADS que actualmente aún siguen fabricando y así poder hacer la simulación del rectificador, ya que había otros como los HSMS-285x (que son los más populares en los sistemas de cosechamiento) pero estos actualmente están discontinuados así como muchos otros.

Se requiere hacer un rectificador/multiplicador que trabaje a una frecuencia de 2.4 GHz, por lo cual se eligió el multiplicador de voltaje Dickson ya que en el diagrama los capacitores en paralelo facilitan los cálculos y la adaptación de impedancias es más sencillo. Dado que el multiplicador y el rectificador están integrados en un único circuito como se muestra en la figura 34, se emplea el término "rectificador" para referirse a la configuración combinada.

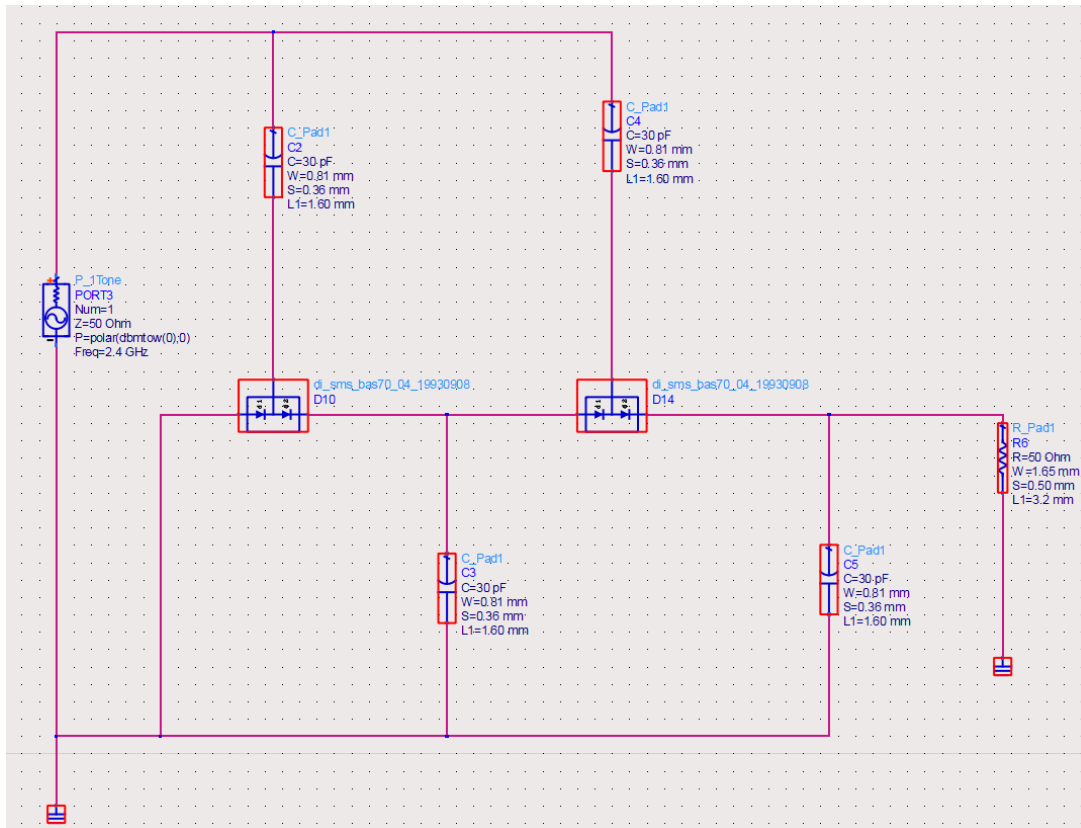


Figura 34 Diagrama circuito rectificador Dickson en el software ADS.

En la figura 34, se representa un multiplicador de voltaje con una relación de 2 etapas de multiplicación. La elección de este factor de multiplicación en lugar de uno mayor obedece a la consideración de que, con cada etapa adicional, aumentan las pérdidas generadas por cada diodo. Por consiguiente, la utilización de numerosos diodos conduce a un sistema poco eficiente en presencia de señales de baja amplitud, ya que la mayor parte de la potencia se disipa en los diodos.

La configuración del rectificador se examina en la sección 2.6.8, y su funcionamiento es el siguiente: el diodo D1 carga el condensador C1 con el voltaje máximo de entrada V_{in} en el primer semiciclo negativo. En el semiciclo positivo siguiente, el capacitor C2 acumula carga a través del diodo D2, sumando de los voltajes almacenados en C1 y V_{in} . En el semiciclo negativo subsiguiente, el diodo D3 carga el condensador C3 con la suma de los voltajes de C1, C2 y V_{in} . Posteriormente en el semiciclo positivo, el diodo D4 carga el capacitor c4 con el voltaje contenido en C3 y el voltaje de entrada V_{in} .

3.2 Construcción del rectificador

Se prosigue con la parte de construcción de la parte más importante de la rectenna la cual es el rectificador, para esto es necesario exportar el layout del circuito como se ve en la figura 35 para que en el software de CorelDRAW haga algunas modificaciones al circuito estas serán poner todas las pistas y componentes en negro ya que se va a imprimir en papel couche como se observa en la figura 36.

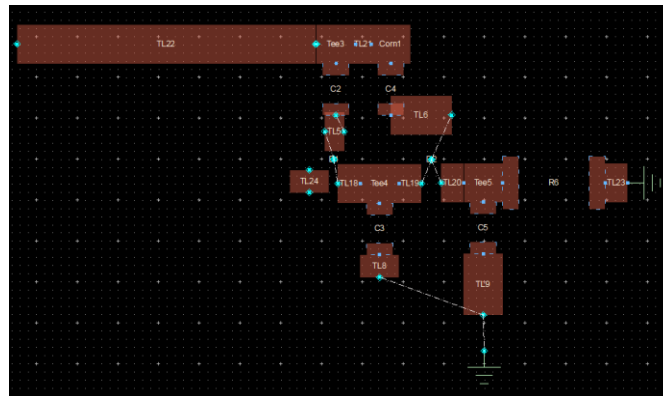


Figura 36 Layout del rectificador



Figura 37 Circuito rectificador con modificaciones en CorelDRAW

Teniendo el circuito impreso en el papel couche se recorta para posteriormente ponerlo encima del sustrato Rogers 4003c (se limpia con agua los dos lados del cobre y luego con alcohol isopropílico) con cinta Diurex y se pasa por una enmicadora (como se ve en la figura 38a) que se encuentra en el laboratorio de caracterización basado en sistemas de microondas en la facultad de ciencias de la electrónica posteriormente de unas cuantas pasadas por la enmicadora la placa se sumerge en agua para poder quitar el Diurex y los accesos de papel couche y la placa quedar como se observa en la figura 38b.



Figura 38 a) Circuito pasando por enmicadora y b) placa después de pasar por enmicadora

Luego, la placa con el rectificador impreso en ella se sumerge en una solución de cloruro férrico. Antes de realizar esta acción, se aplicó tinta negra permanente en los bordes externos de la cara opuesta de la antena y se colocó cinta adhesiva Diurex. Estas medidas se tomaron con el propósito de preservar la región de la placa que contiene cobre cuando se sumerja en el ácido férrico, ya que esa área constituye la tierra del rectificador (figura 39).

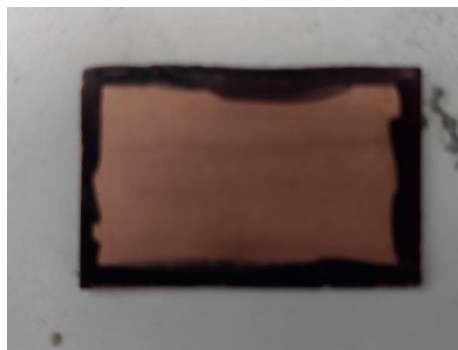


Figura 39 Cara lateral de la placa (tierra)

Finalmente se extrae el circuito y se sumerge en agua para quitar el exceso de ácido férrico y también para poder quitar el Diurex, se quitaron las marcas del plumón permanente con ayuda de acetona después se proceden a soldar los componentes y así se veía el rectificador construido (figura 40).

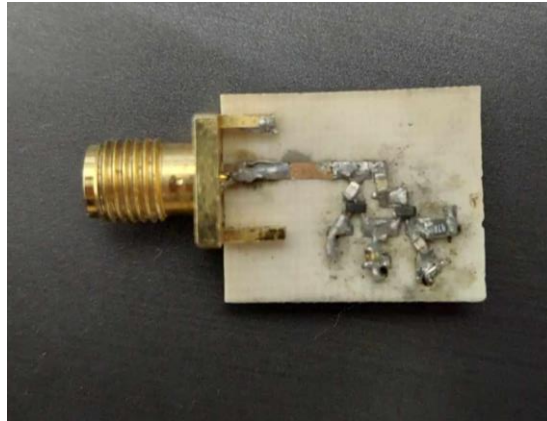


Figura 40 Rectificador con componentes SMD soldados

Una vez construido el rectificador se procede a caracterizar su impedancia de entrada de manera experimental conectándolo al analizador vectorial de redes de la Facultad de Ciencias de la Electrónica situado en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas como se ve en la figura 41.

La impedancia se refiere a la resistencia que surge en un circuito eléctrico cuando se intenta hacer pasar una corriente alterna a través de él. A diferencia de la resistencia en un circuito de corriente continua, la impedancia se caracteriza por estar representada mediante números complejos, es decir, compuesta por una parte imaginaria y una parte real, en los cuales la parte real es la resistencia eléctrica, mientras que la parte imaginaria se compone de las reactancias.

El valor impedancia es importante porque permitirá diseñar una red de acoplamiento tipo L.



Figura 41 Rectificador conectado al VNA

En la pantalla del VNA podremos ver la impedancia de entrada situada en la parte superior izquierda de color amarillo como se observa en la figura 42.

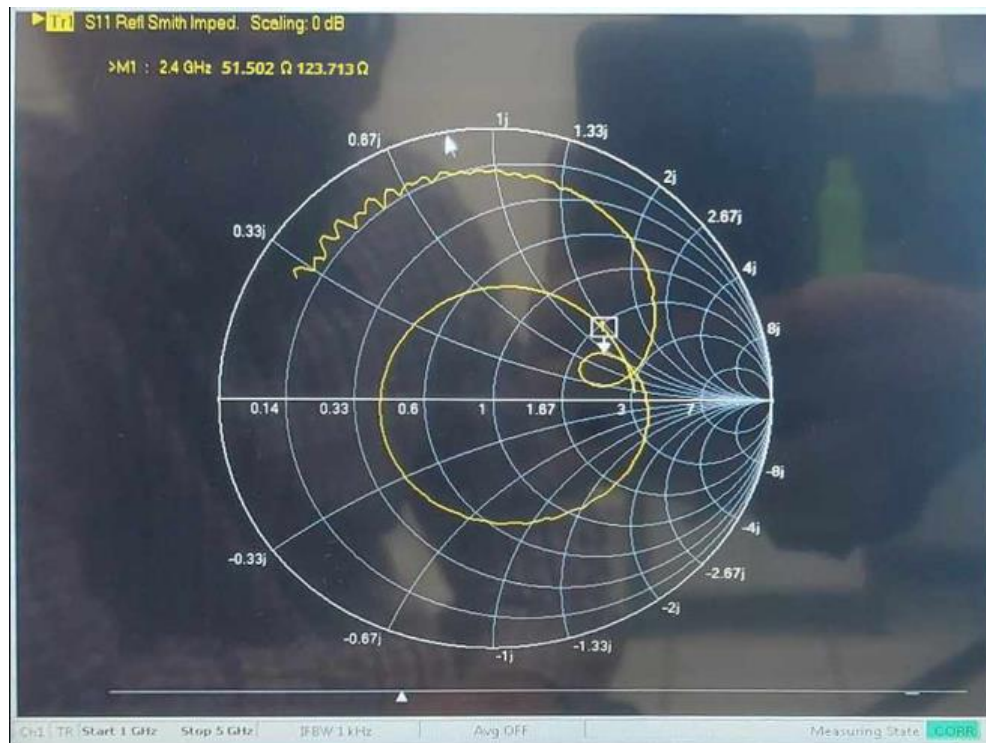


Figura 42 Impedancia de entrada mostrado en el VNA

En la figura 41 notamos que nos arroja la impedancia de entrada en la parte superior izquierda con una frecuencia de 2.4 GHz, la impedancia de entrada para la parte real es de 51.502 Ω y la parte imaginaria es de $j123.713 \Omega$ con esto ya podemos diseñar la red de acoplamiento tipo L.

3.3 Diseño de la red de acoplamiento tipo L

La impedancia que se ve dentro de la red de adaptación, seguida de la impedancia de carga, debe ser igual a Z_0 para una condición de impedancia adaptada [32]:

$$Z_0 = jX + \frac{1}{jB + 1/(R_L + jX_L)} \quad (29)$$

Reordenando y separando en partes reales e imaginarias se obtienen dos ecuaciones para las dos incógnitas, X y B [32]:

$$B(XR_L - X_L Z_0) = R_L - Z_0 \quad (30)$$

$$X(1 - BX_L) = BZ_0R_L - X_L \quad (31)$$

Resolviendo la ecuación 31 para X y sustituyendo la ecuación 31 se obtiene una ecuación cuadrática para B. La solución es [32]:

$$B = \frac{X_L \pm \sqrt{R_L/Z_0 \sqrt{R_L^2 + X_L^2} - Z_0R_L}}{R_L^2 + X_L^2} \quad (32)$$

Tenga en cuenta que como $R_L > Z_0$, el argumento de la segunda raíz cuadrada siempre es positivo. Entonces la reactancia en serie se puede encontrar como [32]:

$$X = \frac{1}{B} + \frac{X_L Z_0}{R_L} - \frac{Z_0}{BR_L} \quad (33)$$

La ecuación (32) indica que son posibles dos soluciones para B y X. Ambas soluciones son físicamente realizables ya los valores positivos como los negativos de B y X son posible (X positivo implica un inductor y X negativo implica un condensador, mientras que positivo B implica un condensador y B negativo implica un inductor) [32].

Ahora veremos el caso cuando $R_L < Z_0$. La admitancia vista mirando hacia la red coincidente, seguida de la impedancia de carga, debe ser igual a $\frac{1}{Z_0}$ para una condición de impedancia adaptada [32]:

$$\frac{1}{Z_0} = jB + \frac{1}{R_L + j(X + X_L)} \quad (34)$$

Reordenando y separando en partes reales e imaginarias se obtienen dos ecuaciones para las dos incógnitas, X y B [32]:

$$BZ_0(X + X_L) = Z_0 - R_L \quad (35)$$

$$(X + X_L) = BZ_0R_L \quad (36)$$

Resolviendo para X y B obtenemos [32]:

$$X = \pm \sqrt{R_L(Z_0 - R_L)} - X_L \quad (37)$$

$$B = \pm \frac{\sqrt{(Z_0 - R_L)/R_L}}{Z_0} \quad (38)$$

Ahora veremos las siguientes ecuaciones para calcular el valor del inductor y capacitor [32].

$$C = \frac{B}{2\pi f Z_0} \quad (39)$$

$$L = \frac{X Z_0}{2\pi f} \quad (40)$$

En mi caso veo que $R_L > Z_0$ ya que mi $r_L = 51.502 \Omega$ y $Z_0 = 50\Omega$ así que ocupare la red de acoplamiento de la figura 32a vista en la sección 2.8.3. Sustituimos valores de las ecuaciones 32 y 33 teniendo en cuenta que $x_L = 123.713 \Omega$, recordando que $X_L = \frac{x_L}{Z_0} =$

$$\frac{123.713}{50} = 2.47426, R_L = \frac{r_L}{Z_0} = \frac{51.502}{50} = 1.03004 \text{ y } z_0 = \frac{Z_0}{Z_0} = \frac{50}{50} = 1.$$

$$B = \frac{2.47426 \pm \sqrt{1.03004/1 \sqrt{1.03004^2 + 2.47426^2 - 1(1.03004)}}}{1.03004^2 + 2.47426^2} = 0.694 \text{ siemens} \quad (41)$$

Ahora sustituyo los valores de la ecuación 33

$$X = \frac{1}{0.694} + \frac{2.47426(1)}{(1.03004)} - \frac{1}{0.694(1.03004)} = 2.44 \text{ ohms} \quad (42)$$

Sustituyo los valores para calcular tanto el capacitor como el inductor de las ecuaciones 39 y 40.

$$C = \frac{0.694}{2\pi(2.4 * 10^9)50} = 921.698fF = 0.92 pF \quad (43)$$

$$L = \frac{2.44(50)}{2\pi(2.4 * 10^9)} = 8.103 nH \quad (44)$$

Teniendo los valores del capacitor e inductor buscamos valores comerciales cercanos a estos ya que no existen componentes tan específicos con estos valores. Encontrando así valores

para el capacitor de $C = 0.85 \text{ pF}$ y para el inductor de $L = 7.9 \text{ nH}$. Ahora en el simulador ADS agrego estos valores como se observa en la figura 43.

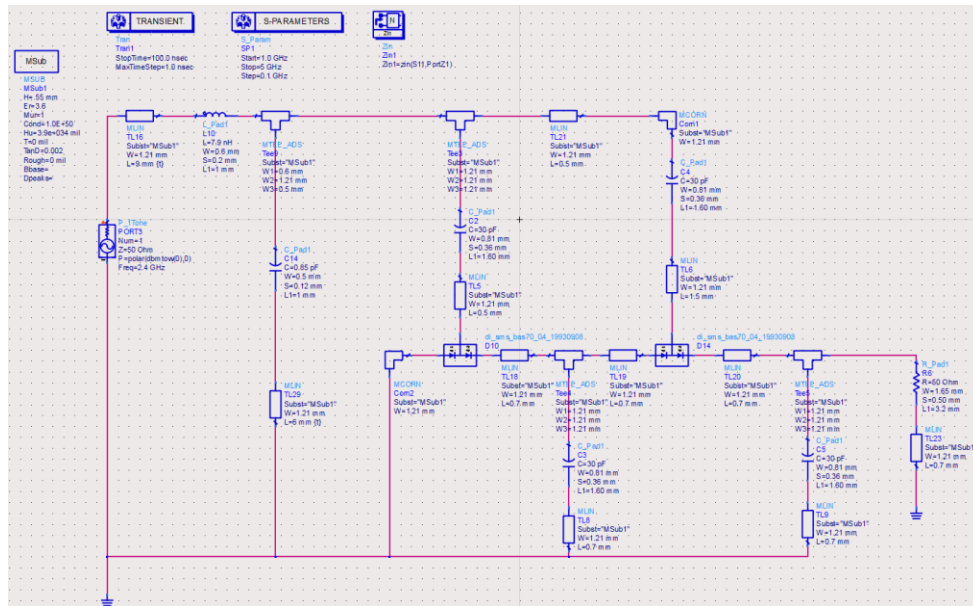


Figura 43 Rectificador con red de acoplamiento en ADS.

Se verifica que esta red de acoplamiento en verdad este acoplada, simulando el circuito lo cual arrojará la siguiente información de la figura 44.

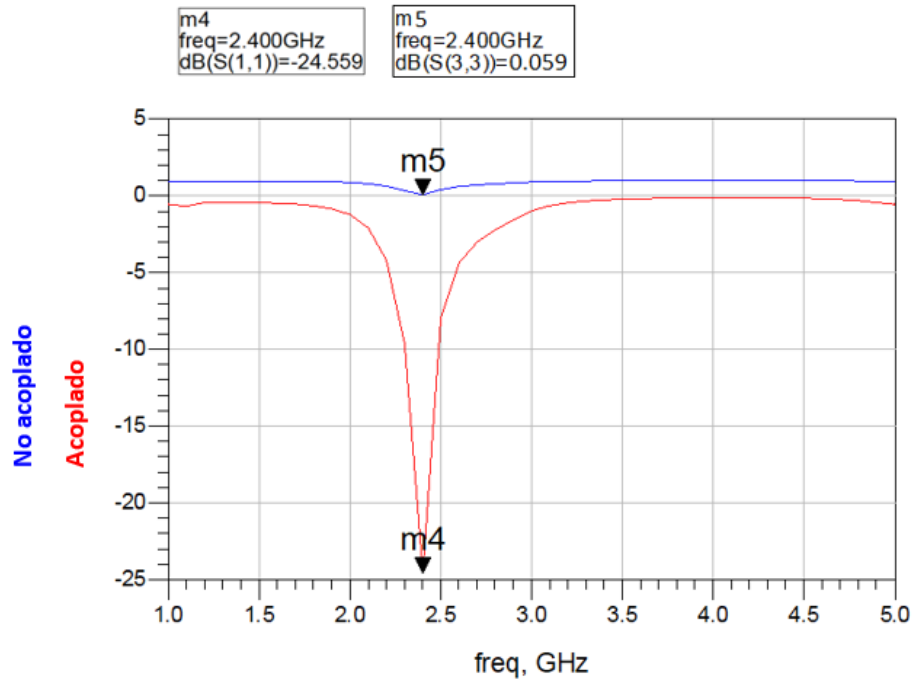


Figura 44 Coeficiente de reflexión del rectificador simulado, acoplado y no acoplado.

El coeficiente de reflexión o parámetro S11 que se ve en la figura 44 se nota una la línea azul la cual muestra que el circuito esta desacoplado, en cambio la línea roja muestra el correcto acoplamiento a la frecuencia de 2.4 GHz con un valor de -24.559 dB, Obtenido la simulación se procede a la construcción de esta red de acoplamiento.

3.4 Construcción de la red de acoplamiento con el rectificador

Se siguen los pasos de construcción de la sección 3.2 ya que es el mismo método desde la exportación del layout para modificar el circuito en CorelDRAW hasta la impresión del circuito en papel couche y pasar el circuito por la enmicadora ya que solo se agregaron los dos componentes que son el capacitor e inductor. El circuito final es el siguiente (figura 45).

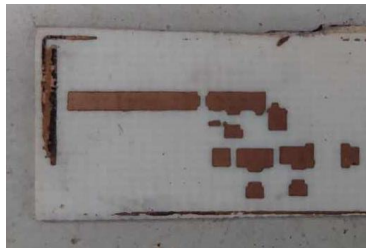


Figura 45 Circuito Rectificador con red de acoplamiento tipo L construido.

Se procede a soldar los componentes estos son los capacitores, el inductor, diodos schottky y la resistencia, como se muestra en la figura 46.

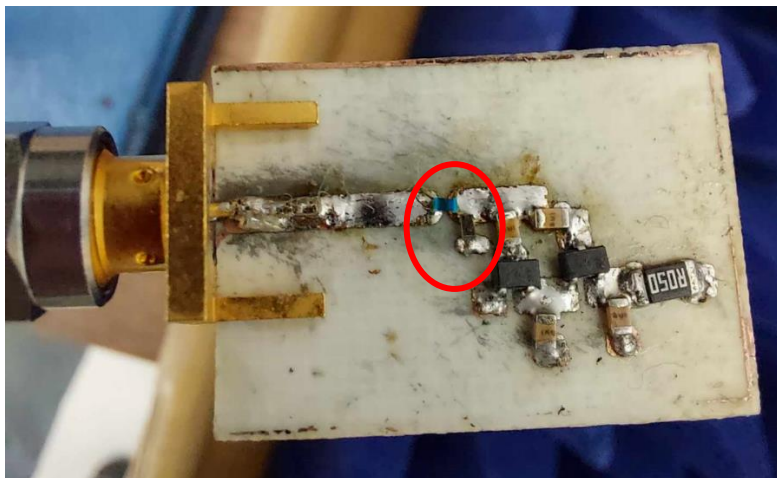


Figura 46 Rectificador con red de acoplamiento y componentes soldados.

Se conecta el rectificador al VNA para saber si este está acoplado a 2.4 GHz. Como se observa en la figura 47.

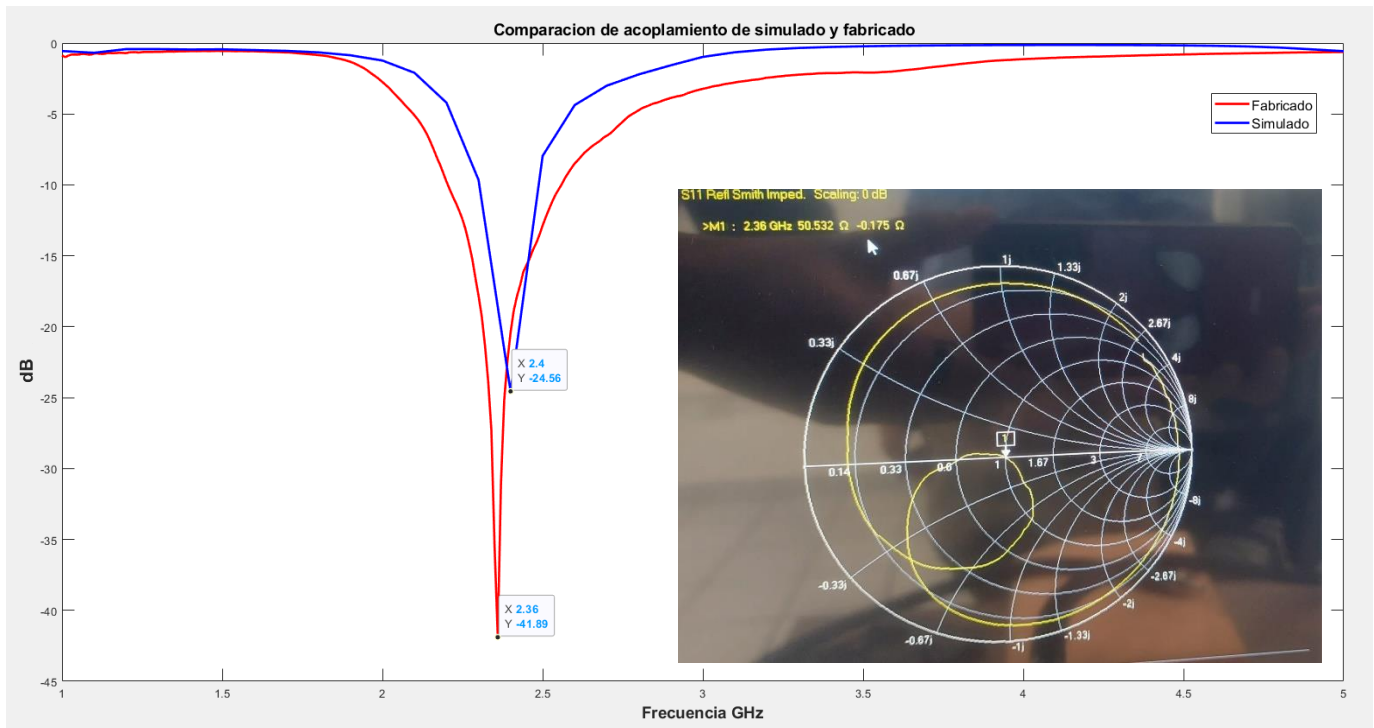


Figura 47 parámetro de dispersión S del rectificador construido y simulado.

En la figura 47 podemos notar como el parámetro S_{11} se recorrió dando una frecuencia de 2.36 GHz, se desplazó unos pocos MHz pero aun es funcional ya que está cerca del valor de 2.4 GHz ya que el ancho de banda del rectificador si llega a 2.4 GHz por lo que si va a capturar esa señal, notamos que el rectificador cumple con la necesidad de que tenga la capacidad de captar señales tan débiles como -30 dB y esta las supera, incluso las mejoro ya que este rectificador está a -41.89 dB lo se significa que la transferencia de energía será mejor que la simulada ya que en la simulación llegaba a los -24.55 dB como se puede notar. Tomando en cuenta esta frecuencia se diseñará la antena a 2.36 GHz para que pueda realizar una buena conversión de corriente alterna a directa. También se volvió a medir la impedancia para asegurar que el rectificador este acoplado a 50 ohms como se muestra en la carta Smith de la figura 47.

3.5 Diseño de la antena

Con base a los resultados de la figura 47, la cual es la frecuencia de funcionamiento del rectificador, se diseña y construye una antena de 2.36 GHz para así lograr la transferencia de potencia más eficiente entre la antena y el circuito rectificador, se propone diseñar una antena rectangular como se muestra en la figura. 48. Para lograr una frecuencia ideal de trabajo igual al del rectificador construido en la figura 47, se utilizará el software HFSS para diseñar geoméricamente la antena microstrip tipo parche.

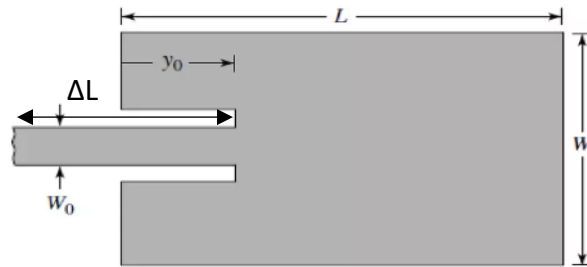


Figura 48 Diseño geométrico de la antena microstrip [4]

Se empleó el material dieléctrico Rogers 4003c. Este material exhibe resistencia al fuego y a la humedad, y la línea de microcinta reduce las dimensiones, el peso y el costo de la antena.

La frecuencia de operación y el sustrato que voy a utilizar para construir la antena se especifican, asignándose los valores correspondientes de: $f_r = 2.36$ GHz es la frecuencia de trabajo de la antena. $\epsilon_r = 3.55$ es la permitividad eléctrica del sustrato y $h = 1.52$ mm será la altura del sustrato.

Los parámetros clave para la construcción de la antena se determinan mediante estas ecuaciones [6].

Ancho del parche de la antena

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (45)$$

Constante dieléctrica efectiva

$$\epsilon_{reff} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (46)$$

Extensión de longitud

$$\Delta L = 0.412 * h * \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (47)$$

Longitud efectiva del elemento conductor

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (48)$$

Longitud del elemento radiador

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (49)$$

Donde

C= velocidad de la luz

Se ha optado por utilizar la técnica de alimentación insertada, que se considera una de las más efectivas. Además, este método facilita la regulación de la impedancia de entrada de la antena. El nivel de impedancia en la entrada del parche se puede ajustar mediante la modificación de la longitud del inserto. Las ecuaciones para calcular el inserto de alimentación se presentan a continuación [6].

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (50)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (51)$$

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (K_0 h)^2 \right] \quad (52)$$

Resistencia de entrada resonante

$$R_{in}(y_0) = \frac{1}{2(G_1)} \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} \right) = 9.5 \text{ mm} \quad (53)$$

Sustituiremos los valores en cada una de las ecuaciones 45 a 49 para poder sacar los parámetros requeridos para la antena.

$$W = \frac{3 * 10^8}{2(2.3610^9)} \sqrt{\frac{2}{3.55 + 1}} = 42.13 \text{ mm} \quad (54)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{(3.55 + 1)}{2} + \frac{(3.55 - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{1.52 * 10^{-3}}{42.13 * 10^{-3}} \right]^{-1/2} = 3.34 \quad (55)$$

$$\Delta L = 0.412 * (1.52 * 10^{-3}) * \frac{(3.34 + 0.3) \left(\frac{42.13 * 10^{-3}}{1.52 * 10^{-3}} + 0.264 \right)}{(3.34 - 0.258) \left(\frac{42.13 * 10^{-3}}{1.52 * 10^{-3}} + 0.8 \right)} = 0.00072 \text{ mm} \quad (56)$$

$$L_{eff} = \frac{3 * 10^8}{2(2.36 * 10^9) \sqrt{3.34}} = 0.34 \text{ mm} \quad (57)$$

$$L = 0.34 - 2(0.00072) = 33.33 \text{ mm} \quad (58)$$

Sin embargo, para lograr el acoplamiento entre el parche y la línea de alimentación, se requiere la incorporación de un transformador lambda cuartos.

$$L_{acop} = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f} = \frac{3 * 10^8}{\sqrt{3.34}(2.36 * 10^9)} = 17.38 \text{ mm} \quad (59)$$

Para calcular el ancho de una línea de microcinta, así como el transformador de lambda cuartos (W_0) se propone la siguiente formula [6]:

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

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{3.55 + 1}{2} + \frac{3.55 - 1}{3.55 + 1} \left(\frac{0.23 + 0.11}{3.55} \right)} = 0.1343 \quad (61)$$

Donde A es la variable para el cálculo del ancho del adaptador.

$$B = \frac{60\pi^2}{z_0\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{3.55}} = 6.28 \quad (62)$$

Es fundamental señalar que esta variable, así como la variable A empleada en el cálculo del ancho del adaptador, no poseen un significado teórico intrínseco. Dichas variables son simplemente instrumentos utilizados para calcular los anchos tanto de la línea como del adaptador [6].

$$W_0 = \frac{2h}{\pi} \left(B - 1 - \ln(2B - 1) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \right) (\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.11}{\epsilon_r}) \right) \quad (63)$$

$$W_0 = \frac{2(1.52 * 10^{-3})}{\pi} \left(6.28 - 1 - \ln(2(6.28) - 1) + \left(\frac{(3.55 - 1)}{2(3.55)} \right) (\ln(6.28 - 1) + 0.39 - \frac{0.11}{3.55}) \right) = 3.4 \text{ mm} \quad (64)$$

La antena final con los cálculos obtenidos se ve en la figura 49:

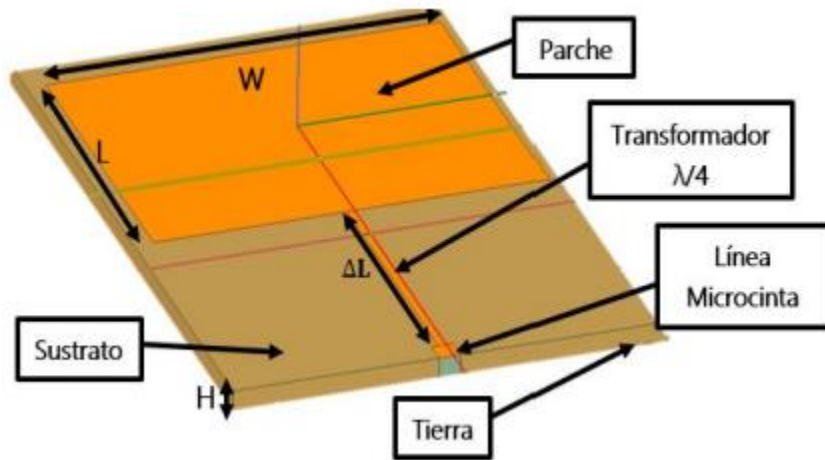


Figura 49 Antena microstrip

La tabla 2 se presentan las medidas obtenidas de la antena para una mejor visualización.

Elemento	Parámetro	Medidas (mm)	Material
Sustrato	W	48	Rogers 4003c
	L	67	
	h	1.52	
Parche	W	42.13	Rogers 4003c
	L	33.33	
Tierra	W	48	
	L	67	
Transformador	W	3.4	
	L	17.38	
Lina Microcinta	W	3.4	
	L	1.52	

Tabla 2 Parámetros antena microstrip.

Después de obtener las dimensiones de nuestra antena, procedemos a realizar su modelado utilizando el software ANSYS HFSS como se observa en la figura 50.

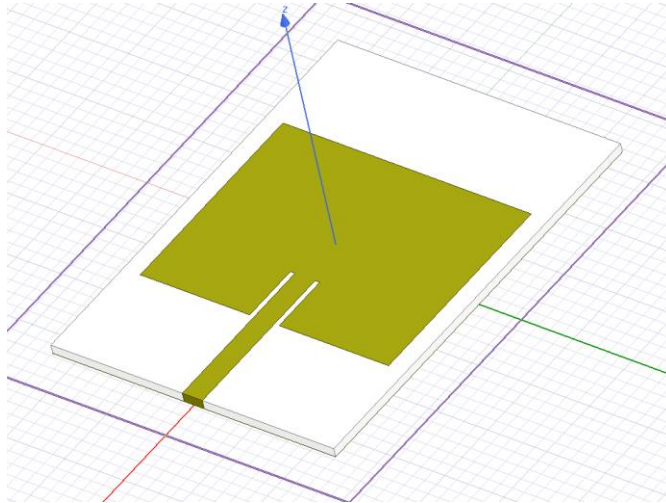


Figura 50 Antena simulada en HFSS.

El resultado del parámetro S_{11} (Figura 51) muestra un coeficiente de reflexión aceptable conforme a los estándares para la frecuencia de 2.36 GHz. Además, se observa un desplazamiento en la frecuencia ya que la antena esta resonando a 2.34 GHz.

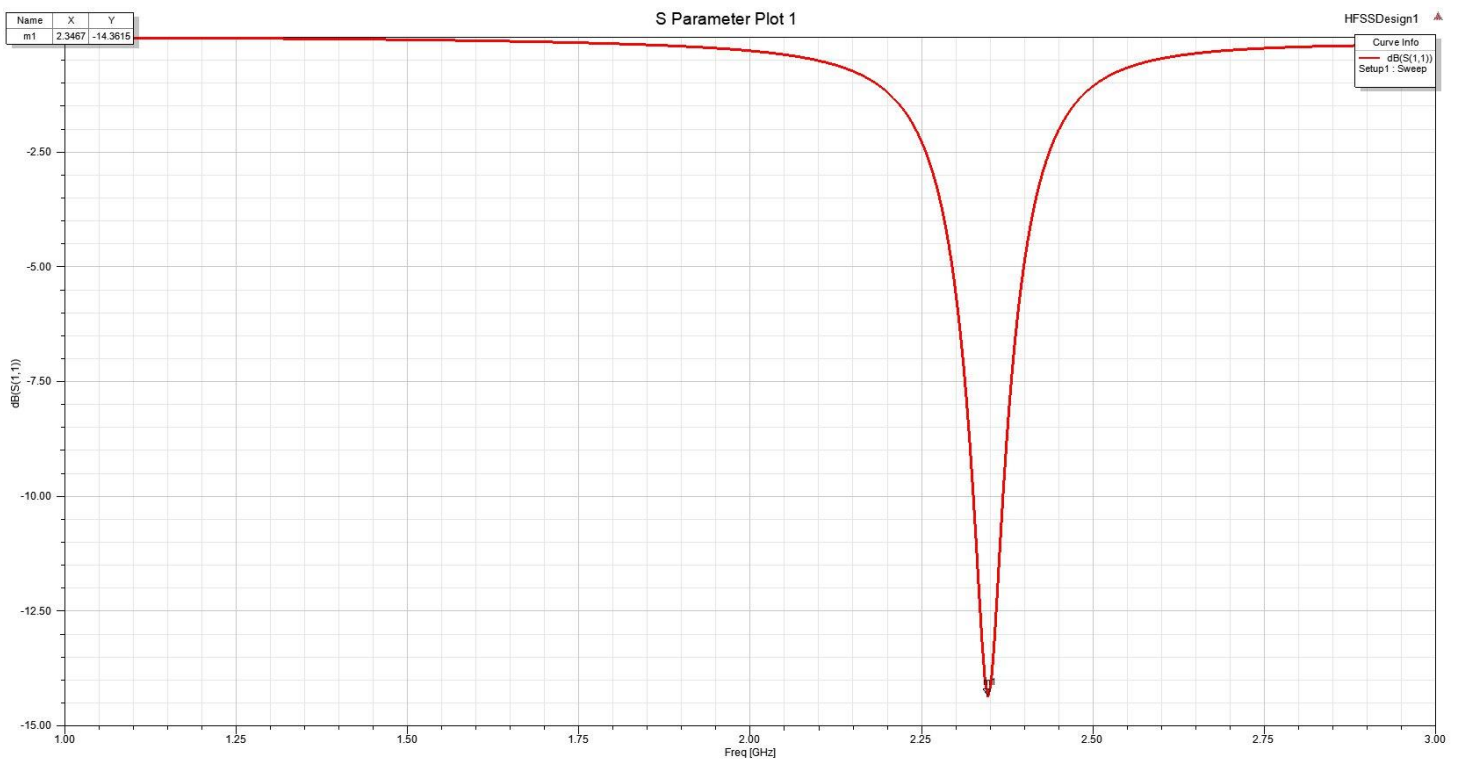


Figura 51 Respuesta del coeficiente de reflexión S_{11} de la antena.

Con el objetivo de lograr que la antena resuene en la frecuencia esperada, se ha optado por realizar un análisis paramétrico sobre las dimensiones del parche. Esto implica tomar las medidas ya calculadas y ajustarlas para alcanzar la frecuencia deseada.

La longitud de una onda electromagnética generalmente disminuye con la frecuencia y viceversa. Este mismo principio se aplica en la teoría de antenas, incluyendo las antenas de microcinta.

En la tabla 3 se presentan los valores modificados y optimizados de la antena.

Elemento	Parámetro	Medidas (mm)	Material
Sustrato	W	48	Rogers 4003c
	L	67	
	h	1.52	
Parche	W	41.78	Rogers 4003c
	L	33.08	
Tierra	W	48	
	L	67	
Transformador	W	3.4	
	L	17.38	
Lina Microcinta	W	3.4	
	L	1.52	

Tabla 3 Parámetros de la antena mejorados.

A continuación, se observa en la figura 52, se observa una mejor respuesta del parámetro S_{11} con una mejora en la frecuencia de resonancia ya que ahora si está a 2.36 GHz y -13.65 dB, los decibeles están correctos ya que para una buena construcción de una antena debe de estar por debajo de -10 dB ya que la antena puede recibir 70% de la señal.

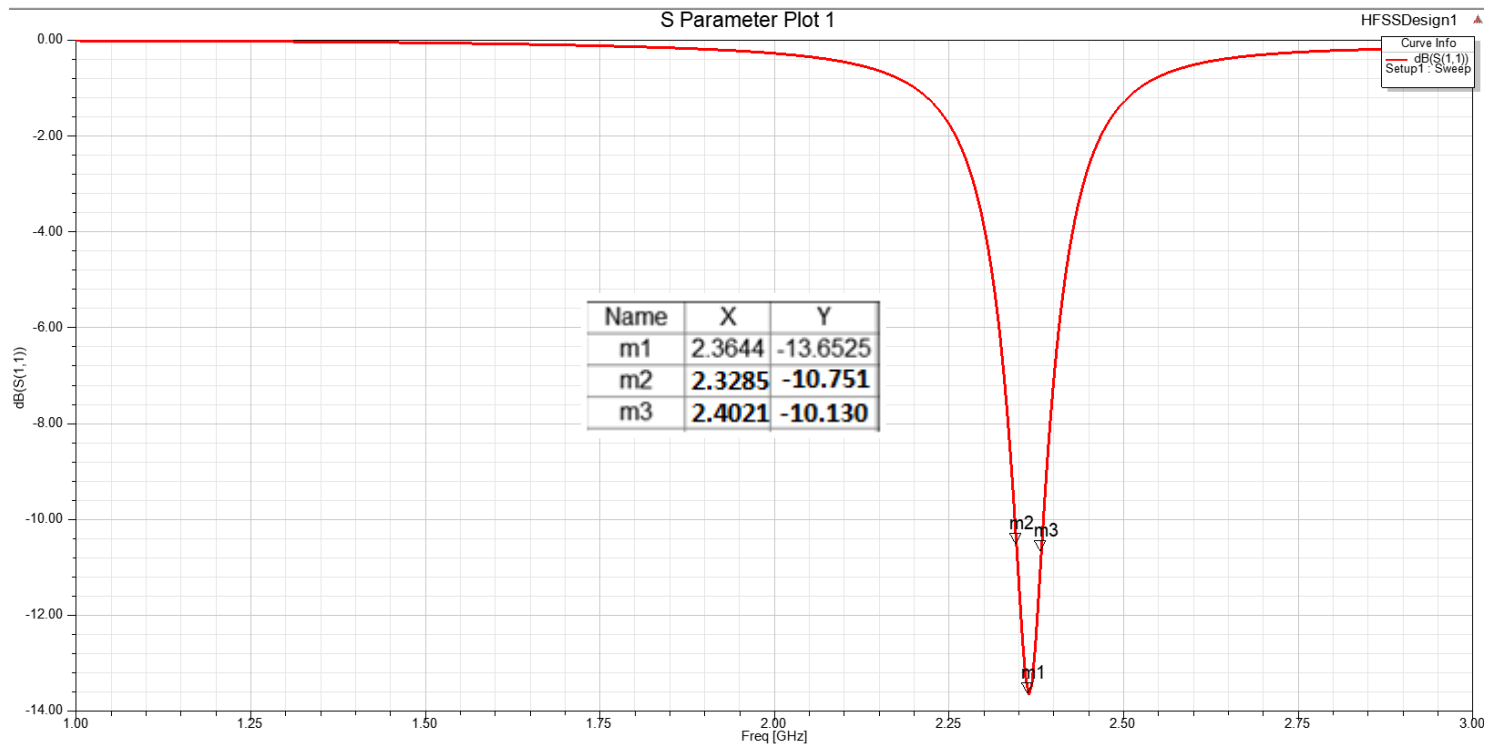


Figura 52 Respuesta del coeficiente de reflexión s_{11} de la antena mejorada.

En la figura 52 se observa que la antena va a reflejar todas las frecuencias excepto la deseada que es de 2.36 GHz. Es crucial considerar el ancho de banda, y al utilizar los marcadores m2 y m3, se puede apreciar un ancho de banda de aproximadamente 80 MHz a -10dB. Este resultado representa un ancho de banda significativo.

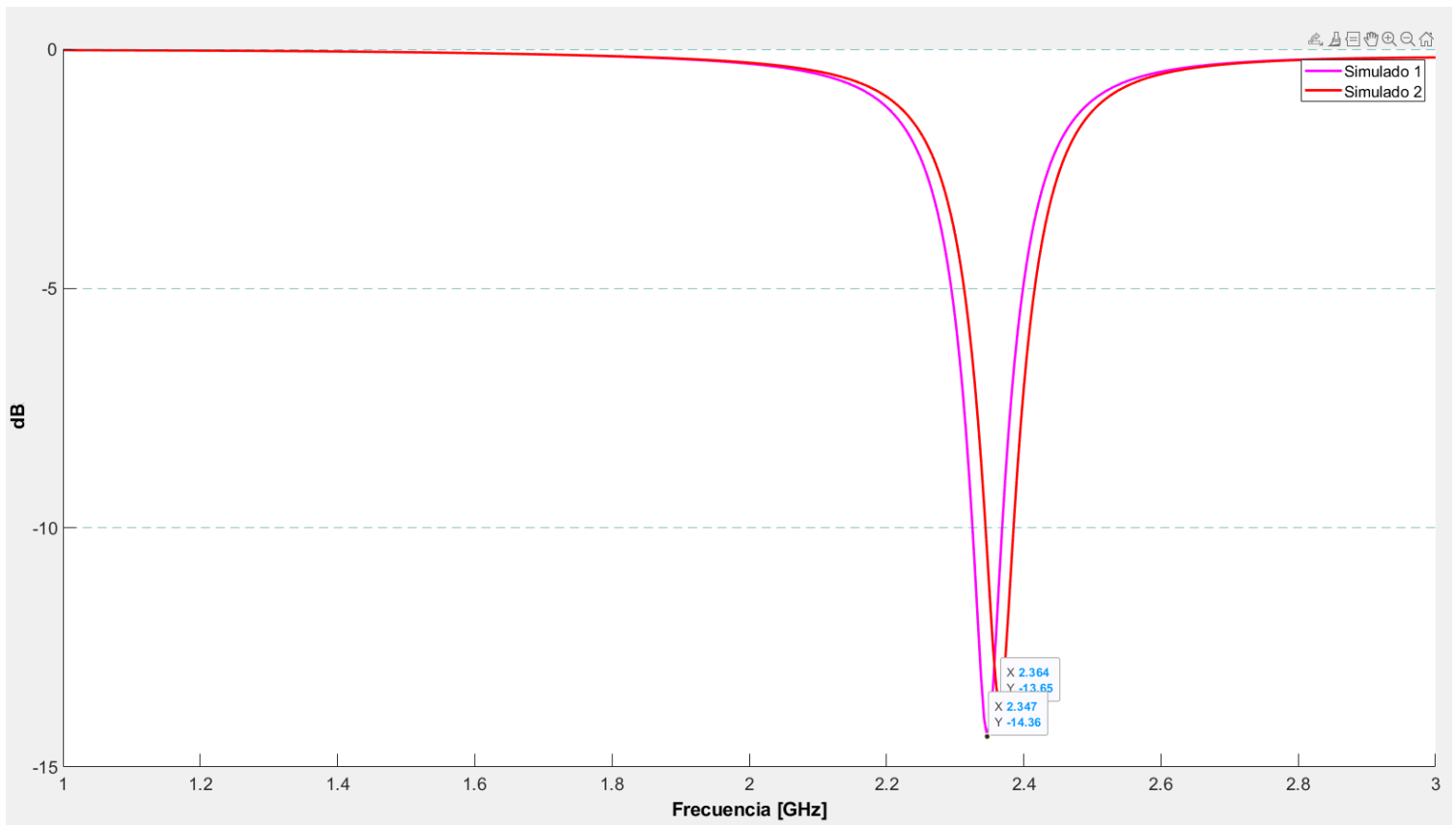


Figura 53 Comparación de ambos coeficientes de reflexión

En la figura 53 se logra observar cómo es la mejora ya que esta sí está acoplada a la frecuencia requerida que es de 2.36 GHz y no está recorrida así que el análisis paramétrico sí funcionó como se esperaba.

3.6 Construcción de la antena

Para la construcción de esta antena se ocuparon los mismos pasos que en la sección 3.2 pero modificando algunos pasos, en principio se siguen las mismas instrucciones la cual es exportar del layout de la antena desde el programa HFSS para su posterior modificación en el software CorelDRAW, para su impresión opte por cambiar el tipo de papel por uno que facilita la construcción de la antena el cual es el papel en corte vinil (figura 54).

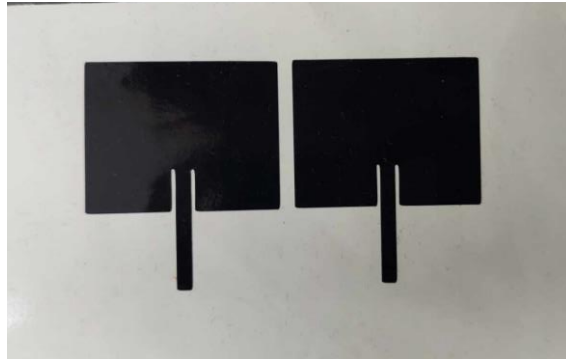


Figura 54 Antena impresa en papel corte vinil

Lo siguiente es pegar la antena (ya que este es una estampa) en el sustrato rogers 4003c, se aplica tinta negra permanente en los bordes externos de la cara opuesta de la antena y se colocó cinta Diurex para que al momento de sumergirla en el cloruro férrico este no quite esa parte de la cara. Posteriormente se saca la antena del cloruro, se limpia y se retira la estampa (la antena) y así se vera la antena final (figura 55).

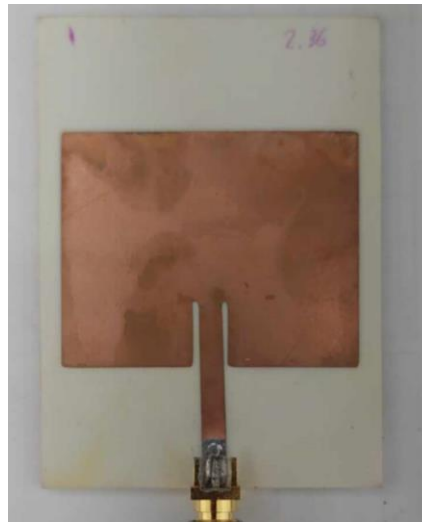


Figura 55 Antena construida

Se conecto al analizador vectorial de redes (VNA) para saber el valor de la frecuencia en que la antena esta resonando por lo que se hizo una comparación con el valor simulado para saber si esta antena fabricada esta resonando a la misma frecuencia de 2.36 GHz como se observa en la figura 56.

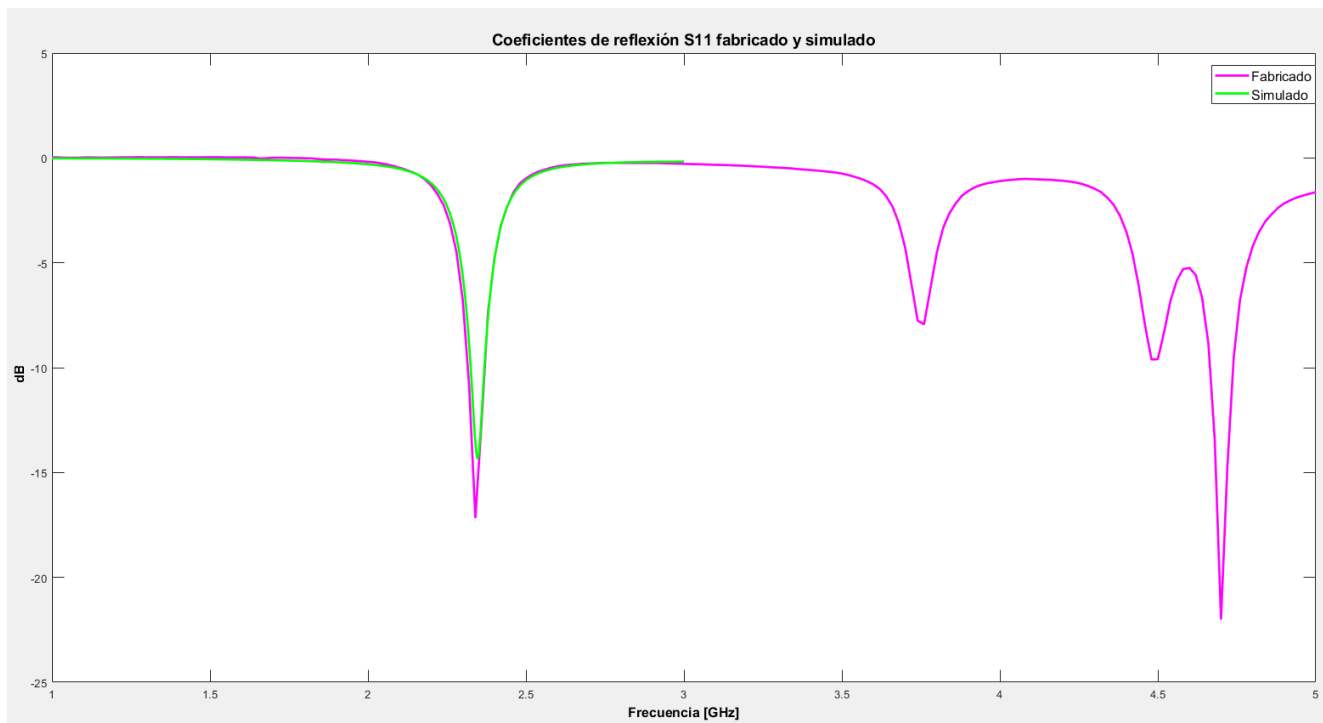


Figura 56 comparación de los coeficientes de reflexión fabricado y simulado.

El objetivo general de este trabajo de tesis es el diseño de la rectenna, lo cual ya he conseguido con el diseño de esta antena así que el siguiente paso consiste en ensamblar la antena receptora con el circuito rectificador. Para llevar a cabo este proceso, se conecta la antena desarrollada en este trabajo con el circuito rectificador diseñado y construido, utilizando un conector tru macho-macho como se ilustra en la figura 57.

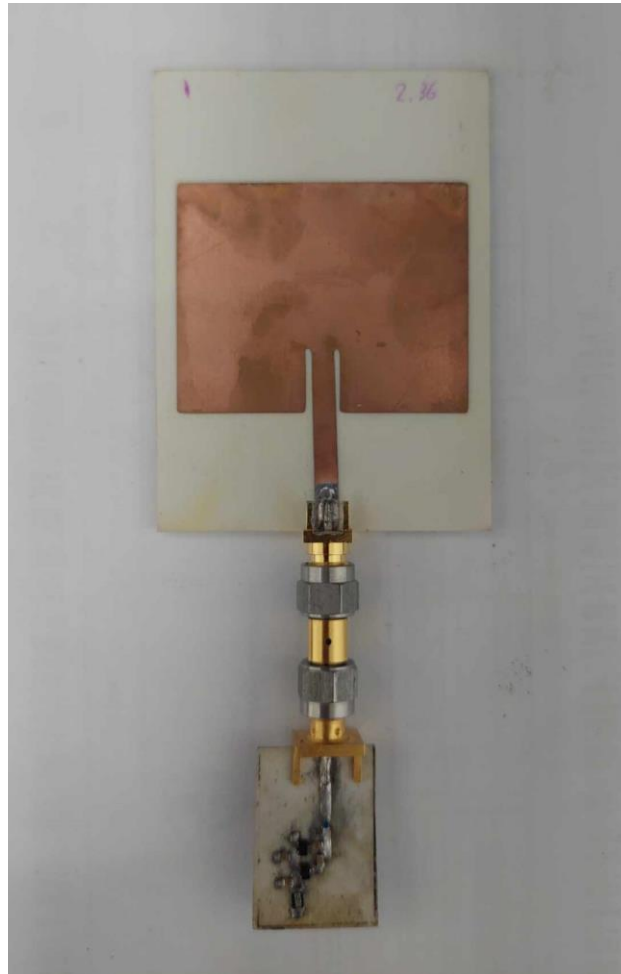


Figura 57 Rectenna fabricada.

Capítulo 4 Evaluación de la rectenna respecto a su cosechamiento de voltaje

Introducción

En esta parte del capítulo se mostrarán los resultados del voltaje obtenido de la rectenna en diferentes puntos del edificio FCE 2 de la facultad de electrónica.

4.1 Resultados de la rectenna

Se presentan los resultados del voltaje obtenido, pero ahora conectando la antena con el rectificador en diferentes puntos de la FCE, la primera medición se hizo dentro del laboratorio de caracterización basado en microondas ya que hay presente una señal wifi, equipos de mediciones, dispositivos como laptop, celulares que capturan esta señal, así como la cámara de Faraday que dentro no hay buena recepción de wifi, se hizo uso del multímetro KEITHLEY 2110 5 1/2. A continuación, la figura 58 se aprecian de los voltajes obtenidos.

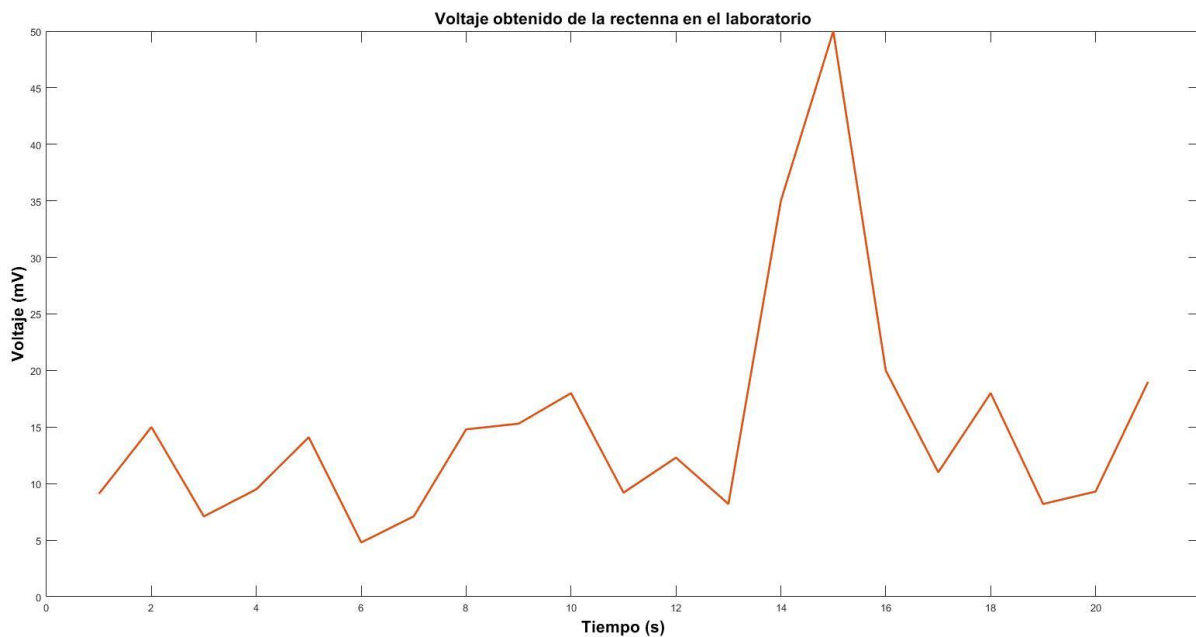


Figura 58 Voltaje obtenido de la rectenna en el laboratorio.

Los voltajes obtenidos conectando la antena al rectificador tienen un pico máximo de 50 mV y mínimo de 4.8 mV, lo cual significa que la antena está diseñada y construida correctamente como se mencionó en el apartado 3.5.

El segundo lugar fue fuera del edificio de la facultad de electrónica más específicamente en el FCE 2 como se observa en la figura 59 y en la figura 60 se ven los resultados del voltaje obtenido.



Figura 59 Medición fuera del edificio.

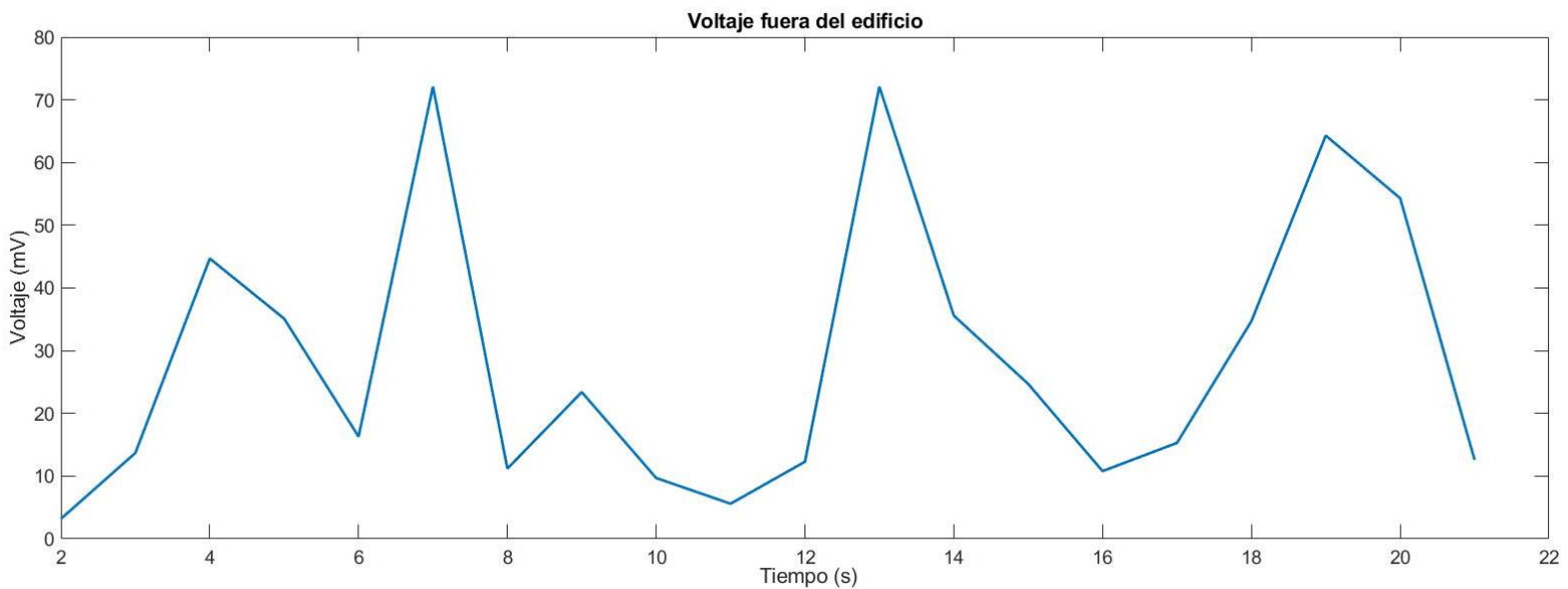


Figura 60 Voltaje obtenido fuera del edificio.

En la figura 60 se observa otro aumento de voltaje pico ahora 70 mV con un voltaje mínimo de 5.6 mV, pero esto puede deber a la interferencia de los rayos del sol así que se optó por

medir dentro del auditorio de la facultad de electrónica ubicado en el FCE2 para verificar que este aumento de voltaje no se debe por este factor y también se propuso ese lugar ya que ahí se encuentra un modem, las mediciones se realizaron a 5m de altura desde el modem a la rectenna y los resultados son los siguientes.

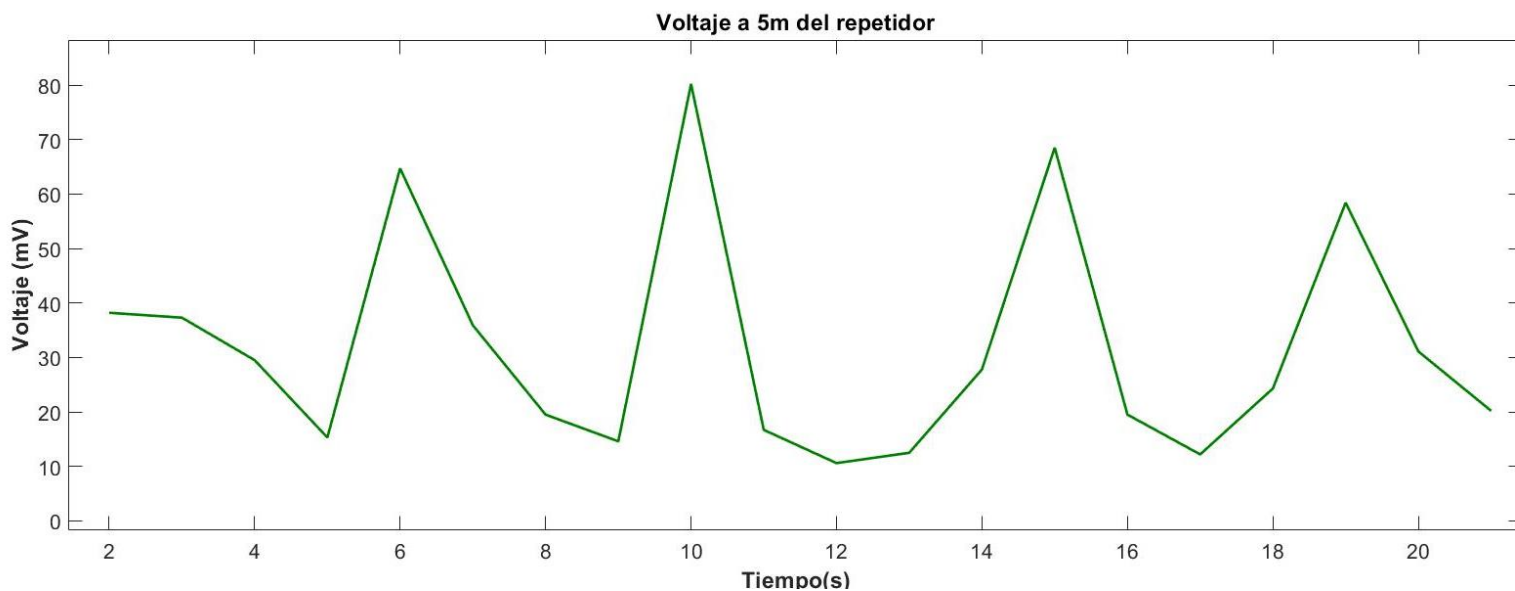


Figura 61 Voltaje dentro del auditorio.

Como se ve en la figura 61 ese aumento no fue por la interferencia de los rayos del sol, sino porque está más cerca del modem o repetidor que se encuentra en el auditorio y esto es seguro ya que en la sala está aislada de los rayos del sol, note un aumento en el voltaje pico de 80 mV ya que estaba más cerca del repetidor o modem que se encuentra dentro del auditorio. Se hizo otra medición atrás del edificio del FCE 2 pero mientras más se aleja de algún modem el voltaje de salida ira disminuyendo ya que en esas mediciones dieron resultados entre 1.5 mV a un pico de 6 mV. A continuación, la figura 62 se observa los resultados de los voltajes con los diferentes lugares de medición. Con este tipo de circuitos se puede tener un cosechamiento de energía constante debido a que las señales de comunicaciones están presentes las 24 horas del día.

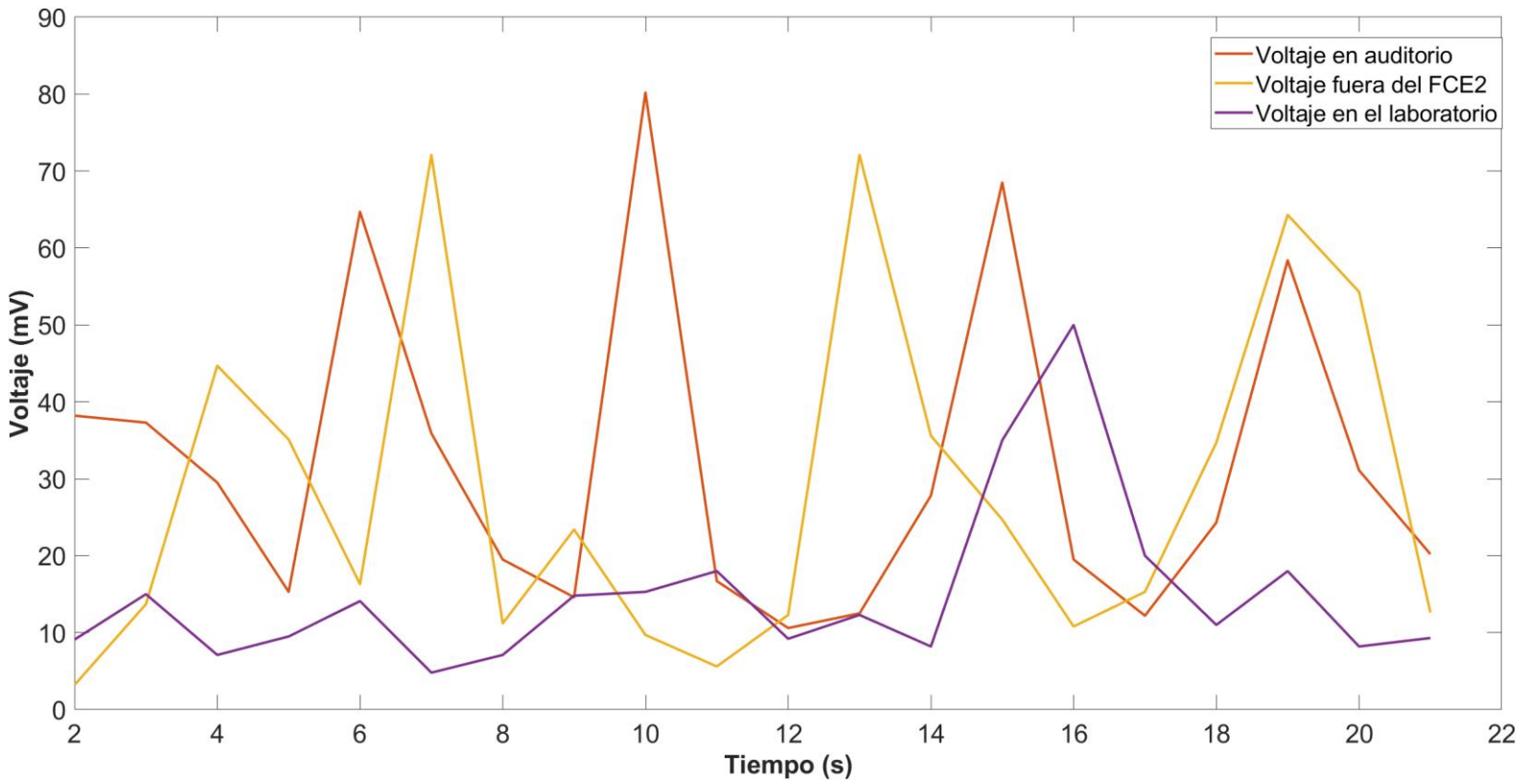


Figura 62 Todos lo voltajes obtenidos.

En la tabla 4 se muestra el valor promedio de los diferentes puntos donde se obtuvo las mediciones.

	Voltaje (mV) a 5 m del modem	Voltaje (mV) fuera del edificio	Voltaje (mV) en el laboratorio
Promedio	31.85	28.585	14.8

Tabla 4 Voltajes promedio de los diferentes lugares de medición.

La tabla 5 muestra algunos parámetros con respecto a otros trabajos realizados, los parámetros son, las frecuencias, numero de etapas, voltaje de salida, dimensiones de la rectenna y estado de la rectenna este último parámetro significa que si está fabricada la rectenna o solo hicieron simulación. Comparando mi trabajo con el de estas referencias esta es bueno ya que está dentro de un rango cercano al voltaje de salida, en cambio a las dimensiones de la rectenna mi trabajo es más pequeño que el de otros.

Trabajos	Estado	Frecuencia	Número de etapas del multiplicador de voltaje	Voltaje	Distancia de medición de modem a Rectenna	Dimensiones rectenna
Torrealba [35]	Fabricado	915 MHz	4	5.69 mV	1 m	29 cm largo
Martínez [36]	Simulado	2.4 GHz	2	1.5 V	sin especificar	sin especificar
López [37]	Fabricando	2.45 GHz	3	101.6 mV	10 cm	60 cm largo
Siljeström [38]	Fabricado	2.4 GHz	3	0.2 V	20 y 60 cm	50 cm largo
Este trabajo	Fabricado	2.4 GHz	2	80 mV	5 m	12 cm largo

Tabla 5 comparación de trabajos

Capítulo 5 Conclusión y trabajo a futuro

Introducción

En este último capítulo de la presente tesis, se exponen las conclusiones derivadas del desarrollo del trabajo, con el propósito de cumplir con los objetivos establecidos en la sección 1.3.

5.1 Conclusiones

En este trabajo, se ha concebido, producido y evaluado una Rectenna, que comprende tanto la antena como el rectificador.

Un rectificador se ha diseñado y construido para aprovechar la energía de entornos con muy baja potencia, específicamente las señales de radiofrecuencia y microondas en la banda ISM más en específico con WIFI a 2.36 GHz. Este prototipo aumenta el voltaje de la señal y convierte la energía de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC). El dispositivo puede trabajar con potencias muy bajas como -44 dB ($1\mu\text{W}$).

Los resultados de la simulación de ADS y HFSS muestran que tanto la antena como el circuito rectificador diseñado y construido están perfectamente adaptados a la frecuencia de trabajo, con reflexiones mínimas. Estos valores aseguran que el rectificador obtenga el voltaje más alto posible al captar la máxima energía de la antena.

El diseño de una red de acoplamiento de impedancia tipo L y el circuito rectificador, tal como se describe en este trabajo, requiere una consideración cuidadosa de varios aspectos. Entre ellos, las características de los componentes como lo son el inductor y capacitor ya que los resultados de los cálculos para saber el valor de estos componentes no siempre serán fieles ya que al momento de buscar esos valores encontraremos que no los hay, así que hay que optar por buscar un valor comercial cercano al calculado, una vez encontrándolo se simula hasta ver cual valor tiene una mejor respuesta y utilizar ese valor. Como se muestra en este trabajo se ve que el acoplamiento es correcto en la simulación, pero al momento de

construirlo la señal se recorrió unos cuantos Hertz, pero no afectó ya que el rectificador sí está convirtiendo la señal ya que el rango del ancho de banda del rectificador aún está dentro de los 2.4 GHz.

La rectenna, el sistema completo, se probó con éxito utilizando señales de un router WIFI. El objetivo era capturar señales de mayor potencia. A una distancia de 5 m, se obtuvieron voltajes de salida de 20 a 70 mV al estar en el router del auditorio. Y se comprobó que las mediciones fuera del edificio no se modificaron con la presencia de los rayos del sol.

5.2 Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se propone lo siguiente.

- Diseñar una antena y rectificador junto con unas redes de acoplamiento sintonizadas para diferentes bandas específicas, como FM, HDTV, GSM, 3G, 4G y WIFI, sería una forma eficiente de aprovechar la energía de diversas fuentes de radiofrecuencia. Esto permitiría adaptar la rectenna para capturar y convertir eficazmente las señales presentes en cada banda, optimizando así el rendimiento del sistema en entornos urbanos donde coexisten diversas fuentes de RF y microonda para que su voltaje es su salida se mayor.
- En situaciones en las que se busca trabajar con dispositivos con un mayor consumo de energía, se sugiere utilizar arreglos de rectennas en serie para aumentar el voltaje.

Apéndice A. Equipos de medición

VNA: Analizador vectorial de redes ANRITSU MS4644b (Familia VectorStar)

La función de este dispositivo se centró en medir el coeficiente de reflexión de la antena y el rectificador (ver dispositivo en Fig. 62). El rango de trabajo de 70 KHz a 40 GHz, un rango dinámico de 142 dB y una potencia de salida de +14 dBm son sus características principales. Este dispositivo tiene cuatro bucles de acceso directo y dos puertos. [34].

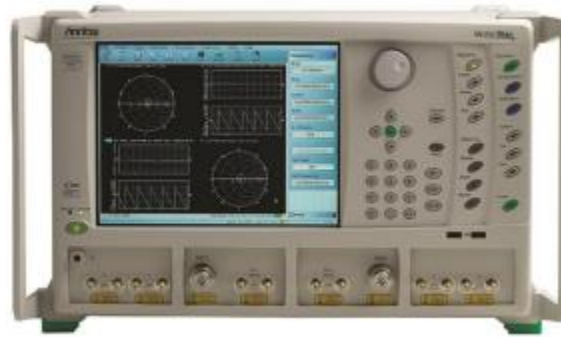


Figura 63 Analizador vectorial de redes Anritsu MS4644b.

Generador de señales ANRITSU MG3692C

Esta herramienta se utilizó para transmitir señales a la frecuencia de resonancia de la antena (ver figura 63). Tiene una resolución de 0.01 Hz, un rango de frecuencia de 2 GHz a 20 GHz y un nivel de ruido de -199 dB. También proporciona modulación por pulsos y modulaciones analógicas (AM/FM) [34].



Figura 64 Analizador de señales ANRITSU MG3692C

Referencias

- [1] J. Salazar and S. Silvestre, “Internet de las cosas (IoT) - Cisco,” Cisco, p. 34, 2017, [Online]. disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/81581111.pdf>.
- [2] A. Rajawat and P. K. Singhal, “Design and analysis of a 900 MHz rectifier antenna using DGS,” Mater. Today Proc., vol. 29, pp. 397–407, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.293.
- [3] R. B. Ibrahim, S. H. S. B. Mohd, H. B. M. Khir, M. A. B. Zakariya, and H. Daud, “Powering LED from Wi-Fi: A qualitative assessment for rectenna design,” in 2019 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2019, pp. 793–796, doi: 10.1109/STA.2014.7086695.
- [4] Anguera, J., Pérez. Antonio. 2008. Teoría de Antenas (1st ed). Consultado el 25 de septiembre de 2023 de: https://web.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook_teoría_antenas.pdf
- [5] H. Jabbar, Y. S. Song and T. T. Jeong, “RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices,” IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 56, no. 1, pp. 247-253, Feb. 2010.
- [6] B. Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Design, 3° Edición. New York: John Wiley & Sons Inc. 2005.
- [7] Alai Secure - Colombia. (2023, 19 agosto). Radiofrecuencia en telecomunicaciones - AlaiSecure - AlaiSecure - Colombia. AlaiSecure - Colombia. <https://alaisecure.co/glosario/radiofrecuencia-en-telecomunicaciones-que-es-y-como-funciona/>
- [8] 6 reasons for Cisco Wi-Fi 6. (2021, 4 octubre). [Vídeo]. Cisco. https://www.cisco.com/c/es_mx/products/wireless/what-is-wifi.html
- [9] Manuel Huidobro, J. (2013). Antenas para telecomunicaciones. Acta.es. Recuperado en 2023, de https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf
- [10] Miguel Ferrando, Alejandro Valero. Universidad Politécnica de Valencia. Dep. Comunicaciones. Recuperado en 2023, de http://www.upv.es/antenas/Documentos PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF

- [11] Edgar Hernández Limón. Diseño de una antena de microcinta con polarización dual a 4 GHz [Tesis Para Obtener El Título De Licenciado En Electrónica, Facultad Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional Facultad Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [12] J. Anguera, A. Pérez, “Teoría de antenas”, Barcelona, España, Universidad Ramon Llull, 2008
- [13] rfLyncs LLC. (2021, noviembre 7). Antenna Return Loss versus Reflected Power, Mismatch & VSWR. Custom Antenna & RF Design Services. Recuperado en 2023, de <https://rflyncs.com/return-loss/>
- [14] O. M. Fernando, A. Valero, “Antenas: Introducción. Parámetros de antenas”, departamento de comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia.
- [15] J. WONHONG, T. JINPIL, CH. JAEHOON, "A Low-Profile IR-UWB Antenna With Ring Patch for WBAN Applications", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 14, pp. 1447-1450, 2019.
- [16] V. Karthik, T.R. Rao, "A microstrip antenna at UWB frequencies for body wearable wireless devices". IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), pp. 1-5, 2014.
- [17] V. Reghunath, M.N. Upama Rajan, "Band Notched UWB Antenna for Wireless Body Area Network". Fourth International Conference on Advance in Computing and Communications (ICACC), pp. 305-308, 2019.
- [18] R. D. Vásquez, “Análisis y Diseño de una Antena de parche Microstrip”, tesis de maestría, facultad de ingeniería, Universidad la Salle, España, 2018.
- [19] Siyi Shen, “Demonstration of an Efficient Ambient Radiofrequency and Microwave Energy Harvesting System with High Sensitivity and DC Output”, tesis de maestría, facultad de ingeniería y ciencia aplicada, Universidad de Virginia, USA, 2019.
- [20] [10] J. M. F. Hernandez, “Apuntes de dispositivos y circuitos eléctricos”, Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México,
- [21] T. Sánchez A., “Electrónica: Dispositivos y aplicaciones”, 2da edición, Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, 2013.

- [22] Dieter Kind, K. F. 2001. High Voltage Test Techniques. (2nd ed.). Consultado el 15 de agosto de 2023 de: [https://books.google.com.mx/books?id=nHqQnSM71_cC&printsec=frontcover&dq=High voltage+Test+Techniques&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwiR643Z0_TsAhUNqJ4KHZWJAOoQ6AEwAHoECAIQAg#v=onepage&q=High-voltage Test Techniques&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=nHqQnSM71_cC&printsec=frontcover&dq=High+voltage+Test+Techniques&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwiR643Z0_TsAhUNqJ4KHZWJAOoQ6AEwAHoECAIQAg#v=onepage&q=High-voltage+Test+Techniques&f=false)
- [23] Sari, F., Uzun, Y. 2019. A comparative study: Voltage Multipliers for RF Energy Harvesting system. Consultado el 24 de noviembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/332727389_A_COMPARATIVE_STUDY_VOLTAGE_MULTIPLIERS_FOR_RF_ENERGY_HARVESTING_SYSTEM
- [24] Quddious, A., A. Antoniadis, M., Vryonides, P., Nikolaou, S. 2020. Voltage-Doubler RF-to-DC Rectifiers for Ambient RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer Systems. En Recent Wireless Power Transfer Technologies. doi:10.5772/intechopen.89271
- [25] James F. Cox. 1998. Fundamentals of Linear Electronics: Integrated and Discrete. de <https://books.google.com.mx/books?id=FbezraN9tvEC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- [26] Nikhil, M., High Voltage Generation by using Cockcroft-Walton Multiplier, 2015.
- [27] Rashid, M.H. Circuitos microelectrónicos análisis y diseño. 1a ed. International Thomson, 2000.
- [28] Akter, N., Hossain, B., Kabir, M., Bhuiyan, A., Yeasmin, M., Sultana, S. Design and Performance Analysis of 10-Stage Voltage Doublers RF Energy Harvesting Circuit for Wireless Sensor Network. Journal of Communications Engineering and Networks. 2. 84-91, 2014.
- [29] Mishra, D., De, S., Jana, S., Basagni, S., Chowdhury, K., Heinzelman, W. Smart RF Energy Harvesting Communications: Challenges and Opportunities. Communications Magazine, IEEE. 53. 70-78, 2015.
- [30] JL, B. (2021, 25 septiembre). Diodo Schottky. Electrónica Online. <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/diodo-schottky/>
- [31] Constantino Pérez Vega, C. (2009). Acoplador de impedancia. unican. Recuperado 20 de octubre de 2023, de <https://personales.unican.es/perezvr/pdf/ACOPLADORES%20DE%20IMPEDANCIA.pdf>

- [32] M. Pozar, D. (2012). Microwave engineering (4.a ed., Vol. 5) [Kindle]. Aptara. <http://alunoeletrica.eng.ufba.br/material/eletromagnetismoaplicado/livros/pozar.pdf>
- [33] Hernández Aquino, R. 2008. Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4 ghz y 5.8 ghz. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones. Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Universidad de las Américas Puebla. Mayo. Derechos Reservados © 2008.
- [34] Petlachi, R. (2022). Antena fractal para un cubesat (Licenciatura). Benemerita universidad autonoma de puebla.
- [35] Torrealba, R (2016). Sistema de Cosechamiento de Energía con Radio Frecuencia. Benemérita universidad autónoma de puebla.
- [36] Martinez, K (2022). DISEÑO DE UNA RECTENA PARA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA A 2.4GHZ. (Licenciatura). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO
- [37] Lopez, S (2017). DISEÑO DE UNA ANTENA RECTIFICADORA EN LA BANDA UHF PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA (ingeniería). Universidad Carlos III de Madrid
- [38] Siljeström, P (2015). Diseño de una "rectenna" en la banda WiFi de 2.45GHz para aplicaciones de captación de energía electromagnética (ingeniería)