

Optimización de un Sistema Recolector de Energía de
Radiofrecuencia en la Banda 5G Usando un Sistema de
Filtrado en Microcinta.

Pedro H. Cely A.
Sebastián Mora G.
Santiago Villarreal V.

Director de Trabajo de Grado:
Ing. Arturo Fajardo Jaimes., Ph.D.

Cliente:
Ing. Manuel Ricardo Perez Cequera., Ph.D.



Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería de Electrónica

31 de enero de 2024

RECTOR DE LA UNIVERSIDAD: Luis Fernando Múnica Congote, S.J.
DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA: Lope Hugo Barrero Solano, Sc.D.
DIRECTOR DE LA CARRERA: Diego Alejandro Patiño Guevara, Ph.D.
DIRECTOR DEL PROYECTO: Arturo Fajardo Jaimes., Ph.D

Artículo 23 de la resolución No. 13 de junio de 1946

La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque los trabajos no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vea en ellos el anhelo de buscar la verdad y la justicia.

Agradecimientos

A lo largo de la ejecución de este proyecto de grado, se ha contado con el valioso respaldo de destacados individuos, cuyas contribuciones han sido esenciales para alcanzar el éxito del mismo. Expresamos nuestro sincero agradecimiento a cada uno de ellos.

En primer lugar, reconocemos al Ing. Arturo Fajardo Jaimes, nuestro director de proyecto, por su orientación experta y constante disposición para abordar nuestras inquietudes. Su honestidad en la evaluación de nuestro trabajo ha sido clave, impulsándonos a superarnos y confiando en nuestra capacidad para llevar a cabo el proyecto.

Al Ing. Manuel Ricardo Perez Cerquera, nuestro cliente, le extendemos nuestro agradecimiento por compartir su profundo conocimiento en tecnologías de filtros con tecnología de microcinta. Su participación activa en las pruebas del sistema, respaldada por su experiencia en elementos hardware generadores de ondas RF, ha Enriquecido significativamente nuestro enfoque y resultados.

La Ing. Luisa Fernanda Garcia Vargas merece reconocimiento por su apoyo esencial en el desarrollo de la documentación de los procesos del proyecto de grado. Su actitud positiva, compromiso constante y habilidades colaborativas han sido un activo valioso.

Al equipo de laboratorio en su conjunto, y en particular a Ivonne Paola Valencia Ramirez y Deisy Alejandra Benavidez, les agradecemos su colaboración indispensable en la impresión de nuestros filtros en microcinta utilizando el LPKF, así como su disposición constante para brindar asistencia cuando más lo necesitábamos.

Al Ing. Carlos Ivan Páez Rueda, expresamos nuestro agradecimiento por su flexibilidad en los procesos de impresión con el LPKF, facilitando de manera significativa nuestra labor.

Finalmente, reconocemos y agradecemos profundamente el apoyo moral indispensable de nuestros padres: Clemencia Amezquita, Augusto Cely, Sandra Villarraga, Fabian Villarreal, Yanet Geovo y Eduardo Mora. También recordamos con gratitud a nuestros abuelos, Aristelia Zárate, Myriam Ramírez y Nathan Geovo, quienes, aunque no estén físicamente presentes, permanecen siempre en nuestros mejores recuerdos.

Resumen

Este proyecto de enfoque exploratorio busca una posible optimización con un sistema de filtros en tecnología planar de microcinta para un cosechador de energía de ondas de radiofrecuencia, específicamente en la banda baja de 5G. El objetivo es capturar y convertir de manera práctica las señales presentes en el espectro electromagnético en energía utilizable, maximizando la eficiencia y selectividad del proceso de cosecha, mediante la selección y filtrado adecuado de las señales de RF. De esta forma, se contribuye al avance de la ingeniería electrónica en el campo de la energía sostenible, ofreciendo soluciones para la captura y aprovechamiento de energía de manera eficiente y óptima.

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Planteamiento del Problema	7
1.2. Justificación	7
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivos Específicos	8
2. Marco Teórico	9
2.1. Conceptos y Principios Fundamentales	9
2.1.1. Líneas de Transmisión	9
2.1.2. Tecnología Planar en Microcinta	10
2.1.3. Radiofrecuencia, Telecomunicaciones y Tecnologías De Redes Móviles	10
2.1.4. Filtros	11
2.1.5. Cosechador de Energía	12
2.1.6. Quinta Generación de Comunicaciones (5G)	13
2.1.7. Parámetros S	14
2.2. Estándares de la Solución	14
3. Estado del Arte	16
4. Diseño	20
4.1. Descripción General de la Solución	20
4.2. Diseño	20
4.3. Modelo Arquitectónico	22
4.3.1. Descripción Completa de Bloques - Modelo Arquitectónico . .	23
4.4. Metodología y Diseño de Filtros	23
4.4.1. Evaluación Teórica del Orden de los Filtros	24
4.4.2. Componentes de Espectro de la Fuente:	24
4.4.3. Filtro Pasabanda (Microcinta):	25
4.4.4. Rectificador Doblador:	28
4.4.5. Filtro Pasa Bajas (Microcinta):	29
4.4.6. Cosimulación	30
4.4.7. Cosimulación: Cambio de Topologías	33
5. Análisis de Resultados	34
5.1. Protocolos de Prueba	34
5.2. Rectificador	35
5.3. Filtro Pasabanda	36

5.4. Filtro Pasa Bajos	37
5.5. Sistema Filtro-Rectificador con Carga Resistiva	38
5.6. Sistema Completo	39
5.6.1. Analizador de Potencia	41
6. Conclusiones	43
7. Trabajo Futuro	44
A. Teoría de Lineas de Transmisión	47
A.1. Impedancia Característica	47
A.2. Microcinta	50
A.3. Simulaciones Adicionales del filtro pasabanda	52
A.4. Dispositivos utilizados	54
A.4.1. VNA ZVA24	54
A.4.2. VSN SMW200A	55
A.4.3. DSO-X 2024A	55

Índice de figuras

2.1.	Líneas de Transmisión	9
2.2.	Microcinta	10
2.3.	Topologías de filtros	11
2.4.	Cosechador de Energía RF	12
2.5.	Tecnologías de Comunicaciones	13
3.1.	Diagrama de las fuentes de energía para aplicaciones de cosecha de energía	16
3.2.	Diagrama de un cosechador de energía de radiofrecuencia con un convertidor RF-DC	17
3.3.	Diagrama de bloques de un cosechador de energía de radiofrecuencia teórico. [1]	18
3.4.	a) Modelo de un filtro pasabanda en Microcinta y b) su equivalente en parametros distribuidos	18
3.5.	Esquemático de un Circuito Multiplicador de voltaje conectado entre filtros	19
4.1.	Interfaz de Nuhertz Filtro Pasa Banda	22
4.2.	Diagrama del Sistema	22
4.3.	Interfaz de Nuhertz	24
4.4.	Valor práctico de la potencia	25
4.5.	Equivalencia filtro pasa banda	25
4.6.	Respuestas filtro eliptico 4th	27
4.7.	Respuestas filtro Chebyshev 4th	27
4.8.	Respuestas filtro Butterworth 5th	28
4.9.	Bloque equivalente del rectificador	28
4.10.	Simulación del rectificador en LTSPICE	29
4.11.	Equivalente filtro pasa bajas	29
4.12.	Rectificador en LTSpice a archivo .cir de Ansys	30
4.13.	Filtro Pasabandas a Bloque de Integración en Ansys Circuits	31
4.14.	Filtro Pasabandas a Bloque de Integración en Ansys Circuits	31
4.15.	Interconexión de Bloques en la Cosimulación dentro de Ansys	32
4.16.	Resultado de La Cosimulación	32
4.17.	Resultado de La Cosimulación Cambio de Topologías	33
5.1.	Circuito Rectificador	35
5.2.	Escala Circuito Rectificador	35
5.3.	Respuesta rectificador físico	36
5.4.	Impreso microcinta pasabanda	36

5.5.	S12 VNA pasabanda	37
5.6.	S12 VNA pasabanda segunda medida	37
5.7.	S12 pasa bajos	38
5.8.	S12 VNA pasa bajos	38
5.9.	S12 VNA pasa bajos	39
5.10.	Sistema Completo	39
5.11.	S11 VNA sistema completo	40
5.12.	FFT sistema completo	41
5.13.	Interfaz Analizador de Potencia	42
A.1.	Segmento de línea de transmisión: (a) de longitud Δz ; y (b) modelo de parámetros distribuidos.	48
A.2.	Corte Transversal de una Línea de Microcinta	50
A.3.	Estructura aproximada de los campos eléctricos y magnéticos dentro de la línea de microcinta. Los campos fuera de la línea son posiblemente significativos, complicados y no mostrados. En este caso, la onda se está propagando lejos del espectador.	50
A.4.	Vista desde el lado de una línea de microcinta.	52
A.5.	Respuestas filtro elíptico 3th	52
A.6.	Respuestas filtro elíptico 5th	53
A.7.	Respuestas filtro Chebyshev 3rd	53
A.8.	Respuestas filtro Butterworth 2nd	53
A.9.	Respuestas filtro Butterworth 3rd	53
A.10.	Respuestas filtro Butterworth 4th	54
A.11.	VNA ZVA24 [2]	55
A.12.	VNA ZVA24 [3]	55

Índice de cuadros

5.1.	Protocolo de pruebas usadas para las distintas etapas del filtro con entradas y salidas esperadas	34
5.2.	Tabla frecuencia vs. salida	40
5.3.	Tabla Características del Sistema Completo	41
5.4.	Tabla Filtros vs Potencia	42

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

El cambio climático emerge como una de las amenazas más apremiantes que confronta la humanidad en el siglo actual [4]. Sus efectos devastadores, manifestados a través de olas de calor, inundaciones, incendios forestales y otros fenómenos climáticos extremos, han comenzado a afectar a escala global. En este contexto crítico, es esencial abordar la necesidad imperante de optimizar nuestros procesos y recursos con el objetivo de prevenir una potencial catástrofe climática, que podría desencadenar pérdidas humanas y ecológicas de magnitud inimaginable, amenazando, en última instancia, la habitabilidad de nuestro propio planeta [5].

En este punto crítico, se hace evidente que la tecnología de las telecomunicaciones, además de facilitar la transmisión de información a velocidades sin precedentes [6], también representa una fuente de energía que con frecuencia se desaprovecha. Las ondas de radiofrecuencia (RF) generadas por estas tecnologías son un claro ejemplo de este desaprovechamiento, ya que la mayoría de la potencia generada se disipa en el espacio, lo que equivale a un derroche de valiosos recursos [7]. En respuesta a este desafío y para evitar el desperdicio de la energía generada por estas ondas RF, han surgido los cosechadores de energía de RF, que ofrecen la oportunidad de capturar y utilizar eficazmente esta fuente de energía subutilizada.

Con lo expuesto anteriormente, el presente proyecto de grado de enfoque exploratorio tiene como objetivo la posible optimización de un sistema recolector de energía a través de un sistema de filtrado en microcinta. Este sistema está diseñado para procesar señales de RF de frecuencias de gran magnitud, del orden de los gigahertz.

1.2. Justificación

El proyecto de grado presentado aquí se establece como una iniciativa de gran relevancia en el contexto del cambio climático[4]. La amenaza inminente que este fenómeno representa se ha vuelto innegable y nos plantea la urgente necesidad de optimizar nuestros recursos y procesos para evitar posibles consecuencias catastróficas, tanto para la sociedad como para el medio ambiente. El proyecto se enfoca en un área crítica que se ha subestimado, la recolección de energía de Radio Frecuencia (RF) a través de un sistema de filtrado en microcinta. Esto se convierte en una herramienta esencial no solo para atender la demanda creciente de energía,

sino también para mitigar los efectos del cambio climático al aprovechar de manera eficiente fuentes de energía sub utilizadas.[5].

La pertinencia de este proyecto radica en varios aspectos fundamentales. En primer lugar, es importante destacar que la literatura y los antecedentes existentes en el tema de la Cosecha de Energía de RF a través de un Sistema de Filtrado en Microcinta son sumamente pobres y limitados. Esta falta de información de calidad representa una oportunidad invaluable para contribuir al conocimiento en esta área. Nuestro trabajo no solo abordará la problemática actual, sino que también sentará las bases para investigaciones futuras, permitiendo un avance significativo en el campo de la recolección de energía de RF.[6]

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Desarrollar y optimizar un sistema de filtrado, pasa bajos y pasa banda para aplicaciones de cosecha de energía haciendo uso de señales con frecuencias en el rango de la banda baja de 5G.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Modelar teóricamente un sistema de cosecha de energía compuesto por: dos filtros de microcinta (pasa bandas y pasa bajos), un rectificador doblador, una carga resistiva y una antena dipolo.
- Diseñar y evaluar en simulación un sistema de cosecha de energía considerando al menos 4 topologías de filtros en microcinta (2 pasa banda y 2 pasa bajos), manteniendo una carga constante (i.e. 50 ohms) y una antena comercial (dipolo de 50 ohms sintonizada en la banda de 5G).
- Implementar y evaluar el impreso del cosechador de energía de RF optimizado en simulación.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Conceptos y Principios Fundamentales

2.1.1. Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión, componentes esenciales en diversas aplicaciones de telecomunicaciones, se definen como estructuras geométricamente uniformes diseñadas para transportar eficientemente la energía de radiofrecuencia (RF) de un punto A un punto B.[8] Entre sus usos destacados se encuentran en equipos transmisores, antenas, filtros de microondas, radares y otras tecnologías. Un parámetro crítico en el análisis de las líneas de transmisión es la impedancia característica, la cual varía según el tipo de línea utilizada. Por ejemplo, los cables coaxiales comunes tienen impedancias características en el rango de 50 a 75 ohmios, como en el caso del cable RG6.[8]

El término "línea de transmisión" se aplica a medios que utilizan el modo transversal electromagnético (TEM) para guiar ondas electromagnéticas. En este modo, los campos eléctrico y magnético viajan de manera perpendicular, lo que facilita la definición de voltajes, corrientes y el análisis electromagnético. Ejemplos de líneas de transmisión TEM incluyen el cable coaxial, el cable bifilar, la stripline y la microcinta.[8]

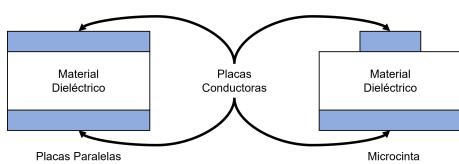


Figura 2.1: Líneas de Transmisión

de líneas de transmisión de potencia.[8] Estas ecuaciones se basan en dos ecuaciones diferenciales en función de la distancia y el tiempo, una para el voltaje ($V(x,t)$) y otra para la corriente ($I(x,t)$). Ellas demuestran cómo la energía eléctrica, bajo ciertas condiciones, puede reflejarse en la línea de transmisión, generando patrones de onda característicos.

$$\frac{dV(x,t)}{dx} = -L \frac{dI(x,t)}{dt} - RI(x,t) \quad (2.1)$$

$$\frac{dI(x, t)}{dx} = -C \frac{dV(x, t)}{dt} - GV(x, t) \quad (2.2)$$

Las ecuaciones del telegrafista describen un segmento de línea infinitesimal en términos de cuatro parámetros distribuidos: inductancia distribuida (L), que se debe al campo magnético alrededor del conductor; capacitor distribuido (C), debido al campo eléctrico entre los conductores y el dieléctrico; resistencia distribuida (R), que modela la no idealidad de los conductores; y conductancia distribuida (G), que refleja la disipación de potencia debido a la no idealidad del medio dieléctrico. Estos parámetros son fundamentales para comprender y analizar el comportamiento de las líneas de transmisión en diversos contextos de aplicaciones.[8]

2.1.2. Tecnología Planar en Microcinta

La tecnología de microcinta, también conocida como microstrip, se presenta como una línea de transmisión eléctrica que se integra en una placa de circuito impreso (PCB). Este sistema se caracteriza por contar con dos conductores, uno en la superficie de la tarjeta y el otro desempeñando la función de plano de tierra. Su principal aplicación se centra en la transmisión de señales de microondas y se encuentra presente en una variedad de dispositivos, incluyendo antenas, acopladores y filtros.[9]

A pesar de que las microcintas pueden ser implementadas en sustratos convencionales de PCB, como el comúnmente utilizado FR4, ha documentado la presencia de pérdidas dieléctricas significativas en este tipo de sustratos estándar. Además, se observa que la constante dieléctrica en el FR4 no siempre se encuentra bajo un control adecuado.

En el contexto de una microcinta, una onda electromagnética se propaga parcialmente a través del sustrato y parcialmente en el aire sobre este. La diferencia en las constantes dieléctricas entre el sustrato y el aire resulta en un medio no homogéneo para la onda, lo que da como resultado una velocidad de propagación que se encuentra entre la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas en el sustrato y en el aire. Este fenómeno es fundamental para comprender el comportamiento de las microcintas y sus aplicaciones en la transmisión de señales de microondas.[9]

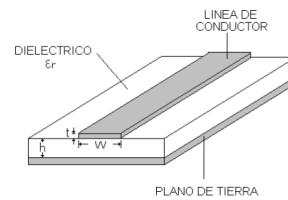


Figura 2.2: Microcinta

2.1.3. Radiofrecuencia, Telecomunicaciones y Tecnologías De Redes Móviles

El espectro electromagnético abarca una amplia gama de frecuencias, y dentro de esta diversidad, la radiofrecuencia (RF) se define como la porción de menor energía, comprendiendo rangos que van desde los 3 Hz hasta los 300 GHz [10]. Teoría de propagación de ondas electromagnéticas se establecieron gracias a los experimentos de Heinrich Rudolf Hertz entre 1886 y 1888, y el pionero Guillermo Marconi marcó un hito histórico en 1901 al llevar a cabo la primera emisión trasatlántica de radio.[11]

La radiocomunicación, en sus primeras décadas del siglo XX, desempeñó un papel fundamental en aplicaciones que incluían la radiodifusión, comunicaciones militares y marítimas[11]. A medida que avanzaba el siglo, las telecomunicaciones experimentaron una diversificación notoria, incorporando tecnologías inalámbricas y por cable en sus medios de transmisión. El desarrollo de la telefonía fija marcó un hito en la comunicación a larga distancia a través de líneas de cable.

La década de 1970 vio el surgimiento del teléfono móvil, dando inicio a la primera generación de comunicación móvil, 1G, con el Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS) de los laboratorios Bell como estándar. 1G se caracterizó por servicios de voz puramente analógicos y operó en el rango de 800-900 MHz. La segunda generación (2G) llegó a finales de la década de 1980 e inicios de la década de 1990, permitiendo la transmisión de voz y datos digitales a través de tecnologías como GSM, TDMA y CDMA. Las bandas utilizadas variaron desde 850 MHz hasta 1900 MHz.[12]

El año 2000 marcó la aparición de la tecnología 3G, incrementando las tasas de datos y facilitando una mayor capacidad de voz, así como soporte para diversas aplicaciones, con un rango de frecuencias que se extendía de 800 MHz a 2.5 GHz. En 2010, 4G inauguró una era basada en IP, proporcionando alta velocidad, calidad, capacidad, seguridad y servicios de voz y datos a un costo más accesible. Las velocidades de transmisión oscilaron entre 100 Mbps en movimiento y Gbps en estado estático, y las frecuencias utilizadas abarcaron desde 700 MHz hasta 2600 MHz.[12]

Finalmente, la quinta generación (5G), en desarrollo desde 2018, representa la más reciente revolución en las comunicaciones. Diseñada para satisfacer las necesidades de las redes de área local (LAN) y de área amplia (WAN), 5G emplea el Protocolo de Transporte Abierta (OTP) para superar la pérdida de velocidad de bits, ofreciendo velocidades de 1-10 Gbps, un ancho de banda mil veces superior al de sus predecesoras y un rango de frecuencias 3-300 GHz. A medida que esta tecnología se consolida, se anticipa que todos los sistemas migrarán hacia su implementación, marcando un hito en la evolución de las comunicaciones.[13]

2.1.4. Filtros

Los filtros electrónicos desempeñan un papel crucial en la electrónica y las comunicaciones al permitir la discriminación de frecuencias específicas o rangos de frecuencias de las señales que los atraviesan. Esto se logra mediante la modificación de parámetros como la amplitud y la fase de la señal. Estos filtros pueden clasificarse de diversas maneras, como activos o pasivos, analógicos o digitales, pasa-altas, pasa-bajas, pasa-banda o rechaza-banda, y se dividen en IIR (respuesta infinita al impulso) y FIR (respuesta finita al impulso).

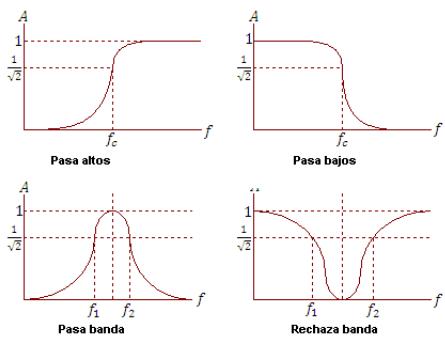


Figura 2.3: Topologías de filtros

Históricamente, los primeros filtros electrónicos desarrollados a principios del siglo XX fueron los filtros pasivos

analógicos, que consistían en circuitos con componentes como resistencias, condensadores e inductores. Estos componentes eran esenciales en los filtros RC y RLC de un solo polo que aún se utilizan hoy en día. Más adelante, surgieron los filtros híbridos, que combinaban amplificadores analógicos con componentes pasivos.

Dentro de las topologías de filtros más relevantes para el contexto de este documento se encuentran los siguientes:

Filtros Pasa Bajas (LPF): Estos filtros permiten únicamente el paso de las frecuencias más bajas, atenuando las frecuencias más altas. Su diseño implica dos terminales, entrada/salida, y una caja negra o cuadripolo que contiene los componentes necesarios para su funcionamiento.

Filtro Pasa Altas (HPF): Este filtro, compuesto por una resistencia y un condensador conectados en serie, discrimina las frecuencias más bajas de la señal. El condensador permite el paso de las frecuencias por encima de una frecuencia de corte (FC) específica. Se utiliza comúnmente para eliminar información no deseada, generalmente presente por debajo de los 70-40 Hz, donde suele encontrarse ruido.

Filtro Pasa Banda (BPF): Este filtro permite el paso de frecuencias dentro de un rango determinado, con una frecuencia superior (F_H) y una frecuencia inferior (F_L). Su aplicación se centra en seleccionar y procesar señales en un rango de frecuencias específico.

2.1.5. Cosechador de Energía

La cosecha de energía, también conocida como energy harvesting, es una tecnología que permite capturar y convertir energía de diversas fuentes ambientales para alimentar dispositivos autónomos de baja potencia. Esta tecnología se ha vuelto cada vez más importante debido a la creciente demanda de sistemas electrónicos portátiles y de bajo consumo energético en aplicaciones como monitoreo remoto, sensores inalámbricos y dispositivos de Internet de las cosas (IoT) [14]. Una de las fuentes de energía más comunes para la cosecha de energía es la luz solar. Los paneles solares fotovoltaicos son ampliamente utilizados para capturar la energía solar y convertirla en electricidad utilizable [15]. Además, se han desarrollado otras tecnologías de cosecha de energías basadas en el aprovechamiento de vibraciones mecánicas, como los generadores piezoelectricos, que convierten la energía mecánica en electricidad mediante el uso de materiales piezoelectricos [16]. Otra fuente de energía que se utiliza en la cosecha de energía es la energía térmica. Los dispositivos termoelectricos son capaces de convertir la diferencia de temperatura en electricidad mediante el efecto Seebeck [17]. Además, se han explorado otras fuentes de energía ambiental, como la energía de radiofrecuencia (RF) y la energía de las ondas electromagnéticas. Los rectificadores de RF y los sistemas de recolección de energía RF permiten capturar y convertir la energía de las señales de RF a energía utilizable [18].

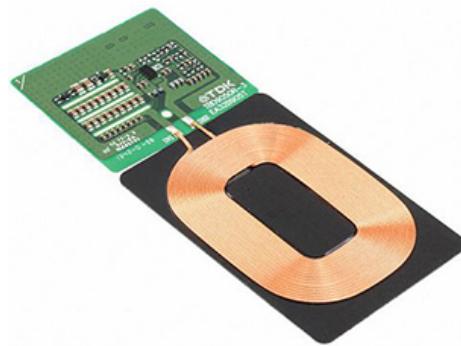


Figura 2.4: Cosechador de Energía RF

En términos de aplicaciones, la cosecha de energía se utiliza en una amplia gama de campos, incluyendo sensores inalámbricos para monitoreo ambiental, monitoreo estructural, aplicaciones médicas implantables, dispositivos portátiles y sistemas de IoT [19]. La eficiencia y el rendimiento de los sistemas de cosecha de energía han mejorado significativamente en los últimos años, lo que ha permitido la alimentación autónoma y prolongada de dispositivos de bajo consumo energético[20]

2.1.6. Quinta Generación de Comunicaciones (5G)

El estándar 5G en el ámbito de las telecomunicaciones representa la quinta generación de tecnologías móviles y se erige como sucesor del previo 4G, que proporciona conectividad a la mayoría de los dispositivos móviles contemporáneos. Según la Asociación GSM, se estima que para 2025, las redes 5G contarán con más de 1.7 mil millones de suscriptores en todo el mundo [12]. Estas redes, al igual que sus predecesoras, funcionan a través de celdas, que dividen el área de servicio en pequeñas regiones geográficas, cada una de ellas identificada como una "celda". En cada celda, todos los dispositivos 5G se conectan a la red mediante ondas de radio a través de una antena.[12]

La principal ventaja de la tecnología 5G radica en su capacidad para soportar un ancho de banda significativamente mayor, lo que se traduce en velocidades de descarga que pueden superar los 10 gigabits por segundo (Gbit/s). Esta mejora no solo beneficia a los teléfonos móviles, sino que también abre la puerta a su utilización en computadoras de escritorio y portátiles. Además, se esperan nuevas aplicaciones en campos como el Internet de las cosas (IoT) y la comunicación entre máquinas. Es importante destacar que los dispositivos 4G no son compatibles con estas nuevas redes, por lo que se requerirá un soporte específico para 5G.

La capacidad de 5G para soportar velocidades de descarga que superan los 10 gigabits por segundo (Gbit/s) representa un hito extraordinario en las telecomunicaciones. Esta tecnología no solo promete llevar las comunicaciones móviles a un nivel superior, sino que también es un habilitador clave para aplicaciones revolucionarias, como la realidad virtual y aumentada, el Internet de las cosas (IoT), la automatización industrial y la conducción autónoma. El rápido desarrollo y despliegue de 5G en todo el mundo hacen que estas perspectivas estén al alcance de nuestras manos.[12]

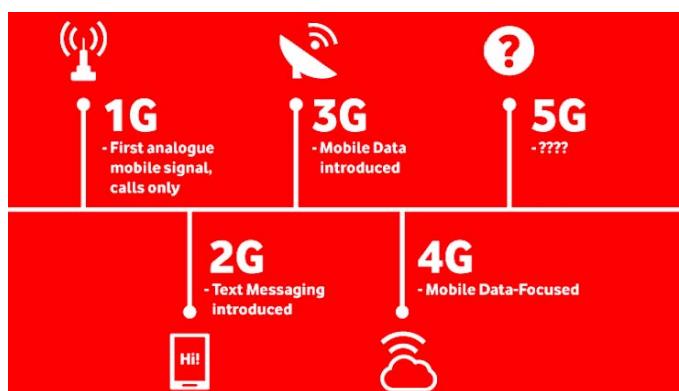


Figura 2.5: Tecnologías de Comunicaciones

2.1.7. Parámetros S

Describen las relaciones de entrada y salida entre los puertos en un sistema eléctrico. En este caso específico, se consideraron dos puertos, P1 y P2, donde S12 representa la potencia transferida del Puerto 2 al Puerto 1, mientras que S21 representa la potencia transferida del Puerto 1 al Puerto 2. Un puerto se define como el punto donde la energía eléctrica puede ser entregada en forma de voltaje y corriente. En el contexto de un sistema de comunicación, como por ejemplo dos radios, los terminales de las radios que suministran energía a las antenas se consideran los dos puertos. Por lo tanto, S11 indica la potencia reflejada que la primera radio intenta entregar a la antena correspondiente, mientras que S22 refleja la potencia que la segunda radio intenta entregar a su antena. Además, S12 representa la potencia de la segunda radio que se transfiere a través de la antena 1 para llegar a la primera radio. Es esencial tener en cuenta que, en general, los parámetros S varían con la frecuencia.

2.2. Estándares de la Solución

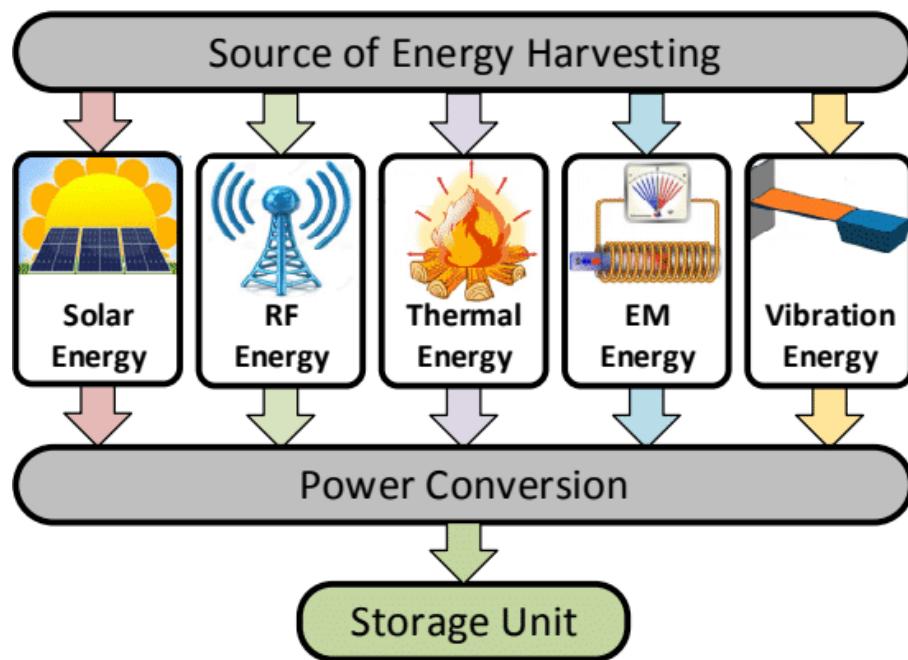
- IEEE 1390-2020: un estándar internacional que establece un formato para la presentación de información de estándares en documentos técnicos. Este estándar se utiliza comúnmente en la sección de estándares de los trabajos de grado para documentar el uso de estándares en una investigación o desarrollo.[21]
- FCC (Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos): La FCC establece estándares para una variedad de tecnologías de redes inalámbricas, incluidas las redes 4G LTE, 5G y Wi-Fi. Estos estándares definen los parámetros técnicos que deben cumplir las redes inalámbricas para garantizar que funcionen de manera segura y eficiente.[22]
- IEC 60950-1: El IEC 60950-1 es un estándar internacional que establece los requisitos de seguridad para los equipos de tecnología de la información (TI). El estándar se aplica a los equipos alimentados por red o batería, incluidos los equipos de trabajo eléctricos y equipos relacionados, que no excedan los 600 V.[23]
- IEC 62368-1: estándar internacional que establece los requisitos de seguridad para los equipos de tecnología de audio, video, información y comunicaciones (AV/ITC) y máquinas de trabajo y oficina con una tensión nominal que no excede los 600 V.[23]
- ISO 50001:2018: estándar internacional que especifica los requisitos para un sistema de gestión de la energía (SGE). Un SGE es un sistema que ayuda a las organizaciones a mejorar su desempeño energético, reduciendo su consumo de energía y sus costes energéticos.[24]
- IEEE 802.11: conjunto de estándares para redes inalámbricas locales (WLAN) desarrollado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). El estándar define las especificaciones físicas y de capa de enlace de datos para las redes inalámbricas, que se basan en la tecnología de acceso múltiple por división de código (CSMA/CA).[25]

- Directivas de la Unión Europea (CE):La Unión Europea (UE) ha desarrollando una serie de directivas para garantizar la seguridad y la eficiencia de los recolectores de energía. Estas directivas se aplican a todos los recolectores de energía que se comercializan o ponen en servicio en la UE.[26]

Capítulo 3

Estado del Arte

En el proceso de investigación que precedió a este trabajo de grado, se realizó una extensa investigación y lecturas, destacando ciertos artículos clave que resultaron fundamentales para comprender a fondo el tema en cuestión. Entre estos artículos se encuentra **A comprehensive review on high-efficiency RF-DC converter for energy harvesting applications** [27], una publicación que arroja luz sobre la técnica de captura de energía del medio ambiente en forma de ondas electromagnéticas de RF, transformándola en energía eléctrica para alimentar dispositivos como microcontroladores y sensores de temperatura. Este enfoque no solo demuestra la versatilidad de la tecnología, sino también su capacidad para aprovechar diversas fuentes de energía de RF, tales como redes celulares, transmisiones de televisión, redes de radio, y señales de Bluetooth y wifi, ilustrando así su potencial en diferentes contextos [27].



24

Figura 3.1: Diagrama de las fuentes de energía para aplicaciones de cosecha de energía

El artículo mencionado previamente también aborda a fondo los principios físicos

que sustentan esta tecnología, así como sus aplicaciones potenciales. Además, explora los desafíos técnicos que han sido superados gracias a la innovación, incluyendo la baja densidad de potencia y la variabilidad del entorno. Esta revisión crítica de los obstáculos superados resalta la significativa relevancia e impacto del campo de estudio en el que nos encontramos inmersos.

En cuanto a los componentes clave de los sistemas de recolección de energía de radiofrecuencia (RF), el artículo proporciona una meticulosa descripción de la función y diseño óptimo de cada elemento esencial. Desde la antena, encargada de captar la energía electromagnética, hasta el circuito rectificador y el dispositivo de almacenamiento, cada componente se presenta en un contexto técnico preciso. Además, se exploran diversas técnicas de optimización y mejoras propuestas en la literatura científica, brindando así una visión completa y actualizada de los avances más recientes en este campo de investigación.

Un aspecto crucial de este artículo es su detallada evaluación y comparación de los sistemas RFRH existentes. A través de criterios meticulosamente definidos y métricas específicas, se lleva a cabo una evaluación objetiva y completa del rendimiento y la eficiencia de estos sistemas. Factores como la potencia de entrada, la potencia de salida, la sensibilidad, el rango de operación y el factor de calidad son analizados minuciosamente, proporcionando así una evaluación detallada y equitativa de los sistemas actualmente disponibles. Esta comparación de resultados experimentales y teóricos extraídos de diferentes sistemas RFRH, tal como se presenta en la literatura especializada, subraya las fortalezas y debilidades de cada enfoque, ofreciendo una perspectiva crítica y balanceada de las investigaciones previas en el campo de la recolección de energía de radiofrecuencia.[27]

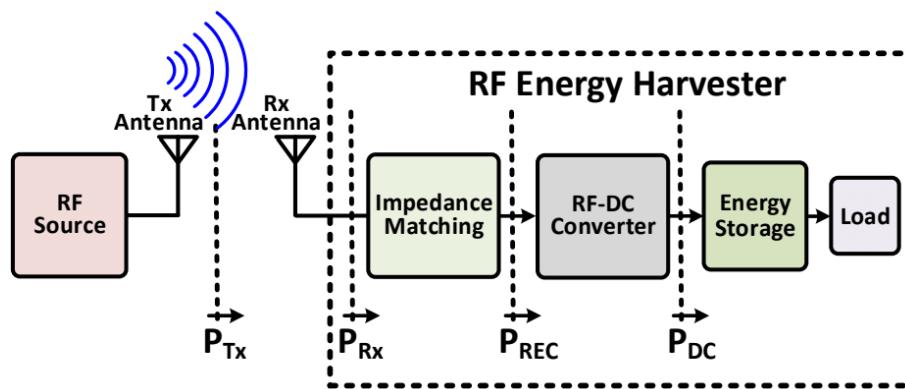


Figura 3.2: Diagrama de un cosechador de energía de radiofrecuencia con un convertidor RF-DC

Además, el libro: **An Energy Harvesting Receiver Utilizing Microstrip-Filter Technology for IoT devices in 5G Network**, está dedicado al diseño y la implementación de un convertidor de radiofrecuencia a corriente directa (RF-DC) para aplicaciones de recolección de energía de radiofrecuencia (RFRH). Este convertidor utiliza un esquema innovador de cancelación de voltaje umbral (Vth) para compensar el Vth de los dispositivos rectificadores, logrando así mejorar la eficiencia de conversión de potencia (PCE). Trabajando a frecuencias de 900 MHz y 2.4 GHz, el convertidor ha sido implementado con tecnología CMOS de 180 nm. Los resultados experimentales obtenidos demuestran que el convertidor alcanza una PCE máxima del 38.5 % a una potencia de -12 dBm y presenta una sensibilidad de

-20 dBm. Este artículo no solo profundiza en los conceptos básicos y los desafíos inherentes al RFRH, sino que también explora los elementos clave del sistema, como la antena, la red de adaptación de impedancia y el dispositivo de almacenamiento o carga, proporcionando así una visión holística de los sistemas de recolección de energía de radiofrecuencia [28].

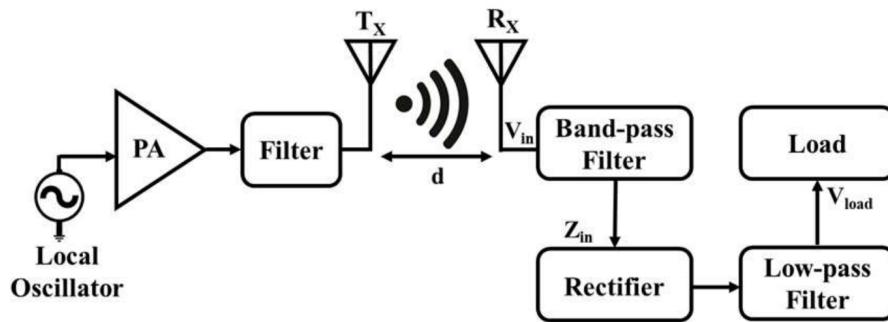


Figura 3.3: Diagrama de bloques de un cosechador de energía de radiofrecuencia teórico. [1]

El documento mencionado anteriormente destaca la implementación de un filtro pasa banda Chebyshev de 3.º orden, diseñado con una precisión milimétrica para mantener una óptima coincidencia de impedancia entre la antena y el rectificador. Este filtro, con una pérdida de inserción inferior a -33 dB en el rango de 12.22 GHz a 17.20 GHz, garantiza una transmisión de señal eficiente y estable.

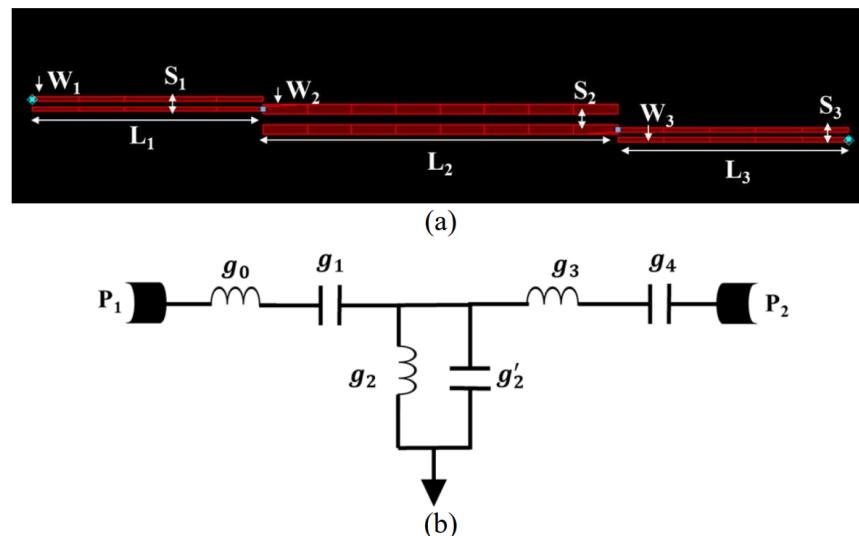


Figura 3.4: a) Modelo de un filtro pasabanda en Microcinta y b) su equivalente en parámetros distribuidos

Además, se emplea un filtro pasa bajo elíptico de 5.º orden, específicamente diseñado para modular la señal después del rectificador y proporcionar un voltaje estable al sensor IoT. Con una pérdida de 40 dB a 14 GHz y una respuesta plana por debajo de 9.80 GHz, este filtro asegura una señal uniforme y fiable para los dispositivos IoT[28].

Dentro de **An Energy Harvesting Receiver Utilizing MicrostripFilter Technology for IoT devices in 5G Network.**, se utiliza un multiplicador de voltaje de una etapa, empleando diodos Schottky para convertir la señal alterna en un voltaje directo multiplicado. Este circuito logra una potencia de salida notable de 25 mW con una entrada de -10 dBm y una eficiencia del 86 %, subrayando la capacidad del sistema para generar energía significativa incluso a partir de señales de entrada relativamente bajas [28].

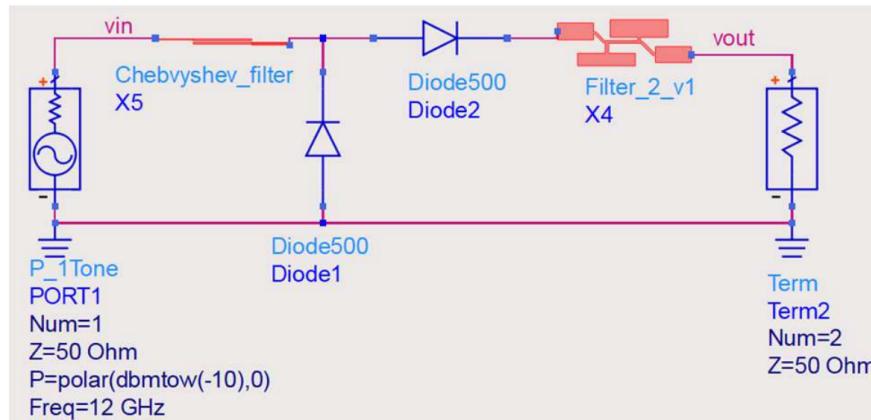


Figura 3.5: Esquemático de un Circuito Multiplicador de voltaje conectado entre filtros

Se concluye que la recolección de energía de radiofrecuencia representa un campo de investigación prometedor con amplias aplicaciones en diversos sectores. El análisis exhaustivo de investigaciones clave, como el artículo 'A comprehensive review on high-efficiency RF-DC converter for energy harvesting applications', subraya la versatilidad y el potencial de esta tecnología para aprovechar fuentes de energía de RF variadas y su capacidad para alimentar dispositivos con eficiencia. Se destaca la importancia de comprender los principios físicos y los avances en los componentes esenciales de los sistemas de recolección de energía, así como las estrategias de optimización propuestas en la literatura. La evaluación comparativa de sistemas existentes ofrece una visión equilibrada de sus ventajas y limitaciones, proporcionando un marco para el avance futuro en esta área. Además, el artículo 'An Energy Harvesting Receiver Utilizing MicrostripFilter Technology for IoT devices in 5G Network' profundiza en el diseño de convertidores RF-DC, destacando la implementación de filtros precisos para mantener la estabilidad de la señal y resaltando la capacidad de generar potencia incluso con señales de entrada reducidas, lo que abre perspectivas prácticas para aplicaciones en dispositivos IoT en redes 5G. Estas contribuciones consolidan la relevancia y el potencial de la recolección de energía de radiofrecuencia como un área clave en la innovación tecnológica actual y futura.

Capítulo 4

Diseño

4.1. Descripción General de la Solución

La propuesta planteada se centra en un sistema de filtrado diseñado con el propósito de maximizar la captación de energía de las ondas de radiofrecuencia (RF), específicamente orientado a la banda de frecuencia de 3 GHz a 3.3 GHz, característica de la banda baja de 5G. Inicialmente, la señal RF penetra el sistema a través de una línea de transmisión que desempeña la función de un filtro pasabanda de líneas paralelas, ejerciendo una discriminación precisa de frecuencias no pertinentes y permitiendo únicamente el avance de las frecuencias de interés hacia las siguientes fases del proceso. Tras atravesar este filtro, la señal experimenta un proceso de rectificación para eliminar cualquier residuo de corriente alterna (AC) y, a continuación, se somete a un segundo filtro pasabajos. Esta etapa final se encarga de mitigar cualquier irregularidad residual en la señal y asegurar la generación de un voltaje de corriente continua (DC) óptimo para la alimentación de una carga específica.

Es esencial destacar que este proyecto se distingue por su enfoque exploratorio. La investigación realizada en este trabajo se centra en el desarrollo de un sistema de filtrado basado en la escasa literatura que aborda cuestiones relacionadas con el filtrado y la recolección de energía de RF, presentando similitudes con investigaciones previas. La idea central es que este sistema de filtrado tiene el potencial de mejorar considerablemente la eficiencia en la recolección de energía del dispositivo cosechador de RF. Las simulaciones y pruebas que detallaremos más adelante ofrecerán una evaluación clara de esta posible mejora.

El objetivo principal de este estudio es contribuir a una comprensión más profunda de la recolección de energía a partir de señales RF y, al mismo tiempo, establecer un precedente significativo en este campo. Es importante subrayar que la novedad de este proyecto reside en su enfoque en la utilización de la banda de RF de 5G, representando un avance importante y una extensión del conocimiento existente en esta área de investigación.

4.2. Diseño

Este proyecto de grado se centra en una exploración detallada de cómo un sistema de filtrado diseñado para ondas de radiofrecuencia podría mejorar significativamente la recolección de energía en un sistema cosechador que hace uso de estas ondas RF. Es importante destacar que este proyecto se considera exploratorio, lo que

significa que no se puede garantizar una solución definitiva ni un éxito absoluto en su implementación.

El enfoque primordial de esta investigación se centra en la elaboración de un filtro pasabanda mediante la aplicación del software Ansys. Se diseña una línea de transmisión con configuración específica para desempeñar como un filtro pasabanda utilizando la topología de líneas paralelas. El objetivo fundamental radica en la capacidad de filtrar una amplia diversidad de señales que poseen distintas frecuencias. Este filtro busca atenuar las frecuencias no deseadas, restringiendo el paso exclusivamente a señales dentro del rango de 3 GHz a 3.3 GHz, alineado con la banda baja característica de la tecnología 5G.

Ahora, incorporando la información oficial del MINTIC sobre el 'INFORME PRELIMINAR DE EVALUACIÓN DE SOLICITUDES- RESOLUCIÓN 3947 DE 2023 Y SUS MODIFICACIONES'[29], este documento tiene un enfoque esencial en la habilitación de la banda baja de 5G. Este análisis resalta la importancia de ajustar y adaptar las tecnologías a esta banda específica para impulsar el desarrollo e implementación efectiva de la tecnología 5G en su rango de frecuencias correspondiente. Este informe refuerza la relevancia y la urgencia de investigaciones y desarrollos como el diseño de filtros pasabanda orientados a esta franja de frecuencias específica para optimizar el desempeño de los sistemas en el contexto de la infraestructura de la red 5G.

Continuando con el funcionamiento, en su paso a través del filtro, se espera que se permita solo el paso de la banda deseada de 3.3GHz, lo que resultará en una señal filtrada que retiene solo la información relevante para la solución. Después de salir del filtro pasabanda, la señal pasará por un rectificador de tipo doblador para eliminar sus componentes de corriente alterna (AC). Posteriormente, se someterá a un filtro pasabajos que eliminará cualquier ripple restante y proporcionará una señal de corriente continua (DC), la cuales requerida para poder energizar cargas o incluso almacenarse para un uso futuro.

En el proceso de diseño y desarrollo de filtros de microcinta, se evaluaron diversas plataformas de software destinadas a la simulación de circuitos específicos para este propósito. Tras considerar múltiples opciones, se destacaron tres alternativas principales: Ansys, CST y ADS. En colaboración con el Ing. Arturo Fajardo Jaimes, Ph.D., se tomó la determinación de emplear Ansys Electronics como la herramienta ideal para la ejecución de estos diseños. La elección de Ansys se basó en su capacidad para realizar simulaciones en HFSS y en layout, siendo además la única opción accesible a través de la universidad. Esta selección se fundamentó en su versatilidad técnica y en la disponibilidad práctica, asegurando así un enfoque óptimo para la consecución de los objetivos planteados en este trabajo.

Nuhertz Filter Solutions, un software de la familia Ansys, que aceleró drásticamente el proceso de diseño de filtros planos y parámetros distribuidos. Esta herramienta no solo ofrece la posibilidad de diseño de filtros de manera amigable, sino que también proporciona una biblioteca completa de componentes, facilitando la predicción instantánea del rendimiento del circuito. Para los filtros planos, Nuhertz FilterSolutions presenta una lista de geometrías para el tipo de filtro seleccionado. A medida que se elige cada una, la herramienta predice automáticamente la respuesta del filtro. La geometría plana se genera automáticamente, y el tamaño total del filtro se calcula de manera precisa. Las predicciones de respuesta de frecuencia de Nuhertz se basan en modelos derivados de soluciones de parámetros distribuidos de los com-

ponentes del filtro. Además, Ansys Nuhertz Filter Solutions permite la comunicación entre softwares Ansys para que toda la geometría del filtro se puede exportar a Ansys HFSS para una simulación adecuada y optimización del rendimiento del filtro.[28]

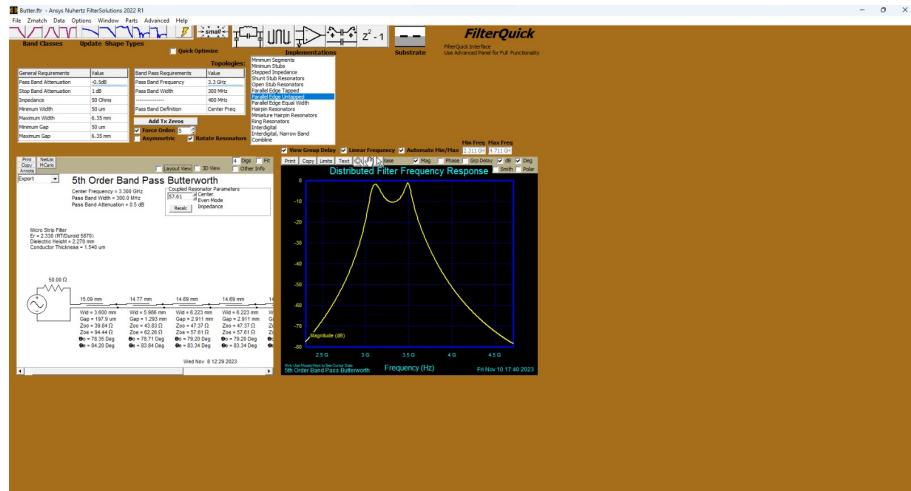


Figura 4.1: Interfaz de Nuhertz Filtro Pasa Banda

Además de su eficacia en filtros planos, Nuhertz FilterSolutions también incluye herramientas de síntesis para filtros digitales, condensadores comutados y componentes activos. La versatilidad de esta herramienta se destaca aún más al permitir la exportación de la lista de redes de filtros activos en formato SPICE. Esta característica se revela especialmente útil cuando se llevó a cabo la co-simulación de todo el sistema, donde se integró la simulación con el rectificador hecha en LTspice, permitiendo una evaluación del sistema en su conjunto. Con esta metodología, respaldada por herramientas avanzadas, se garantiza una aproximación precisa para el diseño y desarrollo de los filtros en microcinta, el rectificador doblador y todo el sistema en conjunto en este proyecto de investigación.[28]

4.3. Modelo Arquitectónico

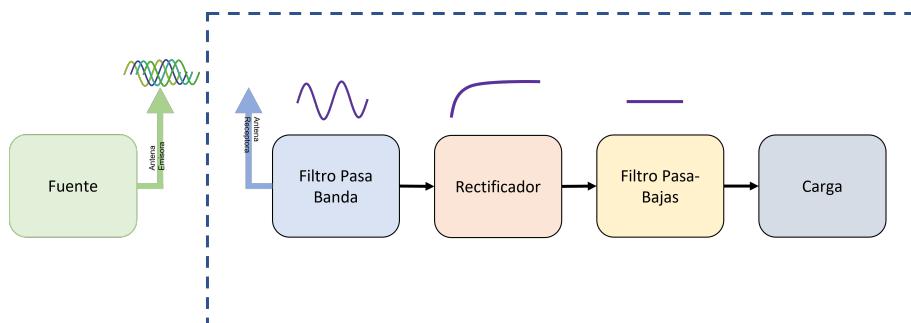


Figura 4.2: Diagrama del Sistema

4.3.1. Descripción Completa de Bloques - Modelo Arquitectónico

La Figura 4.2 presenta el diagrama de bloques que representa el diseño conceptual de la propuesta de solución para la optimización del cosechador de energía, con un enfoque en el sistema de filtrado, el rectificador, el filtro pasabanda y la carga. La ilustración incluye representaciones visuales que ayudan a comprender mejor el funcionamiento de cada bloque.

En primer lugar, en el bloque de la fuente, ubicado sobre la antena transmisora, se representan varias señales sinusoidales desfasadas y superpuestas entre sí. Estas representan el amplio espectro de ondas de radiofrecuencia (RF) generadas por la antena transmisora o un generador. A continuación, encontramos el bloque de filtro pasabanda, donde se muestra en la parte superior un funcionamiento básico de este bloque en donde toma el conjunto de señales de la fuente y filtra a una única señal sinusoidal, lo que ilustra la discriminación exitosa, permitiendo el paso del rango deseado.

El siguiente bloque es el rectificador, que presenta la señal de salida del filtro pasabanda después de pasar por un rectificador doblador con diodos que operan en frecuencias del orden de los GHz. Luego, en el bloque del filtro pasabajos, cuyo propósito es eliminar el ripple restante y llevar la señal a un valor de corriente continua (DC) que pueda ser aprovechado por una carga, se observa una señal continua que representa este proceso.

Finalmente, el bloque final es una carga de 50 Ohmios que pueda conectarse al sistema para utilizar la energía generada.

4.4. Metodología y Diseño de Filtros

En el proceso de diseño de los filtros, se recurrió al software Ansys Nuhertz FilterSolutions y Ansys Circuits. Para el filtro pasabanda, con parámetros cruciales como la frecuencia central (3.3 GHz), frecuencias de corte y anchos de banda claramente definidos, se optó por la topología Butterworth en Ansys Nuhertz. Luego, se ingresaron y ajustaron los parámetros necesarios para el diseño.

Una de las ventajas significativas de la herramienta Ansys Nuhertz es su capacidad para explorar diversas opciones al variar el orden del filtro. Esta funcionalidad permitió la simulación de filtros de diferentes órdenes y la evaluación de sus respuestas en frecuencia.

El proceso de diseño del filtro pasabajos siguió una lógica similar. Dado que el objetivo principal de este filtro era eliminar el ruido rizado al final del sistema, se realizaron pruebas dentro de Ansys Nuhertz. Tras un análisis de las evaluaciones, se tomó la decisión de implementar un filtro pasabajos de tipo Chebyshev de cuarto orden.

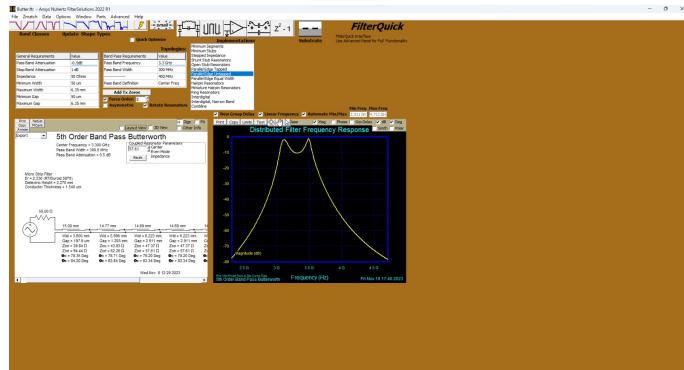


Figura 4.3: Interfaz de Nuhertz

4.4.1. Evaluación Teórica del Orden de los Filtros

Se emplearon las fórmulas 4.1 y 4.2 como herramientas fundamentales para determinar el orden mínimo del filtro pasabajos. En estas expresiones, P representa la atenuación en decibelios (dB) de la banda de rechazo, L corresponde en dB del ripple deseado, F-30 es la frecuencia de la banda de rechazo, y Fc denota la frecuencia de corte del filtro.

$$n = \frac{\cosh^{-1} \frac{10^{0,1*P}-1}{10^{0,1*L}-1}}{\cosh^{-1} U} \quad (4.1)$$

$$U = \frac{F_{-30\text{dB}}}{F_c} \quad (4.2)$$

Para definir las especificaciones del filtro, se establecen los siguientes parámetros: una frecuencia de corte (Fc) de 0.6 GHz, esencial para la atenuación de frecuencias que puedan afectar la salida en corriente continua; un rizado (ripple) de 0.9 dB, determinante para conocer el orden mínimo del filtro que cumpla con los requisitos del cliente; y una atenuación de 30 dB a 1.2 GHz, con el fin de lograr una reducción significativa en esa frecuencia.

En la resolución de este problema, se optará por emplear los parámetros mencionados para el diseño del filtro pasabajos: Fc=0.6 GHz, L=0.9 dB (asegurando que sea inferior a 1 dB), P=30 dB y F-30dB=1.2 GHz. Estos valores establecidos ofrecen un marco específico y detallado que dirigirá el proceso de cálculo y diseño, asegurando la eficacia del filtro en términos de atenuación, rizado y respuesta en frecuencia.

Al emplear los parámetros especificados en las fórmulas mencionadas, se determina que U=2. Esto indica que el valor del orden del filtro debe ser igual o superior a 3.9. Con el objetivo de optimizar la eficiencia del filtro y considerando las necesidades prácticas, se optó por seleccionar un orden de 4. Esta elección se basa en la búsqueda de un equilibrio entre el rendimiento deseado y la eficiencia del diseño, donde un orden más bajo aún satisface los criterios establecidos sin comprometer la eficacia del filtro pasabajos.

4.4.2. Componentes de Espectro de la Fuente:

Se llevó a cabo una prueba preliminar con el objetivo de comprender y analizar las señales de radiofrecuencia preexistentes en el entorno. Este proceso se llevó a

cabo empleando un analizador de espectro, tal como se ilustra en la figura 4.4. Cabe destacar que el punto más destacado en el espectro corresponde a la banda de 2.5 GHz, la cual es conocida por ser utilizada por diversas tecnologías.

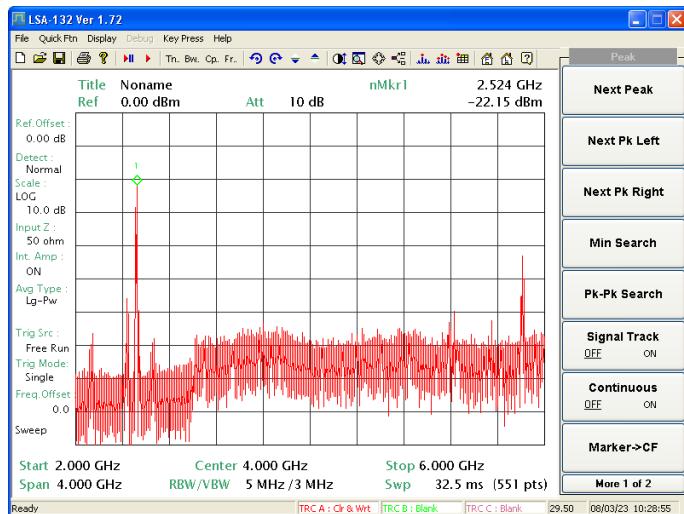


Figura 4.4: Valor práctico de la potencia

Esta medición se llevó a cabo utilizando la antena seleccionada para nuestra solución. Como se puede apreciar en los resultados, se obtuvo un pico con una amplitud de -22.15 dBm, equivalente a 0.01746 Vrms. Este valor representa el límite máximo alcanzado en la banda de frecuencia evaluada. Con esta información en mente, se tomó la decisión de generar una señal artificial con el propósito de explorar otras bandas de frecuencia, en particular, la banda de 3.3 GHz.

4.4.3. Filtro Pasabanda (Microcinta):

El segundo bloque dentro de la arquitectura del sistema corresponde al filtro pasa banda diseñado utilizando Ansys Nuhertz FilterSolutions (Figura 4.5). Este filtro pasa banda, de quinto orden, ha sido desarrollado con el objetivo primordial de maximizar la eficiencia. Esta optimización aborda tanto el orden del filtro como la amplitud de la banda de paso, teniendo en cuenta tanto las características de las señales que transitarán a través del filtro como las especificaciones de diseño establecidas.

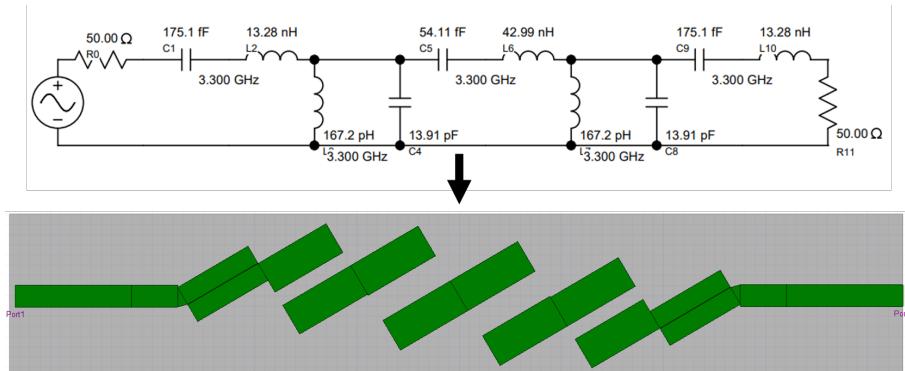


Figura 4.5: Equivalencia filtro pasa banda

En el proceso de selección del filtro pasabanda, se evaluaron tres tipos principales de filtros: Butterworth, Chebyshev II y Elíptico, variando entre órdenes del 2do al 5to. Esta etapa es crucial debido al papel del filtro en el acoplamiento de impedancias en el sistema y la minimización de pérdidas durante la conexión del sistema de recolección de energía. Esto es esencial para asegurar que el sistema entregue la máxima potencia, optimizando su eficiencia. Lograr un acoplamiento ideal de impedancias entre el sistema y la carga es clave; cuando ambas impedancias son iguales, se obtiene la máxima transferencia de potencia por división de voltaje.

Para realizar esta evaluación, se empleó el software ANSYS Electronics. Esta herramienta facilitó un análisis de los parámetros S11 y S12 de cada tipo de filtro y sus órdenes respectivos. Este enfoque permitió seleccionar el filtro que mejor se adaptara a los requisitos de acoplamiento de impedancias, maximizando así la transferencia de potencia en el sistema.

El filtro pasa banda seleccionado, de quinto orden, fue elegido para adaptarse a las necesidades de este proyecto. Durante el proceso de desarrollo, se consideraron tanto la naturaleza de las señales que atravesarán el filtro como las especificaciones del diseño. Una decisión crucial en este proceso fue la elección de la tecnología planar de microcinta para implementar este filtro. Esta elección se basó en un desarrollo que involucró la evaluación de diversas topologías disponibles para esta aplicación. La topología seleccionada, conocida como "paralela de borde no acoplada", resultó ser la opción idónea para alcanzar los objetivos del proyecto, ofreciendo un equilibrio óptimo entre rendimiento y eficiencia. Estas decisiones fundamentales aseguran no solo un acople adecuado de impedancias en el sistema, sino también una minimización efectiva de las pérdidas durante la conexión del sistema de recolección.

Al evaluar el comportamiento del filtro a través del parámetro S11, se realizó una conversión del valor de S11 de dB a magnitud utilizando la siguiente fórmula:

$$Z_{\text{in}} = \frac{Z_0(1 + S_{11})}{1 - S_{11}} \quad (4.3)$$

$$S_{11}(z) = 10^{\frac{S_{11,\text{dB}}(z)}{20}} \quad (4.4)$$

$$Z_{\text{in}}(z) = \frac{Z_0(1 + S_{11}(z))}{1 - S_{11}(z)} \quad (4.5)$$

$$\frac{dZ_{\text{in}}}{dz} = -\frac{Z_0(1 + S_{11}(z))}{(1 - S_{11}(z))^2} \quad (4.6)$$

$$\frac{dZ_{\text{in}}}{dz} = -Z_0(1 + S_{11}) \quad (4.7)$$

Esta conversión fue esencial para crear una ecuación que proporcionara un factor de selección, permitiendo así analizar la variación de la impedancia en función de la frecuencia. Este análisis detallado y preciso fue fundamental para tomar la decisión final en la elección del filtro. Finalmente, se optó por un diseño Butterworth que cumplía con los requisitos específicos del sistema de recolección. Una vez obtenidos los valores del parámetro S11 de la señal, se exportaron a un archivo .csv para su posterior procesamiento en MATLAB. En MATLAB, se analizó la respuesta de la impedancia en relación con la frecuencia, lo que facilitó la selección del filtro pasa-banda más adecuado para el circuito en cuestión. En el anexo adjunto, se presentan imágenes del parámetro S11 del filtro seleccionado, junto con la respuesta de la impedancia en función de la frecuencia. Estos ejemplos brindan una visión extensa y detallada de los filtros realizados y su comparativa con el filtro seleccionado.

A continuación mostraremos los resultados de las simulaciones de los filtros respectivos con su orden, la gráfica del S11 y la respuesta de impedancia con la frecuencia.

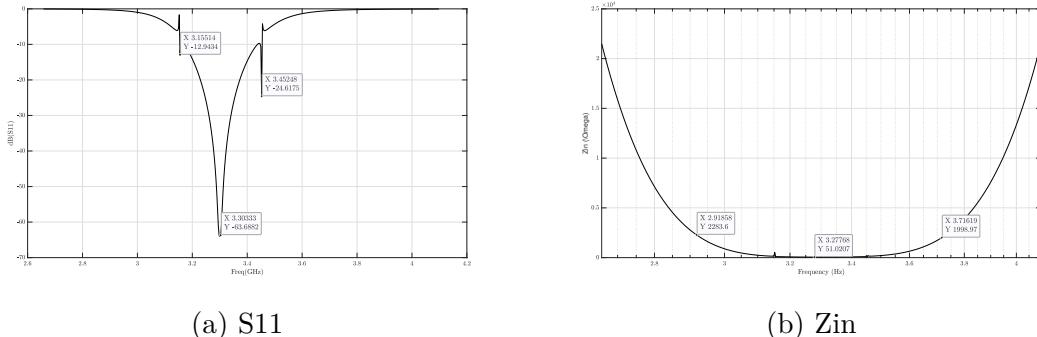


Figura 4.6: Respuestas filtro elíptico 4th

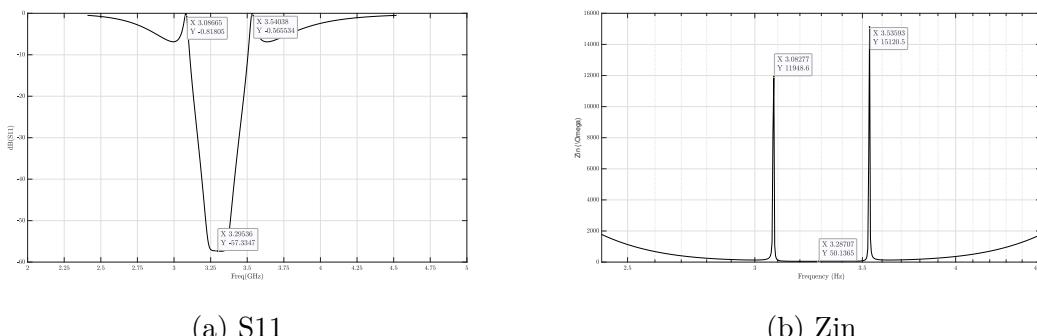
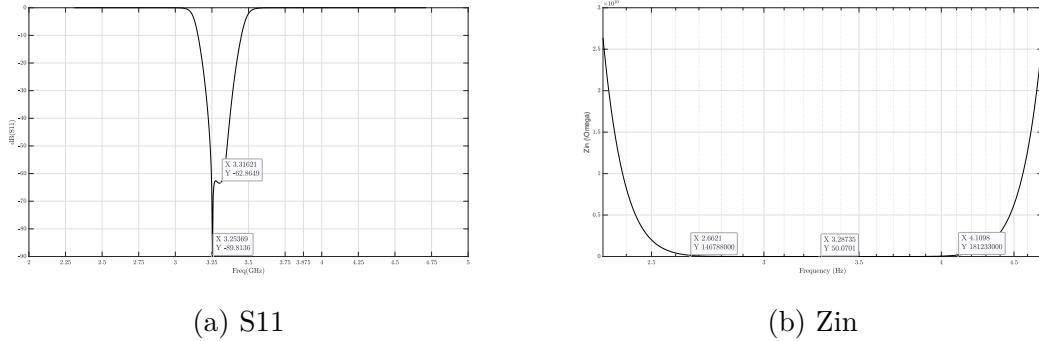


Figura 4.7: Respuestas filtro Chebyshev 4th



(a) S11

(b) Zin

Figura 4.8: Respuestas filtro Butterworth 5th

Como podemos evidenciar en la tabla previamente expuesta, se puede comprobar que al comparar que, las gráficas de impedancia vs. frecuencia, el filtro Butterworth 5º Orden es que tiene una respuesta constante en las frecuencias deseadas del cosechador de energía comparándola con el Chebyshev; el cual tiene unos picos de 1.2k y 1.5k en 3.08 GHz y 3.53 GHz respectivamente. Debido a esto fue descartado, el chebyshev y el elíptico son descartados debido a que el Butterworth, tiene una respuesta mucho más plana en las frecuencias deseadas. En la parte de anexos podremos encontrar las demás simulaciones de los filtros.

4.4.4. Rectificador Doblador:

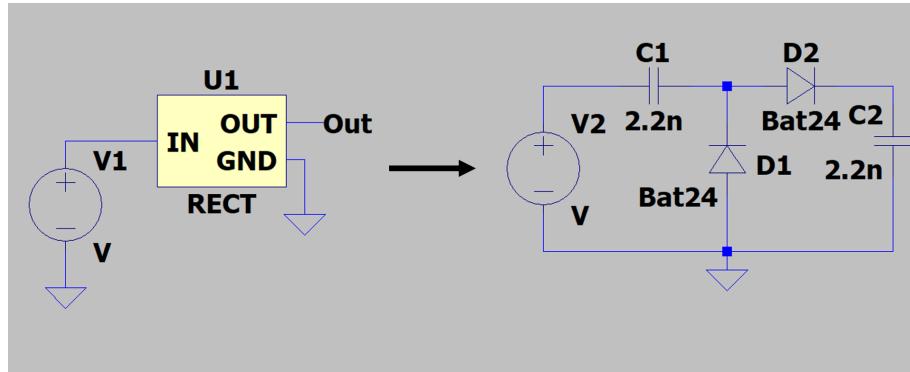


Figura 4.9: Bloque equivalente del rectificador

El siguiente bloque en la arquitectura del sistema es el rectificador doblador, diseñado utilizando la plataforma de simulación LTSpice. La función de este rectificador es convertir la señal de radiofrecuencia (RF) en una forma más adecuada para la posterior alimentación de la carga.

El rectificador doblador ha sido diseñado para garantizar un proceso eficiente de rectificación. Utilizando diodos de RF específicos (diodos BAT2402), este componente es capaz de transformar la señal alterna (AC) proveniente del filtro pasa banda en una señal continua (DC).

La selección de diodos de RF adecuados es un aspecto fundamental en el diseño del rectificador, y se han elegido diodos de alto rendimiento que son capaces de funcionar eficazmente en el rango de frecuencias del orden de los Giga Hertz. Estos diodos se han integrado en una configuración de rectificación doblador de voltaje, lo

que permite aprovechar la señal de entrada para poder generar un DC de un valor superior a la amplitud de entrada en este caso es el doble.

El proceso de diseño del rectificador doblador en LTSpice ha involucrado la simulación de su comportamiento y el ajuste de sus parámetros para lograr una rectificación precisa y eficiente. Se ha prestado especial atención al rendimiento en el rango de frecuencias de 3 GHz a 3.3 GHz, asegurando que el rectificador funcione de manera óptima en las condiciones requeridas por la aplicación.

La incorporación de este rectificador en la arquitectura del sistema permite la transformación de la señal de RF en una señal de corriente continua (DC) sin un rizado significativo, lo que es esencial para alimentar la carga de manera efectiva. A su vez este rectificador fue simulado tanto en LTSpice y Ansys para poder observar su comportamiento teórico.

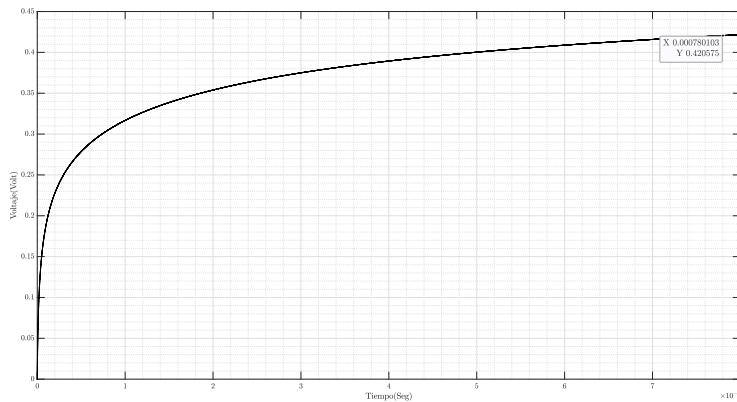


Figura 4.10: Simulación del rectificador en LTSPICE

4.4.5. Filtro Pasa Bajas (Microcinta):

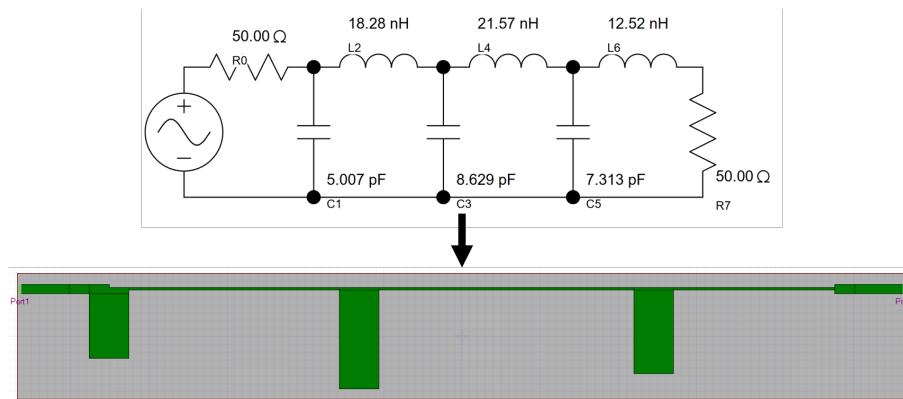


Figura 4.11: Equivalente filtro pasa bajas

El tercer componente en la arquitectura del sistema es el filtro pasabajas diseñado en Ansys Nuhertz FilterSolutions. Este filtro, de cuarto orden, fue concebido para adaptarse a los requerimientos del proyecto tras una exhaustiva evaluación de diversas topologías y tipos de filtros. Tras este análisis, se optó por un diseño que

empleara el tipo de filtro de segmentos mínimos, utilizando la topología Chebyshev de orden 4.

Al igual que en la selección del filtro pasabanda, en el proceso de elección del filtro pasabajas se probaron y compararon distintos tipos de filtros y órdenes, abarcando desde 2do hasta 5to. Se empleó el software ANSYS Electronics para llevar a cabo esta evaluación, lo que permitió una consideración minuciosa de cada opción y su impacto en el sistema, asegurando la elección más adecuada para satisfacer las necesidades del proyecto..

4.4.6. Cosimulación

Los componentes necesarios para el proyecto incluyen un filtro pasa banda, un sistema rectificador con diodos y un filtro pasa bajas, cada uno de los cuales ha sido diseñado y posteriormente sometido a simulaciones exhaustivas utilizando software especializado. En particular, los filtros han sido simulados en Ansys, mientras que el sistema rectificador ha sido evaluado en múltiples entornos, incluyendo LTSpice, OrcadSpice y Simulink de MatLab.

La necesidad de llevar a cabo una co-simulación de estos sistemas radica en la importancia de comprender su comportamiento en conjunto. Dado que dos de estos componentes son sistemas de líneas de transmisión, la co-simulación se ha realizado con Ansys Circuits, que ofrece la capacidad de integrar estos sistemas en las cuales se pueden lograr realizar una simulación circuital (Rectificador) y electromagnética (Filtros en microcinta) conjunta.

Para lograr esta integración, se ha transformado el modelo del diodo BAT2402 integrado a un sistema completo, un rectificador doblador de LTSpice en un formato de netlist (.cir) que puede ser interpretado por Ansys como un bloque aislado que corresponde a todo el rectificador y que contiene: el componente de diodo de radiofrecuencia y capacitores que inherentes al diseño. Esto garantiza que el diodo se comporte en consonancia con las especificaciones previstas. Ver imagen 4.12

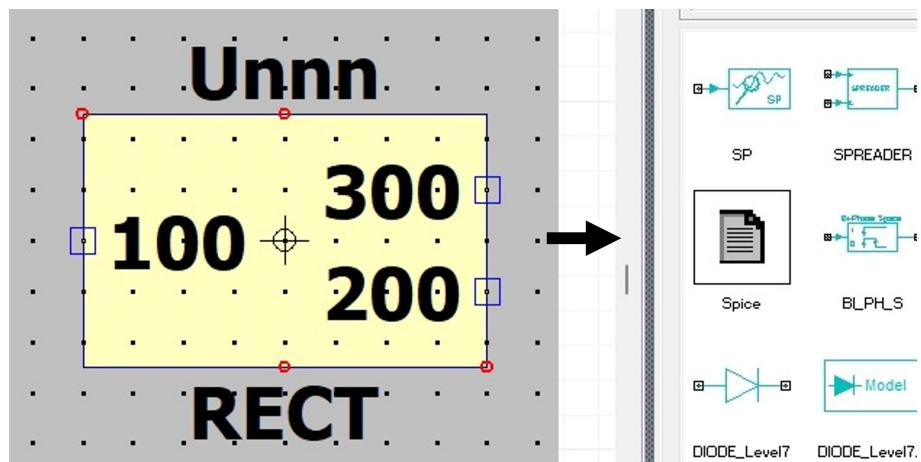


Figura 4.12: Rectificador en LTSpice a archivo .cir de Ansys

La complejidad de esta co-simulación radica en la necesidad de unir los sistemas de líneas de transmisión y los sistemas electrónicos, que operan de manera distinta. Cada línea de transmisión debe convertirse en un bloque único con puertos para permitir una interconexión adecuada entre las diferentes etapas del sistema. Estos

bloques se generan a partir de los archivos tridimensionales de las líneas de transmisión previamente diseñadas con Ansys Nuhertz y se exportan como componentes circuital en Ansys Circuits. Ver imagen 4.13.

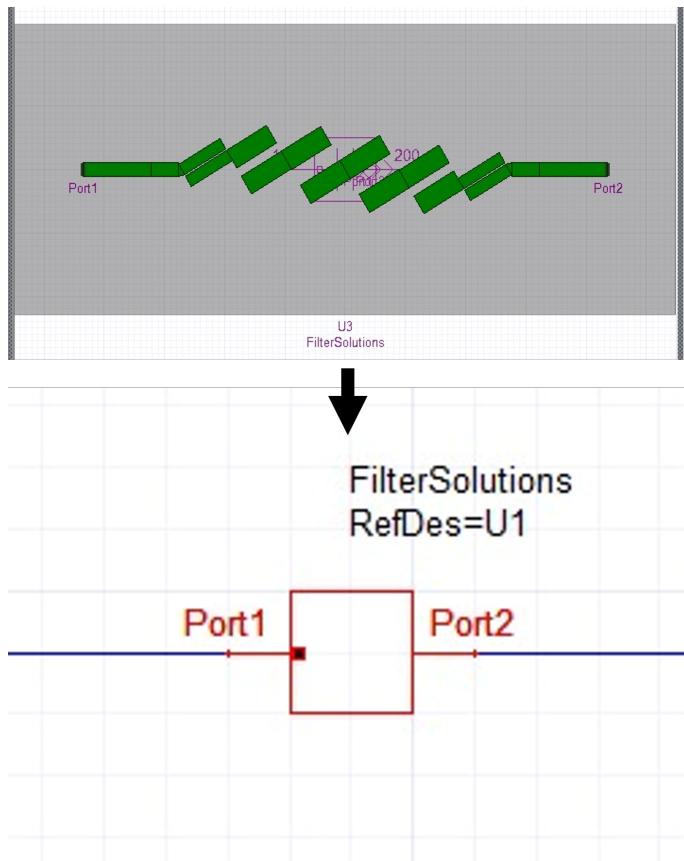


Figura 4.13: Filtro Pasabandas a Bloque de Integración en Ansys Circuits

Para completar la configuración, se establece un generador de señales de RF como una fuente de voltaje AC. Esta fuente entrega 300mV a una frecuencia de 3.3GHz. La simulación se configura para hacer un análisis en DC desde los 0s hasta los 50us, este rango de tiempo tan corto se justifica por los largos tiempos de simulación dentro de Ansys. Ver imagen 4.14

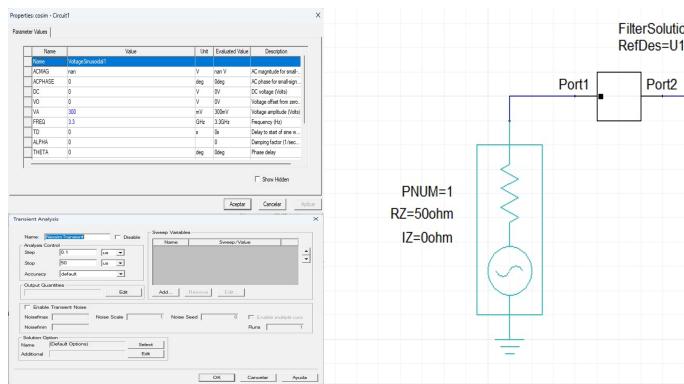


Figura 4.14: Filtro Pasabandas a Bloque de Integración en Ansys Circuits

Entonces, todos los bloques interconectados: Filtro Pasabanda, Rectificador y Filtro pasabajos dentro de ansys

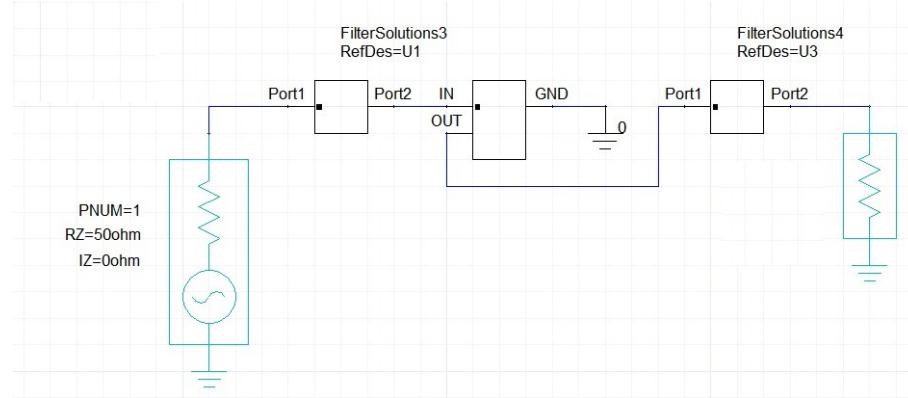


Figura 4.15: Interconexión de Bloques en la Cosimulación dentro de Ansys

Una vez que la cosimulación está correctamente configurada, se procede a realizar la simulación para evaluar el comportamiento del sistema en su conjunto. Se crea un Rectangular Plot dentro de Ansys para poder observar el voltaje en el segundo puerto del sistema, es decir; en la carga. El resultado puede verse en la figura 4.16

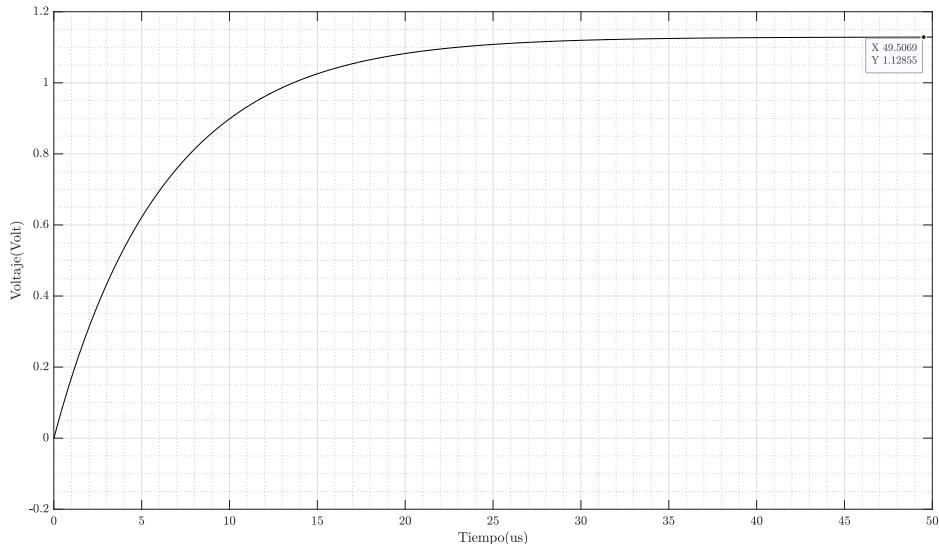


Figura 4.16: Resultado de La Cosimulación

La Figura 4.16 presenta la salida simulada del sistema interconectado utilizando Ansys Circuits, ofreciendo un análisis en estado transitorio, que se encuentra en el dominio del tiempo. Durante este análisis, se observa cómo la señal atraviesa el filtro pasabanda, el rectificador y el filtro pasabajos. Como resultado de esta interacción entre los bloques del sistema, se genera un voltaje DC con un mínimo nivel de fluctuación, aproximadamente de 1.12 voltios, después de un breve transitorio.

Este resultado confirma la coherencia del sistema con las expectativas teóricas iniciales. Los hallazgos de la simulación subrayan la capacidad del sistema para transformar una señal de entrada de 300 mV, con una frecuencia de 3.3 GHz, en un voltaje DC con una amplitud casi duplicada y un rizado mínimo. En resumen, la simulación valida la eficacia del diseño al lograr una conversión exitosa con un rendimiento notablemente estable.

La simulación en estado transitorio demuestra con claridad que el sistema diseñado se comporta según lo previsto, esta cosimulación sirve para validar, al menos en la teórica; la posibilidad de optimizar la recolección de energía de RF en la banda baja de 5G.

4.4.7. Cosimulación: Cambio de Topologías

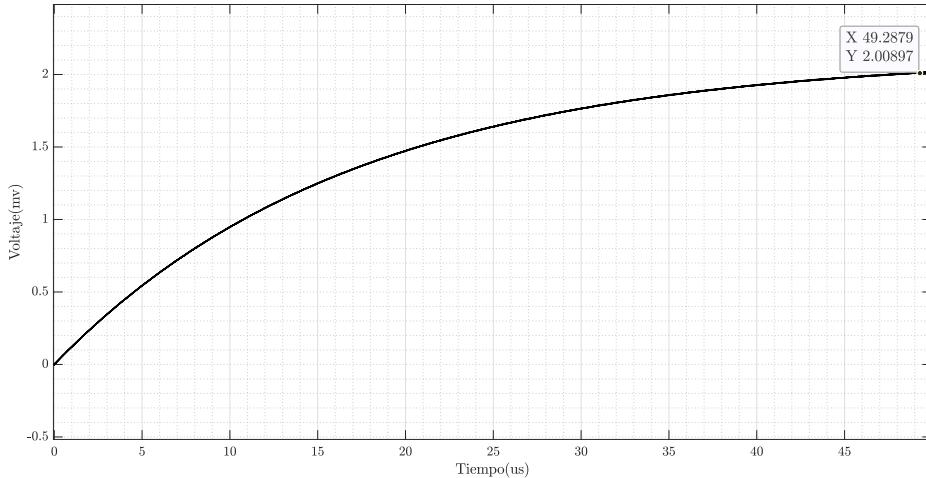


Figura 4.17: Resultado de La Cosimulación Cambio de Topologías

Se realizó una segunda cosimulación empleando dos filtros que previamente habían sido evaluados de forma individual para garantizar su cumplimiento con los requisitos de selección. Tras analizar las diferentes opciones, se optó por el filtro Butterworth de orden 4, el cual, según las pruebas realizadas en el diseño, mostró resultados y características que lo ubicaron como la segunda opción preferida.

La elección de este filtro se fundamentó en su capacidad para mantener una respuesta efectiva y un acople óptimo con una impedancia de 50 Ohms, lo que contribuye al rendimiento eficiente del sistema. Este filtro se consideró especialmente debido a su capacidad para mejorar el desempeño general del sistema, en línea con los parámetros y las exigencias técnicas establecidas.

Se decidió emplear un filtro pasabajos Butterworth de quinto orden, con segmentos mínimos, con el objetivo estratégico de lograr una atenuación mínima de 20 dB. Estos dos filtros se incorporaron al segundo sistema. Al comparar las salidas de este segundo sistema, se confirmó la elección definitiva a favor del sistema de la primera cosimulación. Se observó que dicho sistema solo alcanza una salida de 2 mV, lo cual representa una pérdida considerable considerando que el primer sistema duplica el voltaje de entrada a 300 mV.

Como resultado de este proceso de evaluación y Cosimulación, se concluyó que el primer sistema, es considerablemente más eficiente. Por consiguiente, este sistema se ha identificado como la opción preferida para la impresión y prueba, garantizando un rendimiento superior.

Capítulo 5

Análisis de Resultados

5.1. Protocolos de Prueba

# de prueba	Condiciones de la prueba	Camino activado	Secuencias de entradas	Salidas esperadas
T1	Realización de filtro en ANSYS	Entrada del filtro	1. Diseñar Filtro 2. Editar las características de simulación 3. Simular filtro 4. Obtener graficas características de la salida del filtro	1. Una gráfica con coincidencia teórica donde s1 y bode permitan el mayo paso en 3.3Ghz 2. Ningún error proporcionado por ANSYS
T2	HFSS ANSYS	Entrada y salida en ANSYS	1. Simular HFSS del sistema de bode en 3d 2. Realizar la comprobación de errores en ANSYS	1. Ningún error dado por ANSYS y graficas 3d de la naturaliza del electromagnetismo
T3	Prueba circuito LTSPICE	Entrada y salida	1. Circuito rectificador a simular 2. Perfil de simulación entrada de 300 mV y 3.3Ghz	1. graficas en puntos claves que concuerden con los valores teóricos como el doblaje de voltaje en la salida y carga de los capacitores 2. grafica de 600mV rectificada
T4	Prueba circuito físico de filtros	Fuente de prueba y multímetro	1. Conectar valor DC y AC en los filtros y en el rectificador 2. Medir puntos de prueba	1. Valores de salida que coincidan con los valores de simulación de ANSYS y Itspice
T5	Pruebas Circuito completo	Fuente de prueba y voltímetro	1. conectar a fuente a 3.3Ghz y 300mV 2. Medir puntos de prueba (salida de cada filtro y rectificador)	1. Valores de salida que coincidan con las simulaciones en ANSYS y Itspice
T6	Pruebas circuito físico rectificador	Fuente de prueba y voltímetro	1. conectar a fuente de 3.3GHz y 300mV 2. medir entrada y salida	1. valor de entrada que coincida con valores puestos 2. valores de salida iguales que en Itspice

Cuadro 5.1: Protocolo de pruebas usadas para las distintas etapas del filtro con entradas y salidas esperadas

El protocolo de pruebas presentado en la imagen es un procedimiento sistemático para verificar el funcionamiento de un circuito con filtro. El protocolo consta de seis pruebas. Las pruebas T1 y T2 se realizan en un entorno de simulación, mientras que las pruebas T3, T4 y T5 se realizan en el mundo real. Las salidas esperadas de cada prueba se describen en la imagen. El protocolo de pruebas presentado es un procedimiento adecuado para verificar el funcionamiento de un circuito con filtro. El protocolo es sistemático y completo, y proporciona una garantía de que el circuito funciona correctamente.

5.2. Rectificador

El impreso del rectificador se diseñó y fabricó con pistas de 2 mm de ancho, con el objetivo de realizar pruebas iniciales y evaluar el rendimiento del sistema de rectificación.



Figura 5.1: Circuito Rectificador



Figura 5.2: Escala Circuito Rectificador

Para llevar a cabo las primeras pruebas, se empleó la prueba T6 del protocolo de pruebas. En esta fase, se modificó la entrada del sistema para que fuera generada mediante un generador de señales genérico. La señal de entrada seleccionada tuvo una frecuencia de 3.3kHz y 100MHz, y una amplitud de 600 mV (voltios pico a

pico). En la imagen 5.3a se muestra el punto de prueba correspondiente a la señal de entrada seleccionada. Este punto de prueba se ubicó en el nodo de conexión entre la entrada y el condensador C1, donde la señal generada se observa claramente.

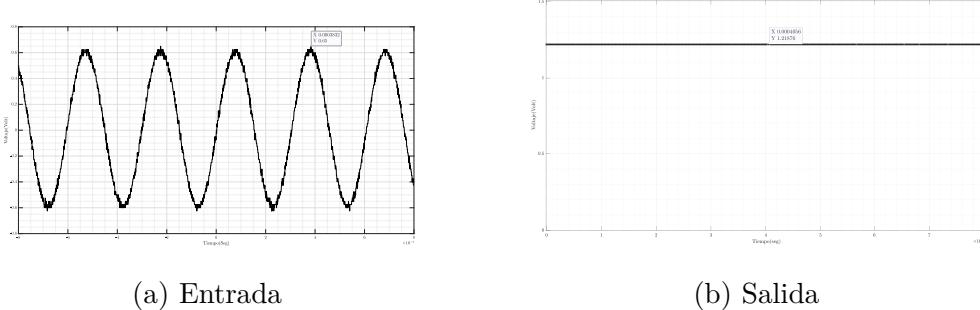


Figura 5.3: Respuesta rectificador físico

Posteriormente, se tomó una lectura en el nodo de conexión que involucra los componentes D2, C2 y la salida del sistema de rectificación. En este punto, deberíamos haber obtenido una señal rectificada y duplicada en su amplitud. No obstante, los resultados obtenidos revelaron que la señal de salida no fue exactamente duplicada, presentando un valor de 1.1 V, tal como se muestra en la imagen 5.3. Esto indica que, si bien la señal no se duplicó de manera perfecta, se logró un aumento en la amplitud a 1.83 veces su valor original.

5.3. Filtro Pasabanda

Para realizar las evaluaciones de los filtros y el sistema completo se realizaron con un VNA (Vector Network Analyzer), se habla un poco más específico en el anexo A.4.

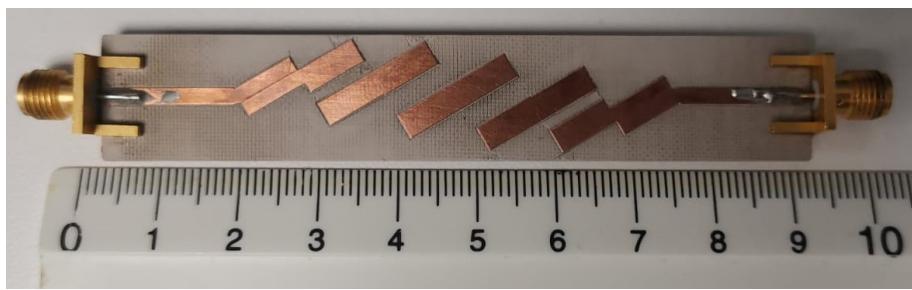


Figura 5.4: Impreso microcinta pasabanda

En las imágenes presentadas, se evidencia una disparidad significativa en el ancho de banda del filtro pasabanda con respecto a la simulación. Concretamente, se observa una notoria reducción en el ancho de banda real en comparación con el simulado. Se llevó a cabo un análisis y se observó continuidad entre 2 puntos de la entrada y salida del filtro, lo cual se debe a que se requería una mejor resolución para la fabricación de este, para poder obtener un resultado similar al simulado se decidió hacer una corrección física cortando los caminos que tenían continuidad, lo que generó una repercusión directa en el ancho de banda del filtro.

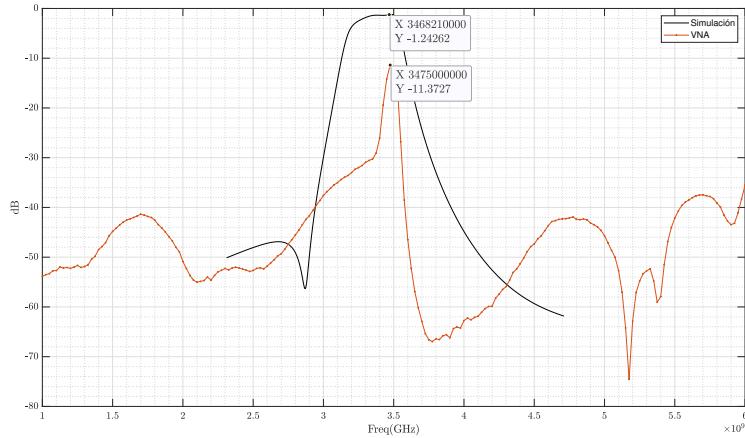


Figura 5.5: S12 VNA pasabanda

La ejecución de este corte se llevó a cabo con el propósito de evaluar la posibilidad de obtener una respuesta similar a la del diseño original. No obstante, a pesar de este procedimiento correctivo, se notó que el cambio en el ancho de banda no alcanzó la magnitud esperada. Este fenómeno plantea la consideración de que la precisión de la maquinaria utilizada podría haber influido de manera significativa en la respuesta real del filtro. Este resultado destaca la importancia crítica de la precisión en los procesos de fabricación, ya que cualquier desviación puede tener repercusiones sustanciales en el rendimiento final del sistema.

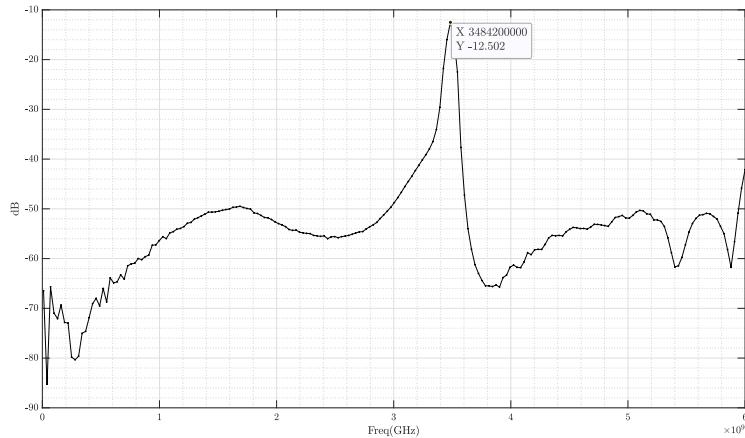


Figura 5.6: S12 VNA pasabanda segunda medida

5.4. Filtro Pasa Bajos

El filtro pasabajos fue sometido a pruebas mediante el uso de un VNA. En este procedimiento, se conectaron los extremos de entrada y salida del filtro al VNA, permitiéndonos así obtener los parámetros S12. Este análisis se llevó a cabo mediante la prueba T4 del protocolo de pruebas.

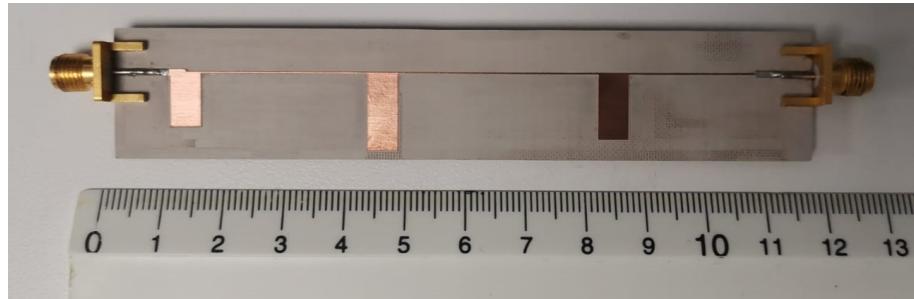


Figura 5.7: S12 pasa bajos

La figura 5.8 presenta una comparación visual entre los resultados obtenidos en la prueba física y la simulación. Se observa que existe una ligera discrepancia de 0.1 GHz en la frecuencia de corte entre ambas, sin embargo, este desplazamiento no implica un cambio significativo en el comportamiento final del circuito. Es crucial resaltar que la prioridad recae en la atenuación eficiente de las señales de frecuencias elevadas, con el objetivo de minimizar el ripple y lograr una salida de corriente continua (DC) más limpia.

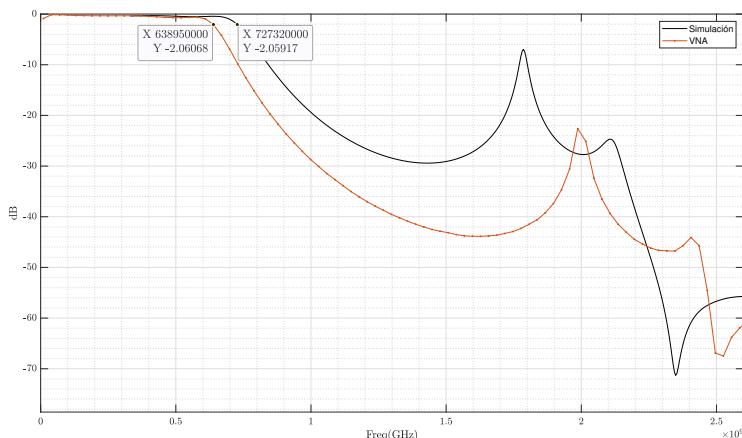


Figura 5.8: S12 VNA pasa bajos

Es importante destacar que se realizó un ajuste en la escala de medida en comparación con el sistema completo y el filtro pasabanda, dado que la frecuencia de corte del filtro pasabajos se sitúa en 0.6 GHz.

5.5. Sistema Filtro-Rectificador con Carga Resistiva

Se llevó a cabo una prueba específica que incluyó únicamente el filtro pasa banda y el rectificador. El propósito de esta prueba fue analizar la respuesta del parámetro S12 a frecuencias de 3.3 GHz, y los resultados se representan en la gráfica 5.9. Se observa tanto el sistema medido en el Analizador de Red de Vector (VNA) como la simulación en Ansys. En términos generales, se aprecia una coincidencia satisfactoria entre la simulación y la prueba física, la frecuencia de paso se establece en 3.49 GHz.

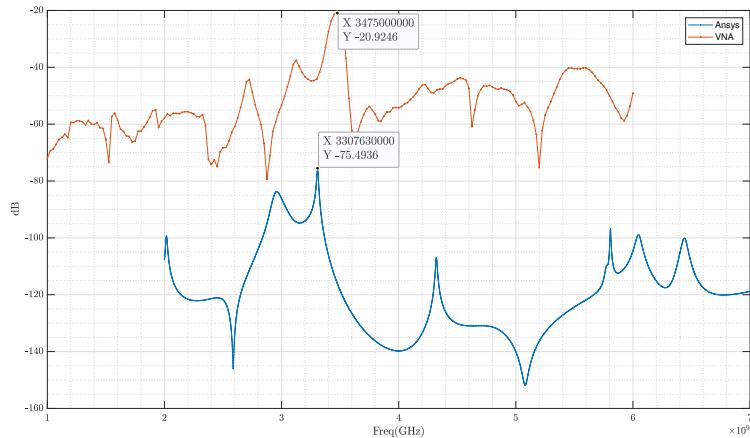


Figura 5.9: S12 VNA pasa bajos

5.6. Sistema Completo

El sistema completo se representa en la figura 5.10. En esta configuración, el puerto de entrada se designa como el puerto libre del filtro pasa banda, mientras que la salida se establece en el puerto libre del filtro pasa bajos. Se llevaron a cabo diversas mediciones para evaluar el rendimiento del sistema, incluyendo la eficiencia, la determinación del S11 práctico, la identificación del ripple en la salida del sistema y la confirmación de la atenuación del mismo.

La mayoría de estas pruebas se realizaron utilizando un VSN SMW200A de Rohde and Schwarz, que posibilita la generación de señales de alta frecuencia para un análisis preciso, además para ver el funcionamiento del cosechador se visualizó en un Keysight InfiniiVision DSO-X 2024A debido a que a la salida del cosechador se visualiza una señal de DC.

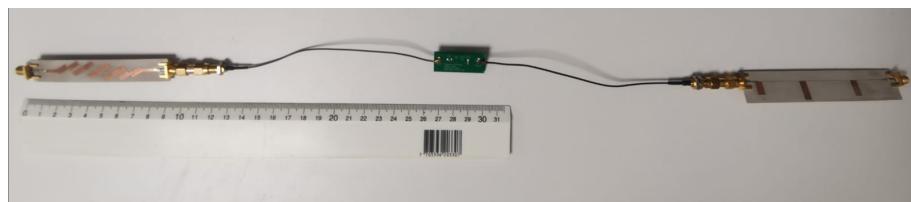


Figura 5.10: Sistema Completo

Además, se empleó el VNA para obtener las respuestas en frecuencia del recolector de energía (harvester). La figura 5.11 muestra el S11 práctico del sistema. Este gráfico confirma que el sistema exhibe una tendencia a 50 ohmios, especialmente notoria a una frecuencia de 3.45 GHz.

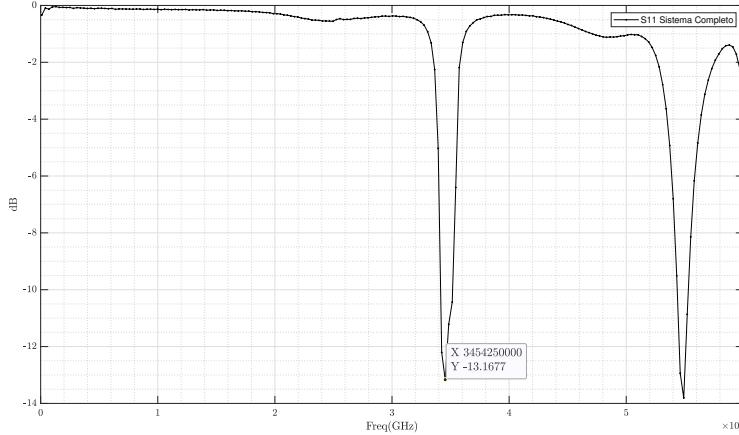


Figura 5.11: S11 VNA sistema completo

En las tablas 5.2 y 5.3, se presentan los diversos resultados obtenidos a través del uso del VNA y el osciloscopio. Se ha establecido que el sistema completo presenta una frecuencia de paso de 3.49 GHz, atenuando a partir de esta frecuencia, en concordancia con el comportamiento del parámetro S12 observado en la figura 5.9. Asimismo, se ha verificado que el ripple de salida del sistema se sitúa en 0.38 dB, cumpliendo con el requisito de ser menor a 1 dB para asegurar una salida estable. En la figura 5.12, se ofrece una representación visual de las principales frecuencias presentes en la señal de corriente continua (DC).

Frecuencia(GHz)	Vout(V)
3.55	0.00668
3.49	0.279
3.4	0.0734
3.3	0.00249

Cuadro 5.2: Tabla frecuencia vs. salida

Tendiendo en cuenta 5.11 podemos ver que a la frecuencia diseñada es 50 ohms el sistema tiene una impedancia en la banda alrededor de 3.3 Ghz constante, por lo que se puede realizar el cálculo para encontrar la eficiencia del sistema.

Para calcular el porcentaje de eficiencia (η) del sistema, puedes usar la fórmula:

$$\eta = \left(\frac{\text{Potencia de Salida}}{\text{Potencia de Entrada}} \right) \times 100$$

La potencia en un sistema resistivo se puede calcular utilizando la relación $P = \frac{V^2}{R}$, donde V es el voltaje y R es la resistencia.

Primero, calculemos la potencia de entrada (P_{entrada}) con la entrada de 300mV y la impedancia de 50 ohmios:

$$P_{\text{entrada}} = \frac{(0,3 \text{ V})^2}{50\Omega}$$

Luego, calculemos la potencia de salida (P_{salida}) con la salida de 279mV y la misma impedancia de 50 ohmios:

$$P_{\text{salida}} = \frac{(0,279 \text{ V})^2}{50\Omega}$$

Finalmente, podemos usar la fórmula del porcentaje de eficiencia:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{slich}}}{P_{\text{eatradia}}} \right) \times 100$$

Es relevante destacar que la eficiencia del sistema completo ha sido cuantificada en un 86.49 %. Estas evaluaciones se llevaron a cabo mediante salidas de 300 mV en el VSN, variando las frecuencias alrededor de la banda de 3.3 GHz. Estos resultados confirman la capacidad del sistema para recolectar eficientemente energía en el rango de frecuencias establecido, consolidando así la efectividad y validez del diseño propuesto.

Característica	Resultado
Ripple	0.38
Eficiencia	86.49 %

Cuadro 5.3: Tabla Características del Sistema Completo

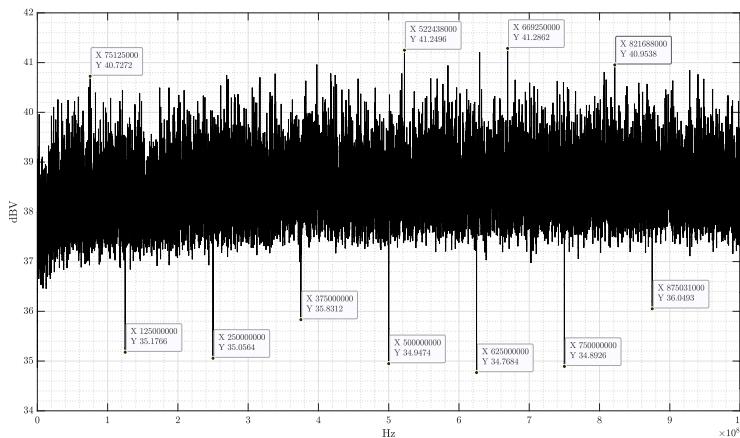


Figura 5.12: FFT sistema completo

5.6.1. Analizador de Potencia

Se llevó a cabo una prueba de potencia en dBm mediante un analizador de potencia. En esta evaluación, la señal generada por el Generador de Señales de Voltaje (VSG) se utilizó como referencia. Esta señal se transmitió al sistema completo y luego, a su vez, la transmitió a un ordenador. En el proceso, se empleó la aplicación Trace Window como interfaz, como se ilustra en la imagen 5.13. Esta aplicación permite ajustar la referencia, dejando como 0 la entrada dada por el VSG, permitiendo así la cuantificación de las pérdidas en el sistema.

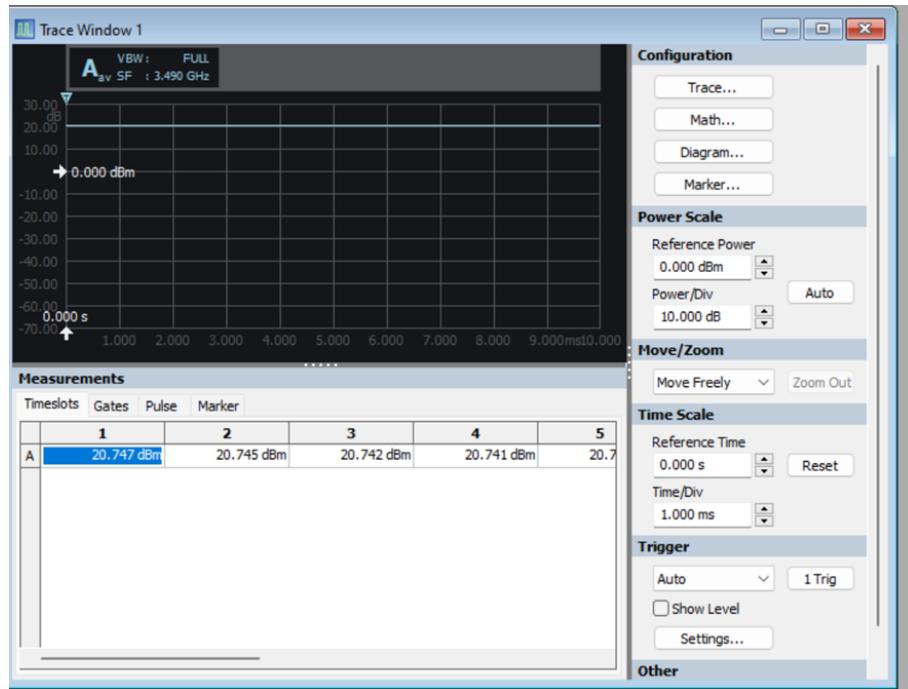


Figura 5.13: Interfaz Analizador de Potencia

En la tabla 5.4, se pueden apreciar los resultados obtenidos para cada filtro. Es evidente que ninguno de los filtros presenta ganancia, lo que implica que ambos experimentan pérdida. Esta observación se alinea con los resultados previamente detallados en las pruebas realizadas anteriormente. Es importante señalar que esta prueba se llevó a cabo a una frecuencia de 3.49 GHz para el filtro pasa banda y de 0.1 GHz para el filtro pasa bajos. Esta elección de frecuencias destaca las pérdidas en los puntos de máxima transmisión de señal de cada filtro.

Filtro	dB
Pasa Banda	-12
Pasa Bajos	-8

Cuadro 5.4: Tabla Filtros vs Potencia

Capítulo 6

Conclusiones

1. Se diseñó un sistema cosechador de energía en la banda baja de 5G constituido por un sistema de filtrado, pasa banda y pasa bajos, el cual con simulaciones en software seleccionaron los tipos y las topologías de filtros que mejor se desempeñaran.
2. Se simuló el sistema cosechador de energía tanto en bloques por separado (filtro pasabanda, filtro pasabajos y rectificador) como todo el sistema en conjunto (**Cosimulación**) con la ayuda de Ansys Nuhertz FilterSolutions y ANsys Circuits
3. Se logró probar el sistema físico con dispositivos como el VNA y el Analizador de Potencia, donde se evidenció el comportamiento de los filtros pasabanda Butterworth, pasabajos Chebyshev y el rectificador doblador. Acto seguido el sistema interconectado probó haciendo uso de los mismos instrumentos y se comprobó que en efecto tenía un funcionamiento que es consistente con lo simulado y además obteniendo una eficiencia del 86.49 %
4. El comportamiento teórico de los filtros se evidenció mediante a las simulaciones y demás modelos conceptuales en parámetros distribuidos dentro de Ansys Nuhertz FilterSolutions y ANsys Circuits; sin embargo, un modelo matemático que describa el sistema no fue conseguido debido a prelación de otros puntos más esenciales para el proyecto.

Capítulo 7

Trabajo Futuro

Para futuras investigaciones, identificamos dos puntos críticos que requieren atención especial: la fase de impresión de los filtros y la posterior prueba en diferentes sustratos. Estos aspectos se han revelado como áreas potenciales de mejora y refinamiento para optimizar aún más el proceso.

En cuanto a la impresión de los filtros, es esencial abordar el tiempo de impresión y la disponibilidad de opciones de impresión en la ubicación geográfica. Durante el desarrollo de este trabajo, se identificó que el tiempo de impresión se convirtió en un punto crítico debido a las limitaciones de opciones de impresión en Bogotá, así como la necesidad de ajustarse a los plazos universitarios. Este desafío afectó significativamente la gestión del tiempo y podría haber influido en la calidad de las impresiones. Para superar este obstáculo, sería valioso explorar alternativas de impresión, ofrezcan tiempos de elaboración y entrega más flexibles.

Además, se destaca la importancia de realizar las medidas críticas en los filtros impresos, ya que es imperativo reconocer que, en el ámbito de diseño de dispositivos de alta frecuencia, la exactitud y la consistencia son factores determinantes que inciden directamente en la funcionalidad y eficiencia del producto final. En futuras iteraciones del diseño, se deben explorar y optimizar los procesos de fabricación para garantizar la coherencia entre el rendimiento simulado y el resultado real. La exactitud en las medidas es fundamental para garantizar la coherencia entre el rendimiento simulado y el resultado real. Se sugiere implementar protocolos de control de calidad más rigurosos en esta fase del proceso para mitigar posibles desviaciones y optimizar la fiabilidad de los resultados.

En relación con la elección de sustratos, es crucial ampliar la investigación para evaluar y comparar diferentes opciones. Explorar una variedad más amplia de sustratos permitirá identificar cuáles ofrecen resultados más óptimos para las aplicaciones específicas. Esta ampliación en la diversidad de sustratos también contribuirá a la generalización de los hallazgos y aumentará la robustez de las conclusiones.

Bibliografía

- [1] K. Mahant and H. Mewada, “Substrate integrated waveguide based bandpass filter with defected ground structure for fmcw radar application,” *International Journal of Sensors Wireless Communications and Control*, vol. 10, no. 3, pp. 421–429, 2020.
- [2] J. E. Midwinter, “A tutorial on vector network analyzers,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 24, no. 11, pp. 1043–1054, 1976.
- [3] R. . Schwarz, *Rohde Schwarz SMW200A Vector Network Analyzer*, 2023.
- [4] N. K. Arora, “Environmental sustainabilitynecessary for survival,” *Environmental Sustainability*, vol. 1, pp. 1–2, 03 2018.
- [5] International Energy Agency (IEA), “World energy outlook 2022,” tech. rep., IEA, 2022. License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).
- [6] J. Dunn, “Introduction to transmission lines,” *EDN*, 2001.
- [7] M. Karlsson and S. Jacobsson, “Transmission lines and wave propagation,” *John Wiley & Sons*, 2011.
- [8] P. C. Magnusson and G. C. Alexander, *Transmission Lines and Wave Propagation*. CRC Press, 2001.
- [9] H.-Y. D. Yang, “Theory of microstrip lines on artificial periodic substrates,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 5, pp. 629–635, 1999.
- [10] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.
- [11] G. H. Brown, C. N. Hoyler, R. A. Bierwirth, *et al.*, “Theory and application of radio-frequency heating.,” *Theory and application of radio-frequency heating.*, 1947.
- [12] V. K. Sapna Shukla, “Comparative study of 1g, 2g, 3g and 4g,” *Journal of Engineering, Computers & Applied Sciences*, 2013.
- [13] P. Pirinen, “A brief overview of 5g research activities,” in *1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity*, pp. 17–22, 2014.
- [14] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.
- [15] J.-S. G. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip filters for RF/microwave applications*. John Wiley & Sons, 2004.

- [16] S.-R. Wu, K.-W. Hsu, and W.-H. Tu, “Compact wide-stopband microstrip bandpass filter-based on stub-loaded stepped-impedance resonators,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 6, no. 13, pp. 1422–1428, 2012.
- [17] S.-J. Sun, T. Su, K. Deng, B. Wu, and C.-H. Liang, “Compact microstrip dual-band bandpass filter using a novel stub-loaded quad-mode resonator,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 23, no. 9, 2013.
- [18] J. Nath, *Design and characterization of frequency agile RF and microwave devices using ferroelectrics*. PhD thesis, North Carolina State University, Jan. 2006.
- [19] H. A. A. Samad, M. F. S. Azni, M. F. Abdul Karim, M. Yahya, and M. A. Arifin, “Rapid modeling, characterization, optimization methodology and analysis for low cost rf filter design,” in *2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security*, pp. 264–268, 2010.
- [20] X. Kang, C. K. Ho, and S. Sun, “Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5539–5551, 2015.
- [21] IEEE Standards Association, “IEEE Standard for Utility Telemetry Service Architecture for Switched Telephone Network,” tech. rep., IEEE, 1995. Withdrawn Standard. Withdrawn Date: Feb 06, 2006.
- [22] “Federal Communications Commission — fcc.gov.” <https://www.fcc.gov/>.
- [23] “IEC 61249-2-39:2012 | IEC Webstore — webstore.iec.ch.” <https://webstore.iec.ch/publication/5022>.
- [24] “ISO 50001:2018 | ISO Documentación.” <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:es>.
- [25] “IEEE Standards Association — standards.ieee.org.” <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/7028/>.
- [26] “EUR-Lex - 32014L0035 - EN - EUR-Lex — eur-lex.europa.eu.” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0035>.
- [27] M. Basim, Q. ul Ain, K. Shehzad, S. A. A. Shah, A. Ali, B. Jang, Y. Pu, J.-M. Yoo, and K. Y. Lee, “A comprehensive review on high-efficiency rf-dc converter for energy harvesting applications,” *Journal of Semiconductor Technology and Science*, vol. 22, no. 5, pp. 304–325, 2022.
- [28] M. Eshaghi and R. Rashidzadeh, “An energy harvesting receiver utilizing microstrip filter technology for iot devices in 5g network,” in *2022 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 324–327, 2022.
- [29] MinTIC, “Informe preliminar de evaluaciÓn de solicitudes- resoluciÓn 3947 de 2023 y sus modificaciones,” 2023.
- [30] K. Technologies, *Keysight InfiniiVision DSO-X 2024A Digital Oscilloscope*, 2023.

Apéndice A

Teoría de Lineas de Transmisión

A.1. Impedancia Característica

En esta sección, se profundiza en la teoría de la propagación de señales a lo largo de líneas de transmisión. Inicialmente, se establecerá la base teórica de que un circuito que incorpora resistencias, inductores y capacitores puede considerarse un modelo apropiado para representar una línea de transmisión. Posteriormente, se procede al desarrollo de la teoría de las líneas de transmisión, exponiendo los principios fundamentales que gobiernan su comportamiento.

Además, se abordan las dimensiones y características de las variables pertinentes en la teoría de líneas de transmisión. Se brinda una consideración detallada sobre los parámetros esenciales que caracterizan una línea sin pérdidas, seguido de un enfoque particular en la línea de microcinta, que tiene mucha relevancia en el contexto de este proyecto. La representación de un segmento uniforme de línea de transmisión, independientemente de su estructura real, se logra mediante el circuito ilustrado en la Figura A.1, el cual incorpora los siguientes elementos:

- Resistencia a lo largo de la línea (R)
- Inductancia a lo largo de la línea (L)
- Conductancia de derivación de la línea (G)
- Capacitancia de derivación de la línea (C)

Estos parámetros, R, L, G y C, se refieren a la resistencia, inductancia, conductancia y capacitancia por unidad de longitud, respectivamente. A menudo, se emplea la notación "p.u.l. como abreviatura para "por unidad de longitud". En el sistema métrico, estas cantidades se expresan en ohmios por metro (Ω /m), henries por metro (H/m), siemens por metro (S/m) y faradios por metro (F/m), respectivamente. Los valores de R, L, G y C se ven influenciados por la geometría de la línea de transmisión y las propiedades eléctricas de los dieléctricos y conductores que la componen.

La capacitancia (C) refleja la capacidad de la línea para almacenar energía eléctrica y se atribuye principalmente a las propiedades del dieléctrico. La conductancia (G) describe las pérdidas en el dieléctrico originadas por la conducción eléctrica y la relajación dieléctrica. En líneas de transmisión, la mayoría de los sustratos de microondas presentan una conductividad despreciable, por lo que las pérdidas dieléctricas

son predominantes. Estas últimas se originan debido al movimiento de los centros de carga que ocasiona distorsiones en la estructura de red dieléctrica, particularmente en cristales o estructuras moleculares. La pérdida de relajación dieléctrica surge a raíz del desplazamiento periódico del campo eléctrico, lo que conlleva a la transferencia de energía del campo electromagnético a vibraciones mecánicas.

La resistencia (R) se asocia principalmente a la pérdida óhmica en el material conductor, siendo esta una contribución relevante a las pérdidas en la línea de transmisión. En cambio, la inductancia (L) describe la capacidad de almacenar energía magnética, y su magnitud depende en gran medida de la geometría de la línea. La mayoría de los materiales utilizados en líneas de transmisión presentan una permeabilidad relativa (μ_r) cercana a la del vacío, lo que implica que no se almacena más energía magnética en ellos.

Para la mayoría de las líneas de transmisión, los efectos de inductancia (L) y capacitancia (C) dominan en comparación con la resistencia en serie (R) y la conductancia de derivación (G), debido a su relativamente baja resistencia y conductancia. Las características de propagación de la línea se describen con referencia a su equivalente sin pérdidas o, simplemente, sin pérdidas. No obstante, en la práctica, cierta información sobre R o G resulta necesaria para determinar las pérdidas de potencia. El concepto de una línea sin pérdidas constituye una aproximación valiosa, si bien no se corresponde totalmente con la realidad.

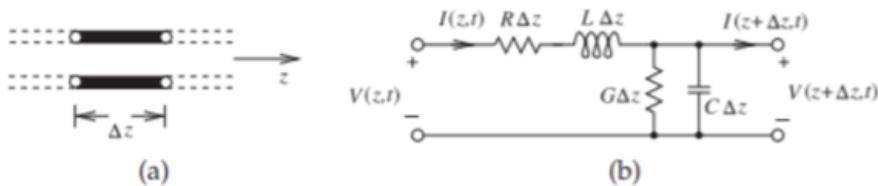


Figura A.1: Segmento de línea de transmisión: (a) de longitud Δz ; y (b) modelo de parámetros distribuidos.

En el siguiente segmento, procedemos a la obtención de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno de propagación de señales en una línea de transmisión. Estas ecuaciones constituyen sistemas acoplados de primer orden que presentan una semejanza notable con las ecuaciones de Maxwell en una dimensión. A través de la resolución de estas ecuaciones diferenciales, se logra una comprensión detallada de la dinámica de propagación de las señales a lo largo de la línea de transmisión. Además, este proceso de resolución lleva a la identificación y el cálculo de una serie de parámetros fundamentales que desempeñan un papel crucial en la descripción de las propiedades de la línea de transmisión. Al aplicar los principios fundamentales de Kirchhoff al modelo matemático representado por la ecuación y considerando el límite conforme Δx se aproxima a cero, se obtienen las expresiones que rigen el comportamiento de las líneas de transmisión:

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial t} = -Ri(z,t) - L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial t} = -Gv(z,t) - C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \quad (\text{A.2})$$

En estado estacionario sinusoidal usando fasores basados en coseno, estos se convierten en:

$$\frac{dV}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{dI}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \quad (\text{A.4})$$

Al eliminar $I(z)$ y $V(z)$ en las expresiones previas, se deriva la ecuación de onda correspondiente para $V(z)$ e $I(z)$:

$$\frac{d^2V}{dz^2} - \gamma^2V(z) = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{d^2I}{dz^2} - \gamma^2I(z) = 0 \quad (\text{A.6})$$

Donde la constante de propagación es:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (\text{A.7})$$

Con unidades del Sistema Internacional (SI), expresado en metros inversos (m^{-1}), donde α representa el coeficiente de atenuación con unidades en néper por metro (Np/m) y β es el coeficiente de cambio de fase, o constante de fase, medido en radianes por metro (rad/m). Aunque los néperes y los radianes son unidades adimensionales, proporcionan una indicación de la naturaleza de estas magnitudes. Las ecuaciones A.5 y A.6 son ecuaciones diferenciales de segundo orden que tienen soluciones de la forma:

$$V(z) = V_o^{+e^{-\gamma z}} + V_o^{-e^{\gamma z}} \quad (\text{A.8})$$

$$V(z) = I_o^{+e^{-\gamma z}} + I_o^{-e^{\gamma z}} \quad (\text{A.9})$$

La interpretación física de estas soluciones es que $V(z+)$ representan dos ondas que se propagan hacia adelante en la dirección positiva de z , mientras que $V(z-)$ corresponden a ondas que se mueven hacia atrás en la dirección negativa de z . Al sustituir A.8 en A.3, se obtiene como resultado:

$$I(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} [V_0^{+e^{-\gamma z}} - V_o^{-e^{-\gamma z}}] \quad (\text{A.10})$$

Luego, de las ecuaciones A.10 y A.9 se obtiene:

$$I_0^+(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} V_0^+ \quad (\text{A.11})$$

$$I_0^-(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} - V_0^- \quad (\text{A.12})$$

La impedancia característica de una línea de transmisión se define como:

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = \frac{-V_0^-}{I_0^-} = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (\text{A.13})$$

A.2. Microcinta

Una línea de microcinta es un diseño que comprende una delgada franja metálica, separada de una superficie metálica de referencia mediante una capa dieléctrica, tal como se ilustra en la Figura A.2. Esta configuración es una opción común y natural para implementar una línea de transmisión en circuitos impresos, lo que la convierte en una elección versátil con numerosas aplicaciones.

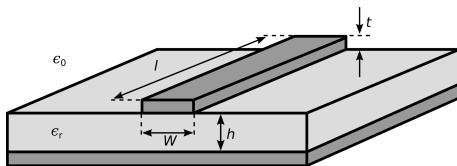


Figura A.2: Corte Transversal de una Línea de Microcinta

Una línea de microcinta es un tipo de línea de transmisión que es asimétrica, ya que su conductor principal, es decir, el plano de tierra, normalmente también cumple la función de tierra para la fuente y la carga.

El material que separa los componentes de la línea de microcinta suele ser un dieléctrico de baja pérdida con una permeabilidad que se asemeja a la del espacio libre ($\mu \approx \mu_0$) y una permitividad relativa (ϵ_r) que cae en el rango de 2 a aproximadamente 10.

La estructura de una línea de microcinta se asemeja a la de una guía de ondas de placa paralela, con la diferencia evidente de que una de las "placas" tiene una longitud finita en la dirección perpendicular a la propagación. A pesar de esta distinción, la guía de ondas de placa paralela ofrece información valiosa sobre el funcionamiento de la línea de microcinta. La línea de microcinta se opera generalmente a frecuencias por debajo de la frecuencia de corte de todos los modos excepto el modo TM, que tiene una frecuencia de corte de cero. Esto asegura que solo el modo TM de orden cero pueda propagarse. Este modo se caracteriza por un campo eléctrico orientado perpendicularmente a las placas y un campo magnético orientado paralelamente a las mismas. La dirección de propagación del producto cruzado entre el campo eléctrico y el campo magnético (**ECEH**) para el modo TM de orden cero siempre apunta en la misma dirección, es decir, a lo largo del eje de la línea de transmisión. En consecuencia, las líneas de microcinta generalmente presentan una estructura de campo electromagnético transversal (**TEM**).

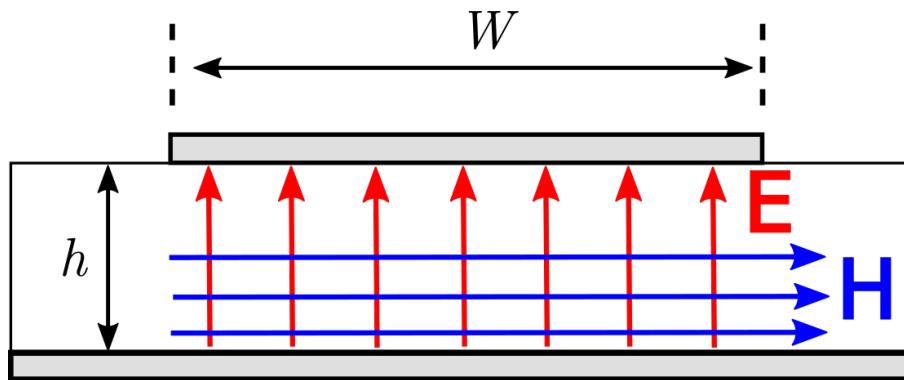


Figura A.3: Estructura aproximada de los campos eléctricos y magnéticos dentro de la línea de microcinta. Los campos fuera de la línea son posiblemente significativos, complicados y no mostrados. En este caso, la onda se está propagando lejos del espectador.

El hecho de que la traza tenga un ancho limitado, representado como W, conduce a la aparición de un "campo de franjas", lo que significa que se producen desviaciones notables de la estructura del campo TM de orden cero en el dieléctrico fuera de los límites de la traza y por encima de esta. Los campos en los bordes pueden desempeñar un papel fundamental en la determinación de la impedancia característica, Z_0 . Dado que Z_0 es un parámetro crítico en el análisis y diseño de sistemas que emplean líneas de transmisión, nos sentimos motivados a no solo calcular Z_0 para la línea de microcinta, sino también a comprender cómo la variación en el ancho W afecta a Z_0 . Abordaremos esta cuestión considerando los siguientes tres casos especiales en secuencia:

El hecho de que la traza tenga un ancho limitado, representado como W, conduce a la aparición de un "campo de franjas", lo que significa que se producen desviaciones notables de la estructura del campo TM de orden cero en el dieléctrico fuera de los límites de la traza y por encima de esta. Los campos en los bordes pueden desempeñar un papel fundamental en la determinación de la impedancia característica, Z_0 . Dado que Z_0 es un parámetro crítico en el análisis y diseño de sistemas que emplean líneas de transmisión, nos sentimos motivados a no solo calcular Z_0 para la línea de microcinta, sino también a comprender cómo la variación en el ancho W afecta a Z_0 . Abordaremos esta cuestión considerando los siguientes tres casos especiales en secuencia:

- Cuando W es mucho mayor que la altura h, se denomina el caso "amplio".
- Cuando W es mucho menor que la altura h, se denomina el caso "estrecho".
- Cuando W es aproximadamente igual a h, es decir, el caso intermedio en el que h y W son del mismo orden de magnitud, más o menos.

Caso Amplio:

Cuando W es mucho mayor que h, la mayor parte de la energía relacionada con la propagación de las ondas se localiza directamente debajo de la traza, y la Figura A.3 ofrece una representación bastante precisa de los campos en esta zona. La impedancia característica, Z_0 , se puede calcular utilizando el modelo de línea de transmisión "elemento agrupado" mediante la siguiente ecuación:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (\text{A.14})$$

En esta situación, consideramos que R' , G' , C' , y L' representan la resistencia, conductancia, capacitancia e inductancia por unidad de longitud, respectivamente. Para el propósito de este análisis, asumimos que las pérdidas son despreciables, por lo tanto, suponemos que R' es mucho menor que $\omega L'$ y que G' es mucho menor que $\omega C'$.

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (\text{A.15})$$

La línea de microcinta ancha se asemeja a un condensador de placas paralelas, en el que la separación entre las placas, denotada como "d", es considerablemente menor que el área de las placas ^A". En este contexto, las influencias de los campos

de franjas pueden considerarse despreciables, y la capacitancia C se determina de la siguiente manera:

$$C \approx \frac{\epsilon A}{d} \quad (\text{A.16})$$

En el contexto de una línea de microcinta ancha, podemos expresar A como el producto de W (el ancho) y l (la longitud), donde l representa la longitud de la línea y d es igual a h . En consecuencia, tenemos la siguiente relación:

$$C = \frac{C}{l} \approx \frac{\epsilon W}{h} (W \gg h) \quad (\text{A.17})$$

Para calcular L' , examinemos la perspectiva de la línea de microcinta ilustrada en la Figura A.4.

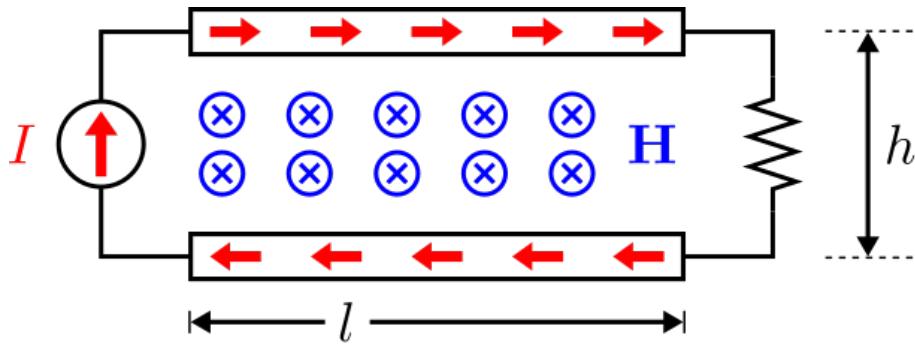


Figura A.4: Vista desde el lado de una línea de microcinta.

A.3. Simulaciones Adicionales del filtro pasabanda

En este anexo exponemos las demás simulaciones de las topologías mostradas anteriormente, (Elíptico, Chebyshev y Butterworth) Y los órdenes faltantes, los cuales sirvieron para poder decidir el orden del filtro. Estas pruebas fueron esenciales para tomar escoger el filtro pasabanda que se usó para la fabricación e implementación del cosechador de energía.

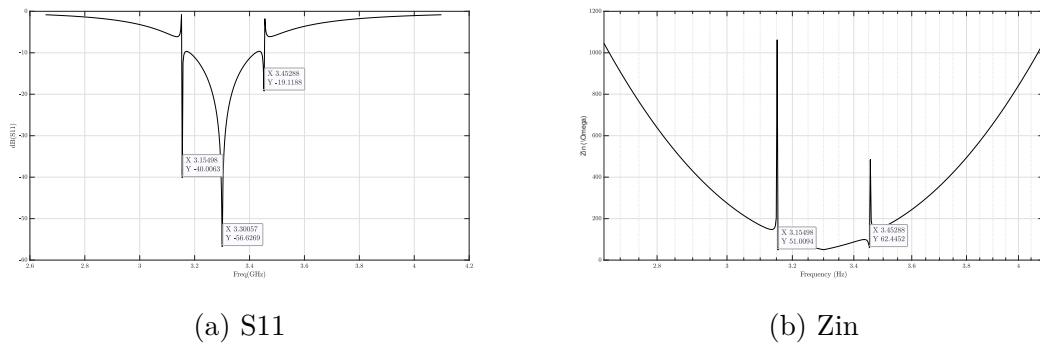
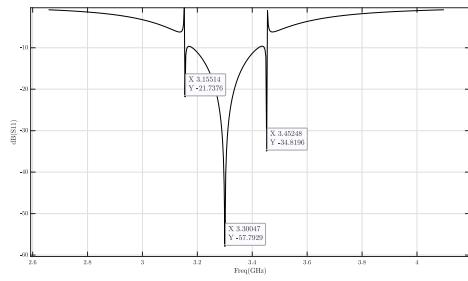
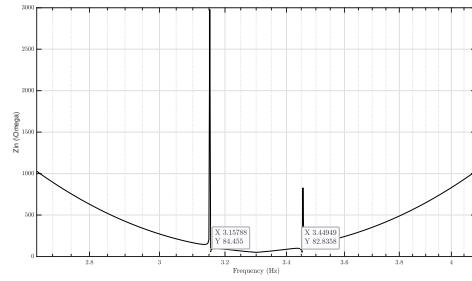


Figura A.5: Respuestas filtro elíptico 3th

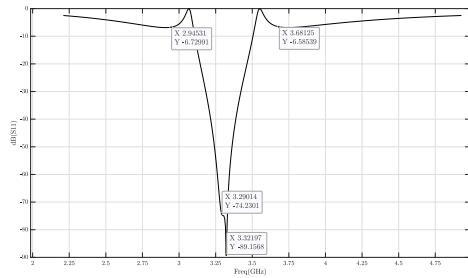


(a) S11

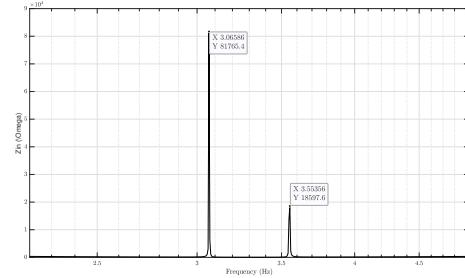


(b) Zin

Figura A.6: Respuestas filtro eliptico 5th

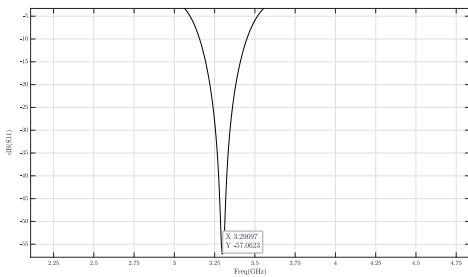


(a) S11

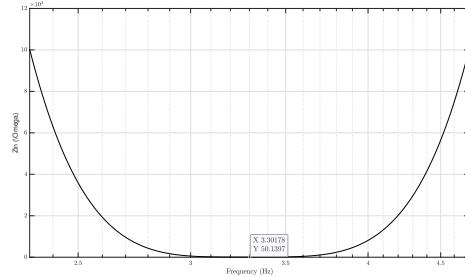


(b) Zin

Figura A.7: Respuestas filtro Chebyshev 3rd

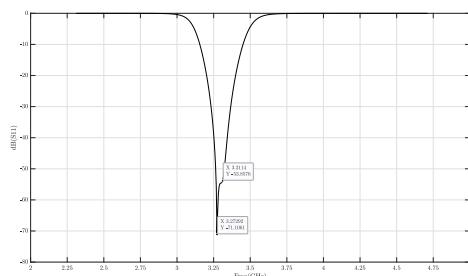


(a) S11

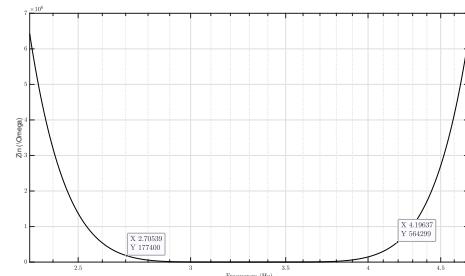


(b) Zin

Figura A.8: Respuestas filtro Butterworth 2nd



(a) S11



(b) Zin

Figura A.9: Respuestas filtro Butterworth 3rd

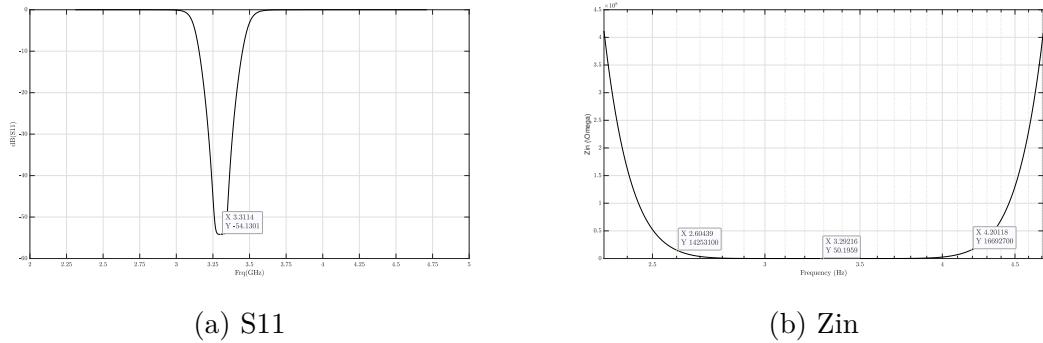


Figura A.10: Respuestas filtro Butterworth 4th

A.4. Dispositivos utilizados

A.4.1. VNA ZVA24

Para realizar las mediciones tanto de los filtros pasa bajos y pasabanda se utilizó un VNA (analizador de redes vectoriales) Un analizador de redes vectoriales (VNA) representa una herramienta electrónica fundamental empleada para la caracterización precisa de la transferencia de señales entre dos puntos de una red eléctrica. Este dispositivo no solo genera señales de prueba de alta frecuencia con amplitud y fase precisas, sino que también mide la respuesta de la red ante dicha señal. Debido a esto podemos evaluar parámetros esenciales como impedancia, ganancia, ancho de banda y atenuación[2].

En el contexto específico de la medición de filtros en microcinta, los VNA desempeñan un papel importante al generar señales de prueba que permiten la evaluación precisa de los parámetros de respuesta de frecuencia. La atenuación, ganancia y ancho de banda de un filtro en microcinta son parámetros cruciales que definen su desempeño, y los VNA ofrecen la capacidad de medir estos elementos con gran exactitud[2].

La atenuación de un filtro en microcinta, que representa la pérdida de potencia al atravesar el filtro, se calcula mediante la comparación de la amplitud de la señal de salida con la de entrada, generadas por un VNA configurado para una frecuencia específica. Similarmente, la ganancia del filtro, que indica el incremento de potencia[2].

El que se utilizó en este trabajo de grado fue él ZVA 24 de Rohde and Schwarz.

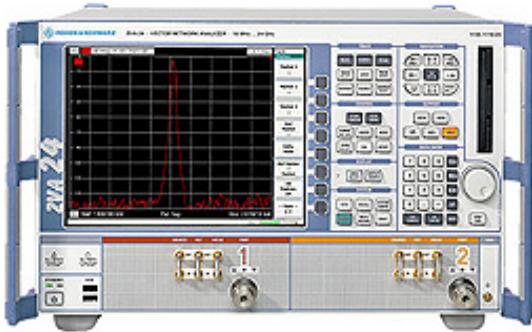


Figura A.11: VNA ZVA24 [2]

El ZVA24 tiene un rango de frecuencia de 10 MHz a 24 GHz, con una precisión de amplitud y fase de más o menos 0,001 dB y más o menos 0,01 \circ , respectivamente. El VNA también tiene una velocidad de barrido de hasta 100 GHz/s, lo que lo hace ideal para mediciones de respuesta de frecuencia rápida.

A.4.2. VSN SMW200A

El Rohde and Schwarz VSN SMW200A es un generador de señales vectoriales avanzado diseñado para aplicaciones en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas. Fabricado por la renombrada empresa alemana Rohde and Schwarz, este instrumento ofrece una amplia gama de funcionalidades para la generación de señales complejas en el dominio de la radiofrecuencia (RF) y la base de banda (BB)[3].



Figura A.12: VNA ZVA24 [3]

Tiene un rango de frecuencia de 10 MHz a 20 GHz, con una precisión de amplitud y fase de $\pm 0,0005$ dB y $\pm 0,001^\circ$, respectivamente. El VNA también tiene una velocidad de barrido de hasta 50 GHz/s[3].

A.4.3. DSO-X 2024A

Es un osciloscopio digital, con un ancho de banda de 200 MHz y 4 canales de entrada. Con su capacidad para capturar y visualizar simultáneamente señales de cuatro fuentes diferentes, ofrece versatilidad en aplicaciones de prueba y medición.

La resolución de 12 bits permite una captura precisa de señales, alcanzando hasta 4096 niveles, lo que garantiza una calidad de imagen óptima, especialmente para señales de baja amplitud. Con una rápida velocidad de actualización de 200,000 wfms/s, el osciloscopio proporciona la capacidad de capturar y mostrar señales en tiempo real, siendo valioso para aplicaciones que requieren la visualización de señales de alta velocidad [30].