



Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Departamento de Ingeniería Electrónica

Tesis de Maestría

Análisis e implementación de un rectificador Dickson para la transmisión de potencia inalámbrica por ondas de radiofrecuencia

Presentada por

Ing. Carlos Yordan González Baffi

para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en
Ingeniería Electrónica**

Director de tesis

Dr. Mario Ponce Silva

Codirector de tesis

Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel

Cuernavaca, Morelos, México. Junio del 2025



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 12/junio/2025

Oficio No. SAC/138/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

CARLOS YORDAN GONZÁLEZ BAFFI
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Análisis e Implementación de un Rectificador Dickson para la Transmisión de Potencia Inalámbrica por Ondas de Radiofrecuencia"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

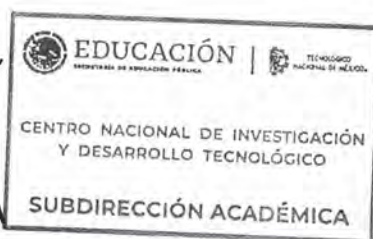
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; 09/junio/2025

Oficio No. DIE/063/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Carlos Yordan González Baffi**, con número de control **M23CE049** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Análisis e Implementación de un Rectificador Dickson para la Transmisión de Potencia Inalámbrica por Ondas de Radiofrecuencia"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 09884229

REVISOR 1

Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5999002

REVISOR 2

M.C. Alfredo González Ortega
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5695647

C.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas, Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmqh

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



2025
Año de
La Mujer
Indígena



“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”.

Albert Einstein.

Dedicatorias

A mi madre, por su amor incondicional y su fe constante en cada uno de mis pasos.

A mi padre, por enseñarme con el ejemplo el valor del trabajo, la disciplina y la perseverancia.

A mi hermano por su apoyo leal y sus palabras de ánimo en los momentos difíciles.

Y a mi esposa por caminar a mi lado en este viaje con tanto amor y entrega.

Gracias a ustedes, esta meta hoy se hace realidad.

Agradecimientos

Quiero manifestar mi sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el valioso apoyo brindado que hizo posible el desarrollo de esta etapa académica. Su respaldo fue crucial para poder concentrarme en mis estudios de maestría.

Extiendo también mi gratitud al Tecnológico Nacional de México, por ser una institución que promueve la formación de posgrado y por ofrecerme la oportunidad de seguir creciendo profesionalmente dentro de sus programas.

De igual manera, agradezco al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por facilitarme sus instalaciones, medios y recursos que resultaron fundamentales para el desarrollo de este proyecto. Además del aprendizaje técnico, me llevo gratos recuerdos y experiencias que enriquecen mi trayectoria.

A mis asesores, el Dr. Mario Ponce Silva y el Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel, les expreso mi más profundo aprecio por su guía constante, su disposición para compartir su experiencia, y por cada momento de apoyo que me ofrecieron a lo largo del proceso. Su acompañamiento fue clave para concluir esta etapa.

Mi agradecimiento se extiende también al comité revisor, compuesto por el Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino y el M.C. Alfredo González Ortega, por sus valiosas aportaciones las cuales enriquecieron significativamente el contenido de este trabajo y contribuyeron a su mejora constante.

A mis docentes, mi reconocimiento por su entrega y compromiso con la enseñanza. Su orientación fue determinante en mi formación, y agradezco profundamente al Dr. Quintero, Dr. Vela (+), M.C. Alfredo González, Dra. Susana, Dr. Víctor Alvarado, Dr. Jarniel, Dr. Mario Ponce, Dr. Jesús Aguayo, Dra. Guadalupe y Dr. Víctor Olivares por las enseñanzas que dejaron huella en mí.

Por último, agradezco a los compañeros que formaron parte de este recorrido. Compartimos desafíos, aprendizajes y muchas vivencias significativas.

Resumen

En este trabajo se utiliza un circuito multiplicador de tensión Dickson bipolar de dos etapas para la captación de energía a partir de ondas de radiofrecuencia de 27MHz moduladas en amplitud. El circuito se simula en Spice y se obtiene la señal de corriente que alimenta al condensador de carga, así como la señal de tensión a la salida del circuito sin condensador de carga, para diferentes topologías del circuito Dickson en las que sólo varía el número de etapas y para diferentes tensiones de alimentación. Se obtiene un circuito equivalente del multiplicador Dickson bipolar con condensador de carga.

El rectificador construido rectificó correctamente la señal de voltaje en ambos experimentos y los valores de voltaje a su salida son muy cercanos a los esperados según la simulación, tan solo 0.1V por debajo con respecto a la simulación. Los valores de corriente entregada al capacitor de almacenamiento no se pudieron medir por ser muy pequeños y la resistencia equivalente a la salida del rectificador es grande de 75.4k Ω , esto mejorará cuando se trabaje con una antena diseñada para el rectificador de menor tamaño, por ende, de menor resistencia, y se diseñe un circuito de acople de impedancia para esta antena.

La implementación del circuito multiplicador de voltaje Dickson demuestra ser una solución flexible para la transmisión de potencia inalámbrica, ya que permite configuraciones con múltiples etapas para ajustar el voltaje según las necesidades. Asimismo, el uso en paralelo de antenas con multiplicadores Dickson posibilita aumentar la corriente de carga hacia un capacitor.

Abstract

In this work, a two-stage bipolar Dickson voltage multiplier circuit is used for energy harvesting from amplitude-modulated 27MHz radio frequency waves. The circuit is simulated in Spice and the current signal feeding the load capacitor, as well as the voltage signal at the output of the circuit without load capacitor, are obtained for different topologies of the Dickson circuit in which only the number of stages varies and for different supply voltages. An equivalent circuit of the bipolar Dickson multiplier with load capacitor is obtained.

The constructed rectifier correctly rectified the voltage signal in both experiments and the voltage values at its output are very close to those expected according to the simulation, only 0.1V below with respect to the simulation. The values of current delivered to the storage capacitor could not be measured because they are very small and the equivalent resistance at the rectifier output is large at 75.4k Ω , this will improve when working with an antenna designed for the rectifier of smaller size, hence lower resistance, and an impedance coupling circuit is designed for this antenna.

The implementation of the Dickson voltage multiplier circuit proves to be a flexible solution for wireless power transmission, as it allows multi-stage configurations to adjust the voltage as needed. Also, the parallel use of antennas with Dickson multipliers makes it possible to increase the load current to a capacitor.

Contenido

Contenido

Dedicatorias	VI
Agradecimientos	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
Contenido	X
Lista de Figuras	XII
Lista de Tablas	XV
Acrónimos	XVI
Simbología	XVII
1. Introducción	2
1.1 Antecedentes históricos	2
1.2 Estado del Arte	3
1.2.1 Sistema típico de captación de RF	3
1.2.2 Rectificadores diseñados para ondas de RF de la literatura	7
1.2.3 Circuitos rectificadores de ondas de RF a base de multiplicadores de voltaje	8
1.2.4 Trabajos que han utilizado al circuito multiplicador bipolar de voltaje Dickson de dos etapas	10
1.2.5 Red de adaptación de impedancias	10
1.2.6 Rectificadores	11
1.3 Problemática	15
1.4 Propuesta de solución	15
1.5 Objetivos	16
1.5.1 Objetivo general	16
1.5.2 Objetivos específicos	16
2. Análisis del multiplicador bipolar de voltaje Dickson	19
2.1 Circuito equivalente de entrada del rectificador	19
2.2 Circuito equivalente de salida del rectificador	19
2.3 Arreglos del circuito multiplicador bipolar Dickson	20
3. Simulación del rectificador	24
3.1 Circuito rectificador simulado en Pspice	24
3.2 Ejemplos de simulaciones en Pspice	26
3.3 Señal de voltaje y señal de corriente a la salida del rectificador	26

CAPÍTULO IV	34
IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO	34
4. Implementación del circuito	35
4.1. Selección de componentes	35
4.2. Diseño y construcción del PCB.....	37
CAPÍTULO V.....	39
RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES	39
5. Resultados de pruebas experimentales.....	40
5.1. Establecimiento de un protocolo de pruebas para validar la metodología de diseño propuesta con el prototipo implementado	40
5.2. Validación de la metodología desarrollada mediante pruebas experimentales.....	40
Publicaciones realizadas.....	46
CONCLUSIONES.....	47
REFERENCIAS	49
SECCIÓN DE ANEXOS	53
Anexos I	54
Anexos II.....	55
Anexo III.....	57
Anexo IV.....	60
Anexo V.....	63

Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama de bloques de un sistema típico de captación de RF [4].	4
Figura 2 Diferentes tipos de topologías de circuitos de adaptación de impedancias con elementos lumped: (a) Red T (b) Red L (c) Red π [4].	11
Figura 3 Tipos de topologías de circuitos rectificadores: (a) rectificador de media onda (b) circuito doblador de media onda (c) rectificador de puente [4].	12
Figura 4 Topologías de multiplicadores de voltaje: (a) Topología Villard (b) Topología Dickson [4].	13
Figura 5 Topologías de rectificadores CMOS: (a) Dickson Charge Pump (b) Multiplicador de Voltaje Diferencial [4].	14
Figura 6 Transistores conectados con diodos: (a) BTMOS (b) DTMOS [4].	15
Figura 7 Circuito multiplicador de voltaje bipolar de Dickson con dos etapas [20].	16
Figura 8 Circuito equivalente de entrada del multiplicador bipolar Dickson.	19
Figura 9 Circuito equivalente de salida del multiplicador bipolar Dickson cuando se carga al capacitor de salida.	19
Figura 10 Arreglo de circuito equivalente del multiplicador de Dickson con tres etapas en paralelo y condensador de carga.	20
Figura 11 Circuito equivalente del multiplicador de Dickson con una etapa.	21
Figura 12 Circuito equivalente del multiplicador de Dickson con tres etapas.	21
Figura 13 Circuito multiplicador de voltaje bipolar de Dickson con dos etapas simulado en Pspice.	24
Figura 14 Circuito equivalente en estado estacionario, con onda positiva en la entrada.	25
Figura 15 Circuito equivalente en estado estacionario, con onda negativa en la entrada.	25
Figura 16 Voltaje de salida del circuito con la salida abierta, es decir sin el capacitor de almacenamiento, simulado en Pspice.	27
Figura 17 Señal de corriente instantánea (señal de color verde) que se le entrega al capacitor de carga, así como su promedio (señal roja) simulado en Pspice.	27
Figura 18 Corriente a la entrada del circuito y voltaje a la salida del circuito cuando la salida está abierta.	28
Figura 19 Zoom a la corriente a la entrada del circuito con la salida abierta.	28
Figura 20 Zoom a la corriente a la entrada del circuito con la salida abierta en otro intervalo de tiempo.	29
Figura 21 Corriente y voltaje a la entrada del circuito con la salida abierta.	29
Figura 22 Corriente a la entrada del circuito y corriente a la salida del circuito cuando se alimenta a la salida un capacitor de carga.	30
Figura 23 Corriente y voltaje a la entrada del circuito cuando se está cargando a la salida un capacitor de 41 F.	30
Figura 24 Circuito equivalente de la Figura 14.	31
Figura 25 Circuito equivalente de la Figura 24.	31
Figura 26 Circuito de prueba en Pspice.	32
Figura 27 Corriente en el circuito de prueba de la Figura 26.	32
Figura 28 Corriente en el circuito de prueba de la Figura 26.	33
Figura 29 Transmisor seleccionado.	35

Figura 30 Antena.....	36
Figura 31 Diodo seleccionado.....	36
Figura 32 Capacitor seleccionado.....	36
Figura 33 Conector seleccionado.....	37
Figura 34 Diseño en Altium Designer visualizado en 3d.....	37
Figura 35 PCB construida con los componentes soldados.....	38
Figura 36 Experimento 1.....	41
Figura 37 Conexiones del Experimento 1.....	41
Figura 38 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 500 mV de voltaje pico en la señal de entrada.....	42
Figura 39 Experimento 2.....	43
Figura 40 Conexiones en el Experimento 2.....	43
Figura 41 Carga del capacitor de 330 uF.....	44
Figura 42 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador con la salida abierta, en el Experimento 2, para 930 mV de voltaje pico en la señal de entrada.....	45
Figura 43 Señal en la antena receptora cuando transmite el transmisor y los cables de ambas antenas están desenrollados completamente.....	45
Figura 44 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con una etapa.....	54
Figura 45 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con dos etapas.....	54
Figura 46 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con tres etapas.....	54
Figura 47 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con una etapa.....	55
Figura 48 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con dos etapas.....	55
Figura 49 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con tres etapas.....	55
Figura 50 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con una etapa.....	56
Figura 51 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con dos etapas.....	56
Figura 52 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con tres etapas.....	56
Figura 53 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con una etapa.....	57
Figura 54 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con dos etapas.....	57
Figura 55 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con tres etapas.....	57
Figura 56 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con una etapa.....	58
Figura 57 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con dos etapas.....	58
Figura 58 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con tres etapas.....	58
Figura 59 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con una etapa.....	59
Figura 60 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con dos etapas.....	59
Figura 61 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con tres etapas.....	59
Figura 62 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 50mV de voltaje pico en la señal de entrada.....	60
Figura 63 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 100mV de voltaje pico en la señal de entrada.....	60
Figura 64 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 150mV de voltaje pico en la señal de entrada.....	61

Figura 65 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 200mV de voltaje pico en la señal de entrada.	61
Figura 66 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 250mV de voltaje pico en la señal de entrada.	61
Figura 67 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 300mV de voltaje pico en la señal de entrada.	62
Figura 68 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 350mV de voltaje pico en la señal de entrada.	62
Figura 69 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 400mV de voltaje pico en la señal de entrada.	62
Figura 70 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 450mV de voltaje pico en la señal de entrada.	63
Figura 71 Carga del capacitor de 470uF.	63
Figura 72 Carga del capacitor de 680uF.	64
Figura 73 Carga del capacitor de 1000uF.	64
Figura 74 Carga del capacitor de 1200uF.	65
Figura 75 Carga del capacitor de 2200uF.	65
Figura 76 Carga del capacitor de 4700uF.	66

Lista de Tablas

Tabla 1 Estado del arte con los rectificadores para ondas de RF.....	7
Tabla 2 Circuitos rectificadores de ondas de RF a base de multiplicadores de voltaje..	8
Tabla 3 Trabajos que han utilizado al circuito multiplicador bipolar de voltaje Dickson de dos etapas.	10
Tabla 4 Ejemplos de simulación	26
Tabla 5 Valores de voltaje del Experimento 1	41
Tabla 6 Valores de R para cada capacitor	44

Acrónimos

BTMOS	Bipolar Trench MOSFET
CA	Corriente alterna
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DC	Corriente continua
DTMOS	Dynamic Threshold MOSFET
FCC	Federal Communications Commission (Comisión Federal de Comunicaciones)
GaN	Gallium Nitride
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HSMS	Hewlett-Packard Schottky Microwav Semiconductor
IMN	Impedance Matching Network (Red de Adaptación de Impedancia)
ISM	Industrial Scientific and Medical
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)
RECTENNA	Término que combina los conceptos de <i>rectifier</i> y <i>antenna</i>
RF	Radiofrecuencia
RFID	Radio Frequency Identification
VTH	Threshold Voltage

Simbología

2V_{RF}	Dos veces el voltaje máximo de radiofrecuencia
3V_{RF}	Tres veces el voltaje máximo de radiofrecuencia
B	Bulk
C	Capacitor
C1	Capacitor 1
C2	Capacitor 2
C3	Capacitor 3
C4	Capacitor 4
C5	Capacitor 5
C6	Capacitor 6
C7	Capacitor 7
C8	Capacitor 8
C9	Capacitor 9
C10	Capacitor 10
C11	Capacitor 11
C12	Capacitor 12
CA	Corriente alterna
D1	Diodo 1
D2	Diodo 2
D3	Diodo 3
D4	Diodo 4
D5	Diodo 5
D6	Diodo 6
D7	Diodo 7
D8	Diodo 8
D9	Diodo 9
D10	Diodo 10
D11	Diodo 11
D12	Diodo 12

D	Drain
G	Gate
L1	Inductor 1
R	Resistencia en el circuito
R1	Resistencia 1
R2	Resistencia 2
R4	Resistencia 4
R5	Resistencia 5
R7	Resistencia 7
RC	Constante de tiempo del circuito, también llamada τ , que determina la rapidez con la que el capacitor se carga.
R_{EQ}	Resistencia equivalente
R_{EQ 1}	Resistencia equivalente 1
R_{EQ 2}	Resistencia equivalente 2
R_{EQ 3}	Resistencia equivalente 3
S	Source
T1	Transistor 1
T2	Transistor 2
T3	Transistor 3
T4	Transistor 4
T5	Transistor 5
t	Tiempo transcurrido desde que se inició la carga.
V1	Fuente de voltaje alterna en Pspice
V_C(t)	Voltaje en el capacitor en el tiempo t.

V_{CA}	Voltaje de la fuente que alimenta el circuito equivalente de salida del multiplicador bipolar Dickson cuando se carga al capacitor de salida, es decir el voltaje de circuito abierto del multiplicador bipolar Dickson.
V_{RF}	Voltaje de radiofrecuencia
V_{entrada}	Voltaje de entrada
V_{SAL}	Voltaje de salida
V_{salida}	Voltaje de salida
Z1	Impedancia 1

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

En las últimas décadas, los sistemas inalámbricos se han consolidado como una de las tecnologías con mayor ritmo de crecimiento, impulsados por el incremento explosivo en la demanda de capacidad de transmisión sin cables. Entre las soluciones emergentes, ha cobrado relevancia la recolección de energía a partir de señales de radiofrecuencia (RF), disponibles en abundancia gracias a fuentes como teléfonos móviles cercanos, redes WiFi, señales de televisión y emisoras de radio. Un componente esencial para esta forma de transmisión de energía es el “*rectenna*”, un dispositivo que combina una antena con un rectificador para captar la energía de RF del entorno y convertirla en corriente continua (DC) [1].

La captación de energía de radiofrecuencia (RF) cumple una función clave en la alimentación de dispositivos electrónicos de bajo consumo. En este proceso, una antena recolecta la energía disponible en forma de señales de RF, la cual es posteriormente convertida en corriente directa (DC) mediante diodos rectificadores. Para garantizar una transferencia eficiente y evitar que los armónicos de alta frecuencia se reemitan al entorno, es necesario que la impedancia de la antena esté adecuadamente acoplada a la del rectificador. Dado que la energía disponible en el puerto de salida de recolección es limitada, este sistema está diseñado para alimentar únicamente cargas de baja potencia [1].

1.1 Antecedentes históricos

La transmisión de potencia inalámbrica de campo lejano es una tecnología que permite transmitir energía eléctrica a través del aire sin necesidad de cables ni conexiones físicas. Esta tecnología tiene una larga historia y se han realizado varios avances a lo largo del tiempo. A continuación, se presenta algunos antecedentes relevantes:

- **1888:** Heinrich Hertz demostró por primera vez la existencia de ondas electromagnéticas que podrían transmitir energía a través del aire [2].
- **1899:** Nikola Tesla experimentó con la transmisión inalámbrica de energía. Aunque su proyecto de la torre en Long Island, diseñado para la transmisión de energía a gran escala, nunca se completó, sus intentos por

transmitir de manera eficaz energía de forma inalámbrica se adelantaron décadas al desarrollo de la tecnología [3].

- **1964:** El 28 de octubre de 1964 la empresa Raytheon junto con las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos de América realizaron una demostración a los medios de comunicación en donde un helicóptero que estaba alimentado por microondas voló 18 metros sobre una antena transmisora [3].
- **1975:** La empresa Raytheon realizó una demostración en donde transfirió potencia con una salida de DC de 30kW a una distancia de 1.6km mediante un haz de microondas [3].

Esos son algunos de los antecedentes relevantes en la historia de la transmisión de potencia inalámbrica de campo lejano. A medida que la tecnología sigue avanzando, es probable que sigamos viendo nuevos desarrollos y avances en este campo.

1.2 Estado del Arte

1.2.1 Sistema típico de captación de RF

La Figura 1 presenta un sistema típico de recolección de energía de radiofrecuencia, compuesto por una antena transmisora y una unidad receptora conocida como *rectenna* (término que combina los conceptos de *rectifier* y *antenna*). Esta unidad incluye una antena receptora, una red de adaptación de impedancia (IMN), un rectificador y un circuito de gestión de potencia. El principal reto en la creación de un rectificador para niveles bajos de potencia de entrada consiste en lograr simultáneamente una alta tensión de salida y una eficiencia elevada en la conversión de potencia [4].

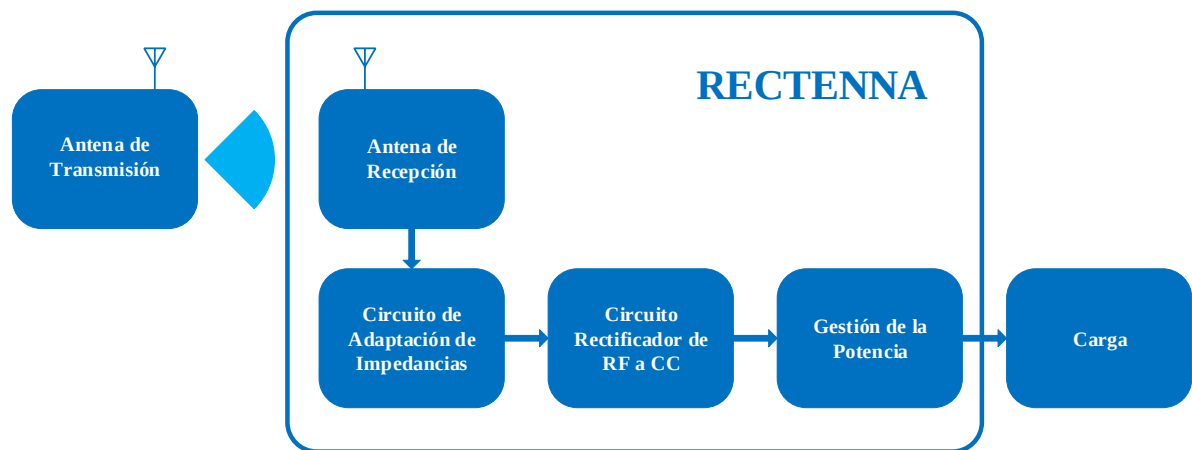


Figura 1 Diagrama de bloques de un sistema típico de captación de RF [4].

Fuentes de radiofrecuencia.

Se puede dividir las fuentes de señales de radiofrecuencia en dos categorías principales: las fuentes de RF dedicadas y las fuentes de RF ambientales [5].

Fuentes de RF dedicadas:

Para garantizar un suministro más estable de energía, pueden utilizarse fuentes dedicadas de RF, las cuales pueden operar en bandas ISM sin licencia. Un caso conocido es el transmisor Powercaster, comercializado para operar a 915MHz con potencias de 1W a 3W. No obstante, el despliegue de estos equipos genera mayores costos y debe ajustarse a normativas como las de la FCC, que limitan su potencia por razones de seguridad y salud de las radiaciones de RF, esto hace que a menudo se requiera instalar múltiples unidades. Además estas fuentes pueden ser móviles [5].

Fuentes de RF ambientales:

Existen transmisores de radiofrecuencia presentes en el entorno que no están diseñados específicamente para la transferencia de energía, por lo que la energía que emiten puede considerarse accesible sin costo. La potencia con la que operan varía ampliamente: las torres de televisión pueden alcanzar unos 10^6 W, los sistemas celulares y RFID alrededor de 10W, y tecnologías como WiFi y dispositivos móviles, cerca de 0,1W. Estas fuentes se pueden clasificar como estáticas o dinámicas [5].

Las fuentes ambientales estáticas de radiofrecuencia corresponden a transmisores, como las torres de radio y televisión, que emiten potencia de manera relativamente constante en el tiempo. Aunque permiten una captación de energía predecible, su salida puede experimentar variaciones tanto breves como prolongadas, influenciadas por factores como la programación de servicios y fenómenos de atenuación. Dado que estas fuentes suelen tener una baja densidad de potencia en distintas bandas de frecuencia, es necesario utilizar antenas de alta ganancia capaces de cubrir ese rango. Asimismo, el diseño del rectificador debe adaptarse a un espectro amplio de frecuencias para garantizar una conversión eficiente [5].

Las fuentes dinámicas de radiofrecuencia ambiental corresponden a transmisores cuya operación no es constante, ya sea porque funcionan en intervalos o porque su potencia de transmisión varía con el tiempo, como sucede con los puntos de acceso WiFi o con ciertos usuarios en redes de radio cognitiva. En estos casos, los sistemas de captación de energía deben ser capaces de adaptarse y, en algunos casos, contar con mecanismos inteligentes que les permitan identificar oportunidades para recolectar energía dentro de un rango de frecuencias determinado [5].

Antena receptora.

La antena receptora cumple la función principal de captar la mayor cantidad posible de energía proveniente de la radiación de radiofrecuencia. Para su diseño, se consideran múltiples aspectos técnicos como la potencia reflejada en su entrada, la impedancia, la ganancia, la eficiencia, así como características físicas como el peso y el tamaño. Existen diversos tipos de antenas empleadas en este contexto, fabricadas con distintos materiales. Entre las más utilizadas se encuentran las antenas Bowtie, dipolo, monopolo, de bucle, Yagi-Uda, las de tipo planar en forma de F invertida, y las que incorporan resonadores dieléctricos. Sin embargo, las antenas de *microstrip* destacan como una de las alternativas más empleadas en aplicaciones de captación de energía RF, debido a las ventajas comparativas que ofrecen frente a otras configuraciones [4].

Circuito de adaptación de impedancias.

En los sistemas de transferencia inalámbrica de energía, una correcta adaptación de impedancias entre la antena receptora y el rectificador es esencial para maximizar la eficiencia de conversión. Esto se basa en el principio de máxima transferencia de potencia, el cual indica que la energía se transfiere de forma óptima cuando las impedancias del emisor y del receptor están igualadas. En este contexto, tanto la antena como el rectificador pueden actuar como carga o como fuente, dependiendo del análisis. Una adecuada adaptación minimiza la cantidad de energía reflejada, favoreciendo así una mejor transmisión desde la antena hacia el rectificador. Para lograr esto, se emplean circuitos de adaptación que ajustan la impedancia mediante fenómenos de resonancia, equilibrando las cargas mediante la acumulación y liberación de energía eléctrica a una frecuencia determinada [6].

En el contexto de la captación de energía de radiofrecuencia, existen tres configuraciones fundamentales de redes de adaptación de impedancia: las de tipo L, π y T. Entre ellas, la configuración tipo L destaca por ser la más sencilla que se ha utilizado en numerosos estudios con sistemas de recolección de energía de RF [6].

Rectificador.

En los sistemas que recolectan energía de señales de radiofrecuencia y la transforman en corriente continua, el rectificador desempeña un papel crucial. Su misión es convertir la señal alterna captada en una fuente de energía útil en forma de corriente directa. La eficiencia global del proceso depende en gran medida del diseño y ajuste de este componente. Factores como la frecuencia de operación, la potencia y el voltaje en la entrada, las pérdidas parásitas y la adaptación de impedancias tanto en la entrada como en la salida, son determinantes para optimizar el rendimiento de conversión [6].

Para implementar circuitos convertidores de RF a corriente continua, se han explorado diversas metodologías, que incluyen desde enfoques basados en tecnología convencional hasta soluciones con tecnología CMOS. En el diseño tradicional de recolectores de energía de RF, es común el uso de diodos con

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

bajo voltaje de umbral, como los Schottky y los HSMS. En cuanto a las técnicas basadas en CMOS, estas pueden clasificarse en circuitos pasivos y activos. Los circuitos activos requieren una fuente externa de energía, como una batería, y suelen aplicarse en tecnologías como sensores activos o sistemas RFID con alimentación propia [6].

Un rectificador puede implementarse principalmente de tres maneras: (a) con un solo diodo, (b) mediante un puente de diodos, o (c) empleando un circuito multiplicador de voltaje. Dentro de este tipo de circuitos, el diodo desempeña un papel central. Las características eléctricas del diodo —como la corriente de saturación, la capacitancia de la unión y la resistencia durante la conducción— influyen directamente en el comportamiento del rectificador. En consecuencia, la eficiencia de conversión de potencia (PCE) del circuito está fuertemente condicionada por el desempeño del diodo [6].

1.2.2 Rectificadores diseñados para ondas de RF de la literatura

En la Tabla 1 se muestra una comparación de los rectificadores diseñados para ondas de RF, encontrados en la literatura.

Tabla 1 Estado del arte con los rectificadores para ondas de RF.

Referencia	Circuito	Potencia de entrada	Eficiencia (máxima)	Frecuencia	Voltaje de salida (máximo)
[7]	Karthauss-Fisher Voltage Multiplier with Schottky diode HSMS-2862	23dBm	70%	2.45GHz	3.518V
[8]	GaN HEMT class- F ⁻¹ power rectifier	Peak Conversion Efficiency @ RF Input Power 85% @ 40dBm	Peak Conversion Efficiency @ RF Input Power 85% @ 40dBm	2.14GHz	Minimum RF Input Power @ Output Voltage 40dBm @ 30V
[1]	Voltage Quadrupler with HSMS-2862 Schottky diode	20dBm	75.108% @ 2.4GHz	2.4GHz, 5.8GHz	8.89V
[9]	Voltage Doubler with Schottky diode SMS7630–005LF	10dBm	75%	0.1GHz to 2.5GHz	4V
[10]	single-stage Class-	64.1% @ 24dBm	64.1% @ 24dBm	5.2GHz	5.1V @ 24dBm

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

	F Dickson charge pump with HSMS-286C Schottky diodes				
[11]	4-stack RF–DC converter based on class-F voltage doublers with MA4E1319-1 Schottky diode chip	73.1% @ 21dBm	73.1% @ 21dBm	5.8GHz	34.2V @ 21dBm
[12]	Greinacher Voltage Doubler with Schottky Diode HSMS-285C	10dBm	78.70%	900MHz	3.437V
[13]	Dual Band Rectifier with HSMS-2850 Schottky diodes	- 5dBm	30%	900MHz	1V @ - 14dBm
[14]	Single Stage Voltage Multiplier with HSMS-2850 diode	14dBm	50.2%	900MHz	3.1V
[15]	Rectifier with RF Combiner with HSMS-2850 diode	- 30dBm a - 10dBm	40%	GSM1800, UMTS2100, Wi-Fi	755mV
[16]	Reconfigurable System with SMS7630-005LF Schottky diodes	- 15dBm a 20dBm	65% @ 10dBm	900MHz	-

1.2.3 Circuitos rectificadores de ondas de RF a base de multiplicadores de voltaje

La Tabla 2 muestra circuitos rectificadores de ondas de RF a base de multiplicadores de voltaje, se realizó esta revisión debido a la ventaja de estos circuitos de aumentar el voltaje.

Tabla 2 Circuitos rectificadores de ondas de RF a base de multiplicadores de voltaje.

Artículo	Antena	Circuito adaptador de impedancias	Circuito rectificador	Frecuencia	Eficiencia	Voltaje de salida
[17]	Resonador de anillo partido, eficiencia de 96.3%, ganancia de 3.35dBi	circuitos de adaptación de impedancia inductiva y transformador de impedancia $\lambda/4$	circuito doblador de tensión de una etapa basado en un diodo detector Schottky de polarización cero, SMS 7630 Skyworks	900MHz	-	1.7V para -11dBm

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

[18]	matriz de parche microstrip 4X2	línea microstrip	filtro paso bajo, un diodo, un circuito de adaptación y un circuito multiplicador de tensión de bomba de carga Dickson	2.45GHz	84.3%	11V para 15dBm 15V para 26dBm
[19]	Antena de Resonador Dieléctrico (DRA) rectangular, ganancia de 6.8dBi	red de adaptación de impedancias LC	4 rectificadores a base de diodos y capacitor, comparativa	5.8GHz	-	Rect. 2: 157.8mV para -10dBm Rect. 2: 691.5mV para -1dBm Rect. 1: 503.1mV para 3dBm
[20]	antena fractal apilada, con geometría de fractal compacto de tercera Koch, ganancia de 2.72dBi	filtro de unión T	dos etapas de un multiplicador de voltaje Dickson en cascada a un rectificador de onda completa	2.45GHz	-	Arreglo de 4 celdas: 2.2V para $1.7\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Arreglo de 9 celdas: 4.1V para $1.7\mu\text{W}/\text{cm}^2$
[21]	Conjunto de antenas de parche microstrip 2x2 Eficiencia de la antena de 75.4% Ganancia 8.36dBi	línea microstrip	Circuito rectificador de bomba de carga Dickson multietapa y diodo mezclador Schottky de microondas de montaje superficial HSMS-8202	2.45GHz	70%	1 etapa: 2V para 10dBm 7V para 30dBm 2 etapas: 1.9V para 10dBm 11V para 30dBm 3 etapas: 1V para 10dBm 15V para 30dBm
[22]	Una antena de parche	-	multiplicador de voltaje de Dickson (dos y tres etapas) y multiplicador de voltaje de Cockcroft-Walton (siete etapas)	2.45GHz	-	Prototipo 1: 205mV para 50mV Prototipo 2: 350mV para 50mV Prototipo 3: 350mV para 50mV
[23]	Antena de parche microstrip	Circuito de adaptación con un inductor y un capacitor	Circuito rectificador multiplicador de voltaje de Cockcroft-Walton de 7 etapas con diodos Schottky HSMS 285-C	900MHz	29.85%	Resultados Analíticos: 4.051V para 10dBm Resultados de Simulación: 4.629V para 10dBm Resultados Experimentales: 4.860V para 10dBm

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

[24]	Antena de parche microstrip Eficiencia de 98.9% Ganancia 4dBi	-	Circuito multiplicador de voltaje Villard de dos etapas y diodo Schottky de barrera cero HSMS-2850	2.43GHz	85%	6.7V para 20dBm
------	---	---	--	---------	-----	-----------------

1.2.4 Trabajos que han utilizado al circuito multiplicador bipolar de voltaje Dickson de dos etapas

La Tabla 3 muestra trabajos que han utilizado al circuito multiplicador bipolar de voltaje Dickson de dos etapas, se realizó esta revisión para conocer si se había utilizado alguna metodología de diseño para este circuito.

Tabla 3 Trabajos que han utilizado al circuito multiplicador bipolar de voltaje Dickson de dos etapas.

Artículos	Circuito Dickson
[20, 22, 25-27]	Solo implementan el circuito, no realizan metodología de diseño.
[28-31]	Realizan metodología de diseño pero para el circuito Dickson convencional, el cual es unipolar y utiliza señales de reloj.
[27, 32, 33]	Simulan el circuito en el software ADS con el que hallan la eficiencia del circuito, pero no utilizan metodología de diseño.
[34, 35]	Implementan al circuito pero no con diodos, sino con MOSFET's

1.2.5 Red de adaptación de impedancias

Un circuito de adaptación puede implementarse mediante componentes concentrados, como inductores y capacitores, o bien mediante elementos distribuidos, como las líneas *microstrip* y los *stubs*. No obstante, en frecuencias elevadas, especialmente en el rango de microondas, se prefiere la tecnología distribuida, ya que los elementos concentrados tienden a presentar un comportamiento deficiente debido a los efectos parásitos. Para sustituir estos componentes por equivalentes distribuidos, se recurre al uso de líneas *microstrip* junto con *stubs* en configuración de circuito abierto o cortocircuito. En este contexto, un *stub* abierto funciona de manera similar a un capacitor en paralelo, mientras que un *stub* en cortocircuito se comporta como un inductor conectado en paralelo [36].

En la Figura 2 se muestra las topologías de adaptación de impedancias con elementos *lumped*.

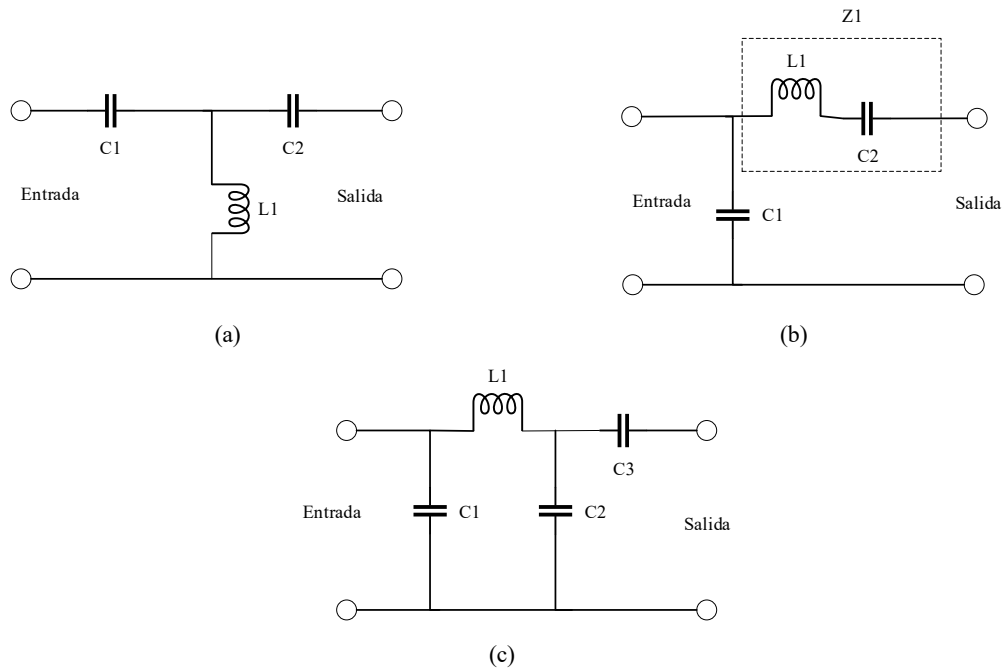


Figura 2 Diferentes tipos de topologías de circuitos de adaptación de impedancias con elementos *lumped*: (a) Red T (b) Red L (c) Red π [4].

1.2.6 Rectificadores

Como se muestra en la Figura 3, los diseños de rectificadores más comunes se clasifican en tres categorías: con un solo diodo, con un puente de diodos y con un circuito multiplicador de voltaje. Los dos primeros tipos pueden generar una señal de corriente continua en la salida, aunque esta presenta una amplitud inferior a la señal de entrada. En contraste, el multiplicador de voltaje no solo realiza la conversión de corriente alterna a continua, sino que también incrementa el nivel de voltaje en la salida, superando el valor pico de la señal recibida [4].

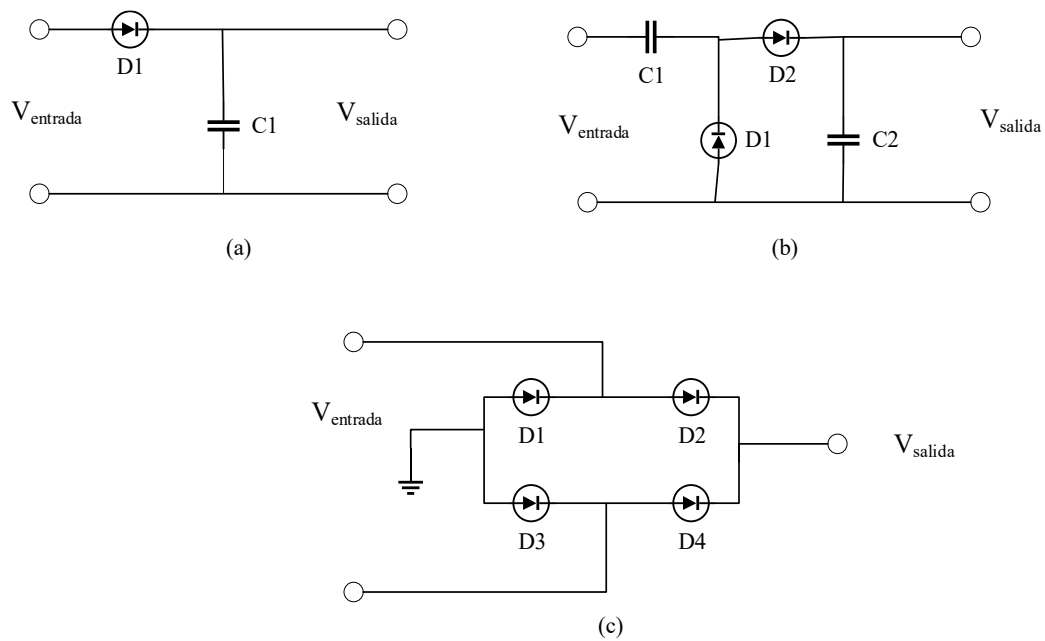


Figura 3 Tipos de topologías de circuitos rectificadores: (a) rectificador de media onda (b) circuito doblador de media onda (c) rectificador de puente [4].

Cuando la energía obtenida tras la rectificación no es suficiente y se necesita elevar aún más el voltaje, una alternativa eficiente consiste en conectar en serie varios rectificadores simples, como se ilustra en la Figura 4, dando lugar a un circuito multiplicador de voltaje [4].

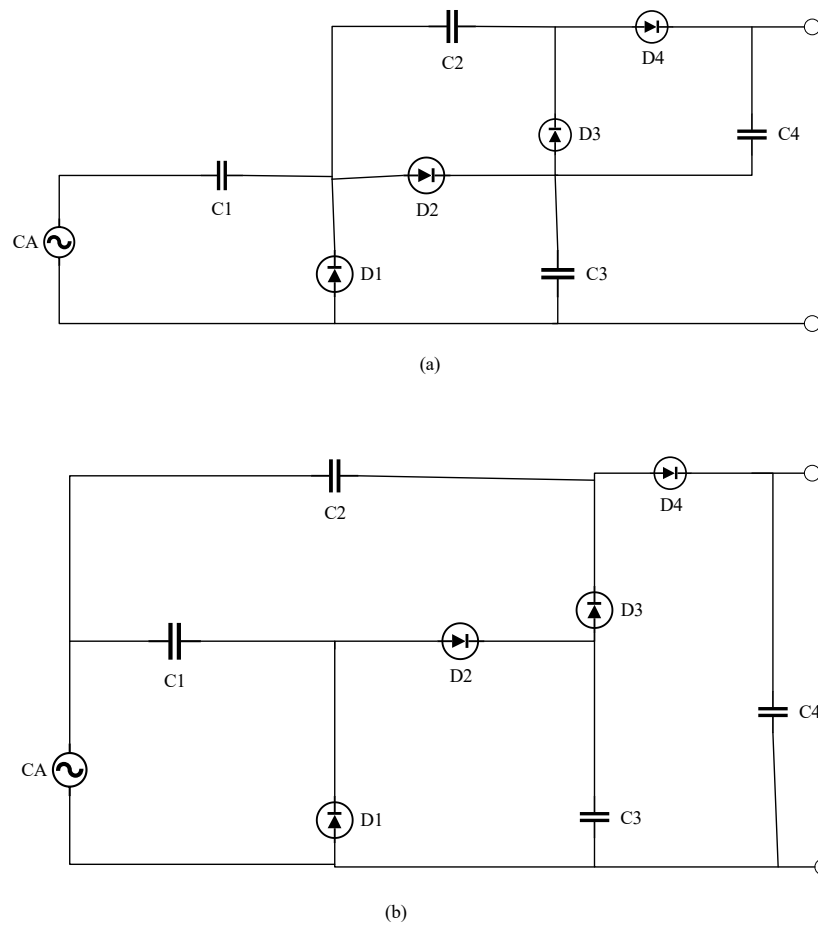


Figura 4 Topologías de multiplicadores de voltaje: (a) Topología Villard (b) Topología Dickson [4].

Los rectificadores basados en diodos presentan como desventaja principal la elevada caída de tensión que ocurre a través de estos componentes. Para mitigar este inconveniente, una estrategia común es sustituir los diodos por transistores MOSFET conectados en configuración equivalente a diodo. En la Figura 5 se ilustran dos topologías representativas: un multiplicador Dickson de cuatro etapas (Figura 5a) y un rectificador diferencial convencional (Figura 5b). Con el avance en el diseño electrónico, la tecnología CMOS se ha consolidado como la opción preferente, no solo por su flexibilidad para desarrollar soluciones personalizadas, sino también porque los transistores CMOS presentan una mayor sensibilidad a bajas tensiones en comparación con los diodos Schottky. No obstante, los transistores MOS presentan limitaciones cuando operan con niveles elevados de potencia en RF, ya que puede generarse una corriente inversa que retorna parte de la energía recolectada hacia la entrada del sistema [4].

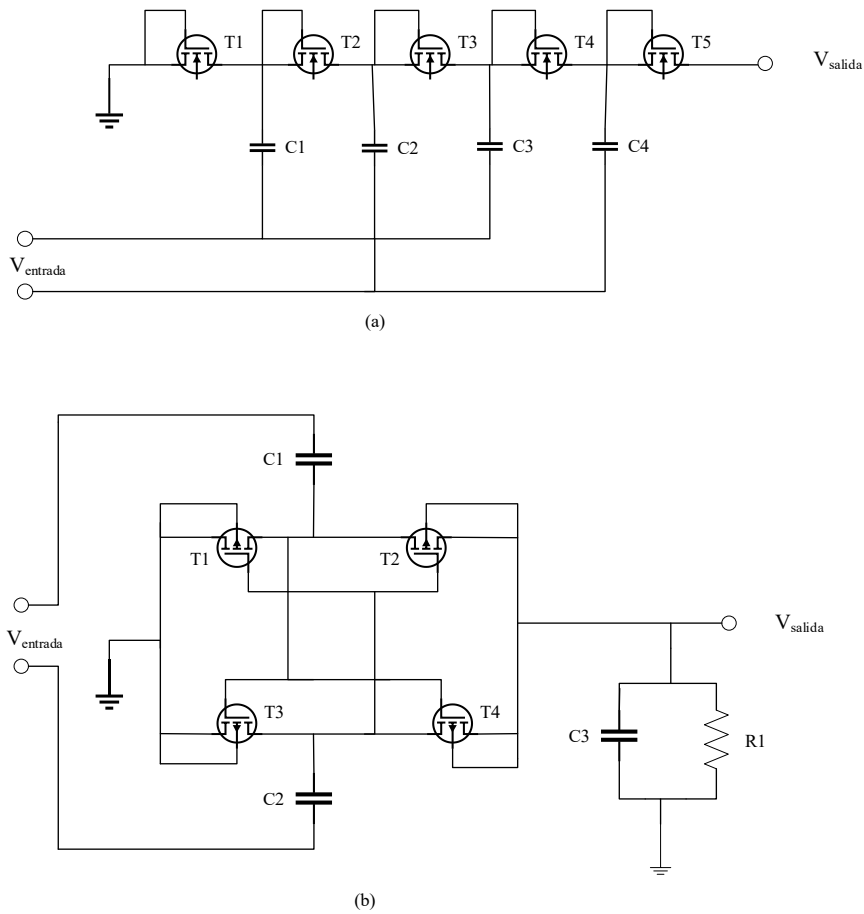


Figura 5 Topologías de rectificadores CMOS: (a) Dickson Charge Pump (b) Multiplicador de Voltaje Diferencial [4].

Con el objetivo de aprovechar eficientemente niveles bajos de voltaje en la entrada, los diseñadores continúan desarrollando nuevas alternativas de diseño. En tecnologías CMOS estándar, es común sustituir un diodo por un transistor MOS configurado en modo diodo, lo cual facilita la integración. La implementación típica de este tipo de conexión, conocida como BTMOS, se muestra en la Figura 6a, donde la compuerta se conecta al drenador y el sustrato al terminal de fuente. Sin embargo, esta configuración presenta una desventaja significativa cuando el dispositivo se encuentra en estado de desconexión, ya que permite el flujo de una corriente inversa elevada. Para contrarrestar este efecto, una solución propuesta consiste en utilizar transistores con un voltaje umbral ajustable de forma dinámica. En la arquitectura DTMOS (Dynamic Threshold MOSFET), ilustrada en la Figura 6b, la compuerta y el sustrato están interconectados, permitiendo así la modificación dinámica del voltaje umbral del dispositivo [4].

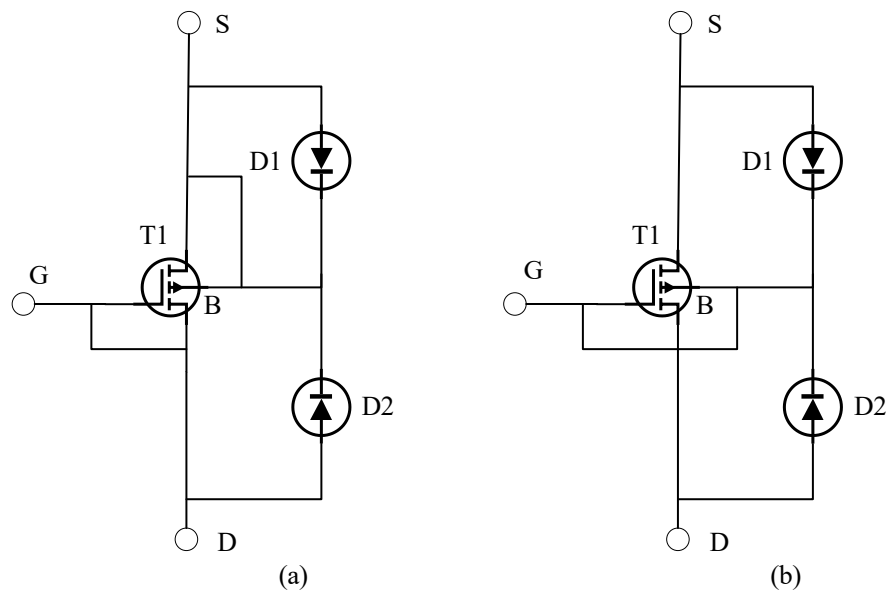


Figura 6 Transistores conectados con diodos: (a) BTMOS (b) DTMOS [4].

1.3 Problemática

Analizando lo planteado podemos concluir que la problemática actual en los circuitos rectificadores para ondas de radiofrecuencia es que aún no tienen una alta eficiencia, una de las causantes de esto es que trabajan a altas frecuencias. Cuando los componentes de estos circuitos trabajan en altas frecuencias hay mayor pérdida de energía y muchas veces se necesitan componentes especiales.

1.4 Propuesta de solución

Se seleccionó el circuito de la Figura 7, el cual es un multiplicador bipolar de voltaje Dickson de dos etapas, usado en [20], debido a que es necesario en este caso elevar el voltaje a un valor práctico, y bipolar para aprovechar ambas partes de la señal de RF, positiva y negativa. Además, este circuito es octomultiplicador por lo que permite elevar considerablemente la señal de entrada. Se usaron capacitores de 10nF y el diodo Schottky BAT6302VH6327XTSA1. Este tipo de diodo se usa para aplicaciones de RF. El diodo presenta una corriente máxima de 100mA con una caída de voltaje en conducción de 190mV y un voltaje máximo en inversa de 3V.

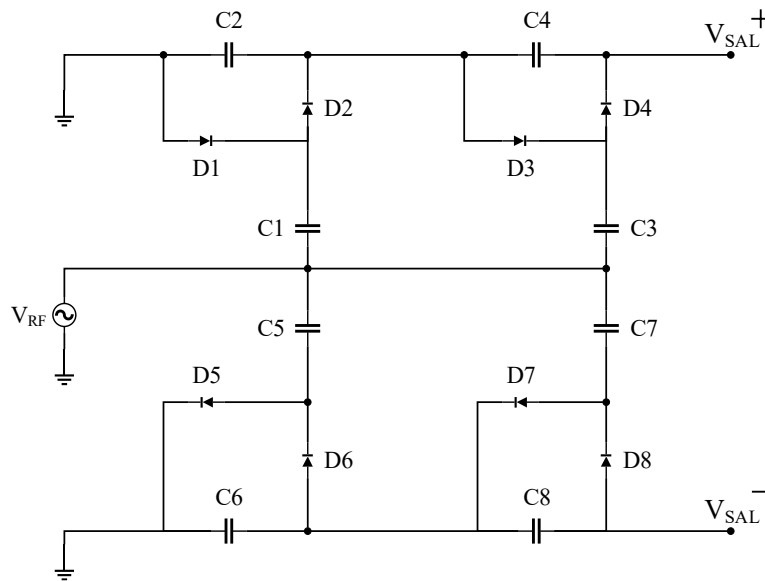


Figura 7 Circuito multiplicador de voltaje bipolar de Dickson con dos etapas [20].

En el caso del circuito de adaptación de impedancias, la antenna que se seleccionó para el receptor es una antenna para 27MHz, según estaba disponible comercialmente. Esta antenna tiene un comportamiento inductivo, por lo que con un capacitor es suficiente para el acoplamiento de impedancias, pero como la antenna tiene una alta resistencia de 50Ω más la resistencia que aporta el cable de esta antenna que tiene una longitud de 3m pues la mayor disminución de corriente lo aporta esta alta resistencia por lo que no se usó ningún circuito de adaptación de impedancias y se recomienda en futuros trabajos cuando se diseñe una antenna para la frecuencia del transmisor y de un tamaño práctico entonces seleccionar un circuito de adaptación de impedancias como los estudiados en este trabajo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar y analizar un rectificador de alta eficiencia para ondas de radiofrecuencia de amplitud modulada.

1.5.2 Objetivos específicos

- 1) Seleccionar un transmisor de AM.
- 2) Seleccionar una antenna receptora.
- 3) Diseñar un rectificador de alta eficiencia.

- 4) Comparar los resultados obtenidos con los rectificadores de ondas de radiofrecuencia de la literatura.

CAPÍTULO II

**ANÁLISIS DEL
MULTIPLICADOR BIPOLAR
DE VOLTAJE DICKSON**

2. Análisis del multiplicador bipolar de voltaje Dickson

Se realizó el análisis del multiplicador bipolar Dickson de dos etapas para comprender su funcionamiento.

2.1. Circuito equivalente de entrada del rectificador

Proponemos que el circuito equivalente de entrada del rectificador es el mostrado en la Figura 8.

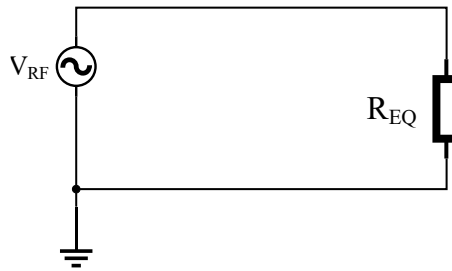


Figura 8 Circuito equivalente de entrada del multiplicador bipolar Dickson.

En la Figura 8 R_{EQ} es la resistencia equivalente a la entrada del circuito y V_{RF} es el voltaje de radiofrecuencia que aporta la antena receptora.

2.2. Circuito equivalente de salida del rectificador

Proponemos que el circuito equivalente de salida del rectificador cuando se está cargando al capacitor de salida es el mostrado en la Figura 9.

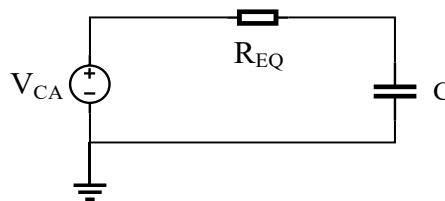


Figura 9 Circuito equivalente de salida del multiplicador bipolar Dickson cuando se carga al capacitor de salida.

En la Figura 9 R_{EQ} es la resistencia equivalente de salida del rectificador y V_{CA} es el voltaje de circuito abierto de salida del rectificador.

Por lo que, el voltaje en el capacitor de salida se puede calcular como se muestra en la ecuación (1).

$$V_C(t) = V_{CA}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1)$$

Donde:

- $V_C(t)$: Voltaje en el capacitor en el tiempo t .
- V_{CA} : Voltaje de la fuente que alimenta el circuito, en nuestro caso el voltaje de circuito abierto de nuestro rectificador.
- t : Tiempo transcurrido desde que se inició la carga (en segundos).
- R : Resistencia en el circuito (en ohmios, Ω).
- C : Capacitancia del capacitor (en faradios, F).
- RC : Constante de tiempo del circuito, también llamada τ , que determina la rapidez con la que el capacitor se carga.

2.3. Arreglos del circuito multiplicador bipolar Dickson

Se pueden agregar varias etapas de este circuito con varias señales de entradas (varias antenas) en paralelo, como se muestra en la Figura 10. Esta configuración es una idea para aumentar la corriente de carga del capacitor.

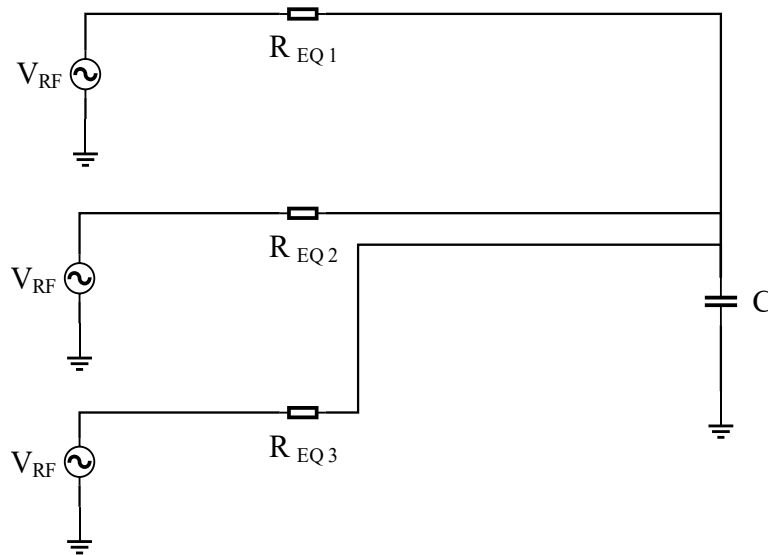


Figura 10 Arreglo de circuito equivalente del multiplicador de Dickson con tres etapas en paralelo y condensador de carga.

También otra forma de conectar este circuito con una sola fuente (una sola antena) es configurándolo en serie con varias etapas. En las Figura 11 y Figura 12 se muestran este circuito con una y tres etapas respectivamente. El circuito con dos etapas se muestra en la Figura 7.

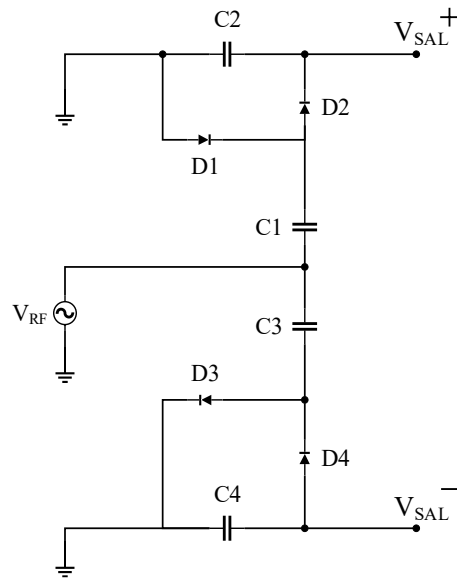


Figura 11 Circuito equivalente del multiplicador de Dickson con una etapa.

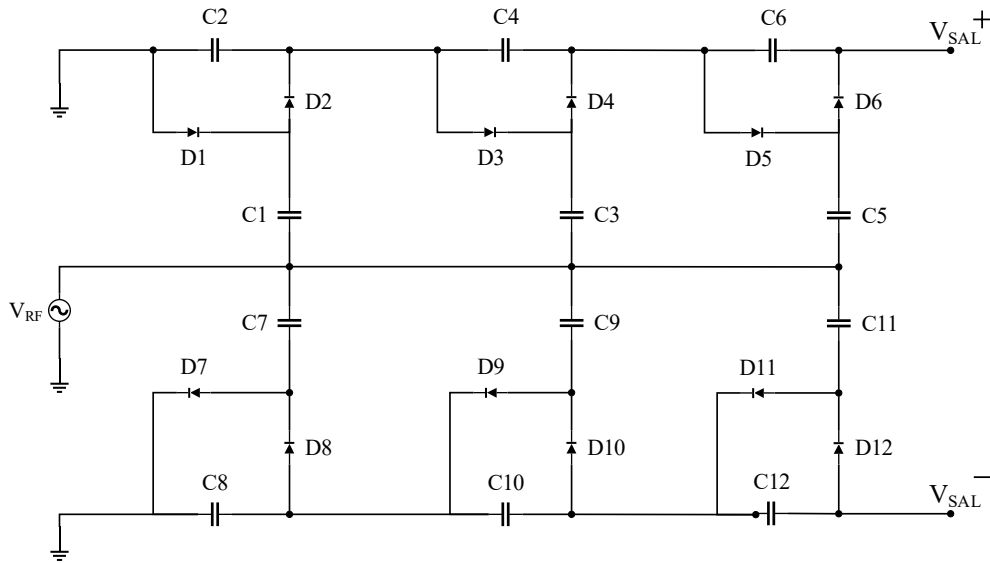


Figura 12 Circuito equivalente del multiplicador de Dickson con tres etapas.

El voltaje de salida idealmente (sin considerar las caídas de los diodos) en el circuito de una etapa es de 4 veces V_{RF} , en el de dos etapas es de 8 veces V_{RF} y en el de 3 etapas es de 12 veces V_{RF} .

Conclusiones preliminares

El circuito multiplicador de voltaje Dickson podemos utilizarlo con una, dos o tres etapas dependiendo del voltaje que se requiera. Podemos hacer un arreglo de varias antenas con multiplicadores Dickson conectados en paralelo para

aumentar la corriente de carga para un capacitor de carga. Planteamos calcular el voltaje en el capacitor de carga con la ecuación del voltaje en función del tiempo en un capacitor cuando este se está cargando en un circuito RC (resistor-capacitor) alimentado por una fuente de voltaje constante.

CAPÍTULO III

**SIMULACIÓN DEL
RECTIFICADOR**

3. Simulación del rectificador

Se simuló el circuito en Pspice para analizar el funcionamiento de este y prever los resultados esperados.

3.1. Circuito rectificador simulado en Pspice

En la Figura 13 se muestra el circuito rectificador simulado en Pspice, se simuló el circuito como se muestra y también con la salida abierta, es decir sin el capacitor C a la salida.

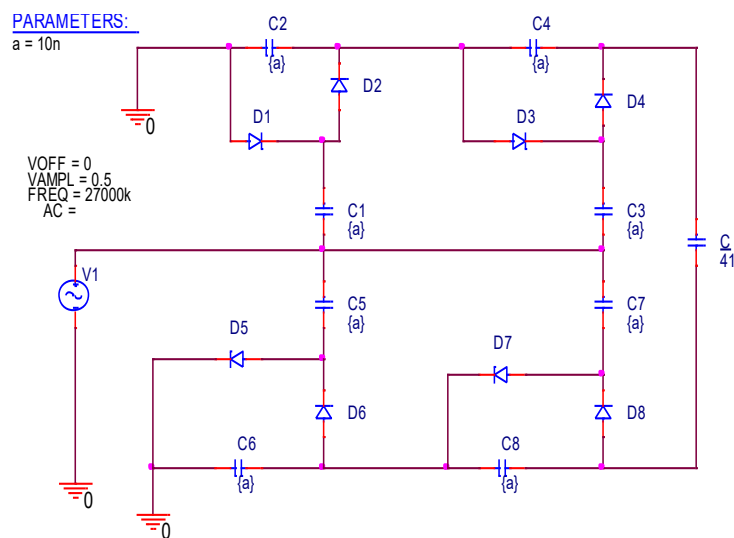


Figura 13 Circuito multiplicador de voltaje bipolar de Dickson con dos etapas simulado en Pspice.

Luego de simulaciones realizadas para comprobar la conducción de los diodos y la carga de los capacitores en estado estable se obtuvieron los siguientes resultados, resumidos en la Figura 14 y la Figura 15. Estas simulaciones en Pspice se hicieron con capacitores de 100nF y para los diodos se usó el modelo del diodo Schottky de la serie SMS7630. Las simulaciones se realizaron con una frecuencia de la fuente de entrada de 27MHz.

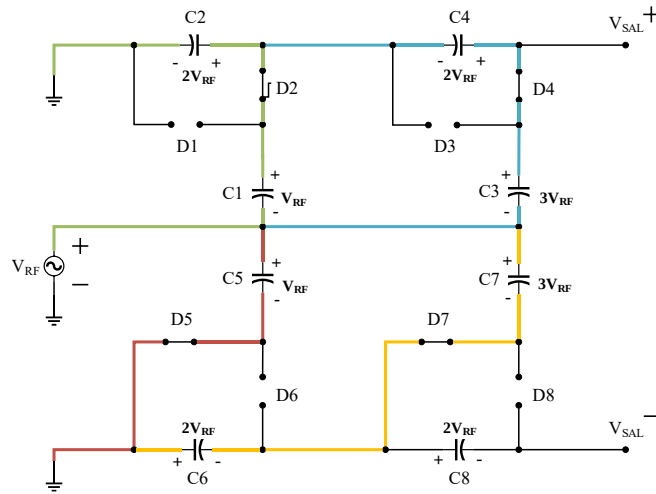


Figura 14 Circuito equivalente en estado estacionario, con onda positiva en la entrada.

En la Figura 14 las líneas de colores en el circuito son los caminos que toma la corriente desde la fuente a tierra. El voltaje de salida va a ser de 8 veces V_{RF} , del cual hay un V_{RF} en D4 y un V_{RF} en D8 de nivel DC, ya que la señal en estos diodos es la señal de V_{RF} pero montado sobre un nivel DC de magnitud V_{RF} .

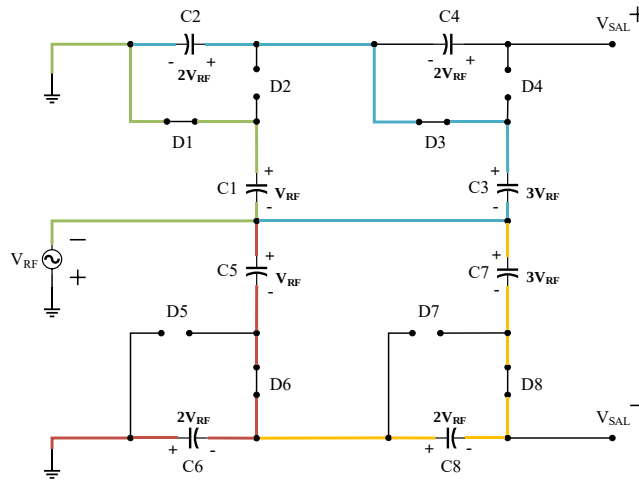


Figura 15 Circuito equivalente en estado estacionario, con onda negativa en la entrada.

En la Figura 15 las líneas de colores en el circuito son los caminos que toma la corriente desde tierra a la fuente. El voltaje de salida va a ser de 8 veces V_{RF} , del cual hay un V_{RF} en D4 y un V_{RF} en D8 de nivel DC, ya que la señal en estos diodos es la señal de V_{RF} , pero montado sobre un nivel DC de magnitud V_{RF} .

3.2. Ejemplos de simulaciones en Pspice

En las simulaciones se conectó como carga un capacitor para cargarlo. Las simulaciones se hicieron en un tiempo de 3ms. Se probó con capacitores a la salida desde 0.3mF hasta 100F. Durante ese tiempo de simulación los capacitores con los que se probó están descargados completamente, por lo que durante el tiempo de simulación el capacitor a la salida se comporta como un cortocircuito y por lo tanto la corriente que se mide en el simulador va a ser la máxima que puede entregar el circuito. Obtuvimos que esta corriente máxima que se le entrega al capacitor de salida depende solamente del voltaje de entrada y de las resistencias que aportan los diodos, los capacitores del circuito no influyen en esta corriente de carga y tampoco influye el valor que tenga este capacitor de salida.

En las simulaciones comprobamos el voltaje en inverso que tiene cada diodo y este es de aproximadamente el doble del voltaje pico de la señal de entrada.

En la Tabla 4 se muestra los resultados de ejemplos de simulaciones en Pspice.

Tabla 4 Ejemplos de simulación

Voltaje de alimentación (V_{RF}) (V)	Topología del Dickson bipolar	Voltaje de salida sin carga (V)	Corriente máxima promedio de carga con capacitor de carga (mA)
1	una etapa	3.6934	10.697
1	dos etapas	7.3804	10.696
1	tres etapas	11.030	10.639
0.5	una etapa	1.7398	3.615
0.5	dos etapas	3.4798	3.6119
0.5	tres etapas	5.2181	3.6027

3.3. Señal de voltaje y señal de corriente a la salida del rectificador

En la Figura 16 se muestra la señal de salida del rectificador, simulado en Pspice, cuando tiene la salida abierta y con un voltaje pico a la entrada de 500mV.

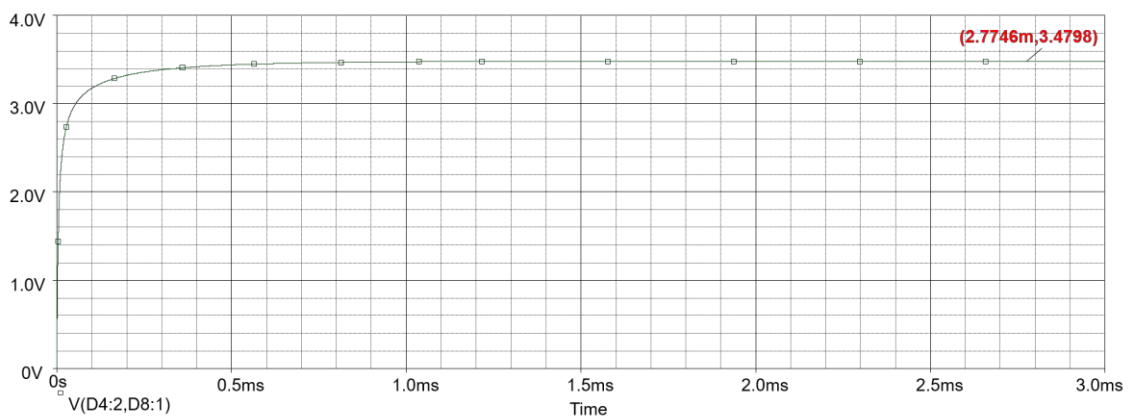


Figura 16 Voltaje de salida del circuito con la salida abierta, es decir sin el capacitor de almacenamiento, simulado en Pspice.

En la Figura 16 podemos observar que el voltaje de salida llega hasta 3.4798V.

En la Figura 17 se muestra la señal de la corriente instantánea máxima (señal de color verde) que se le entrega al capacitor de carga, así como su promedio (señal roja) simulado en Pspice con un voltaje pico a la entrada de 500mV.

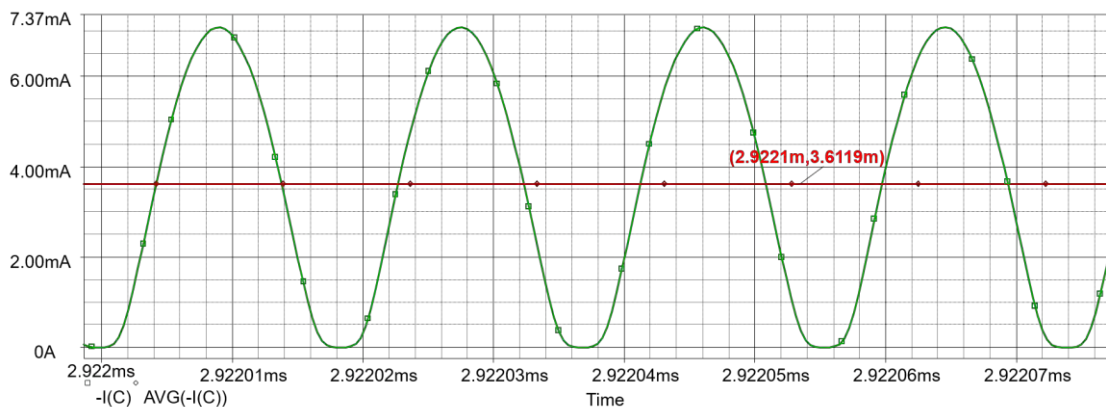


Figura 17 Señal de corriente instantánea (señal de color verde) que se le entrega al capacitor de carga, así como su promedio (señal roja) simulado en Pspice.

En la Figura 17 se observa que la señal de corriente instantánea máxima (señal verde) es siempre positiva y pulsante con un valor promedio de 3.6119mA (señal roja).

3.4. Señal de voltaje y señal de corriente a la entrada del rectificador

A continuación, se analiza la corriente y voltaje a la entrada del circuito en Pspice con la salida del circuito abierta y con un voltaje pico a la entrada de 500mV.

En la Figura 18 se observa la corriente a la entrada del circuito y el voltaje de salida cuando el rectificador tiene la salida abierta.

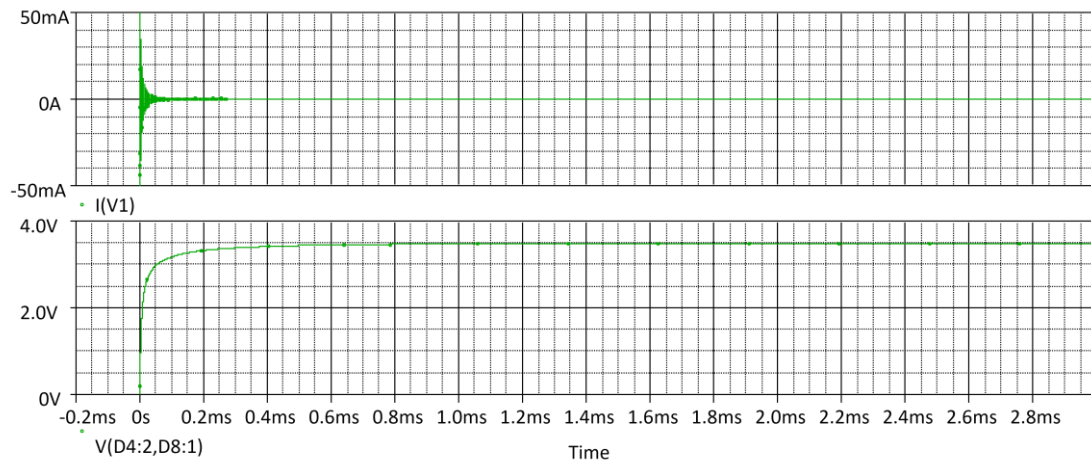


Figura 18 Corriente a la entrada del circuito y voltaje a la salida del circuito cuando la salida está abierta.

La Figura 18 nos permite apreciar que a medida que los capacitores del circuito se van cargando se va demandando menos corriente en la entrada del rectificador.

En la Figura 19 se observa la forma de onda de la corriente a la entrada del circuito cuando la salida está abierta.

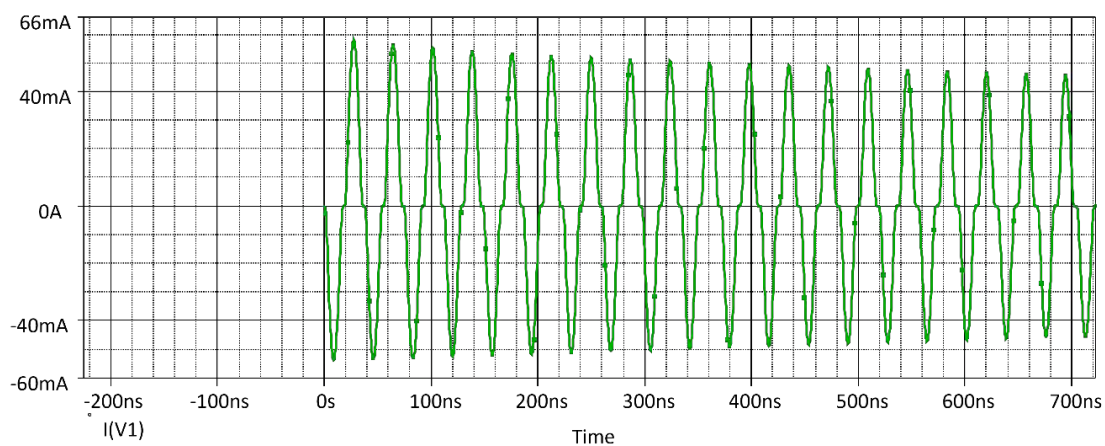


Figura 19 Zoom a la corriente a la entrada del circuito con la salida abierta.

La corriente a la entrada del circuito con la salida abierta alcanza un pico máximo de 58,114mA.

En la Figura 20 se observa la forma de onda de la corriente a la entrada del circuito en otro intervalo de tiempo más adelantado que en la Figura 19. Se puede apreciar cómo va disminuyendo la corriente y aumenta el tiempo muerto en la forma de onda de la corriente a la entrada del circuito.

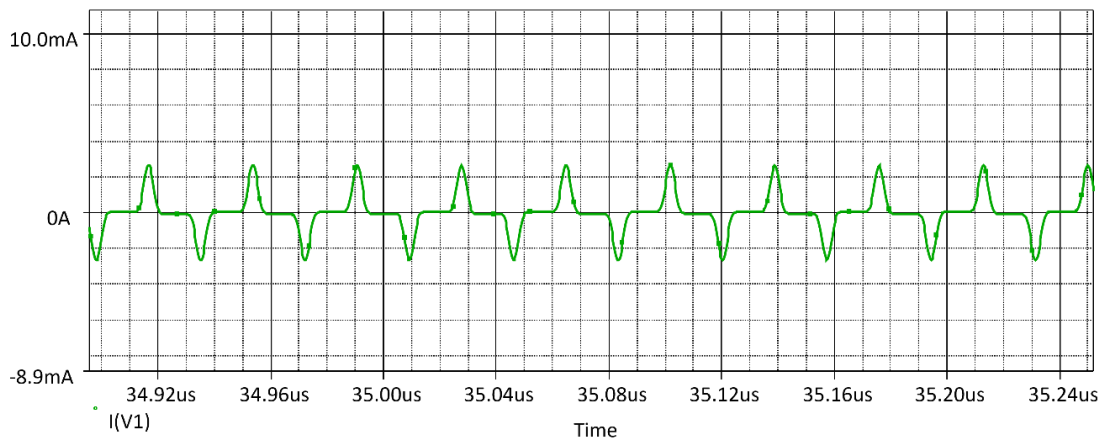


Figura 20 Zoom a la corriente a la entrada del circuito con la salida abierta en otro intervalo de tiempo.

En la Figura 21 se observa la corriente y el voltaje a la entrada del circuito cuando la salida está abierta. Se observa que ambas señales están en fase por lo que la resistencia a la entrada del circuito es puramente resistiva.

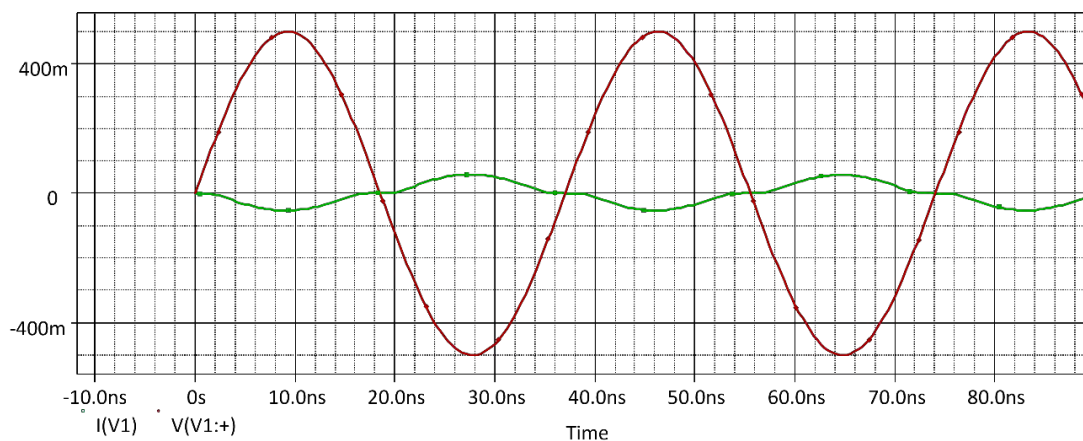


Figura 21 Corriente y voltaje a la entrada del circuito con la salida abierta.

A continuación, se analiza la corriente y voltaje a la entrada del circuito en Pspice con la salida conectada a un capacitor de carga de 41F y con un voltaje pico a la entrada de 500mV.

En la Figura 22 se observa la corriente a la entrada del circuito y corriente a la salida del circuito cuando se alimenta a la salida un capacitor de carga. La corriente a la entrada mantiene esa forma de onda todo el tiempo de simulación que es de 3ms, esto es debido a que está cargando al capacitor de salida.

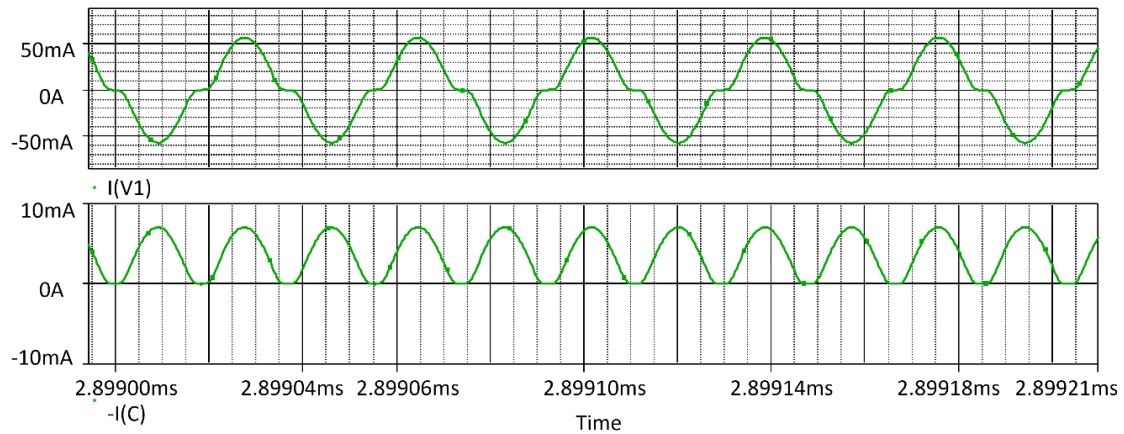


Figura 22 Corriente a la entrada del circuito y corriente a la salida del circuito cuando se alimenta a la salida un capacitor de carga.

La corriente de entrada cuando se está cargando a la salida un capacitor de 41F alcanza un pico máximo de 58,931mA.

En la Figura 23 se observa la corriente y el voltaje a la entrada del circuito cuando se está cargando a la salida un capacitor de 41F. Se observa que ambas señales están en fase por lo que la resistencia a la entrada del circuito es puramente resistiva.

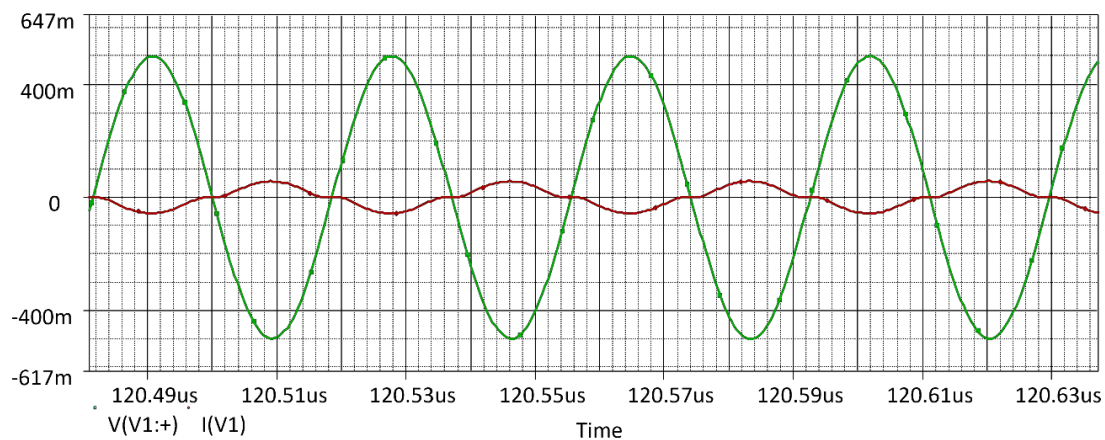


Figura 23 Corriente y voltaje a la entrada del circuito cuando se está cargando a la salida un capacitor de 41 F.

A continuación, se analiza y se halla la resistencia equivalente a la entrada del circuito con un voltaje pico a la entrada de 500mV.

Como los capacitores cuando se cargan se comportan como cortocircuito, tenemos a partir de la Figura 14 el circuito equivalente de la Figura 24.

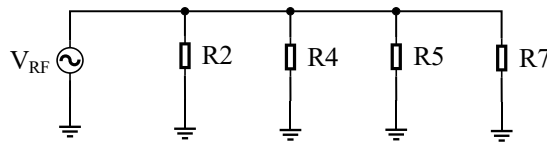


Figura 24 Circuito equivalente de la Figura 14.

En el circuito de la Figura 24 R2, R4, R5 y R7 son las resistencias de los diodos D2, D4, D5 y D7.

Tenemos entonces el circuito equivalente de la Figura 25 que sería reduciendo el circuito de la Figura 24.

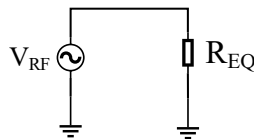


Figura 25 Circuito equivalente de la Figura 24.

En la Figura 25 conocemos el valor V_{RF} y también el valor de la corriente máxima que circula por el circuito que es de 58,114mA por lo que podemos hallar a R_{EQ} .

$$R_{EQ} = \frac{0.5V}{58.114mA} = 8.60\Omega \quad (2)$$

Por lo tanto, la resistencia individual de cada diodo es:

$$R_D = R_{EQ} \times 4 = 8.60\Omega \times 4 = 34.4\Omega \quad (3)$$

Para validar este análisis se comprobó el circuito de la Figura 26 en Pspice, utilizando los mismos componentes de nuestro circuito y los mismos valores para la fuente en la entrada.

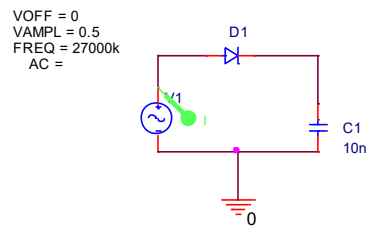


Figura 26 Circuito de prueba en Pspice.

La corriente pico máxima de la Figura 26 se observa en la Figura 27.

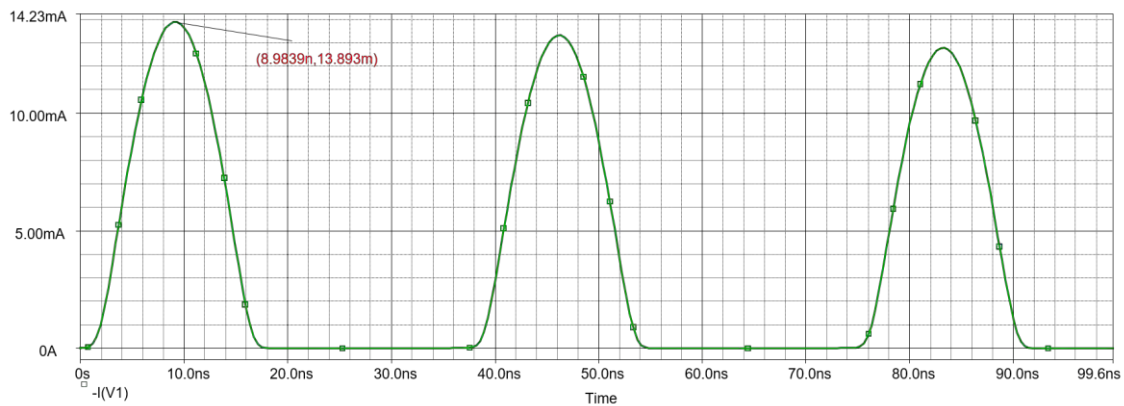


Figura 27 Corriente en el circuito de prueba de la Figura 26.

La corriente pico máxima es de 13,893mA.

Según nuestros cálculos la R_D es de $34,4\Omega$ por lo que en el circuito de prueba la corriente nos da:

$$I = \frac{0.5V}{34.4\Omega} = 14.5mA \quad (4)$$

Por lo que vemos que los resultados son cercanos y podemos concluir que nuestro análisis para hallar la resistencia equivalente es acertado.

A continuación, se muestra la corriente en el circuito de prueba en todo el tiempo simulado:

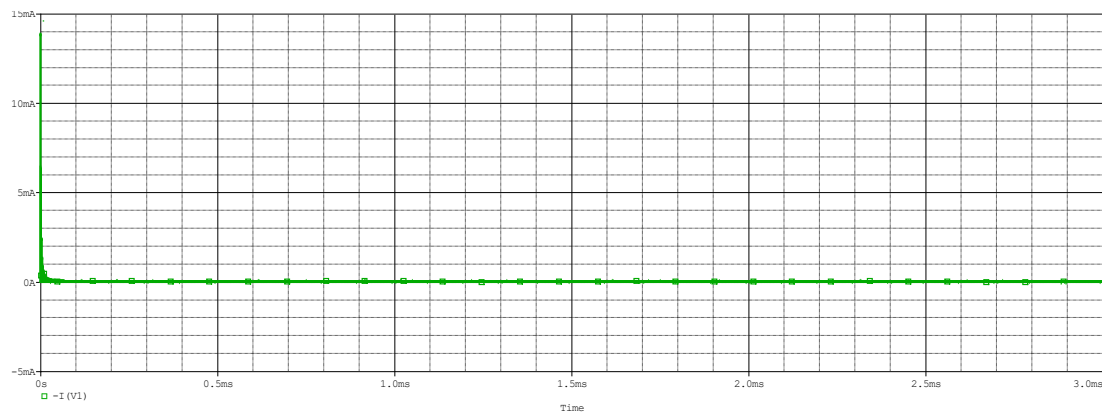


Figura 28 Corriente en el circuito de prueba de la Figura 26.

Conclusiones preliminares

Obtuvimos que la corriente máxima que se le entrega al capacitor de salida depende solamente del voltaje de entrada y de las resistencias que aportan los diodos, los capacitores del circuito no influyen en esta corriente de carga y tampoco influye el valor que tenga este capacitor de salida. La señal de corriente instantánea que se le entrega al capacitor de carga es siempre positiva y pulsante.

La corriente a la entrada del circuito irá disminuyendo a medida que se carguen los capacitores del circuito cuando la salida está abierta y cuando se conecta un capacitor de carga a la salida también va a disminuir la corriente a la entrada a medida que el capacitor a la salida se vaya cargando ya que en la práctica este capacitor va a ser de mucha más capacitancia que los capacitores del circuito.

La corriente y el voltaje a la entrada están en fase por lo que la resistencia equivalente a la entrada es puramente resistiva. Para los valores de la fuente de entrada de 500mV y 27MHz la resistencia equivalente a la entrada es de 8.6Ω , con una resistencia cada diodo de 34.4Ω , estos valores de resistencia varían en dependencia del voltaje pico de la fuente de entrada ya que la resistencia del diodo varía en dependencia de la corriente que circula por él.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN DEL

CIRCUITO

4. Implementación del circuito

4.1. Selección de componentes

Se seleccionaron los componentes en primera instancia pensando en hacer las pruebas con no más de 500mV a la entrada del receptor lo que nos da 3.5V a la salida y con ese voltaje planeamos tener como caso práctico un teclado que su voltaje de funcionamiento es de 3.7V. Se planificó primeramente con el capacitor 885012007009 el cual es de 10nF y de 10V con una tolerancia de 5 %, y con el diodo SMS7630-079LF el cual tiene un voltaje umbral de 240mV, soporta una corriente en directo máxima de 50mA y un voltaje en inverso máximo de 1V.

Cuando se mandó a construir la PCB y a ensamblar los componentes, que todos son de montaje superficial, en JLCPCB, la cual está ubicada en China, pues se sustituyeron estos componentes por componentes similares que eran con los que contaba esta empresa. El capacitor que se usó es 0805B103K101NT el cual es de 10nF y de 100V con una tolerancia de 10 %. El diodo que se usó es BAT6302VH6327XTSA1 el cual tiene un voltaje umbral de 190mV y soporta una corriente en directo máxima de 100mA y un voltaje en inverso máxima de 3V.

En la Figura 29 se muestra el transmisor seleccionado el cual se va a usar para transmitir en AM.



Figura 29 Transmisor seleccionado.

El transmisor de la Figura 29 es de marca Cobra, transmite a 27MHz, la cual es una banda civil y tiene un alcance máximo de 5km.

La Figura 30 muestra la antena seleccionada la cual es de 27MHz y tiene una impedancia de 50Ω.



Figura 30 Antena.

La Figura 31 muestra el diodo seleccionado el cual es un diodo Schottky y para la frecuencia que se usa solo existe en montaje superficial.

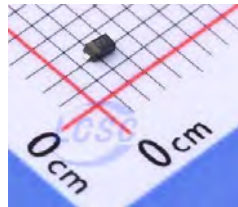


Figura 31 Diodo seleccionado.

El diodo de la Figura 31 es BAT6302VH6327XTSA1 el cual tiene un voltaje umbral de 190mV y soporta una corriente en directo máxima de 100mA y un voltaje en inverso máxima de 3V.

La Figura 32 muestra el capacitor seleccionado, como se usa un diodo de montaje superficial pues se decidió usar también un capacitor de montaje superficial.

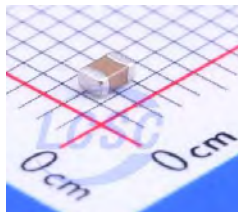


Figura 32 Capacitor seleccionado.

El capacitor de la Figura 32 es 0805B103K101NT el cual es un condensador cerámico multicapa de 10nF y de 100V con una tolerancia de 10 %.

La Figura 33 muestra el conector seleccionado, este se decidió usar para facilitar las conexiones entre la antena y el rectificador y entre el rectificador y el capacitor de almacenamiento en el laboratorio.



Figura 33 Conector seleccionado.

4.2. Diseño y construcción del PCB

El diseño de la PCB se realizó en el software Altium Designer. Para la construcción de la PCB se usó el servicio de la empresa JLCPCB que está localizada en China.

La Figura 34 muestra la imagen en 3d del diseño realizado en Altium Designer.

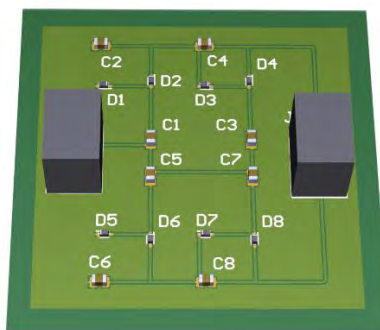


Figura 34 Diseño en Altium Designer visualizado en 3d.

La Figura 35 muestra la PCB construida con los componentes soldados.

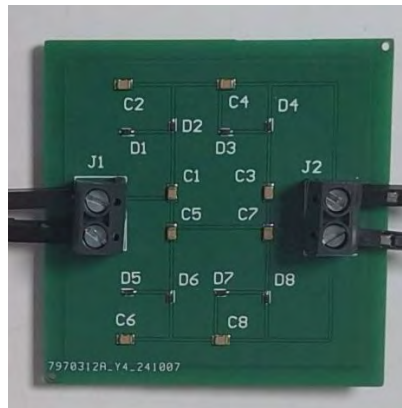


Figura 35 PCB construida con los componentes soldados.

Conclusiones preliminares

El transmisor seleccionado fue diseñado con el objetivo de comunicaciones, es una recomendación para futuros trabajos diseñar un transmisor con el objetivo de la transmisión de potencia inalámbrica.

Una cuestión importante para seleccionar el diodo y capacitor que se va a usar en el rectificador es sus valores críticos como son en el caso del capacitor el voltaje que soportan y en el caso del diodo la corriente máxima en directo y el voltaje máximo en inverso. En el caso del capacitor seleccionado tiene un margen grande en cuanto al voltaje. En cuanto al diodo seleccionado tiene un margen grande en cuanto a la corriente en directo, pero en cuanto al voltaje en inverso hay que cuidar que la señal de entrada no supere un voltaje pico de 1.5V.

La PCB puede ser más pequeña, pero se decidió hacerla de 5 por 5 centímetros para facilitar el trabajo en las pruebas de laboratorio. Se decidió usar los conectores en vez de soldar los cables a la PCB para facilitar el trabajo en las pruebas de laboratorio.

CAPÍTULO V

RESULTADOS DE PRUEBAS

EXPERIMENTALES

5. Resultados de pruebas experimentales

5.1. Establecimiento de un protocolo de pruebas para validar la metodología de diseño propuesta con el prototipo implementado

En este apartado se define el procedimiento a seguir para realizar las pruebas de laboratorio para validar la metodología de diseño propuesta.

Experimento 1:

Se decidió realizar una prueba usando un generador de señal y el rectificador construido para observar el funcionamiento del rectificador. En esta prueba se desea observar el par de señal de voltaje de entrada y salida del rectificador, además de la señal de corriente que se le entrega a un capacitor de almacenamiento a la salida del rectificador.

Experimento 2:

Otra prueba que se decidió realizar es usar el transmisor seleccionado en este trabajo con la antena transmisora para transmitir la señal transmisora y usar el rectificador construido con la antena receptora para recibir la señal. Luego se desea observar el par de señal de voltaje de entrada y salida del rectificador, además de la señal de corriente que se le entrega a un capacitor de almacenamiento a la salida del rectificador.

5.2. Validación de la metodología desarrollada mediante pruebas experimentales

Se realizaron los dos experimentos en el laboratorio. En ambos experimentos la corriente que se le entrega al capacitor de almacenamiento es tan pequeña que no se puede medir con los instrumentos de medición usados, por lo que se decidió realizar la carga de siete capacitores y grabar esta carga para luego obtener las señales de $V_C(t)$ de cada capacitor y así obtener la R equivalente a la salida del rectificador.

La Figura 36 muestra el experimento 1. En esta se puede observar el generador de señal, el rectificador y el osciloscopio. Para medir el par de señales de voltaje de entrada y salida del rectificador se usaron dos sondas, una para el voltaje a la entrada y las otras dos para el voltaje de salida en modo diferencial.



Figura 36 Experimento 1.

La Figura 37 muestra las conexiones del Experimento 1.

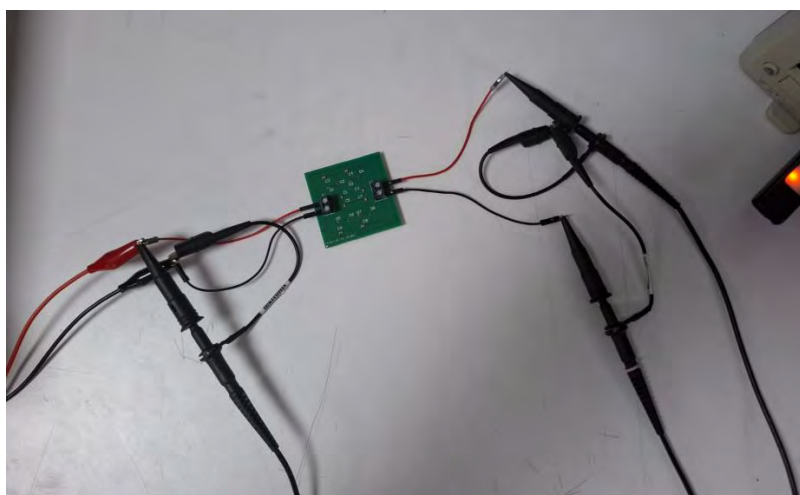


Figura 37 Conexiones del Experimento 1.

Para el Experimento 1 se realizaron diez pruebas con distintos voltajes de entrada desde 50mV hasta 500mV. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Valores de voltaje del Experimento 1

V entrada (mV)	V salida (V)
50	0.136
100	0.394
150	0.735
200	1.11
250	1.46
300	1.77
350	2.13
400	2.47

CAPÍTULO V. RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

450	2.9
500	3.38

En la Figura 38 se muestran las señales de entrada y salida del rectificador, medidas por el osciloscopio, en el Experimento 1, para un voltaje pico de la señal de entrada de 500mV.

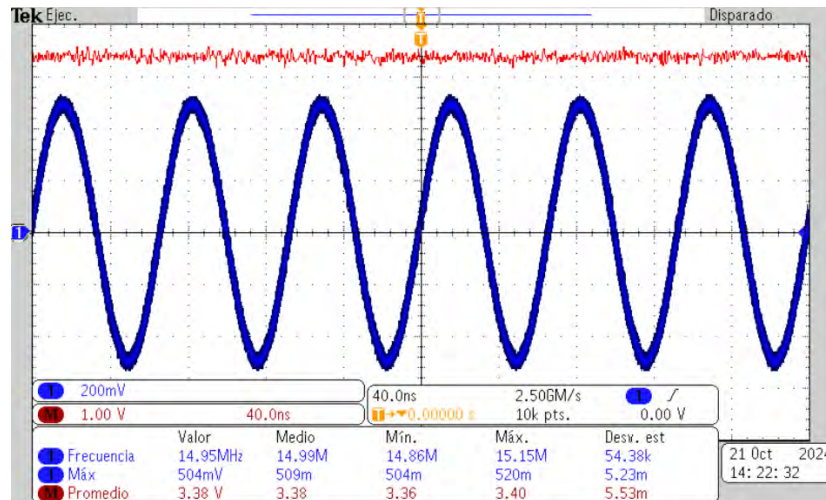


Figura 38 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 500 mV de voltaje pico en la señal de entrada.

Como se observa en la Figura 38 el rectificador está rectificando correctamente la señal de entrada. La frecuencia a la que trabaja el generador de señal es de 15MHz, pues, aunque nuestro transmisor es de 27MHz la máxima frecuencia a la que trabaja el generador de señal usado es de 15MHz. Se observa que el valor del voltaje de salida es de 3.38V mientras que en la simulación para ese mismo voltaje pico de entrada el voltaje de salida es de 3.48V, por lo que el resultado en el experimento es muy cercano al esperado según la simulación.

La Figura 39 muestra el Experimento 2. Se usa un ventilador para el transmisor pues a los cinco minutos de estar transmitiendo continuamente se apaga por protección de sobrecalentamiento, por esta razón los videos que se firmaron a cada capacitor fueron de cinco minutos. Para conformar las señales de $V_C(t)$ se tomó una muestra cada diez segundos lo que nos da un total de 300 muestras para cada señal de $V_C(t)$.

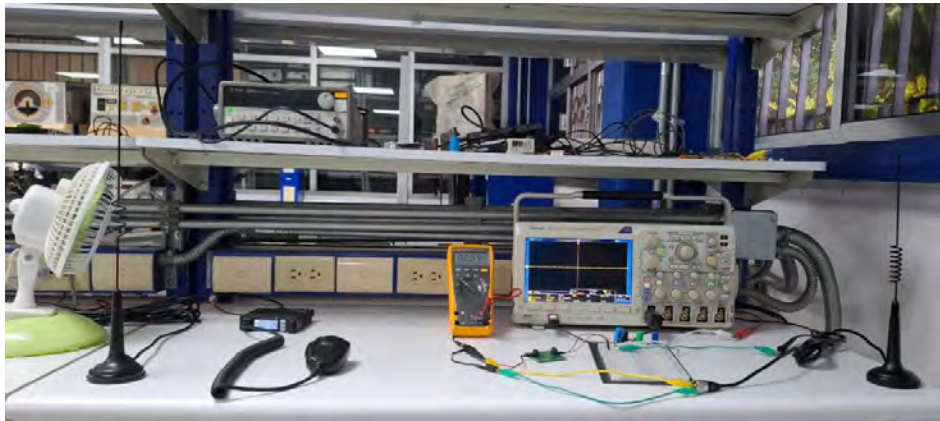


Figura 39 Experimento 2.

La Figura 40 muestra las conexiones del Experimento 2.

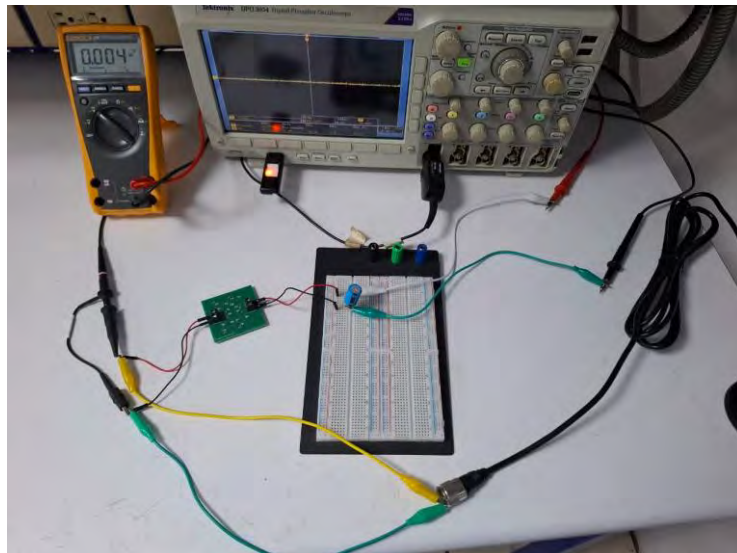


Figura 40 Conexiones en el Experimento 2.

Luego de obtener las señales de $V_C(t)$ para los capacitores se realizó un ajuste de curvas usando la ecuación (1) en la cual se tienen los valores de t , C y V_{CA} se asigna en dependencia del voltaje pico que tiene la señal de entrada, entonces se da un valor de R de forma tal que se realice el ajuste de curvas.

La Figura 41 muestra el ajuste de curvas para el capacitor de $330\mu F$.

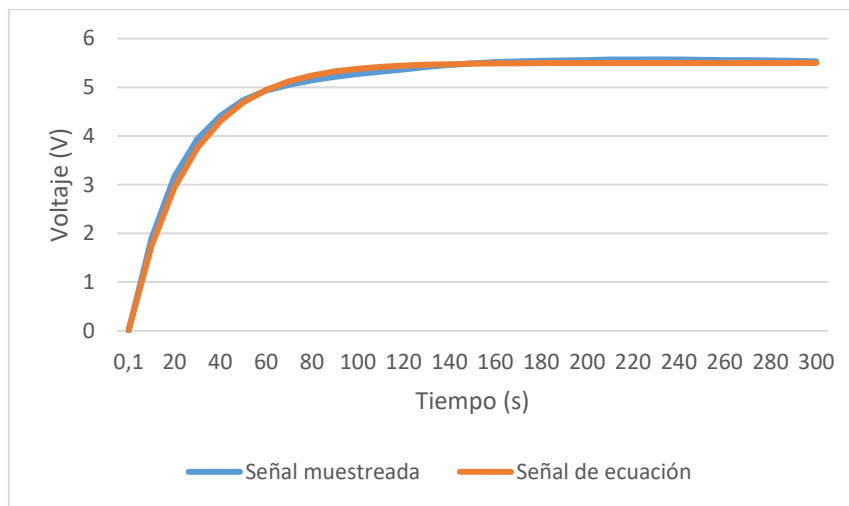


Figura 41 Carga del capacitor de 330 uF.

Tabla 6 Valores de R para cada capacitor

C (μ F)	R (Ω)
330	74000
470	74000
680	90000
1000	70000
1200	85000
2200	75000
4700	60000

El valor promedio de R es de 75428.6Ω por lo que concluimos que la resistencia equivalente a la salida del rectificador es de $75.4k\Omega$.

La Figura 42 muestra el par de señales de voltaje de entrada y salida del rectificador para el Experimento 2 cuando la salida está abierta, es decir sin capacitor de almacenamiento.

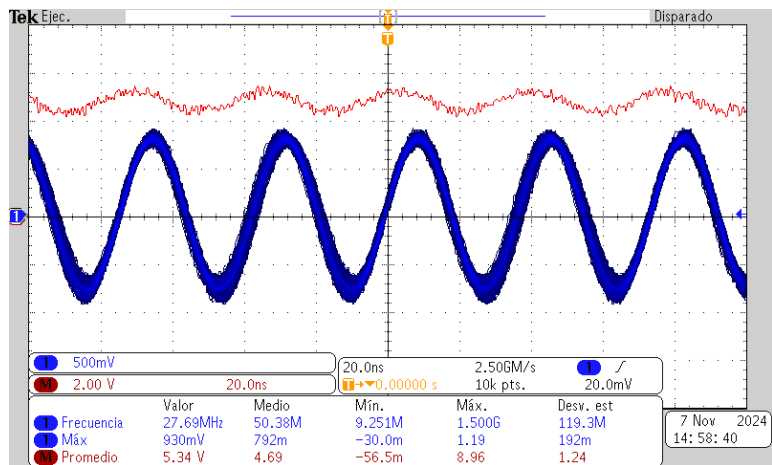


Figura 42 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador con la salida abierta, en el Experimento 2, para 930 mV de voltaje pico en la señal de entrada.

En la Figura 42 se observa que el rectificador rectifica bien la señal de entrada aunque con más rizado que en el Experimento 1.

La Figura 43 muestra la señal de voltaje en la antena receptora sin estar conectada al rectificador, cuando transmite el transmisor de 27MHz y están desenrollados los cables de ambas antenas.

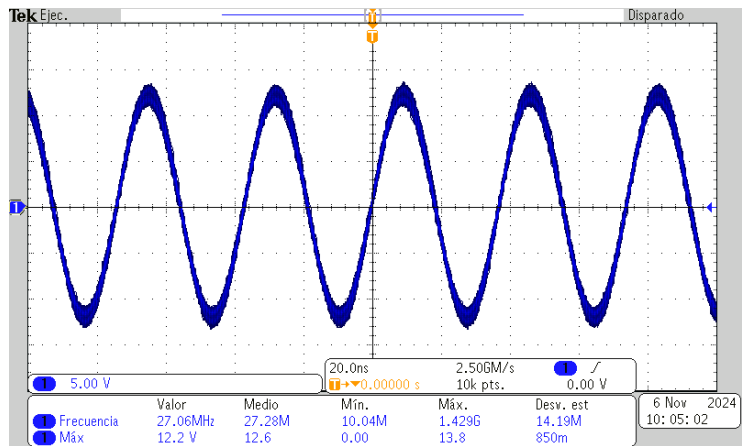


Figura 43 Señal en la antena receptora cuando transmite el transmisor y los cables de ambas antenas están desenrollados completamente.

En la Figura 43 se observa como el voltaje pico en el receptor alcanzó el valor de 12.2V. Esto ocurrió porque al estar los cables de las antenas desenrollados pues estos hacen función de antena también. Esto nos da la idea de que se pueden alcanzar niveles de señales de esta magnitud en la transmisión inalámbrica, por lo que resulta una investigación interesante el de un transmisor de potencia inalámbrica.

Conclusiones preliminares

Se decidió realizar dos experimentos, los cuales son suficientes para validar la metodología de diseño propuesta.

El rectificador construido rectificó correctamente la señal de voltaje en ambos experimentos y los valores de voltaje a su salida son muy cercanos a los esperados según la simulación, tan solo 0.1V por debajo con respecto a la simulación. Los valores de corriente entregada al capacitor de almacenamiento no se pudieron medir por ser muy pequeños y la resistencia equivalente a la salida del rectificador es grande de 75.4k Ω , esto mejorará cuando se trabaje con una antena diseñada para el rectificador de menor tamaño, por ende, de menor resistencia, y se diseñe un circuito de acople de impedancia para esta antena.

Es interesante el valor de 12.2V de voltaje pico, obtenido cuando se desenrollaron los cables de ambas antenas, en la antena receptora, esto nos motiva a investigar sobre cuanta potencia podríamos obtener en el receptor con las antenas adecuadas y un transmisor diseñado para la transmisión de potencia.

Publicaciones realizadas

Se publicó un poster en el II Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada que se realizó en el CENIDET del 22 al 24 de mayo del 2024 con el título de “Cosecha de energía de señales de radiofrecuencia”.

CONCLUSIONES

La implementación del circuito multiplicador de voltaje Dickson demuestra ser una solución flexible para la transmisión de potencia inalámbrica, ya que permite configuraciones con múltiples etapas para ajustar el voltaje según las necesidades. Asimismo, el uso en paralelo de antenas con multiplicadores Dickson posibilita aumentar la corriente de carga hacia un capacitor, cuya carga puede modelarse eficientemente con la ecuación del voltaje de carga de un capacitor en un circuito RC con una fuente de voltaje constante.

Las simulaciones revelan que la corriente máxima entregada al capacitor de salida depende fundamentalmente del voltaje de entrada y de las resistencias de los diodos, sin influencia directa de los capacitores del circuito o del capacitor de salida. Además, se confirmó que la corriente entregada al capacitor de carga es pulsante y positiva, mientras que la resistencia equivalente a la entrada es predominantemente resistiva, variando según el voltaje pico de la fuente de entrada.

El rectificador construido funcionó correctamente, logrando valores de voltaje a la salida cercanos a los esperados según la simulación, tan solo 0.1V por debajo. Sin embargo, las corrientes entregadas al capacitor de almacenamiento fueron demasiado pequeñas para medirlas directamente. La resistencia equivalente a la salida, inicialmente alta, podría optimizarse mediante el diseño de una antena más adecuada y un circuito de acople de impedancia, lo que mejoraría la transmisión de potencia. Los resultados obtenidos, de un voltaje pico de 12.2V en la antena receptora, destacan el potencial del sistema con antenas y transmisor adecuadamente diseñados, abriendo oportunidades para futuras investigaciones en transmisión de energía inalámbrica.

REFERENCIAS

- [1] I. R. H. Yaldi, S. K. A. Rahim, and M. R. Ramli, "Compact rectifier design for RF energy harvesting," presented at the Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, APACE, 2016.
- [2] J. Buchwald, C.-P. Yeang, N. Stermeroff, J. Barton, and Q. Harrington, "What Heinrich Hertz discovered about electric waves in 1887–1888," *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 75, pp. 125-171, 2021.
- [3] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," *IEEE Transactions on microwave theory techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, 1984.
- [4] I. D. Bougas, M. S. Papadopoulou, A. D. Boursianis, K. Kokkinidis, and S. K. Goudos, "State of the art techniques in RF energy harvesting circuits," in *Telecom*, 2021, vol. 2, no. 4, pp. 369-389: MDPI.
- [5] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, 2014.
- [6] M. Basim *et al.*, "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.
- [7] A. Rajawat, K. Suri, and M. Mohta, "Design of an efficient rectifier circuit based on karthaus-fischer voltage multiplier for energy harvesting," in *Intelligent Communication, Control and Devices: Proceedings of ICICCD 2017*, 2018, pp. 913-922: Springer.
- [8] M. Roberg, T. Reveyrand, I. Ramos, E. A. Falkenstein, and Z. Popovic, "High-efficiency harmonically terminated diode and transistor rectifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 12, pp. 4043-4052, 2012.
- [9] M. M. Mansour and H. Kanaya, "High-efficient broadband CPW RF rectifier for wireless energy harvesting," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 4, pp. 288-290, 2019.
- [10] J. Bae *et al.*, "High-efficiency rectifier (5.2 GHz) using a Class-F Dickson charge pump," *Microwave and optical technology letters*, vol. 59, no. 12, pp. 3018-3023, 2017.
- [11] J. Bae *et al.*, "5.8 GHz high-efficiency RF–DC converter based on common-ground multiple-stack structure," *Sensors*, vol. 19, no. 15, p. 3257, 2019.
- [12] A. Rajawat and P. K. Singhal, "Design and implementation of a dual-band rectifier antenna for efficient RF energy harvesting in wireless sensor networks," *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 28, no. 02, p. 1950034, 2019.
- [13] R. Berges, L. Fadel, L. Oyhenart, V. Vigneras, and T. Taris, "Conformable dual-band wireless energy harvester dedicated to the urban environment," *Microwave and optical technology letters*, vol. 62, no. 11, pp. 3391-3400, 2020.
- [14] S. Muhammad, J. Jiat Tiang, S. Kin Wong, A. Iqbal, M. Alibakhshikenari, and E. Limiti, "Compact rectifier circuit design for harvesting GSM/900 ambient energy," *Electronics*, vol. 9, no. 10, p. 1614, 2020.
- [15] S. Shen, Y. Zhang, C.-Y. Chiu, and R. Murch, "A triple-band high-gain multibeam ambient RF energy harvesting system utilizing hybrid combining," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 11, pp. 9215-9226, 2019.
- [16] M. M. Mansour, S. Yamamoto, and H. Kanaya, "Reconfigurable multistage RF rectifier topology for 900 MHz ISM energy-harvesting applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1181-1184, 2020.
- [17] M. Palandoken, C. Gocen, A. Kaya, F. Gunes, C. Baytore, and F. C. Can, "A novel split-ring resonator and voltage multiplier based rectenna design for 900 MHz energy harvesting applications," *Radioengineering*, vol. 27, no. 3, pp. 711-717, 2018.

- [18] M. Islam, M. Hossain, and S. Saha, "Efficient Rectenna Design for Harvesting Microwave Power from SSPS System," in *2017 2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE)*, 2017, pp. 1-4: IEEE.
- [19] S. EL MATTAR, A. BAGHDAD, and A. BALLOUK, "5.8 GHz rectenna using dielectric resonator antenna," in *2019 7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT)*, 2019, pp. 1-5: IEEE.
- [20] H. Mahfoudi, H. Takhedmit, M. Tellache, and S. Boisseau, "Wireless sensor node remote supply using a compact stacked rectenna array with voltage multipliers at 2.45 GHz," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 12, no. 4, pp. 309-315, 2020.
- [21] D. Kumar and K. Chaudhary, "High-efficiency rectenna design for satellite solar power station," in *2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON)*, 2016, pp. 546-550: IEEE.
- [22] A. S. Khan, N. U. Khan, W. U. Rahman, M. M. Ahmad, H. Khan, and F. U. Khan, "Performance evaluation of voltage rectifiers for energy harvesting applications," *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences*, 2021.
- [23] E. M. Ali *et al.*, "Power conversion using analytical model of Cockcroft–Walton voltage multiplier rectenna," *Electronics*, vol. 10, no. 8, p. 881, 2021.
- [24] W. Ali, H. Subbyal, L. Sun, and S. Shamoon, "Wireless energy harvesting using rectenna integrated with voltage multiplier circuit at 2.4 GHz operating frequency," *Journal of Power Energy Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 22-34, 2022.
- [25] R. V. Martínez, "Diseño y construcción de una rectena de alta eficiencia para la recuperación y transformación de energía de RF y microondas en energía eléctrica," Maestría, CICESE, 2022.
- [26] S. E. Pernet Robinson, "Implementación de un sistema de recolección de energía proveniente de ondas de radiofrecuencia para alimentar dispositivos de potencia inferior a 10 mW," 2016.
- [27] Y. Uzun, "Design and implementation of RF energy harvesting system for low-power electronic devices," *Journal of Electronic Materials*, vol. 45, pp. 3842-3847, 2016.
- [28] G. Di Cataldo and G. Palumbo, "Dynamic analysis of 3 stage Dickson voltage multiplier for an optimized design," in *Proceedings of MELECON'94. Mediterranean Electrotechnical Conference*, 1994, pp. 633-636: IEEE.
- [29] D. P. Pizarro Salvador, "Diseño y simulación de un circuito de arranque basado en la carga de empuje de Dickson para aplicaciones de cosecha de energía," Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2023.
- [30] E. Vasilyev, "Optimization of the architecture of a charge pump device on the basis of the energy efficiency criterion," *Journal of Communications Technology Electronics*, vol. 58, pp. 95-99, 2013.
- [31] O.-Y. Wong, H. Wong, W.-S. Tam, and C.-W. Kok, "On the design of power-and area-efficient Dickson charge pump circuits," *Analog Integrated Circuits Signal Processing*, vol. 78, pp. 373-389, 2014.
- [32] M. M. Al-Azawy and F. Sari, "Analysis of Dickson voltage multiplier for RF energy harvesting," in *2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 2019, pp. 10-14: IEEE.
- [33] D. M. B. Longoria, E. S. Navarro, A. A. Casas, M. A. C. Juárez, and U. P. Rico, "Comparación de Circuitos Multiplicadores de Voltaje para Cosecha de Energía en RF (Comparison of Voltage Multiplier Circuits for RF Energy Harvest)," *Pistas Educativas*, vol. 42, no. 136, 2020.

REFERENCIAS

- [34] L. C. Gunnam, Y.-J. Lai, and G.-M. Sung, "Differential Dickson voltage multiplier with matching network for radio frequency harvester," in *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, 2017, pp. 417-418: IEEE.
- [35] M. Ma, X. Cai, J. Jiang, and Y. Sun, "High efficiency cross-coupled charge pump circuit with four-clock signals," *Radioelectronics Communications Systems*, vol. 61, pp. 565-570, 2018.
- [36] S. Almorabeti, M. Rifi, and H. Terchoune, "Rectifier circuit designs for RF energy harvesting applications," in *Colloque sur les Objets et systèmes Connectés*, 2019.

SECCIÓN DE ANEXOS

Anexos I

Simulaciones de la corriente de carga en el capacitor de carga y del voltaje de salida del circuito sin carga conectada, para los circuitos de una, dos y tres etapas y con un valor pico del voltaje de entrada de 1V:

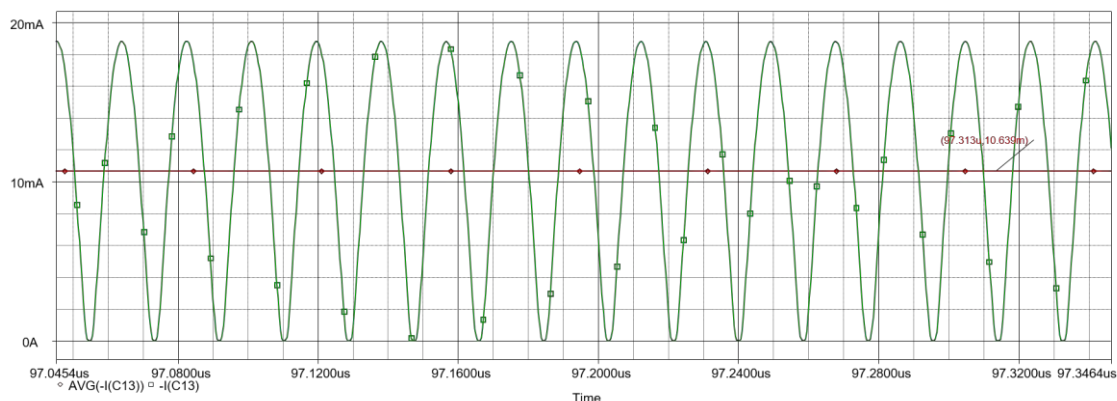


Figura 44 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con una etapa.

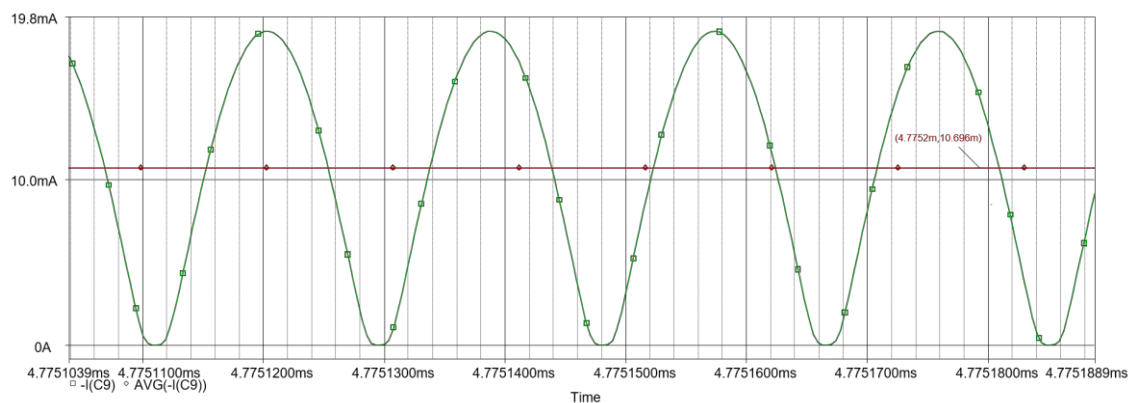


Figura 45 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con dos etapas.

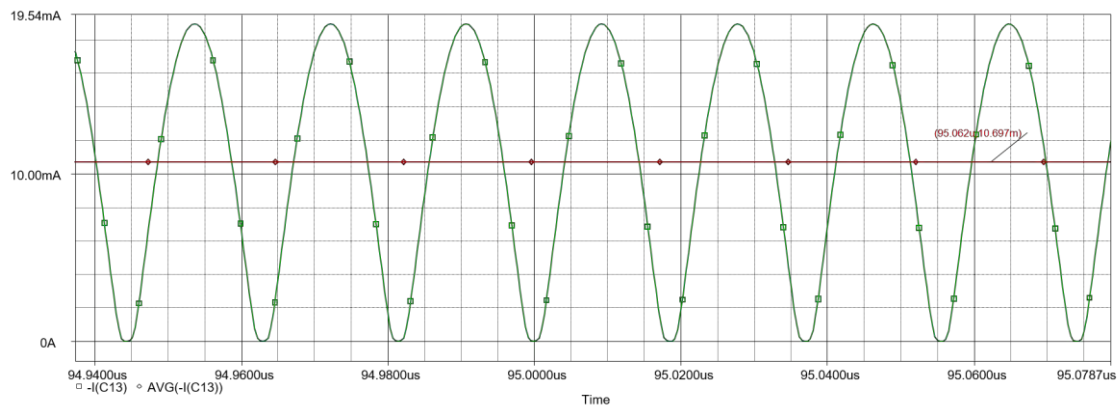


Figura 46 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con tres etapas.

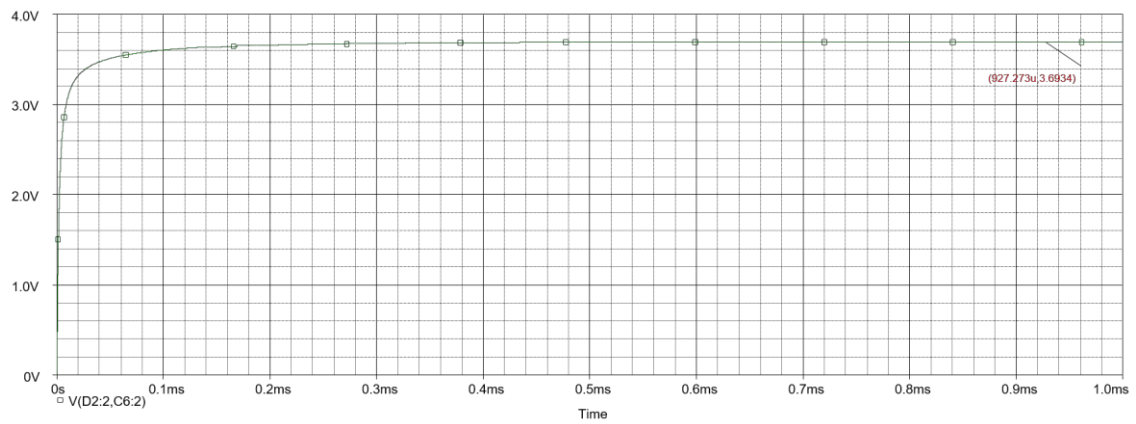


Figura 47 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con una etapa.

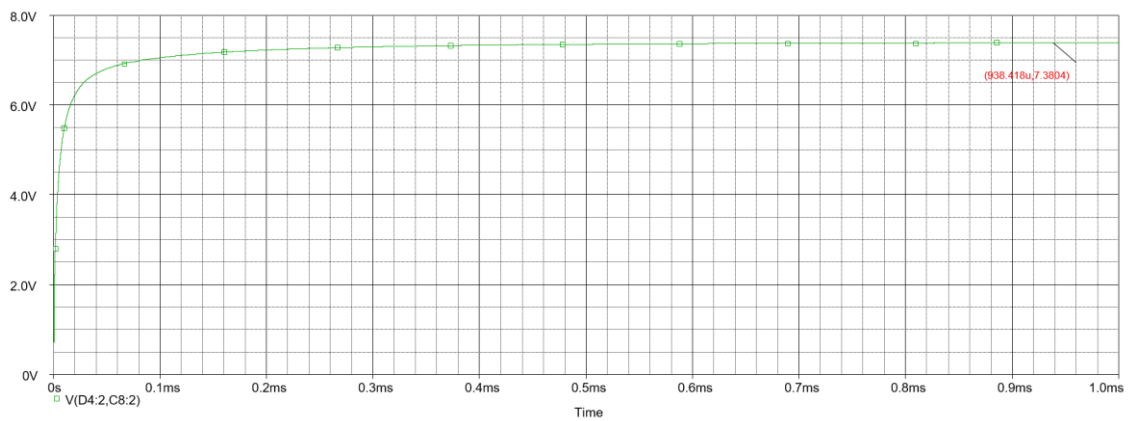


Figura 48 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con dos etapas.

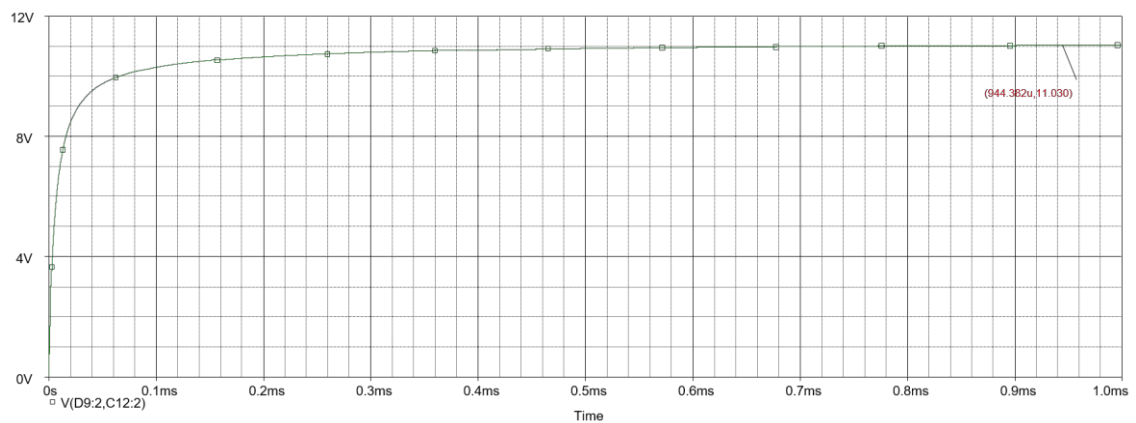


Figura 49 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con tres etapas.

Anexos II

Simulaciones de la corriente de carga en el capacitor de carga y del voltaje de salida del circuito sin carga conectada, para los circuitos de una, dos y tres etapas y con un valor pico del voltaje de entrada de 100mV:

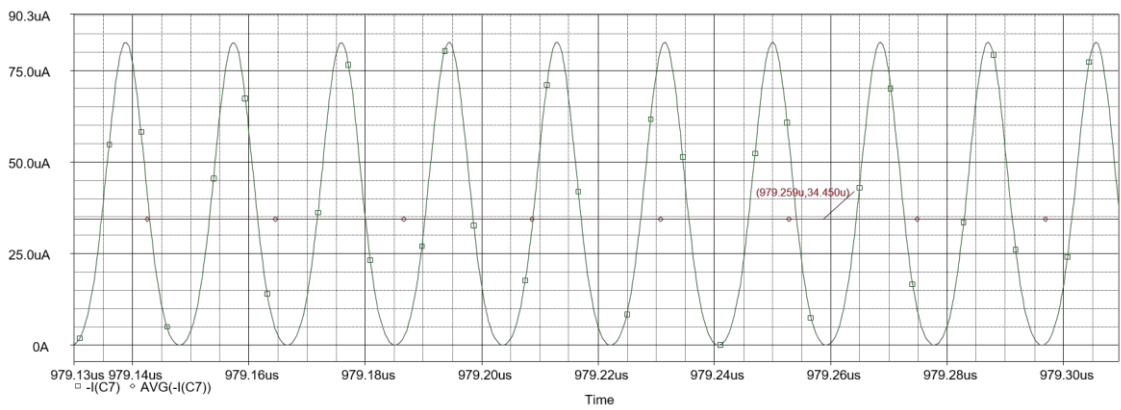


Figura 50 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con una etapa.

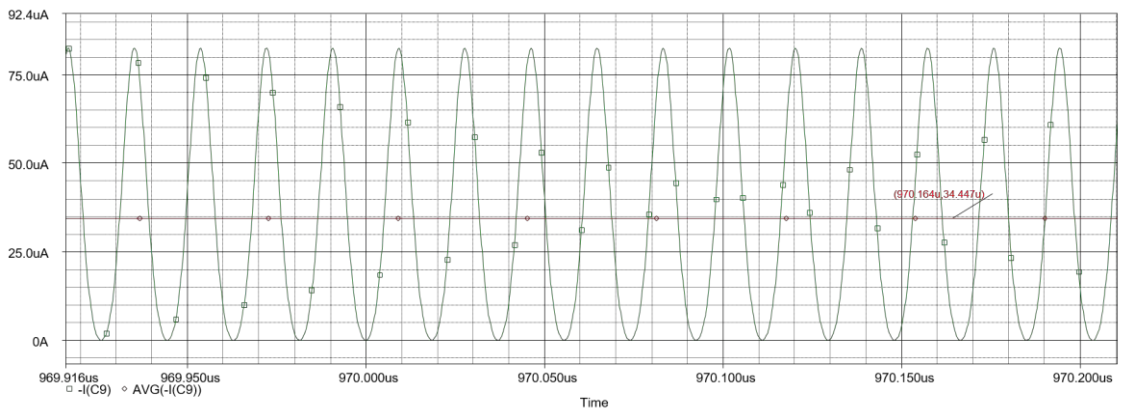


Figura 51 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con dos etapas.

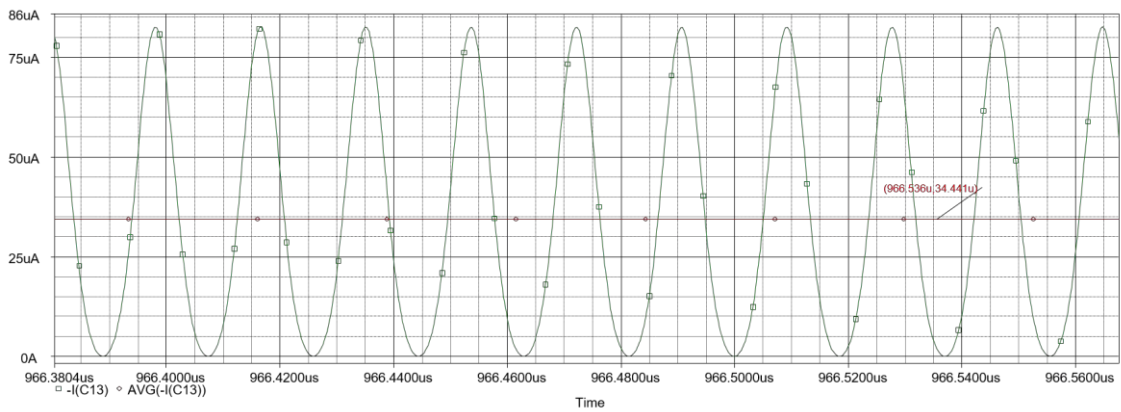


Figura 52 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con tres etapas.

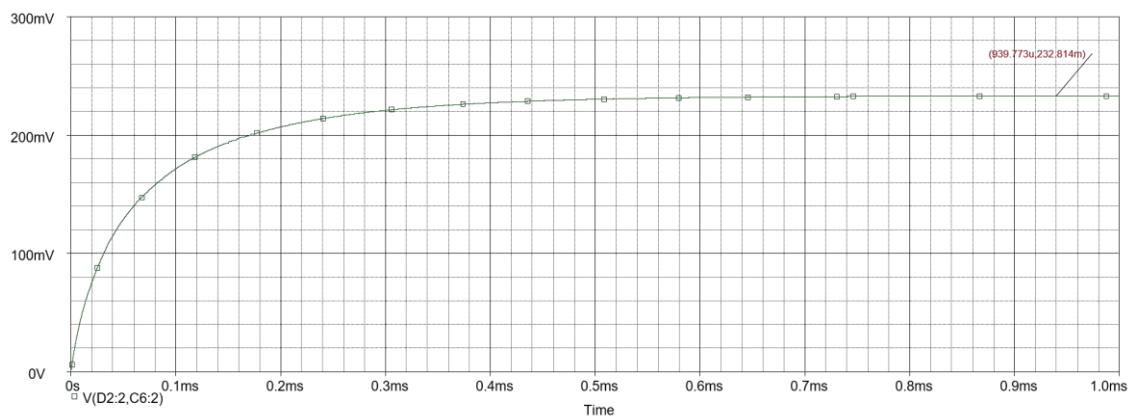


Figura 53 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con una etapa.

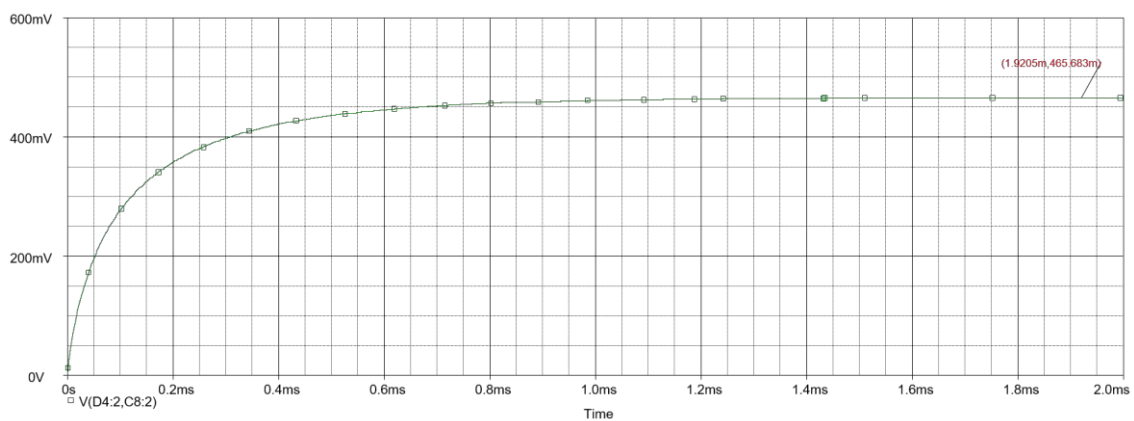


Figura 54 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con dos etapas.

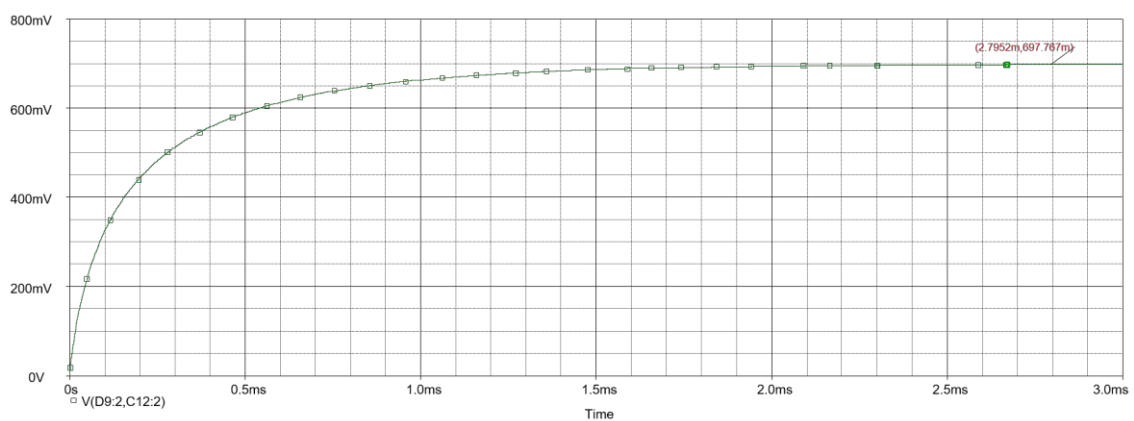


Figura 55 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con tres etapas.

Anexo III

Simulaciones de la corriente de carga en el capacitor de carga y del voltaje de salida del circuito sin carga conectada, para los circuitos de una, dos y tres etapas y con un valor pico del voltaje de entrada de 500mV:

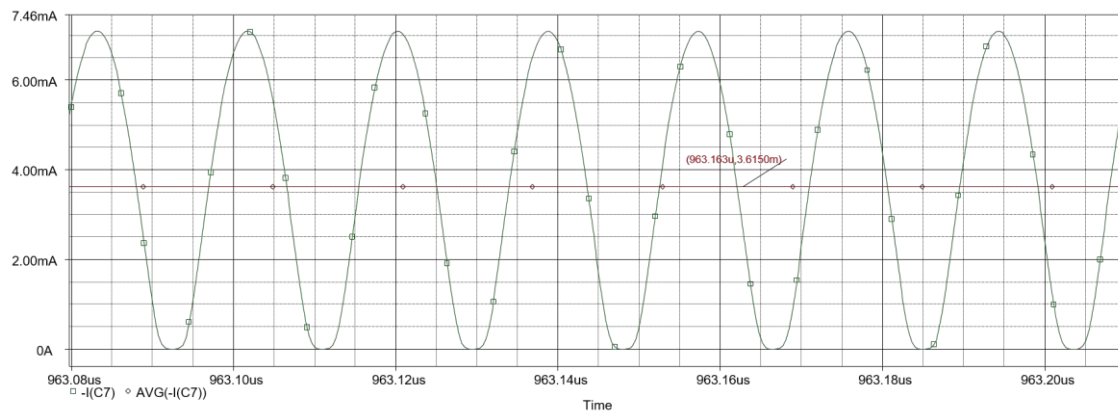


Figura 56 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con una etapa.

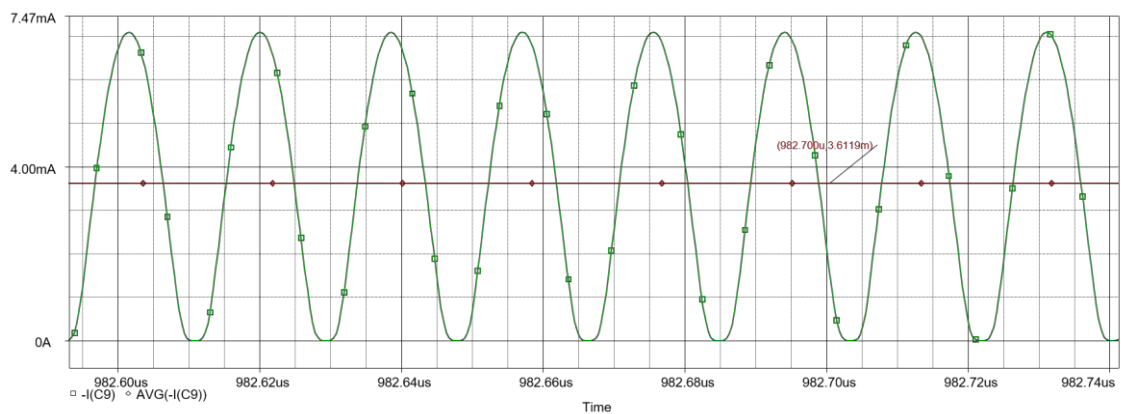


Figura 57 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con dos etapas.

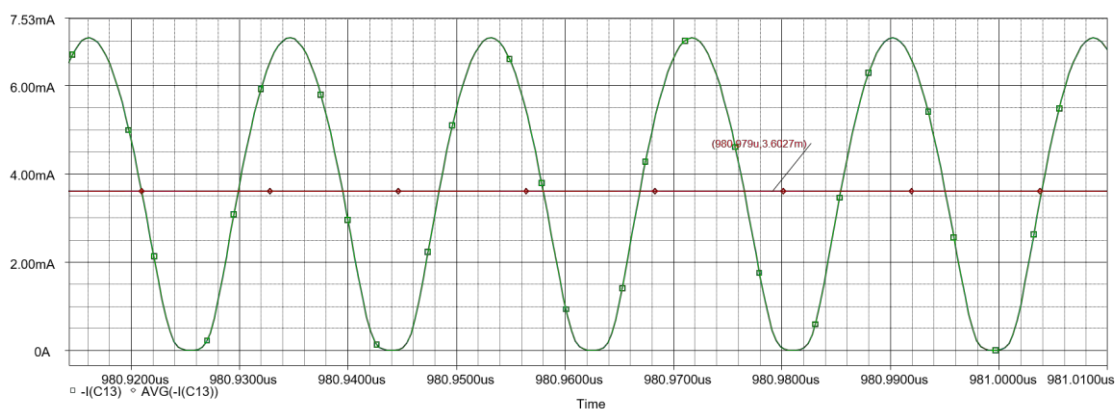


Figura 58 Corriente de carga en el capacitor de carga para el circuito con tres etapas.

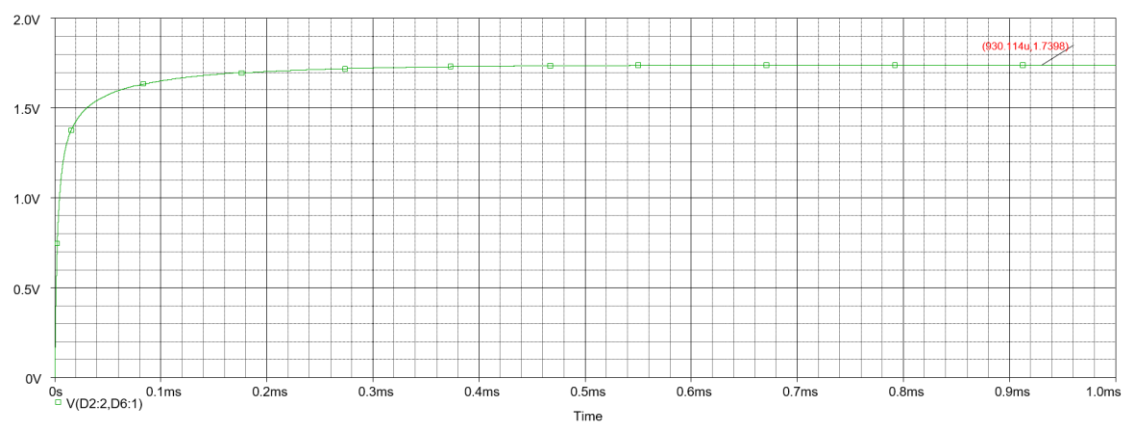


Figura 59 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con una etapa.

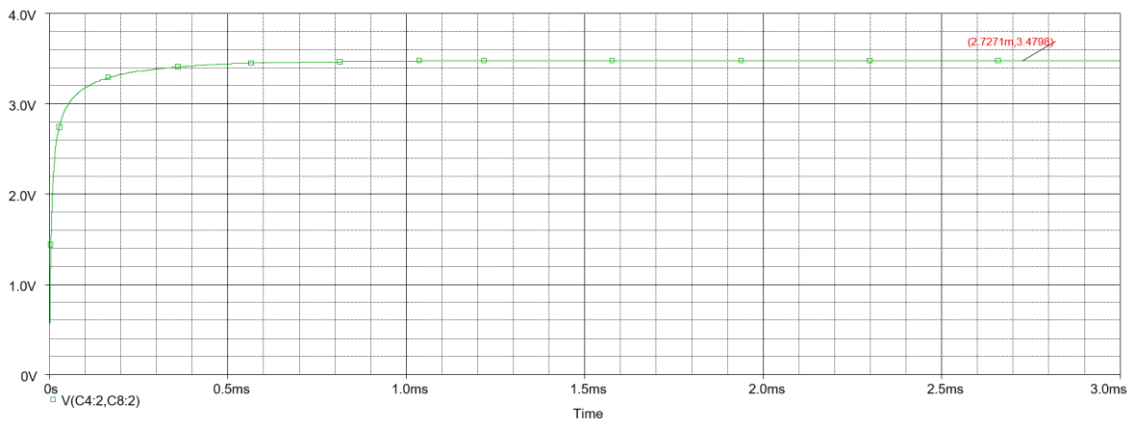


Figura 60 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con dos etapas.

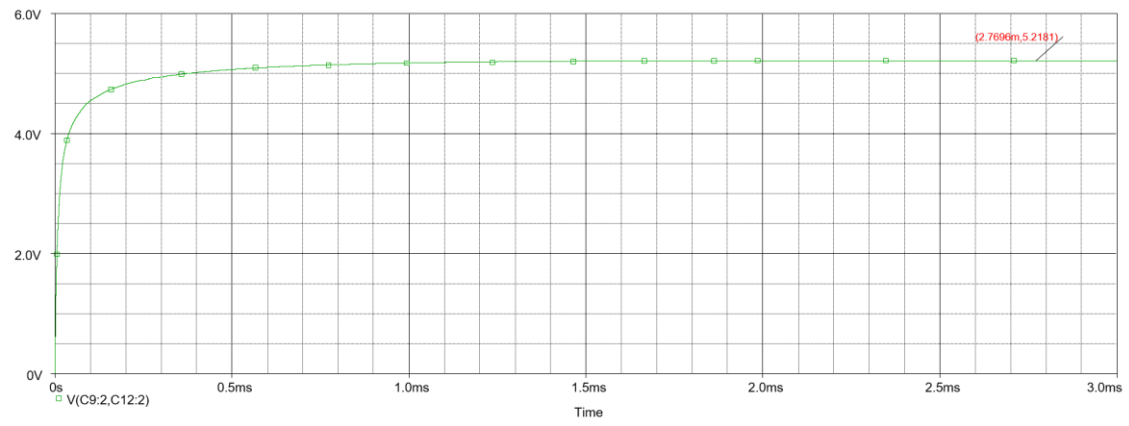


Figura 61 Voltaje de salida sin carga conectada para el circuito con tres etapas.

Anexo IV

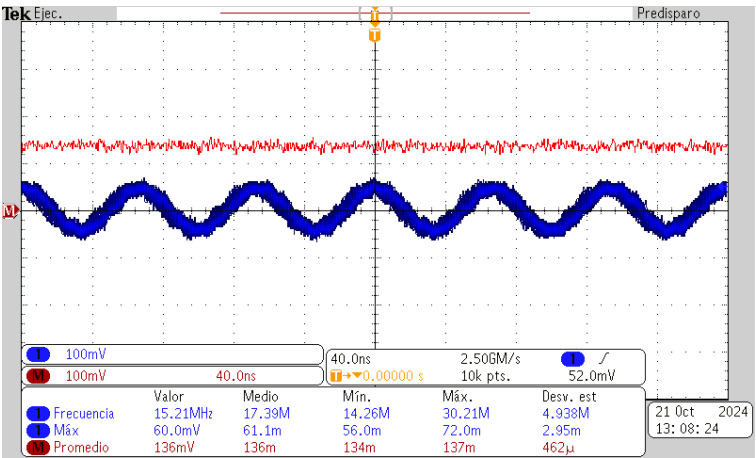


Figura 62 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 50mV de voltaje pico en la señal de entrada.

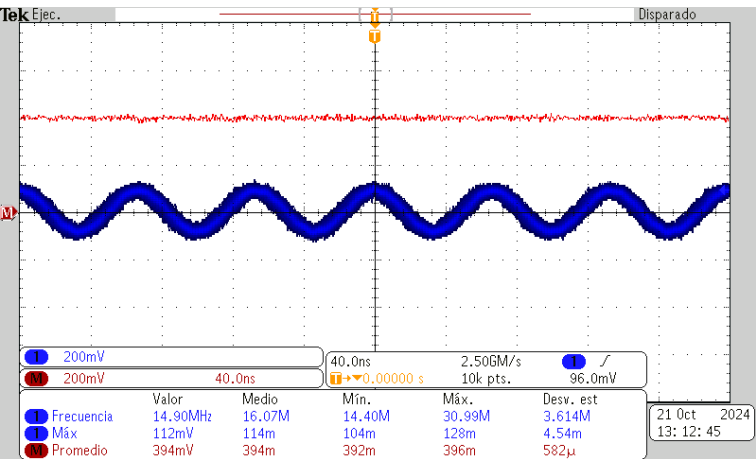


Figura 63 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 100mV de voltaje pico en la señal de entrada.

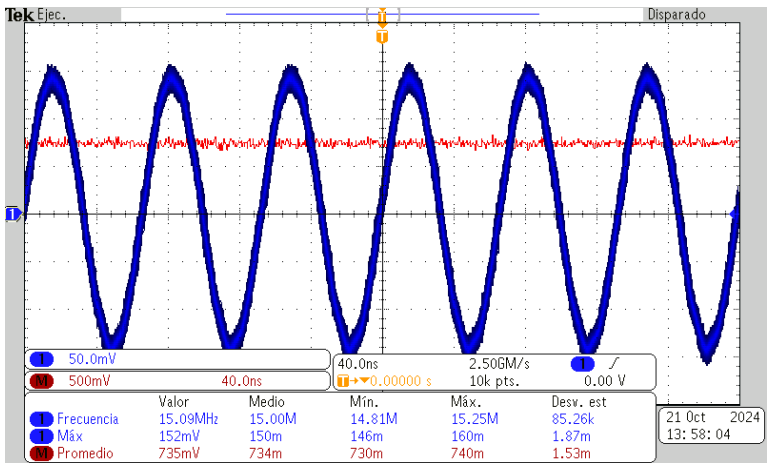


Figura 64 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 150mV de voltaje pico en la señal de entrada.

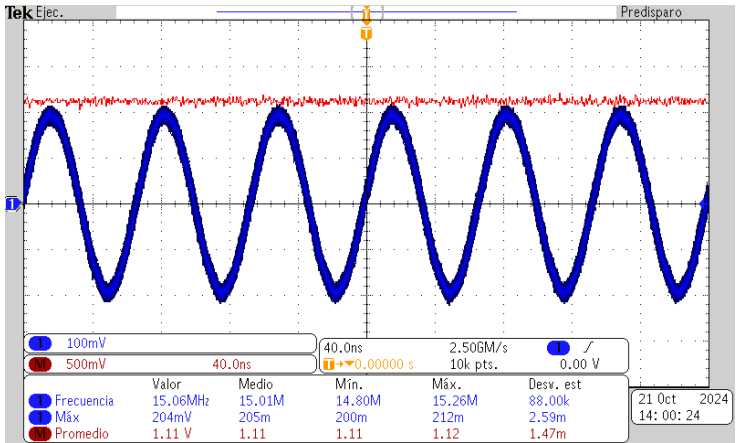


Figura 65 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 200mV de voltaje pico en la señal de entrada.

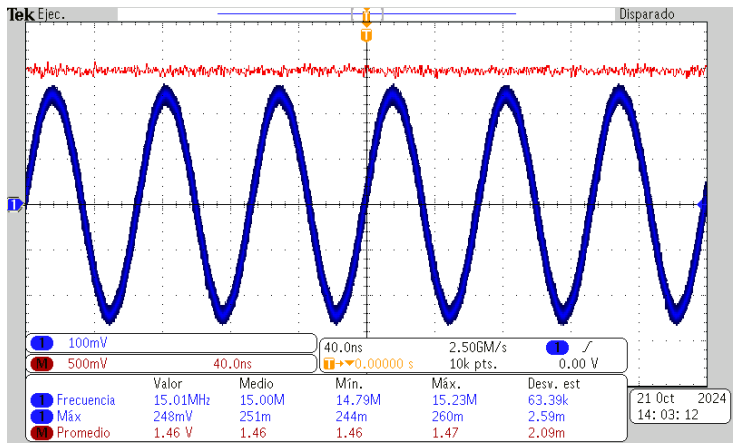


Figura 66 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 250mV de voltaje pico en la señal de entrada.

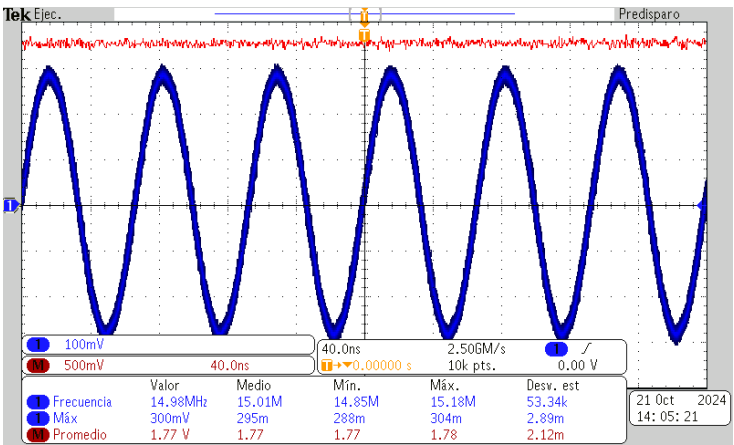


Figura 67 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 300mV de voltaje pico en la señal de entrada.

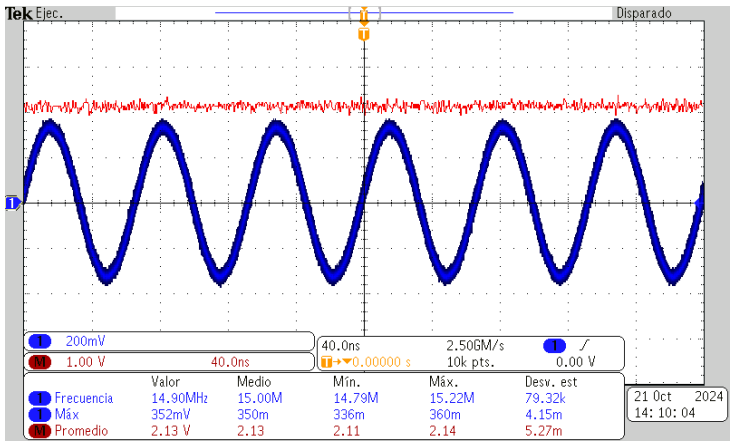


Figura 68 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 350mV de voltaje pico en la señal de entrada.

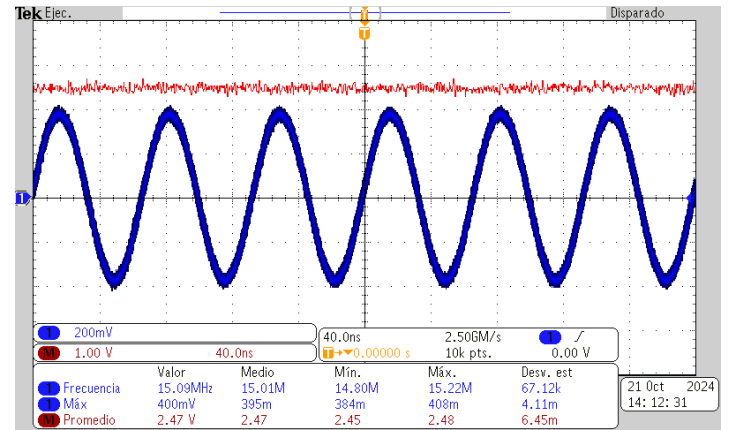


Figura 69 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 400mV de voltaje pico en la señal de entrada.

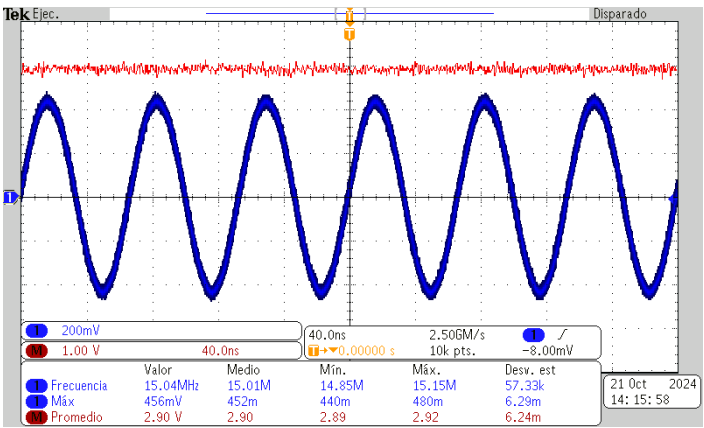


Figura 70 Voltajes de entrada (señal azul) y salida (señal roja) del rectificador, en el Experimento 1, para 450mV de voltaje pico en la señal de entrada.

Anexo V

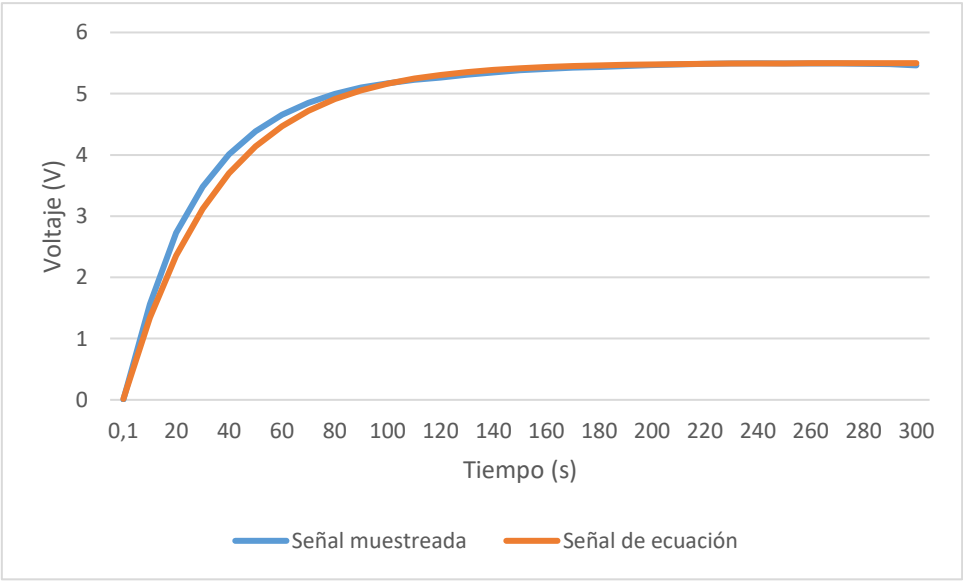


Figura 71 Carga del capacitor de 470uF.

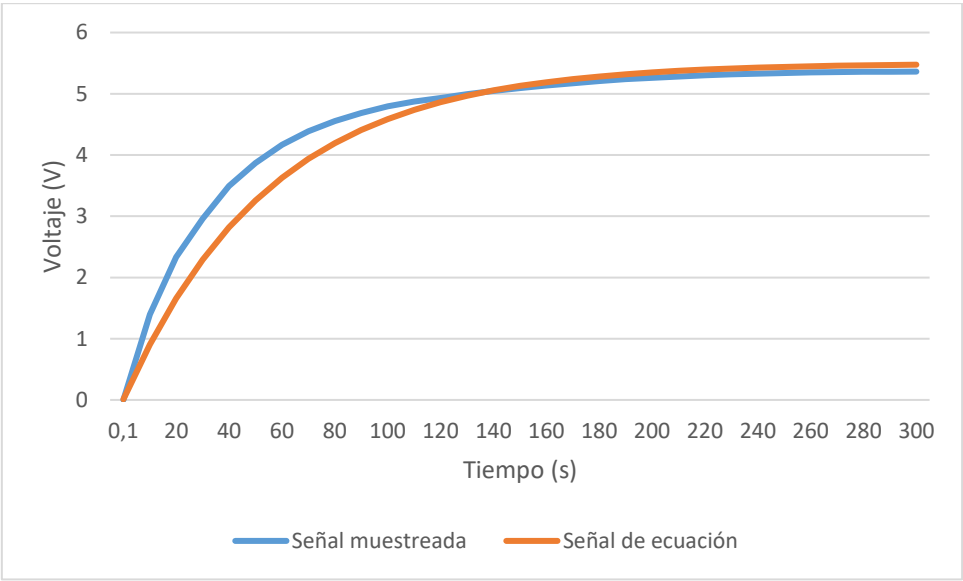


Figura 72 Carga del capacitor de 680uF.

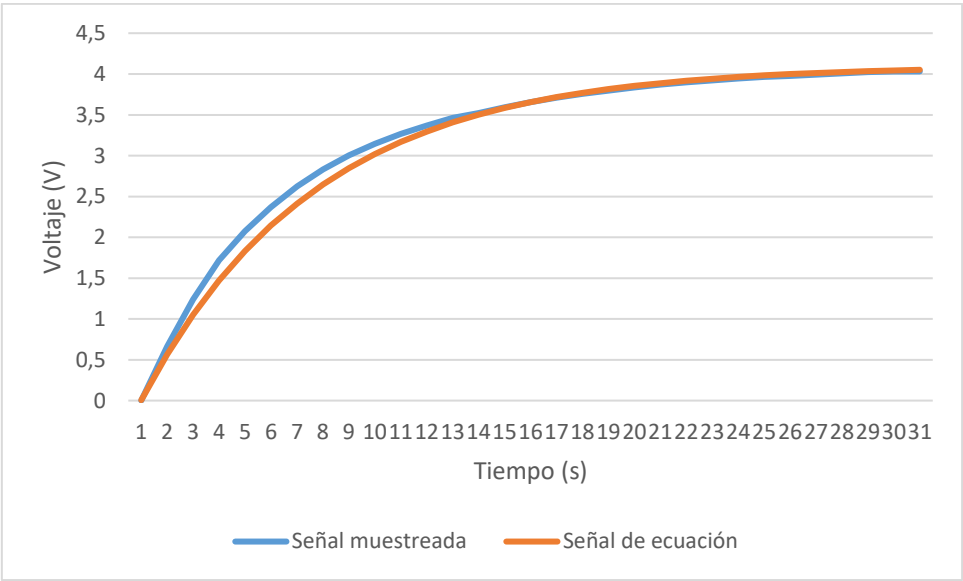


Figura 73 Carga del capacitor de 1000uF.

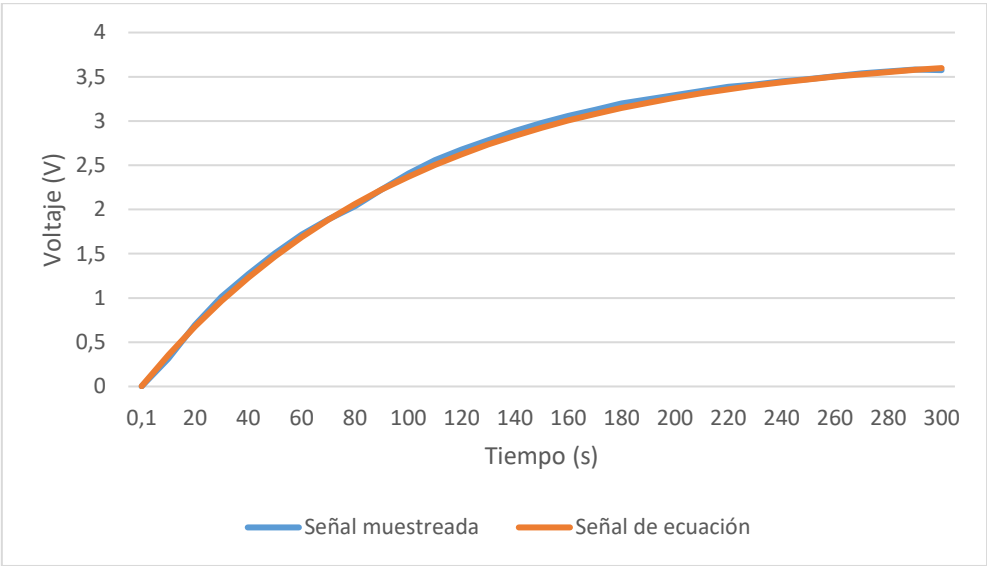


Figura 74 Carga del capacitor de 1200 μF .

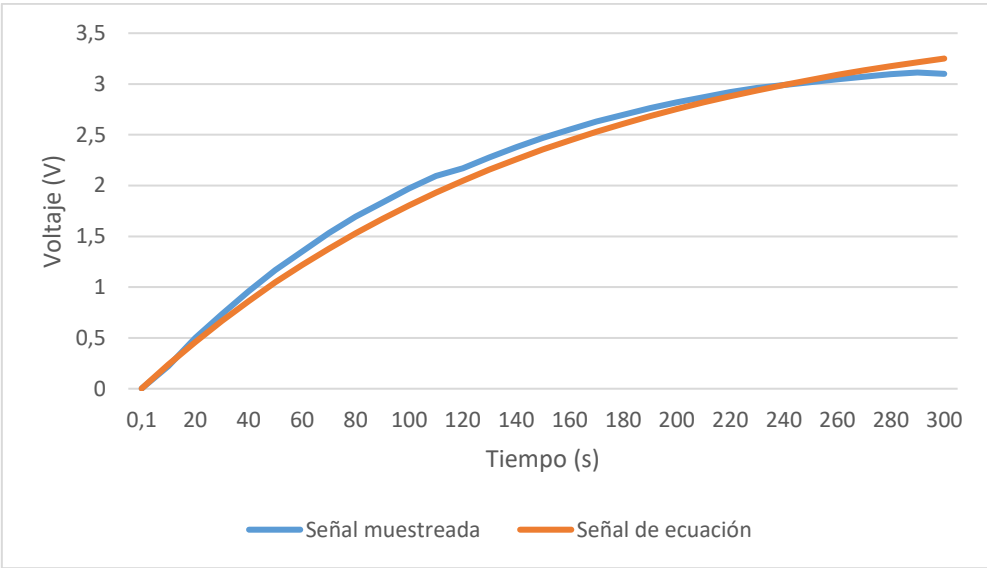


Figura 75 Carga del capacitor de 2200 μF .

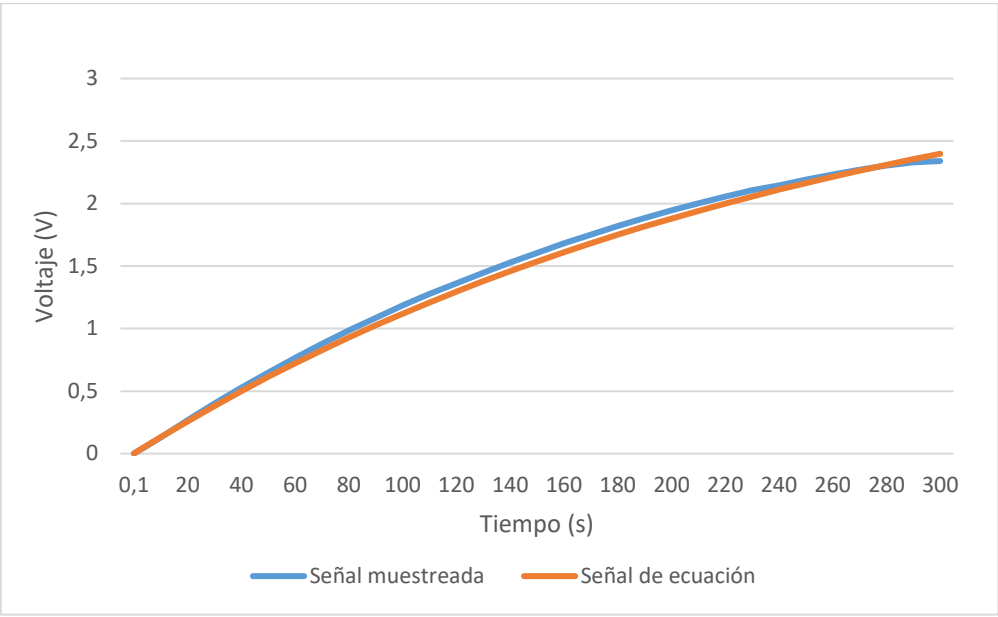


Figura 76 Carga del capacitor de 4700uF.