

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**TEMA:**

IMPLEMENTACIÓN DE CIRCUITOS PARA ACONDICIONAMIENTO DE  
ENERGÍA GENERADA POR SISTEMAS TRIBOELÉCTRICOS PARA  
APLICACIONES EN CORRIENTE CONTINUA

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero (a) Eléctrico (a)

**AUTOR (A):**

Gallegos Martínez Nick Hendrik

**DIRECTOR (A):**

Ing. Julio Esteban Guerra Massón M.Sc.

Ibarra, Ecuador 2025



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA**  
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1004385751		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Gallegos Martínez Nick Hendrik		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Armando Hidrobo y Secundino Peñafiel		
<b>EMAIL:</b>	nhgallegosm@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	No	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0987276364

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	Implementación de circuitos para acondicionamiento de energía generada por sistemas triboeléctricos para aplicaciones en corriente continua
<b>AUTOR (ES):</b>	Gallegos Martínez Nick Hendrik
<b>FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA</b>	Ibarra, a los 29 días del mes de agosto de 2025.
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	<b>Ingeniero(a) Eléctrico(a)</b>
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca M.Sc. Ing. Julio Esteban Guerra Massón M.Sc.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**2. CONSTANCIAS**

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 01 días del mes de septiembre de 2025

**EL AUTOR:**

Nombre: Nick Hendrik Gallegos Martínez



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN**  
**CURRICULAR**

Yo, Guerra Massón Julio Esteban en calidad de director del señor estudiante Gallegos Martínez Nick Hendrik certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "IMPLEMENTACIÓN DE CIRCUITOS PARA ACONDICIONAMIENTO DE ENERGÍA GENERADA POR SISTEMAS TRIBOELÉCTRICOS PARA APLICACIONES EN CORRIENTE CONTINUA"

Para la obtención del título de Ingeniero(a) Eléctrico(a), aprobado la defensa, impresión y empastado.

Ing. Julio Esteban Guerra Massón M.Sc.

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**AGRADECIMIENTOS**

Quiero dedicar unas palabras llenas de amor, gratitud y profundo reconocimiento a las dos personas más importantes en mi vida: mis padres.

A ustedes, papá y mamá, gracias. Gracias por ser mi base, mi guía y mi refugio en cada momento de este largo camino. Este trabajo no es solo el resultado de años de estudio, sino también el reflejo de los valores, el esfuerzo y la dedicación que me inculcaron desde muy pequeño.

Gracias por sus incontables sacrificios, por trabajar sin descanso y por renunciar a muchas cosas para que yo pudiera tener una educación. Sé que hubo momentos difíciles, que muchas veces ocultaron sus propias preocupaciones solo para darme ánimo, una sonrisa o una palabra de apoyo cuando más lo necesitaba. Su amor incondicional me ha sostenido incluso en los momentos más inciertos, y su fe en mí me dio fuerzas cuando dudé de mis propias capacidades.

A mi madre, gracias por tu dulzura, por tus oraciones silenciosas, por tu ternura infinita y por ser mi pilar emocional. Tus consejos, siempre sabios y llenos de amor, me han ayudado a mantenerme firme, a no rendirme, y a recordar siempre el valor de la humildad y la empatía.

A mi padre, gracias por enseñarme con tu ejemplo que el esfuerzo y la responsabilidad son los cimientos de cualquier meta. Por mostrarme que la constancia es más fuerte que cualquier talento, y que no hay orgullo más grande que ver a un hijo cumplir sus sueños.

Este logro no es solo mío, sino de ustedes. Gracias por darme alas para volar, raíces para volver y motivos para seguir soñando.

Con todo mi amor y mi gratitud eterna.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS  
APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

CAPITULO I.....	15
INTRODUCCIÓN.....	15
Tema.....	15
1.1 Problema de investigación.....	15
1.1.1 Formulación de la pregunta de investigación.....	15
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo General.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 Alcance y delimitación.....	16
1.4 Justificación.....	17
CAPÍTULO II.....	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Antecedentes.....	18
2.2 Introducción.....	20
2.3 Efecto triboeléctrico.....	21
2.4 Mecanismo.....	21
2.4 Serie triboeléctrica.....	22
2.5 Generadores Triboeléctricos.....	23
2.6 Nano generadores Triboeléctricos.....	23
2.7 Aplicaciones de los TENG.....	24
2.8 Circuitos de acondicionamiento.....	25
2.9 Rectificadores de TENG.....	26
2.10 Rectificador.....	26
2.11 Rectificador media onda.....	26
2.12 Rectificador Onda completa.....	27



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

2.13 Filtros de señal.....	28
2.13.1 Filtro Capacitivo .....	29
2.13.2 Filtro de inductor .....	29
2.13.3 Filtro LC (Filtro de Inductor-Capacitor) .....	30
2.13.3 Filtro Pi .....	31
2.14 Conversor DC - DC .....	32
2.14.1 BUCK .....	33
2.14.1 BOOST .....	33
2.15 Amplificador de corriente.....	33
CAPÍTULO III .....	35
MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
3.1 Metodología.....	35
3.2 Lugar de estudio .....	36
3.3 Materiales .....	37
3.3.1 Ecuaciones de Triboelectricidad.....	37
3.3.2 Cálculo del Voltaje y Corriente .....	38
3.3.3 Rectificación de la Señal .....	38
3.3.4 Rectificadores de Media Onda .....	38
3.3.4 Rectificadores de Onda Completa .....	38
3.3.5 Cálculo de la Tensión Media y Eficiencia.....	39
3.3.6 Ondulación en la Salida.....	39
3.3.7 Filtrado de señal.....	39
3.3.7.3 Filtro LC.....	40
3.3.8 Filtros Activos .....	40
3.3.9 Análisis de Respuesta del Filtro .....	40
3.3.10 Convertidores DC .....	41



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

3.3.11 Convertidor Buck .....	41
3.3.12 Convertidor Boost.....	41
3.4 Softwares para simulación de circuitos eléctricos.....	41
3.4.1 Proteus .....	41
3.4.2 Simulink.....	42
3.5 Etapas de conversión de energía de un TENG .....	42
3.5.1 Etapa de rectificación .....	44
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>45</b>
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>45</b>
4.1 Dimensionamiento del rectificador de onda completa .....	45
4.1.1 Rectificación cálculo de los valores de salida .....	45
4.1.2 Dimensionamiento del Capacitor de Filtrado.....	46
4.2 Simulación de circuitos de acondicionamiento .....	47
4.2.1 Regulador de voltaje con diodo Zener.....	47
4.2.2 Simulación circuito convertidor DC.....	48
4.2.3 Simulación de circuito amplificador de corriente.....	48
4.2.4 Regulador de voltaje ajustable.....	49
4.3 Dimensionamiento de las Pérdidas en los Circuitos.....	50
4.3.1 Cálculo de Pérdidas Resistivas .....	51
4.3.2 Pérdidas en Componentes Activos y Pasivos no resistivos.....	51
4.3.3 Análisis de resultados .....	52
4.4 Simulación del Circuito en Proteus .....	53
4.5 Simulación del Circuito en MATLAB .....	56
4.6 Análisis de los resultados de las simulaciones .....	62
4.7 Esquema Eléctrico del Circuito .....	64
4.7.1 Descripción de los Componentes y Conexiones.....	64



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

4.7.2 Esquema Eléctrico .....	65
4.8 Pruebas Físicas del Circuito .....	66
4.9 Salida de voltaje del TENG .....	67
4.10 Salida de voltaje del circuito .....	68
4.11 Comparación entre Simulación y Pruebas Reales .....	70
Conclusiones.....	71
Recomendaciones .....	72
Referencias bibliográficas. ....	73
ANEXO I.....	76
ANEXO II .....	77
ANEXO III.....	78
ANEXO IV .....	79
ANEXO V .....	80
ANEXO VI.....	81
ANEXO VII.....	82
ANEXO VIII .....	83
ANEXO IX.....	84



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura. 1. Efecto triboeléctrico.....	21
Figura. 2. Diagrama de un TENG.....	24
Figura. 3. Circuito rectificador de media onda.....	27
Figura. 4. Media onda rectificada.....	27
Figura. 5. Rectificador media onda.....	28
Figura. 6. Onda pulsante.....	28
Figura. 7. Forma de onda de un filtro capacitivo.....	29
Figura. 8. Conexión del filtro LC.....	31
Figura. 9. Filtro pi.....	32
Figura. 10. Diagrama de un convertidor Buck.....	33
Figura. 11. Diagrama de un convertidor Boost.....	33
Figura. 12. Metodología para seguir para lograr implementar los circuitos de implementación.....	35
Figura. 13. Laboratorios de Electricidad.....	37
Figura. 14. Etapas para acondicionar una señal de TENG.....	43
Figura. 15. Circuito de rectificado y filtrado.....	44
Figura. 16. Circuito regulador de voltaje.....	47
Figura. 17. Circuito convertidor DC - DC BOOST.....	48
Figura. 18. Circuito amplificador de corriente.....	49
Figura. 19. Circuito de voltaje ajustable.....	49
Figura. 20. (A)Rectificador de onda completa conectado al TENG sin filtro – PROTEUS                      (B) Gráfica del voltaje .....	53
Figura. 21. (A) Rectificador de onda completa conectado al TENG con filtro capacitivo – PROTEUS                      (B) Gráfica de voltaje .....	54
Figura. 22. (A) Regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – PROTEUS (B) Gráfica de voltaje .....	55
Figura. 23. Rectificador de onda completa conectado al TENG – SIMULINK .....	57
Figura. 24. Señales de voltaje del regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – SCOPE – SIMULINK fase rectificación y filtrado. ....	58
Figura. 25. Señales de corriente del regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – SCOPE – SIMULINK fase rectificación y filtrado. ....	60



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Figura. 26. Señales de voltaje del regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – SCOPE – SIMULINK fase de salida..... 61

Figura. 27. Regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – PCB ..... 65

Figura. 28. Regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – Circuito impreso ..... 66

Figura. 29. Señal de salida tomada del TENG por un osciloscopio HANTEK modelo 2D82AUTO. .... 68

Figura. 30. Señal de salida tomada del circuito de acondicionamiento por un osciloscopio HANTEK modelo 2D82AUTO..... 69



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>TABLA 1.</b> Materiales con cargabilidad .....	23
<b>TABLA 2.</b> VALORES DEL TENG.....	45
<b>TABLA 3.</b> Materiales que conforman el circuito de acondicionamiento .....	50
<b>TABLA 4.</b> <i>Perdidas resistivas</i> .....	51
<b>TABLA 5.</b> Pérdidas componente activos y pasivos.....	52
<b>TABLA 6.</b> Pérdidas totales .....	52
<b>TABLA 7.</b> Cantidad de triboeléctricos necesarios para generar 100mA de salida.....	63
<b>TABLA 8.</b> MATERIALES REALES .....	64
<b>TABLA 9.</b> Valores de salida del circuito.....	69



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**RESUMEN**

Los generadores triboeléctricos (TENG) son una fuente de energía renovable; sin embargo, su aplicación práctica se ve limitada por la baja corriente y la alta variabilidad de voltaje que generan. Esta investigación aborda dicha problemática mediante la implementación de circuitos de acondicionamiento para su uso en aplicaciones de corriente continua de bajo voltaje. Se empleó una metodología cuantitativa y experimental que incluyó el diseño, la simulación en Proteus y MATLAB, y la construcción física de los circuitos. El análisis de pérdidas identificó a un regulador con diodo Zener como el circuito más eficiente, con una disipación de apenas  $3.68 \mu\text{W}$ . Las pruebas físicas del prototipo validaron los resultados de las simulaciones, obteniendo una salida de voltaje estable de 3.2 V, lo cual confirmó la viabilidad del diseño. Se concluyó que, si bien el circuito de acondicionamiento es eficiente, la baja capacidad de corriente de un solo TENG (350 nA) evidencia la necesidad de integrar múltiples generadores en paralelo para alcanzar niveles de potencia útiles en aplicaciones prácticas.

**Palabras clave:**

Triboeléctrico, Acondicionamiento de señal, Generación de energía, Corriente continua, Baja potencia.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**ABSTRACT**

Triboelectric nanogenerators (TENGs) are a renewable energy source; however, their practical application is limited by the low current and high voltage variability they generate. This research addresses this problem by implementing conditioning circuits for use in low-voltage direct current applications. A quantitative and experimental methodology was used, which included the design, simulation in Proteus and MATLAB, and physical construction of the circuits. Loss analysis identified a Zener diode regulator as the most efficient circuit, with a power dissipation of only 3.68  $\mu\text{W}$ . Physical tests of the prototype validated the simulation results, obtaining a stable voltage output of 3.2 V, which confirmed the design's viability. It was concluded that while the conditioning circuit is efficient, the low current capacity of a single TENG (350 nA) highlights the need to integrate multiple generators in parallel to achieve useful power levels for practical applications.

**Keywords:**

Triboelectric, Signal conditioning, Energy harvesting, Direct current, Low power



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**CAPITULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

**Tema**

Implementación de circuitos para acondicionamiento de energía generada por sistemas triboeléctricos para aplicaciones en corriente continua.

**1.1 Problema de investigación.**

Ecuador ha buscado fomentar la producción de energía a través de fuentes renovables no convencionales, como la solar y eólica. Sin embargo, estas opciones enfrentan desafíos considerables, incluyendo costos elevados tanto en inversión como mantenimiento.

Aunque los nano generadores triboeléctricos (TENG) han generado interés como una innovadora fuente de energía, destacando por su uso de materiales económicos y fácilmente reciclables, así como su capacidad de producción escalable debido a su sencillez constructiva, enfrentan dos desafíos principales. Estos son la generación de corriente muy baja y la alta variabilidad del voltaje.

La problemática principal radica en la necesidad de superar los desafíos inherentes a la baja corriente generada y a la variabilidad significativa del voltaje en estos sistemas. La naturaleza fluctuante de la energía mecánica aprovechada por los dispositivos triboeléctricos en corriente alterna presenta obstáculos prácticos que requieren soluciones eficaces en términos de diseño y optimización de circuitos.

**1.1.1 Formulación de la pregunta de investigación**

¿Qué factores se deben considerar para diseñar circuitos de acondicionamiento que permitan utilizar la energía eléctrica producida por un generador triboeléctrico de contacto en corriente continua para aplicaciones de bajo voltaje?

**1.2 Objetivos**

**1.2.1 Objetivo General**

Implementar circuitos de acondicionamiento mediante el uso de dispositivos electrónicos de potencia para el aprovechamiento de energía generada por sistemas triboeléctricos para aplicaciones en DC.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Describir los sistemas de generación triboeléctrica y los circuitos utilizados para el aprovechamiento de energía generada por un TENG de salida DC.

Diseñar los circuitos de acondicionamiento para aprovechar la energía generada por un TENG.

Implementar los circuitos de acondicionamiento para su uso como fuente de energía para equipos en DC.

### **1.3 Alcance y delimitación**

El proyecto se enfoca en implementar circuitos diseñados para acondicionar la energía generada por sistemas triboeléctricos, adaptándola para aplicaciones que demandan corriente continua. Durante la ejecución, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los sistemas triboeléctricos existentes, evaluando sus características y capacidades de generación de energía.

La investigación utilizará herramientas como Scopus y Web of Science, concentrándose en describir los sistemas de generación triboeléctrica más utilizados y los circuitos comúnmente empleados para aprovechar la energía generada por estos dispositivos.

Se realizará el diseño y la simulación de cinco circuitos de acondicionamiento más utilizados para dispositivos TENG con salida en corriente continua. El proyecto abordará la integración de estos circuitos en aplicaciones específicas, como la recarga de dispositivos electrónicos portátiles y sensores remotos de baja potencia, así como otros dispositivos que dependan de una fuente de energía sostenible y autónoma.

El alcance también contempla que la señal de entrada provendrá del TENG que se encuentra en la carrera de Electricidad de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Además de la evaluación de una salida tras el paso de la energía eléctrica por los circuitos de acondicionamiento, con una salida expectante de 5 v en corriente continua a una corriente de 100 mA.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

#### **1.4 Justificación**

La importancia de este proyecto se basa en la capacidad innovadora de los sistemas triboeléctricos en el ámbito de las fuentes de energía renovable. Estos sistemas tienen el potencial de aprovechar la energía mecánica presente en situaciones cotidianas, como el movimiento humano o vibraciones ambientales. La implementación de circuitos de acondicionamiento específicos, diseñados para convertir eficientemente esta energía en corriente continua, resulta crucial para maximizar la eficiencia y utilidad práctica de dichos sistemas. El impacto de este proyecto se manifiesta en la posibilidad de integrar de manera exitosa la energía triboeléctrica en diversas aplicaciones prácticas que demandan corriente continua. Este avance puede tener repercusiones significativas en los campos donde se depende de fuentes de energía sostenibles. Además, contribuirá al avance de la investigación en la generación de energía limpia y autónoma.

La viabilidad del proyecto se sustenta en la existencia de sistemas triboeléctricos establecidos y en desarrollo, respaldados por la tecnología y conocimientos disponibles en el laboratorio de electricidad de la Universidad Técnica del Norte. La investigación se beneficiará de las herramientas de medición y simulación existentes, lo que facilitará la evaluación y optimización de los circuitos de acondicionamiento.

Los beneficiarios directos de este proyecto abarcan a los estudiantes de la carrera de electricidad y a investigadores, enriqueciéndolos con nuevos conocimientos en el campo de la nano generación. Este impacto es especialmente relevante en áreas no conectadas a la red eléctrica, donde se requiere energía para cargar dispositivos electrónicos destinados a su uso diario.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

**2.1 Antecedentes**

En este mundo con un crecimiento poblacional continuo y un desarrollo tecnológico acelerado, la demanda de energía eléctrica es cada vez mayor, así como la creciente dependencia de dispositivos electrónicos y sistemas de comunicación los cuales requieren de una fuente constante de electricidad lo cual choca con la limitada capacidad de las fuentes de energía actuales.[1].

En Ecuador el 65% de la energía es proveniente de fuentes renovables, dentro de las cuales, la de mayor producción de potencia al año es la hidroeléctrica con el 95,68% sin embargo, esta dependencia de generación hidráulica conlleva una disminución de la producción de energía disminuye significativamente durante los meses de estiaje por la disminución del caudal de los ríos que alimentan las principales hidroeléctricas del país[2].

Por otro lado, la generación renovable de fuentes no convencionales, aún se encuentra en etapas tempranas por las complicaciones asociadas al uso de estas tecnologías, como el alto costo de implementación de sistemas fotovoltaicos, o la variabilidad de la velocidad del viento[3].

Además, con el aumento del internet de las cosas, las fuentes de energía para sistemas aislados son cada vez más necesarios y con ello el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento de fuentes de energía limpia que puedan reemplazar el uso de las baterías, las cuales conllevan gran cantidad de gasto de recursos para su producción. De no tratarse adecuadamente liberan sustancias tóxicas en el suelo y agua que conducen a la contaminación de ecosistemas, amenazan la vida marina y tiene afectaciones en la salud humana, sin embargo, incluso su reciclaje implica una serie de procesos especializados como el desmontaje y procesos químicos para la neutralización y purificación de los componentes[4, 5].

La invención del nano generador triboeléctrico (TENG) tiene un rol muy importante en cuanto a la recolección de energía por su eficacia en la conversión de energía mecánica proveniente del entorno en energía eléctrica. Por su capacidad de adaptación al medio, es capaz de obtener energía de fuentes irregulares y de frecuencia ultra baja como la energía azul o la biomecánica la cual aprovecha el movimiento del



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

cuerpo humano para generar energía eléctrica. Además, gracias a su tamaño compacto puede ser implementado en sensores adhesivos con la capacidad de registrar el pulso, la temperatura o la frecuencia respiratoria, otra aplicación viene dada en las prendas de vestir, como guantes, medias, zapatos, entre otros, los cuales pueden alimentar dispositivos electrónicos portátiles de forma continua, así como dispositivos implantables que permitan el seguimiento integral del estado de salud, o los movimientos de su usuario, sin la necesidad de una fuente de energía externa[6]. Otra de las direcciones de investigación de los TENG es como fuente de energía eléctrica de alto voltaje de la recolección de energía eólica, o de las olas del agua- Los TENG cuentan con dos tipos de salida, corriente alterna (AC) y corriente continua (DC) [7].

El modo de corriente continua (DC) se produce mediante la separación de dos materiales dieléctricos con cargas opuestas[8]. Este tipo de salida no requiere de una etapa de rectificación, lo que simplifica el diseño y la aplicación de los TENG[8, 9].

Los TENG en modo DC pueden generar voltajes de hasta 1000 v, corrientes de hasta 10 mA y densidades de potencia de hasta 300 W por metro cuadrado[10]. Estos valores son superiores a los obtenidos en modo AC, lo que hace a los TENG en modo DC más atractivos para la recolección de energía [11].

Los TENG en modo DC pueden aprovechar diversas fuentes de energía mecánica, como el viento, las olas, el movimiento humano, la vibración, etc. Algunas aplicaciones de los TENG en modo DC son la iluminación LED, la carga de baterías, los sensores inalámbricos, los dispositivos portátiles, los dispositivos implantables [12].

Al generar voltajes tan altos no pueden ser aprovechados o almacenados de forma eficiente ya que la forma más común y sencilla es a través del uso de un circuito de rectificación de onda completa y usar dicha energía convertida para cargar un condensador, lo que conlleva pérdidas de energía en la transferencia. Para evitar estas pérdidas se opta por un sistema de acondicionamiento en varias etapas en las que se incluyen una bomba de carga inestable también conocido como duplicador Bennet para la rectificación de la señal y un interruptor electrostático auto actuado como convertidor Buck DC-DC para la reducción del voltaje[13].

El mecanismo operativo del TENG se basa en el efecto triboeléctrico e inducción electrostática , estos efectos se producen en el generador triboeléctrico al colocar en contacto dos materiales diferentes en los cuales sus superficies generan cargas positivas



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

y negativas, los mismos que al ser separados fruto de una fuerza mecánica arrastran con ellos las cargas generadas produciendo una diferencia de potencial entre los extremos de los materiales, esta diferencia de potencial induce un flujo de electrones en un circuito externo conectado a dichas superficies, al tratarse de un cambio periódico de estado se generan cargas opuestas en los materiales en contacto, produciendo de esta forma una salida AC regular[14].

La evolución y adaptación de la tecnología para uso de los TENG tiene un gran potencial como fuente de energía limpia y en generación de energía en dispositivos aislados[15].

## **2.2 Introducción**

En la actualidad, aproximadamente el 80% de la energía consumida a nivel global proviene de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. Es de conocimiento general que estos recursos experimentan un agotamiento continuo y carecen de la capacidad de ser reemplazados en un lapso práctico[16].

Además de su naturaleza finita, la generación de energía a partir de combustibles fósiles produce subproductos de combustión o emisiones, los cuales tienen un impacto negativo en el entorno y podrían contribuir al cambio climático. Es en este contexto que surgen investigaciones significativas sobre las Energías Renovables como un tema crucial.

En 2012, se dio a conocer por primera vez el nano generador triboeléctrico (TENG) junto con la presentación de un prototipo de recolector de energía triboeléctrica. Como se sabe, al frotar entre sí dos materiales en la interfaz (donde uno tiene facilidad para captar electrones y el otro para donar electrones), se generan cargas libres. En el proceso de movimiento alternativo, el campo eléctrico modificado induce corriente en los electrodos mediante el efecto de inducción. Como resultado, la energía mecánica se transforma de manera efectiva en energía eléctrica. A lo largo de los años de desarrollo, se han logrado cada vez más aplicaciones para los TENG, especialmente en el ámbito de la recolección de energía [17].



### 2.3 Efecto triboeléctrico

El fenómeno conocido como efecto triboeléctrico ocurre cuando un material adquiere carga eléctrica debido a la fricción generada al entrar en contacto con otro tipo de material. Este contacto provoca la formación de enlaces químicos en áreas específicas de las dos superficies, donde las cargas se desplazan de un material a otro para igualar su potencial. Las cargas transferidas pueden ser electrones o iones. Cuando los materiales se separan, algunos átomos tienden a retener electrones adicionales, mientras que otros tienden a cederlos, dando lugar a cargas triboeléctricas en la superficie. Estas cargas actúan como fuerza impulsora para llevar a cabo la transferencia de electrones y equilibrar la caída de potencial eléctrico generada [18]. En la Figura 1 se muestra el efecto triboeléctrico entre un globo y un pedazo de papel.

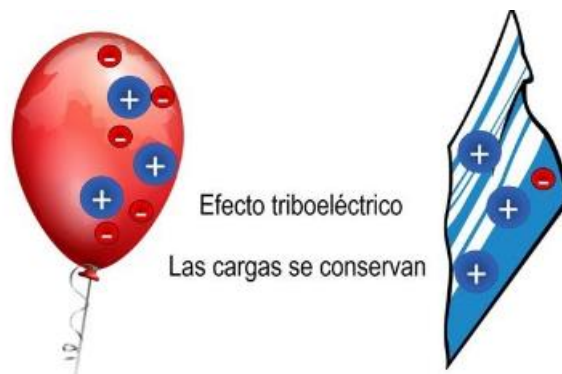


Figura. 1. Efecto triboeléctrico.

Este fenómeno es tan intrincado que resulta imposible predecir qué superficie adquirirá una carga positiva y cuál tendrá cargas negativas, incluso al poner en contacto ambas superficies. Incluso utilizando diversos modos de contacto triboeléctrico, sigue siendo desafiante determinar esta incógnita. La carga se manifestará de manera efectiva hasta una cierta profundidad, dando lugar a la formación de la capacitancia del dispositivo.

### 2.4 Mecanismo

Los átomos constan de un núcleo con carga positiva debido a los protones, rodeado por electrones con carga negativa, lo que hace que el átomo sea eléctricamente neutro [19].

No obstante, la afinidad por los electrones varía entre los elementos, es decir, la propensión a captar o ceder electrones. Esto se debe a la tendencia de los elementos a



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

adquirir la configuración electrónica de los gases nobles más cercanos, que son los elementos electroquímicamente más estables. Por ejemplo, el flúor, con la mayor electroafinidad, tiende a captar un electrón para alcanzar la configuración del neón, mientras que el magnesio tiende a ceder electrones con el mismo propósito [20].

Cuando se frotran dos materiales compuestos por elementos distintos, la diferencia en afinidad electrónica hace que uno de los materiales adquiera electrones del otro, resultando en una carga positiva y otra negativa. Esta transferencia de cargas también ocurre por contacto, pero al frotar se renuevan continuamente los puntos de contacto, ampliando la superficie de transferencia de cargas [20],[21].

Una vez que se ha producido el intercambio de cargas y los dos cuerpos se separan, en materiales conductores las cargas se distribuirán uniformemente en toda la superficie. En materiales aislantes, la carga permanecerá en los puntos de transferencia de cargas. En este último caso, el valor de la carga depositada puede oscilar entre  $10^{-11}$  y  $10^{-9}$  C por cada milímetro cuadrado de superficie, aproximadamente un electrón libre por cada 1000 átomos [20].

#### **2.4 Serie triboeléctrica**

La secuencia triboeléctrica es un listado de materiales organizados según su propensión a ceder o captar electrones. En la Tabla 1 se muestra los diferentes materiales con cada una de se cargabilidad.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Cargado más positivamente (+) ▽	Cargado más negativamente (-) Δ
Vidrio	Latón
Mica	Plata
Lana	Oro
Nylon	Poliéster (PET)
Plomo	Poliestireno
Seda	Acrílico
Aluminio	Cloruro de polivinilo
Papel	Silicio
Madera	Polietileno
Ámbar	Polipropileno
Níquel	Teflón (PTFE)
Cobre	Goma de silicona

**TABLA 1.** Materiales con cargabilidad

Al frotar dos materiales de esta secuencia, el que ocupa la posición más alta transferirá electrones al que está en la posición más baja. La cantidad de carga transferida aumenta a medida que los dos materiales están más distantes en la serie triboeléctrica.

### 2.5 Generadores Triboeléctricos

En situaciones de baja frecuencia, los nano generadores Triboeléctricos demuestran ser más eficaces en la conversión de energía desperdiciada y de baja calidad proveniente del entorno en energía eléctrica. Por otro lado, los nano generadores piezoeléctricos muestran un alto rendimiento en escalas mayores, abarcando áreas más extensas y aprovechando una variedad más amplia de efectos físicos, tales como la deformación, presión y movimiento de los cristales [22].

### 2.6 Nano generadores Triboeléctricos

Estos nano generadores (TENG) transforman la energía mecánica en electricidad a través de la electricidad estática. El principio subyacente en estos nano generadores es el efecto triboeléctrico, que se describe como la generación de carga eléctrica al frotar dos materiales triboeléctricos. La intensidad de la carga está influenciada por diversas variables como el tipo de material, la rugosidad, el área en contacto, la temperatura y la tensión [18].



Estos nano generadores, al unir dos láminas de materiales con electrodos en su parte posterior para capturar la carga, operan de la siguiente manera: el funcionamiento de los nano generadores triboeléctricos se produce cuando los dos materiales del generador a escala nano se fusionan, permitiendo que los electrodos conectados en la parte posterior se acumulen y faciliten el flujo de carga, dando lugar a la creación de un potencial. Al presionar las dos hojas para que entren en contacto entre sí, se genera una corriente en una dirección al liberar presión, y cuando las hojas se separan, la corriente fluye en dirección opuesta, razón por la cual también se les conoce como "Generadores de corriente alterna"[23]. Como se aprecia en la Figura 2 la conformación de un TENG.

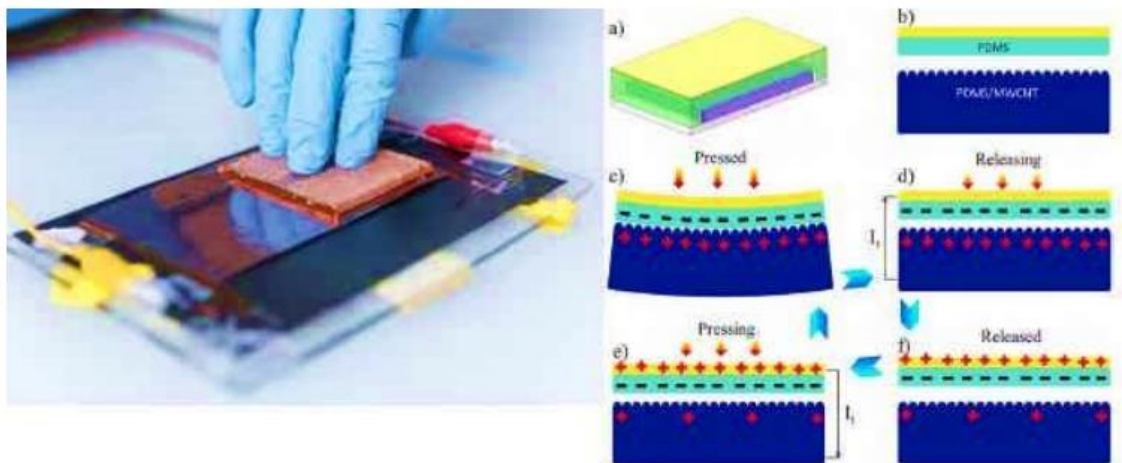


Figura. 2. Diagrama de un TENG.

## 2.7 Aplicaciones de los TENG

De acuerdo con [24], el uso de nano generadores basados en los efectos triboeléctricos ha mostrado una mejora significativa en la densidad de potencia de salida del TENG en los últimos años de investigación, alcanzando un aumento de 5 órdenes de magnitud. La densidad de potencia por área ha llegado a los 313 W/m<sup>2</sup>, mientras que la densidad de volumen ha alcanzado los 490 kW/m<sup>3</sup>, demostrando una eficiencia de conversión de aproximadamente el 60%. El TENG se puede emplear para aprovechar diversas formas de energía mecánica que se encuentran disponible pero desaprovechada en la vida cotidiana, como el movimiento humano, caminar, vibración, activación mecánica, neumático giratorio, viento, agua en movimiento, entre otros.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Se desarrolló un VCSTENG que utiliza PDMS y nanopartículas de oro en las superficies triboeléctricas, con resortes conectados como mecanismo de restauración. Este TENG generó un voltaje de circuito abierto (VOC) máximo de 1200 v, una corriente de cortocircuito (JSC) máxima de 751.2 mA/m<sup>2</sup> y una potencia de salida (POUT) máxima de aproximadamente 313 W/m<sup>2</sup> (con una carga de 1M $\Omega$ ). Pudo encender 600 bombillas LED con la aplicación de una fuerza de 500 N a 600 N, mediante pisadas humanas[25].

Adicionalmente, se propuso un TENG con una capa triboeléctrica Cu-Kapton-Cu ondulada, intercalada entre capas de PTFE nanoestructuradas, capaz de recolectar energía de las ondas de agua. Las ondas de agua generan presión y liberación en la estructura TENG, provocando la electrificación por contacto y el movimiento relativo entre los electrodos de Cu y las superficies de PTFE. Sometido a una condición de onda artificial de altura de 0.2 m y velocidad de 1.2 m/s, este dispositivo produjo un voltaje pico de 30 V y una corriente máxima de salida de 6  $\mu$ A. Además, al someterlo a una vibración de 100 Hz, la densidad de potencia máxima fue de 0.4 W/m<sup>2</sup>[25].

## **2.8 Circuitos de acondicionamiento**

Los nano generadores triboeléctricos (TENG) representan una tecnología promisoría para suministrar energía a dispositivos médicos y electrónicos de consumo con bajos requerimientos energéticos [10].

Estos transductores han experimentado desarrollos a lo largo de varios años, y la investigación para crear nuevos TENG aún está en curso. No obstante, la potencia de salida de estos transductores sigue siendo limitada, generando un creciente interés en el diseño y desarrollo de circuitos de acondicionamiento mejorados para mejorar el rendimiento de salida de los TENG. Los circuitos de acondicionamiento son componentes esenciales en un sistema de conversión de energía cinética, ya que tienen la capacidad de regular y amplificar el flujo de energía de un dominio a otro. Normalmente, un circuito de acondicionamiento para TENG incorpora elementos rectificadores como diodos e interruptores para convertir la corriente alterna generada por el dispositivo en una corriente continua que puede almacenarse en un depósito de capacitancia [26].

Hay una diversidad de aplicaciones para los TENG que están vinculadas a la implementación de circuitos de acondicionamiento. Entre estas aplicaciones se



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

encuentran sensores bioelectrónicos, dispositivos electrónicos y fotosintéticos autoalimentados, pieles electrónicas sostenibles, la captación de energía a partir de gotas de lluvia y ondas de agua, así como convertidores de energía que aprovechan el calor corporal. Esto es solo un conjunto de ejemplos, ya que hay muchas otras aplicaciones disponibles[26],[27].

## **2.9 Rectificadores de TENG**

De todos los circuitos de acondicionamiento, los rectificadores de media onda y de onda completa son los más comúnmente empleados en el avance de los TENG. Como resultado, se han llevado a cabo diversos intentos para mejorar la eficiencia de estos dos circuitos[26].

### **2.10 Rectificador**

Un rectificador es un dispositivo electrónico que transforma la corriente alterna en corriente continua utilizando diodos rectificadores, que pueden ser semiconductores de estado sólido, válvulas al vacío o válvulas gaseosas como las de vapor de mercurio.

Se clasifican en monofásicos o trifásicos según la cantidad de fases de la red eléctrica que utilizan. Además, en términos de rectificación, pueden ser de media onda, donde se utiliza solo un semiciclo de la corriente, o de onda completa, donde se aprovechan ambos semiciclos[28].

### **2.11 Rectificador media onda**

Está construido con un diodo, ya que este puede permitir el flujo de corriente en una sola dirección, lo que lo hace adecuado para transformar una señal de corriente alterna a corriente continua. La Figura I muestra un circuito rectificador de media onda. Cuando la tensión de entrada es positiva, el diodo se polariza en directo y puede considerarse como un cortocircuito. Si la tensión de entrada es negativa, el diodo se polariza en inverso y puede tratarse como un circuito abierto. Por lo tanto, cuando el diodo está polarizado en directo, la tensión de salida a través de la carga se puede determinar mediante la relación de un divisor de tensión. Además, acorde a las especificaciones técnicas el diodo requiere 0.7 v para polarizarse, por lo que la tensión de salida se reduce en esta cantidad (este voltaje depende del material de la unión del diodo). Cuando la polarización es inversa, la corriente es cero, lo que significa que la tensión de salida también es cero. Este



rectificador no es muy eficiente porque durante la mitad de cada ciclo, la entrada se bloquea completamente desde la salida, perdiendo así la mitad de la tensión de alimentación [28]. En la Figura 3, se muestra el circuito de un rectificador media onda.

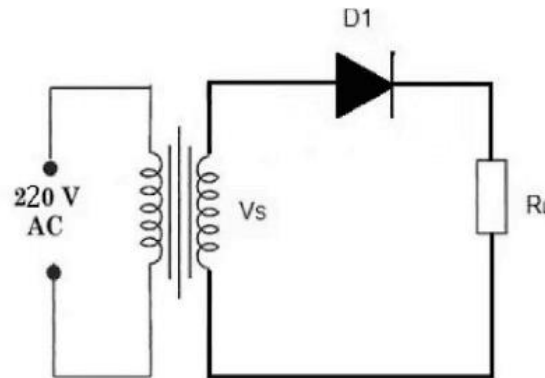


Figura. 3. Circuito rectificador de media onda.

Este circuito se utiliza para eliminar la sección del lado negativo de una onda sinusoidal mediante un diodo polarizado en sentido directo. La forma de onda resultante, como se muestra en la Figura 4, corresponde a un circuito rectificador de media onda.

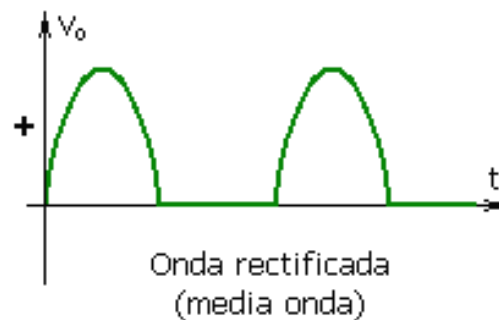


Figura. 4. Media onda rectificada.

### 2.12 Rectificador Onda completa

Un rectificador de onda completa transforma toda la forma de onda de entrada en una polaridad constante en la salida al invertir las porciones negativas (o positivas) de la forma de onda de entrada. Las partes positivas (o negativas) se combinan con las invertidas de las partes negativas (o positivas) para generar una forma de onda



parcialmente positiva (negativa) [28]. En la Figura 5, se muestra el circuito para rectificador de onda completa.

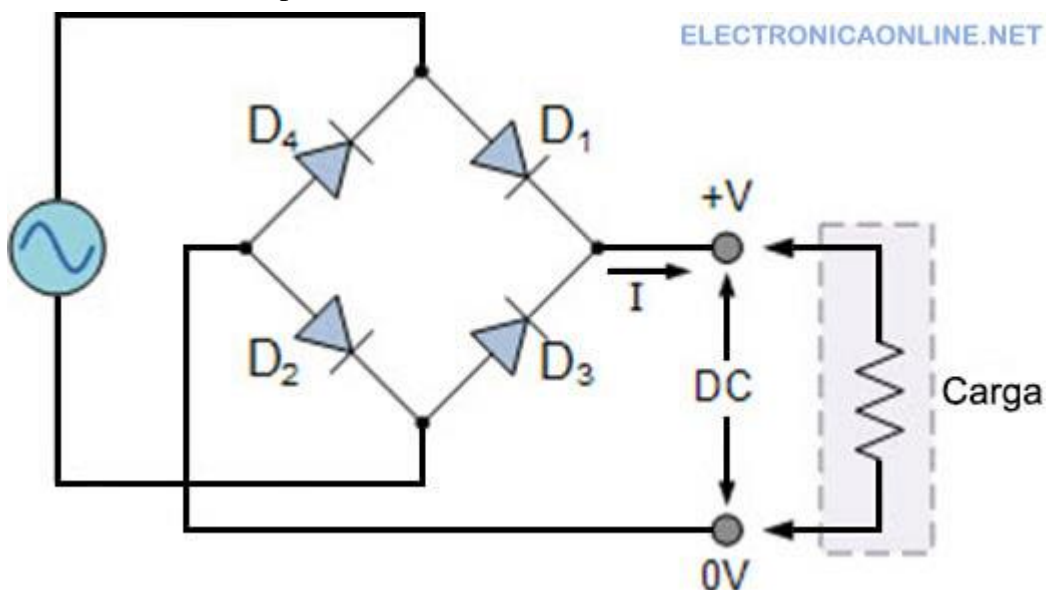


Figura. 5. Rectificador media onda.

En la Figura antes mostrada se tiene un puente de diodos en donde la salida del rectificador de onda completa tiene una forma de onda que es pulsante y unidireccional, manteniendo solo los valores positivos de la señal AC original. Como se muestra en la Figura 6 la onda de salida.

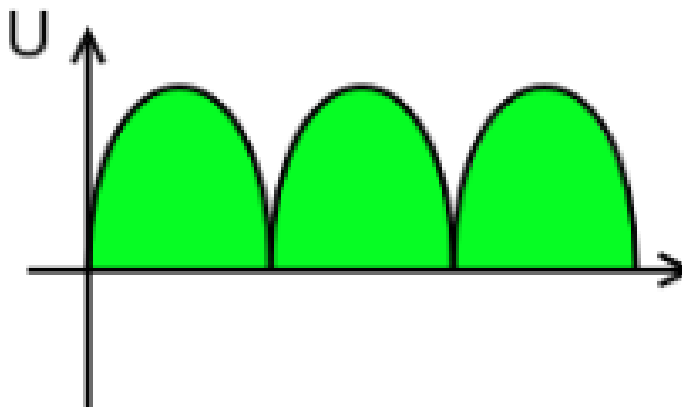


Figura. 6. Onda pulsante.

### 2.13 Filtros de señal

Los filtros son circuitos electrónicos diseñados para procesar señales eléctricas eliminando o reduciendo ciertas frecuencias no deseadas, mientras permiten el paso de otras. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones electrónicas, desde sistemas de comunicación y audio hasta fuentes de alimentación, con el objetivo de mejorar la calidad de las señales.



### 2.13.1 Filtro Capacitivo

El filtro capacitivo es un tipo de filtro electrónico que utiliza condensadores para suavizar o filtrar las señales eléctricas, reduciendo el ruido y las fluctuaciones indeseadas en un circuito. Es muy común en fuentes de alimentación y sistemas de procesamiento de señales, donde se requiere una señal más estable [29].

El condensador se comporta como un elemento de almacenamiento de energía que carga y descarga electricidad. En un circuito de filtrado, el condensador se coloca generalmente en paralelo con la salida para almacenar la carga cuando el voltaje es alto y liberar esta carga cuando el voltaje disminuye, lo que ayuda a suavizar las fluctuaciones de la señal [29, 30].

En sistemas de corriente continua (DC), después de que una señal alterna (CA) ha sido rectificadora, la salida de la rectificación suele ser pulsante, y el filtro capacitivo reduce esta pulsación, haciendo que la señal sea más continua. En la Figura 7, se muestra el diagrama de salida de un filtro capacitivo[30].

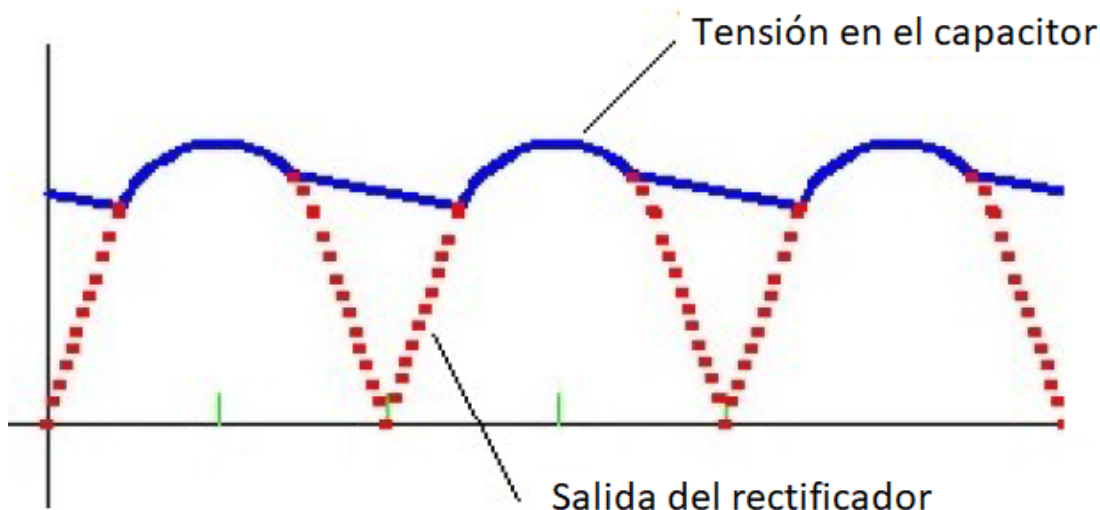


Figura. 7. Forma de onda de un filtro capacitivo.

### 2.13.2 Filtro de inductor

El filtro de inductor, también conocido como filtro L, utiliza un inductor como componente principal para filtrar las señales eléctricas. Su objetivo es suavizar las fluctuaciones en la corriente y reducir el ruido no deseado, siendo especialmente útil para eliminar las componentes de alta frecuencia presentes en un circuito [31].

El inductor se opone a los cambios en la corriente eléctrica debido a la ley de Faraday de la inducción electromagnética. Cuando la corriente a través del inductor



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

cambia, genera una fuerza electromotriz (FEM) que se opone a esa variación, actuando como un "amortiguador" para las fluctuaciones de corriente. Esto hace que la corriente que pasa a través del inductor sea más constante, lo que reduce el rizado y estabiliza la señal en sistemas de corriente continua (DC) [31].

En un filtro L, el inductor se coloca en serie con la carga para oponerse a las fluctuaciones rápidas de corriente que pueden ocurrir en la salida de un rectificador o en otras etapas del circuito.

### **2.13.3 Filtro LC (Filtro de Inductor-Capacitor)**

El filtro LC, también conocido como filtro de inductor-capacitor, combina un inductor y un condensador en su diseño para proporcionar un filtrado más efectivo que los filtros simples de solo inductor o condensador. Este tipo de filtro se utiliza para suavizar tanto el voltaje como la corriente, eliminando las fluctuaciones o rizados que puedan existir después de la rectificación en una fuente de alimentación, o en sistemas donde se genera una señal de corriente continua (DC) a partir de una señal pulsante o alterna (CA)[31].

El filtro LC combina las propiedades de un inductor y un condensador para eliminar las componentes no deseadas de alta frecuencia en una señal. El inductor, colocado en serie, se opone a los cambios rápidos en la corriente, mientras que el condensador, conectado en paralelo a la carga, suaviza las variaciones de voltaje[32].

El inductor se coloca en serie con la carga y actúa para suavizar las fluctuaciones en la corriente. Debido a que se opone a los cambios rápidos en la corriente, filtra eficazmente el ruido de alta frecuencia.

El capacitor se coloca en paralelo con la carga, ayuda a suavizar las fluctuaciones en el voltaje, almacenando carga cuando el voltaje es alto y liberándola cuando el voltaje es bajo, lo que reduce las oscilaciones en la salida de voltaje. En la Figura 8, se muestra la forma de conexión del filtro LC.

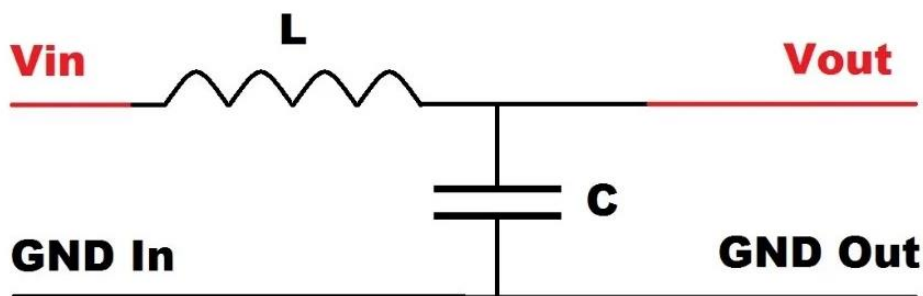


Figura. 8. Conexión del filtro LC.

### 2.13.3 Filtro Pi

El filtro Pi es un tipo de filtro pasivo que combina dos condensadores y un inductor, y se denomina así porque su disposición en el circuito eléctrico se asemeja a la letra griega " $\pi$ ". Este filtro se utiliza comúnmente en fuentes de alimentación y circuitos de procesamiento de señales para suavizar y reducir el rizado (ripple) en las señales de corriente continua (DC) después de la rectificación[32].

El filtro Pi está compuesto por dos condensadores ( $C1$  y  $C2$ ) y un inductor ( $L$ ) en una configuración específica:

- $C1$ : El primer condensador se coloca en paralelo con la entrada del circuito, ayudando a suavizar las fluctuaciones de voltaje.
- $L$ : El inductor se coloca en serie con la carga, para filtrar el ruido y las fluctuaciones en la corriente.
- $C2$ : El segundo condensador se coloca en paralelo con la salida del circuito, ayudando a estabilizar aún más el voltaje y a reducir cualquier componente de alta frecuencia residual.

Este diseño permite que el filtro Pi actúe tanto en las fluctuaciones de voltaje como de corriente, brindando una salida más estable y limpia en comparación con los filtros de una sola etapa (como los filtros de solo condensador o inductor). En la Figura 9 se muestra el circuito de un filtro pi[32].

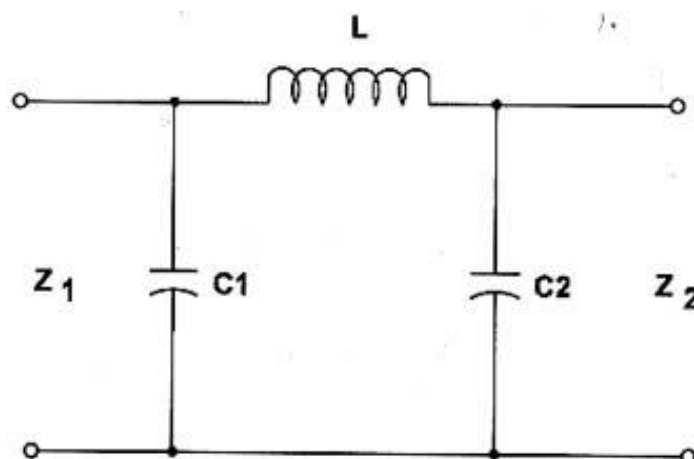


Figura. 9. Filtro pi.

### 2.14 Conversor DC - DC

Un convertidor DC-DC es un dispositivo electrónico que transforma una tensión de corriente continua (DC) de un nivel a otro, sin cambiar la naturaleza de la corriente (manteniéndola en DC). En el caso de las tecnologías TENG (Nano generadores Triboeléctricos), los convertidores DC-DC juegan un papel crucial en el acondicionamiento de la energía, debido a la naturaleza irregular y fluctuante de la energía generada por estos dispositivos [32].

Los TENG generan electricidad mediante la triboelectricidad, es decir, la transferencia de electrones entre dos materiales cuando entran en contacto y luego se separan. Este proceso genera señales eléctricas que son típicamente de bajo voltaje, intermitentes y con características no lineales. Para utilizar esta energía de manera efectiva en aplicaciones prácticas (por ejemplo, en dispositivos electrónicos que requieren alimentación estable en DC), es necesario acondicionar y regular esta energía.

Los TENG generalmente generan bajos voltajes, por lo que un convertidor boost (elevador) puede aumentar este voltaje a niveles utilizables para cargar baterías o alimentar dispositivos. También puede ser necesario un convertidor buck (reductor) si se requiere bajar el voltaje para alimentar dispositivos de bajo consumo [33].



**2.14.1 BUCK**

Convertidor Buck (Reductor): Si el TENG genera un voltaje superior al requerido por la aplicación o el dispositivo, un convertidor Buck puede reducir ese voltaje para ajustarse a las necesidades del sistema[32]. En la Figura 10 se aprecia el diagrama del circuito de convertidor Buck.

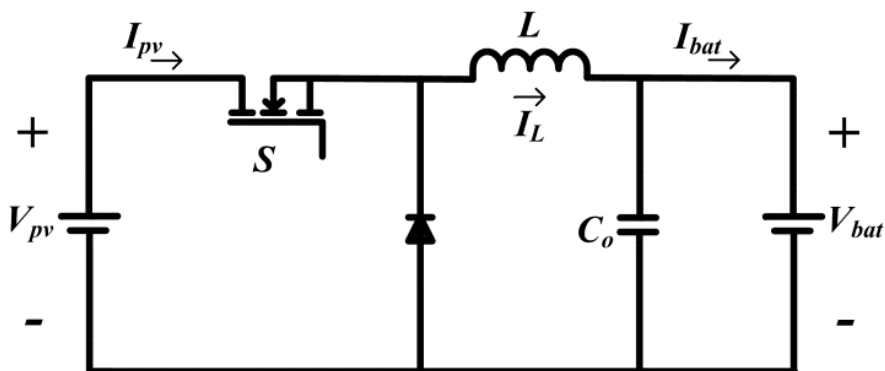


Figura. 10. Diagrama de un convertidor Buck.

**2.14.1 BOOST**

Convertidor Boost (Elevador), este tipo de convertidor aumenta el voltaje de salida por encima del voltaje de entrada. Es útil para las tecnologías TENG, que suelen generar bajos voltajes y requieren ser elevadas a niveles más altos para alimentar dispositivos o cargar baterías[32]. En la Figura 11 se aprecia el diagrama del circuito de convertidor Buck.

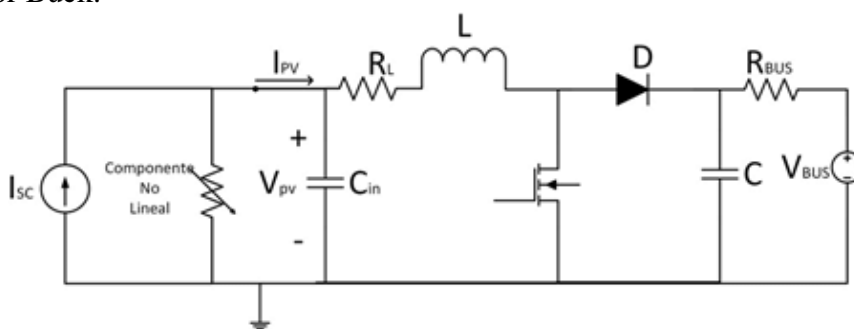


Figura. 11. Diagrama de un convertidor Boost.

**2.15 Amplificador de corriente**

Un amplificador de corriente es un dispositivo electrónico que toma una señal de entrada con una pequeña corriente y la amplifica, generando una señal de salida con mayor corriente, pero sin cambiar significativamente el voltaje de la señal. Su principal función es aumentar la capacidad de entrega de corriente a una carga, lo que es útil cuando la fuente de la señal original no puede proporcionar suficiente corriente por sí sola[33].



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Los amplificadores de corriente utilizados en sistemas TENG están diseñados para aumentar la corriente de salida, permitiendo que la señal generada por el TENG, que es de bajo voltaje y corriente, se eleve a niveles utilizables. Esto es esencial para garantizar que la energía generada pueda alimentar dispositivos o cargar baterías.

Esta característica es importante porque permite que el amplificador de corriente tome la señal del TENG sin cargarlo significativamente. De este modo, la señal original no se ve afectada, y se preservan las características de la energía generada.



### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la metodología empleada para la implementación de circuitos destinados al acondicionamiento de la energía generada por sistemas triboeléctricos, orientados a aplicaciones en corriente continua (DC). Se detallan los pasos seguidos en el diseño y simulación de los circuitos, con el objetivo de optimizar la conversión eficiente de la energía triboeléctrica. Además, se describen los criterios de selección de componentes y las técnicas utilizadas para validar el rendimiento de los sistemas propuestos, garantizando su viabilidad y eficiencia en aplicaciones prácticas.

#### 3.1 Metodología

La metodología empleada en este estudio es de tipo cuantitativa y experimental, orientada al diseño, implementación y evaluación de circuitos para el acondicionamiento de la energía generada por sistemas triboeléctricos en aplicaciones de corriente continua (DC). Esta metodología se basa en la recolección de datos numéricos mediante mediciones obtenidas a través de experimentos controlados. La Figura 12 presenta el diagrama de flujo que ilustra el proceso para cumplir con el objetivo de este capítulo.

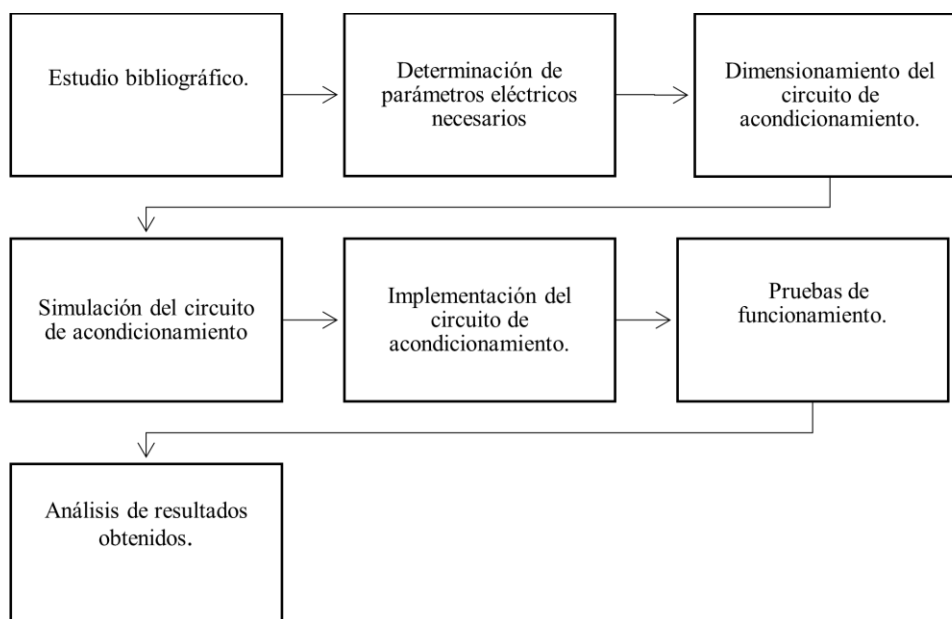


Figura. 12. Metodología para seguir para lograr implementar los circuitos de implementación.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

En el análisis bibliográfico se desarrolló la investigación de los sistemas triboeléctricos ya que serán un componente fundamental en la comprensión y optimización de la generación de energía mediante este método.

La definición de requisitos para el acondicionamiento de energía es un paso crítico en la metodología de implementación de circuitos diseñados para optimizar la energía generada por sistemas triboeléctricos. Este proceso implica identificar y especificar las características técnicas y operativas que deben cumplir los circuitos acondicionadores para asegurar un rendimiento efectivo en aplicaciones de corriente continua (DC).

El diseño del circuito de acondicionamiento es otra etapa en la implementación de sistemas que optimizan la energía generada por dispositivos triboeléctricos. Este proceso implica la creación de un esquema electrónico que permita transformar y adaptar la energía eléctrica generada para que sea adecuada para su uso en aplicaciones de corriente continua (DC).

La implementación y el montaje en placa de circuito impreso (PCB), esta fase se centra en la creación física del circuito diseñado, asegurando que todos los componentes estén adecuadamente integrados para garantizar un funcionamiento óptimo.

Por último, la validación experimental es una etapa en el desarrollo y de circuitos de acondicionamiento para la energía generada por sistemas triboeléctricos. Esta fase se centra en evaluar el rendimiento del circuito en condiciones reales y compararlo con las expectativas establecidas durante el diseño.

### **3.2 Lugar de estudio**

El entorno físico para el desarrollo de circuitos destinados al acondicionamiento de la energía generada por sistemas triboeléctricos se llevará a cabo en el edificio de la carrera de Electricidad de la Universidad Técnica del Norte, ubicada en la ciudad de Ibarra, en la provincia de Imbabura. En la Figura 13 se muestra los laboratorios de la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte



Figura. 13. Laboratorios de Electricidad.

### 3.3 Materiales

La implementación de circuitos para el acondicionamiento de energía generada por sistemas triboeléctricos implica varios fundamentos matemáticos que son esenciales para entender y optimizar su funcionamiento también se describirán softwares para la simulación de dichos circuitos.

#### 3.3.1 Ecuaciones de Triboelectricidad

El voltaje generado ( $v$ ) en un sistema triboeléctrico puede describirse en función de la diferencia de potencial entre los materiales involucrados:

$$V = k * d \quad (1)$$

Donde:

- $k$  es una constante relacionada con las propiedades triboeléctricas de los materiales.
- $d$  es la distancia de separación o el desplazamiento entre los materiales.

La energía generada por sistemas triboeléctricos generalmente tiene una forma de onda irregular y pulsante, lo que requiere un acondicionamiento para su uso en aplicaciones de corriente continua (CC). La forma de onda de salida puede describirse matemáticamente mediante funciones sinusoidales, especialmente en sistemas que presentan una variabilidad periódica [34].



### 3.3.2 Cálculo del Voltaje y Corriente

El voltaje ( $v$ ) y la corriente ( $I$ ) generados por un sistema triboeléctrico pueden modelarse utilizando la Ley de Ohm[29]:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Donde:

- $R$  es la resistencia de la carga conectada.

### 3.3.3 Rectificación de la Señal

Para convertir la señal de CA generada por un sistema triboeléctrico en CC, se utilizan rectificadores. Los fundamentos matemáticos para la rectificación de señales se incluyen en el análisis de las formas de onda de salida[31].

### 3.3.4 Rectificadores de Media Onda

La salida de un rectificador de media onda se describe mediante[29]:

$$V_{salida}(t) = \begin{cases} Vsen(\omega t) & \text{si } Vsen(\omega t) > 0 \\ 0 & \text{si } Vsen(\omega t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

### 3.3.4 Rectificadores de Onda Completa

Para un rectificador de onda completa, la salida es[29]:

$$V_{salida}(t) = |Vsen(\omega t)| \quad (4)$$

Respecto el filtro capacitivo para la salida es [29]:

$$\Delta V_r = I_{carga}/2fC \quad (5)$$



### 3.3.5 Cálculo de la Tensión Media y Eficiencia

La tensión media de salida para un rectificador de media onda se puede calcular como[30]:

$$V_{SalidaPromedio} = \frac{V}{\pi} \quad (6)$$

Y para un rectificador de onda completa:

$$V_{SalidaPromedio} = \frac{2V}{\pi} \quad (7)$$

La eficiencia ( $\eta$ ) del circuito de acondicionamiento se puede calcular en función de la potencia de salida y la potencia de entrada:

$$\eta = \frac{P_{Salida}}{P_{Entrada}} * 100 \quad (8)$$

### 3.3.6 Ondulación en la Salida

La ondulación es un parámetro importante en la calidad de la señal de CC. La ondulación (vripple) puede calcularse considerando la capacitancia y la corriente de carga[29]:

$$V_{ripple} = V_{MaxSalida} - V_{Min} \quad (9)$$

donde  $V_{MaxSalida}$  es el máximo voltaje de salida y  $V_{Min}$  es el mínimo voltaje en el ciclo.

### 3.3.7 Filtrado de señal

El filtrado de la señal es un proceso fundamental en el acondicionamiento de la energía generada por sistemas triboeléctricos, especialmente cuando se trata de convertir la corriente alterna (CA) generada en una corriente continua (CC) utilizable. Este proceso busca suavizar las fluctuaciones en la señal de salida, eliminando la ondulación y proporcionando un voltaje más estable[31].

El principal objetivo del filtrado es reducir la ondulación ( $V_{ripple}$ ) en la señal de salida de un rectificador, que es el voltaje fluctuante resultante de la conversión de CA a



CC. Una salida más estable es crucial para alimentar circuitos electrónicos que requieren un voltaje constante[31].

### 3.3.7.1 Filtros Pasivos

Estos filtros utilizan componentes pasivos como resistores (R), capacitores (C) e inductores (L) para modificar la forma de onda de la señal[31, 32].

### 3.3.7.2 Filtro RC

Consiste en un resistor y un capacitor. Este tipo de filtro es eficaz para reducir la ondulación, permitiendo que el capacitor cargue durante los picos de voltaje y descargue durante los valles[32].

$$V_{Salida}(t) = V_{Entrada} * e^{-\frac{t}{RC}} \quad (10)$$

### 3.3.7.3 Filtro LC

Compuesto por un inductor y un capacitor, es más efectivo que un filtro RC para eliminar altas frecuencias de ruido.

### 3.3.8 Filtros Activos

Estos filtros utilizan amplificadores operacionales y otros componentes activos para mejorar la calidad del filtrado. Son más complejos y eficientes que los filtros pasivos y pueden proporcionar una mayor ganancia[32].

- **Filtros de Suma:** Permiten combinar varias señales, lo que es útil en aplicaciones donde se necesita la integración de varias fuentes de energía.
- **Filtros de Paso Bajo:** Permiten que las frecuencias bajas pasen y atenúan las frecuencias altas, mejorando así la estabilidad de la salida.

### 3.3.9 Análisis de Respuesta del Filtro

Es crucial analizar cómo responde el filtro a diferentes frecuencias de entrada. Esto se realiza mediante la **función de transferencia**, que describe la relación entre la señal de entrada y la salida[32].

$$H(s) = \frac{V_{Salida}(s)}{V_{Entrada}(s)} \quad (11)$$

La respuesta de frecuencia se representa generalmente en un diagrama de Bode, que muestra la ganancia y la fase del filtro en función de la frecuencia.



### 3.3.10 Convertidores DC

Los convertidores DC-DC son circuitos electrónicos que transforman un nivel de voltaje DC a otro, ya sea aumentando (boost) o reduciendo (buck) el voltaje[32].

### 3.3.11 Convertidor Buck

Para un convertidor buck, que reduce el voltaje, la relación se puede expresar como[32]:

$$V_{Salida} = D * V_{Entrada} \quad (12)$$

Donde:

- D: Es el ciclo de trabajo.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (13)$$

Definido por la relación de tiempo que el interruptor está encendido ( $t_{on}$ ) con respecto al periodo total.

### 3.3.12 Convertidor Boost

Para un convertidor BOOST, que aumenta el voltaje, la relación se expresa como[32]:

$$V_{Salida} = \frac{V_{Entrada}}{1 - D} \quad (14)$$

## 3.4 Softwares para simulación de circuitos eléctricos

En la siguiente sección se describirán diversos programas de software utilizados para la simulación eléctrica. Estos programas son herramientas esenciales para ingenieros y técnicos, ya que permiten modelar, analizar y optimizar sistemas eléctricos con precisión y eficiencia.

### 3.4.1 Proteus

Proteus es un software ampliamente utilizado en electrónica de potencia debido a su capacidad para simular circuitos electrónicos y sistemas de control en tiempo real. Ofrece una integración eficiente entre el diseño esquemático y la simulación de microcontroladores, lo que lo hace ideal para aplicaciones educativas y profesionales. Su entorno permite validar y optimizar diseños antes de la implementación física, ayudando a reducir errores y costos en proyectos de electrónica de potencia.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### 3.4.2 Simulink

Es una herramienta de simulación y modelado gráfico integrada en MATLAB, ampliamente utilizada en ingeniería eléctrica, especialmente en electrónica de potencia. Permite diseñar, simular y analizar sistemas complejos, como convertidores de potencia, inversores, rectificadores y sistemas de control asociados. Su entorno visual facilita la creación de modelos mediante bloques funcionales que representan componentes físicos o lógicos [35].

En electrónica de potencia, Simulink se emplea para evaluar el comportamiento dinámico de circuitos, optimizar diseños y realizar estudios de control, como estrategias PWM (modulación por ancho de pulso) y control vectorial en motores eléctricos. Además, su compatibilidad con herramientas como Simscape Power Systems permite la simulación precisa de sistemas eléctricos integrados con electrónica de potencia [36].

### 3.5 Etapas de conversión de energía de un TENG

Debido a la naturaleza lineal de generación en corriente alterna (AC) del TENG, es se va a implementar un proceso de conversión que permita transformar dicha energía hasta un formato adecuado para su utilización en corriente directa (DC). Como se muestra en la Figura 14, donde se aprecia las etapas de conversión de AC – DC.

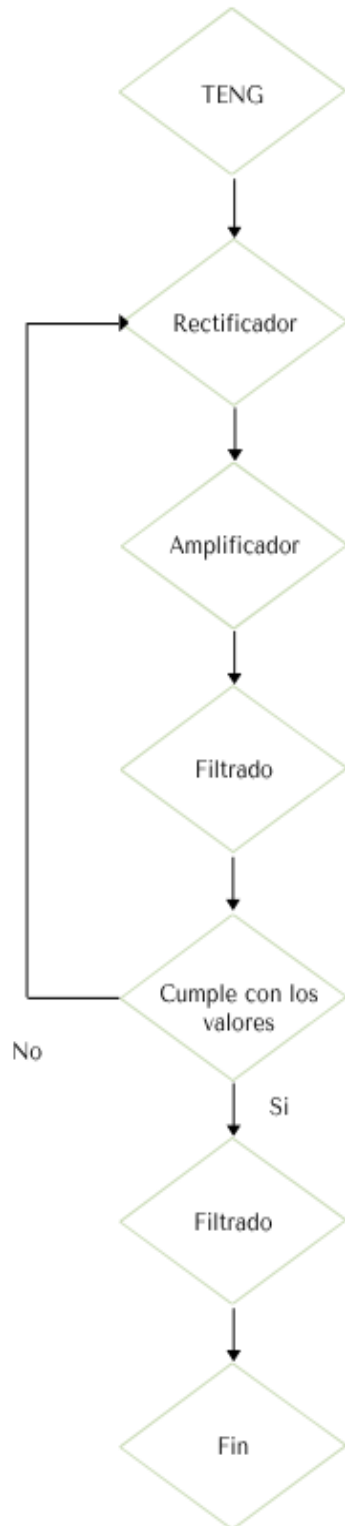


Figura. 14. Etapas para acondicionar una señal de TENG.



### 3.5.1 Etapa de rectificación

Como se muestra en la Figura 15, el circuito equivalente, el cual está formado por cuatro componentes. Este circuito incluye un puente de diodos, cuyo propósito es rectificar la señal, proteger contra la polarización inversa y acondicionar la señal. La Figura 15 ilustra la etapa de rectificación y filtrado del circuito.

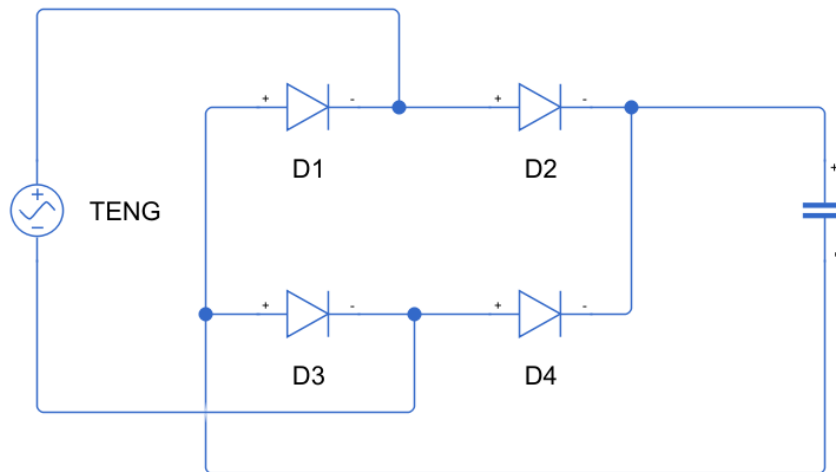


Figura. 15. Circuito de rectificado y filtrado.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**CAPÍTULO IV**

**RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de los cálculos de pérdidas por conducción, conmutación y las simulaciones realizadas. Estos cálculos se basaron en las ecuaciones presentadas en el capítulo anterior, enfocándose en las características de los componentes activos y pasivos de los circuitos seleccionados. Además, se detallan las simulaciones realizadas en MATLAB y Proteus mediante las cuales se verificaron las pérdidas en los circuitos y se compararon los resultados obtenidos con ambas herramientas. El análisis de estos resultados permitió evaluar y seleccionar el circuito con mejor desempeño.

Asimismo, se exponen las pruebas físicas realizadas en el circuito seleccionado tras el análisis previo. El examen de estos resultados permite evaluar el rendimiento del circuito y verificar el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación.

#### **4.1 Dimensionamiento del rectificador de onda completa**

A continuación, se presentan los valores de salida del generador triboeléctrico, mismos que serán usados posteriormente en los cálculos y análisis de los valores de salida del circuito de acondicionamiento.

Magnitud	Valor
Voltaje	35 vp
Corriente	0.35uA
Frecuencia	15hz

**TABLA 2. VALORES DEL TENG**

##### **4.1.1 Rectificación cálculo de los valores de salida**

El generador triboeléctrico (TENG) produce una señal de salida pulsante en corriente alterna, caracterizada por un voltaje de pico que varía con el tiempo debido a la naturaleza intermitente de la generación de energía triboeléctrica. Esta fluctuación que genera un voltaje con una forma de onda irregular y pulsante, que requiere un acondicionamiento para ser utilizado en aplicaciones de corriente continua.

A partir de la Tabla 3 se asumió que la tensión de pico de entrada es de 35 V. Debido a la amplia disponibilidad comercial, se consideraron los modelos KBPC5010 y MB6S para



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

el proceso de rectificación. Estos componentes tienen valores de caída de voltaje por diodo de 0.6 V y 0.5 V, respectivamente. Dichos valores están descritos en sus hojas de datos en el ANEXO I y ANEXO II respectivamente

La caída de voltaje por diodo se justifica considerando las características físicas de los diodos rectificadores. Los diodos de silicio, como los utilizados en este caso, presentan una caída de voltaje típica que ocurre debido a la necesidad de superar la barrera de potencial en la unión PN del diodo. Esta caída de voltaje es inevitable y afecta la eficiencia del proceso de rectificación. En aplicaciones de baja corriente como la que se estudia, el valor de la caída de voltaje puede influir considerablemente en la potencia de salida. Por ende, al presentar un valor de caída de 0.6 V 0.5 V es viable emplear dichos dispositivos ya que en comparación a el uso de diodos rectificadores como el 1n4001 o sus similares la caída es de alrededor de 1v valores descritos en el ANEXO III.

A partir de estos valores descritos en el ANEXO I, se calculó el voltaje de salida para cada modelo:

$$V_{sal} = 33.8V$$

$$V_{sal} = 34V$$

En base en los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo MB6S tiene pérdidas menores en comparación a los otros presentados por ende es el más adecuado para esta aplicación, ya que presenta una menor caída de voltaje por diodo.

Respecto a el valor de la corriente de salida se especificó una corriente de entrada de 0.35 uA asumiendo una eficiencia del 90% se obtiene un valor de corriente de salida de 0.315uA.

#### **4.1.2 Dimensionamiento del Capacitor de Filtrado**

El condensador o capacitor en el circuito funciona como un elemento que almacena carga eléctrica. En momentos en los que la corriente es alta, el condensador se carga almacenando energía; posteriormente, cuando la corriente disminuye, el condensador libera la energía almacenada para mantener una salida constante y estable.[37]

El valor del condensador se eligió en función del nivel de rizado que se pretende reducir y la frecuencia con la que opera el circuito, en este caso se escogió un 5% ya que un rizado



del 5% es generalmente aceptable considerando circuitos bien conocidos como son el LM2596 y TPS54202 que tienen valores similares de rizado. Empleando la Ecuación 5, se dimensionó el condensador necesario para reducir el rizado de voltaje, considerando los valores descritos en la Tabla 3. Asumiendo un rizado máximo de 1.7 V (equivalente al 5% del voltaje total), se calculó que el valor adecuado del condensador es:

$$C = 6.82nF$$

El valor comercial más cercano es el condensador de 7nF sin embargo se opta por el condensador de 10nF debido a su disponibilidad comercial.

#### 4.2 Simulación de circuitos de acondicionamiento

En un sistema de nano generadores triboeléctricos (TENG), que genera energía a partir de la conversión de energía mecánica en electricidad, la salida suele ser pulsante o alterna.

##### 4.2.1 Regulador de voltaje con diodo Zener

Este circuito de la Figura 16 está diseñado para acondicionar esa señal, asegurando que la salida sea un voltaje DC regulado. La combinación del diodo Zener y el transistor estabiliza el voltaje.

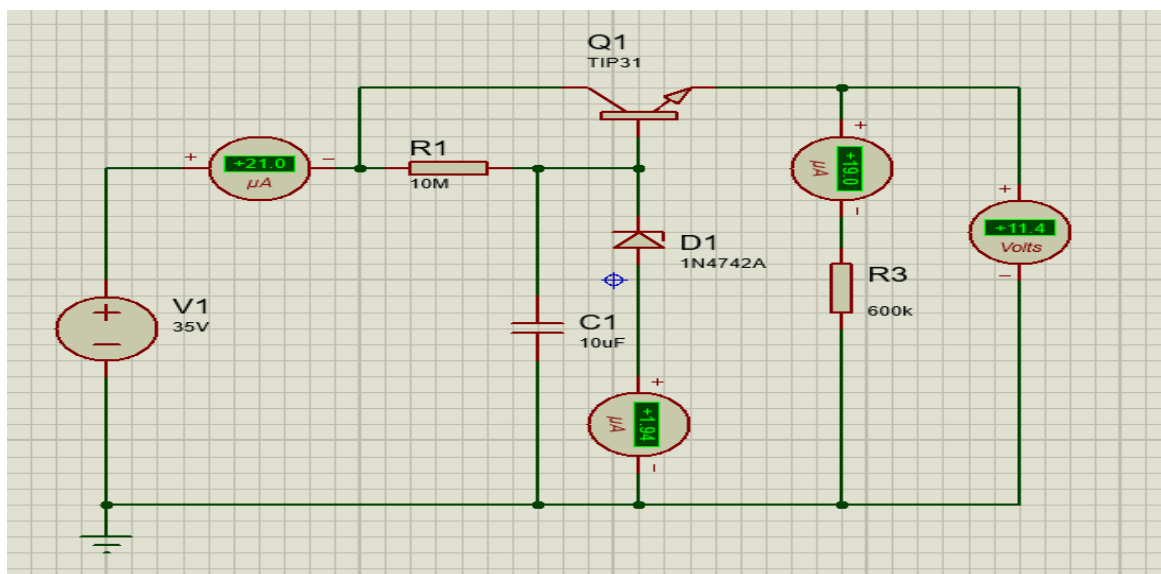


Figura. 16. Circuito regulador de voltaje.

El capacitor C1 ayuda a suavizar la señal de entrada, eliminando picos rápidos o fluctuaciones menores. El diodo Zener garantiza que el voltaje no supere los en voltaje



nominal, y el transistor TIP31 permite que la corriente aumente mientras mantiene el voltaje de salida estable.

#### 4.2.2 Simulación circuito convertidor DC

El circuito de la Figura 17 es un convertidor DC-DC basado en un temporizador 555 configurado en modo astable para generar una señal de pulsos que controla un transistor MOSFET (Q1), el cual a su vez gestiona el paso de corriente a través de una bobina (L1), funcionando como un convertidor boost o step-up.

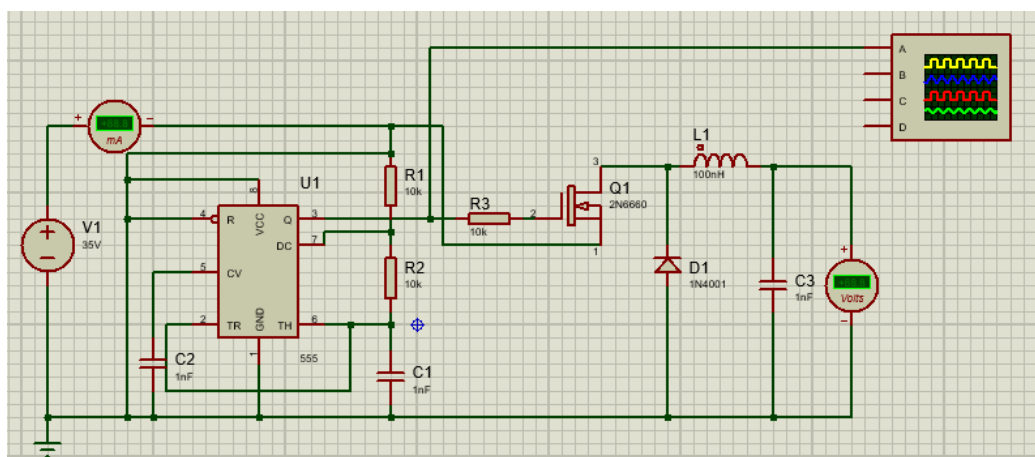


Figura. 17. Circuito convertidor DC - DC BOOST.

Este es un circuito es un convertidor boost (elevador de voltaje). El 555 genera una señal pulsante que conmutará el MOSFET, permitiendo el paso de corriente en pulsos a través del inductor. Cuando el MOSFET se apaga, el inductor libera la energía almacenada, y el voltaje en la salida (vout) se incrementa. El diodo y el condensador filtran las ondulaciones para ofrecer una salida más estable de DC.

#### 4.2.3 Simulación de circuito amplificador de corriente

En el circuito de la Figura 18 se muestra un amplificador operacional en configuración no inversora amplifica la señal de entrada para controlar el transistor NPN Q1 (2N3904). La señal amplificada se utiliza para aplicar un mayor voltaje a la base del transistor. El transistor NPN Q1 funciona como un amplificador de corriente. Cuando recibe una señal en su base desde el amplificador operacional, el transistor se activa y permite que una corriente mayor fluya a través de su colector hacia la carga (R5). Así, aunque el amplificador operacional solo puede entregar una corriente limitada, el transistor amplifica la corriente disponible para la carga.





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

y estabilidad estructural. El diseño del prototipo incluyó una base rígida para soportar el sistema y optimizar la conversión de energía generada. El análisis comparativo de los componentes electrónicos, detallado en la Tabla 2, permitió elegir el más adecuado para el muestreo y monitoreo eficiente de datos en este sistema.

Componente	Modelo	Descripción
Puente de Diodos	KBPC5010, MB6S	Rectifica la señal AC generada por el TENG para obtener una señal pulsante de DC.
Condensador	470 $\mu$ F, 50v (Electrolítico)	Reduce las ondulaciones en la señal rectificada y proporciona una salida DC más estable.
Regulador de Voltaje	LM317	Ajusta la salida DC a un nivel de tensión deseado, protegiendo la carga conectada.
Amplificador	LM358, OPA541	Incrementa la capacidad de corriente para alimentar cargas más exigentes o almacenar energía.
Convertidor Boost	XL6009, MT3608	Eleva la tensión a un nivel adecuado para dispositivos de almacenamiento o carga.
Convertidor Buck	LM2596	Reduce la tensión para proteger los componentes electrónicos o adaptarse a la carga.
Temporizador 555	NE555	Genera pulsos de control para activar/desactivar el convertidor boost en intervalos programados.
Diodo de Protección	1N4007, 1N5819	Evita corrientes inversas que podrían dañar los componentes del circuito.

**TABLA 3.** Materiales que conforman el circuito de acondicionamiento

Con todos los materiales, ecuaciones, simulaciones y circuitos de acondicionamiento, se culmina este capítulo, para que el siguiente capítulo empiece con la prueba de los circuitos y la implementación.

### 4.3 Dimensionamiento de las Pérdidas en los Circuitos

A continuación, se presentan las pérdidas que ocurren en los circuitos eléctricos descritos en el capítulo anterior, obtenidas a partir de cálculos matemáticos, para este caso se considera una corriente de 0.35uA valor descrito en la Tabla 3.



**4.3.1 Cálculo de Pérdidas Resistivas**

A partir de la ley de OHM se obtiene el consumo de potencia de los elementos en el caso de los resistores se obtuvo la Tabla 4 que describe el consumo en dichos elementos.

<b>Circuito</b>	<b>Componentes Analizados</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pérdidas Aproximadas (uW)</b>
Convertidor DC-DC Boost	R2, R3	Pérdidas totales en resistencias	2.97
Amplificador de Corriente	R1, R2, R3, R4	Pérdidas totales en resistencias	10.09
Regulador de voltaje ajustable (LM317)	RV1	Pérdidas totales en resistencias	1.57

**TABLA 4.** *Pérdidas resistivas*

Las pérdidas resistivas en los circuitos del regulador con diodo Zener y el regulador de voltaje ajustable no se consideran significativas, ya que las resistencias están ubicadas después de la etapa de regulación es decir las resistencias son cargas mas no un elemento del circuito regulador. Este hecho implica que su contribución a las pérdidas resistivas es mínima y no afecta de manera relevante la eficiencia del sistema.

**4.3.2 Pérdidas en Componentes Activos y Pasivos no resistivos**

En circuitos de conmutación rápida, para sistemas de acondicionamiento de energía, las pérdidas de conmutación, las pérdidas en los componentes activos y las pérdidas debidas a la ESR (Resistencia Serie Equivalente) de capacitores e inductores se suman, lo que puede resultar en una mayor disipación de potencia y una disminución de la eficiencia general del sistema. La ESR es una característica inherente a los componentes pasivos, como los capacitores y los inductores, que contribuye a las pérdidas de energía cuando circula corriente alterna a través de ellos. Cuanto mayor es la ESR, mayor será la disipación de potencia, lo que afecta negativamente la eficiencia del sistema. Estas pérdidas pueden ser más significativas en circuitos de conmutación rápida, como los convertidores DC-DC, debido a los altos picos de corriente y la frecuencia de conmutación. A continuación, se muestran las pérdidas aproximadas en algunos componentes activos y pasivos utilizados en los circuitos descritos.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

<b>Circuito</b>	<b>Componentes Analizados</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pérdidas Aproximadas (uW)</b>
Regulador de Voltaje con Diodo Zener	1N4733A	Pérdidas por caída de voltaje en el diodo	3.68
Convertidor DC-DC Boost	1N47001 NE555	Pérdidas por caída de voltaje en el diodo	0.2205 50
Amplificador de Corriente	2N3904	Pérdidas por funcionamiento del transistor	1.575
Regulador de voltaje ajustable (LM317)	LM317	Perdidas en el componente	6.93

**TABLA 5.** Pérdidas componente activos y pasivos

**4.3.3 Análisis de resultados**

A partir de los datos obtenidos a partir de los cálculos realizados en los diferentes circuitos evaluados. Se analizo las ventajas y limitaciones de cada circuito en función de las pérdidas totales, de forma que se seleccionó el circuito más adecuado para las condiciones y requerimientos específicos del proyecto, basándose en un enfoque cuantitativo.

<b>Circuito</b>	<b>Pérdidas Resistivas (uW)</b>	<b>Pérdidas en Componentes Activos (uW)</b>	<b>Pérdidas Totales (uW)</b>
Regulador de Voltaje con Diodo Zener	0	3.68	3.68
Convertidor DC-DC Boost	2.97	50.2205	53.19
Amplificador de Corriente	10.09	1.575	11.665
Regulador de Voltaje Ajustable (LM317)	1.57	6.93	8.5

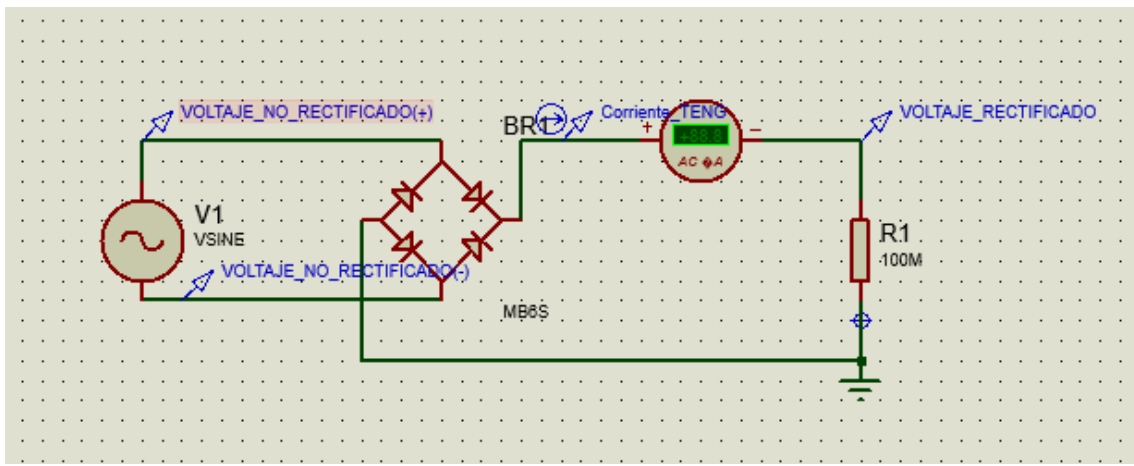
**TABLA 6.** Pérdidas totales

Como se observa en la Tabla 6 las pérdidas totales en los circuitos seleccionados demuestran que la opción más viable sería el regulador con diodo Zener ya que sus pérdidas son menores en comparación a las alternativas presentadas, además es adecuado para aplicaciones de bajo consumo, como la alimentación de sensores u otros dispositivos de baja potencia. Aunque presenta limitaciones para manejar corrientes más altas, su rendimiento en sistemas de bajo voltaje y corriente justifica su selección.

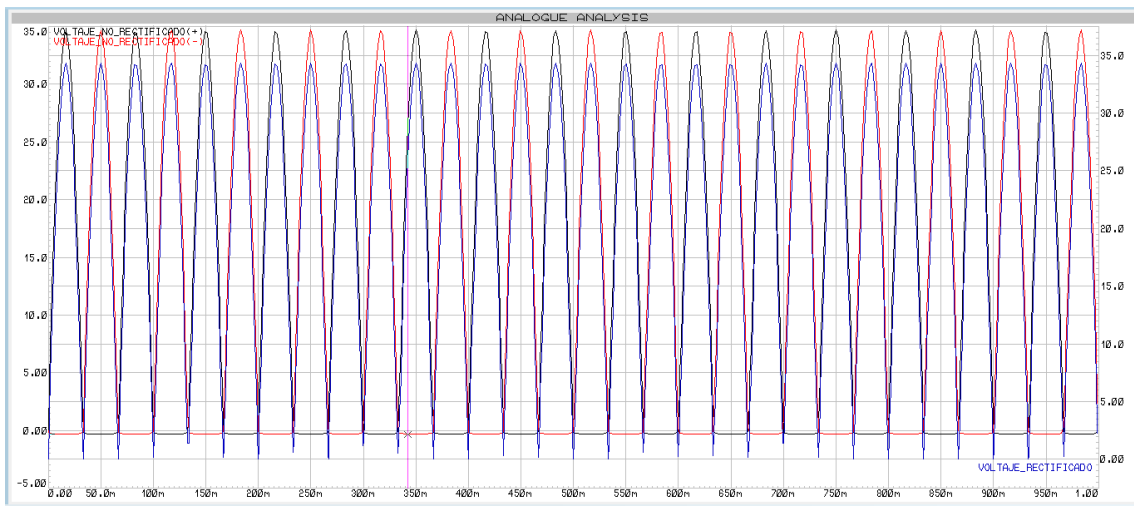


**4.4 Simulación del Circuito en Proteus**

La Figura 20 muestra la señal rectificada obtenida en el circuito de onda completa, donde la gráfica azul representa la señal de entrada alterna de 35 V en la parte positiva, la gráfica rosada representa la señal de entrada alterna de 35 V en la parte inferior negativa, y la gráfica amarilla corresponde a la salida rectificada del puente MB6S, sin el filtro capacitivo, por lo que se puede observar cómo llega tiene una caída a 0 después de cada cumbre, las escalas para cada señal es de 18 V por cada recuadro.



(a)



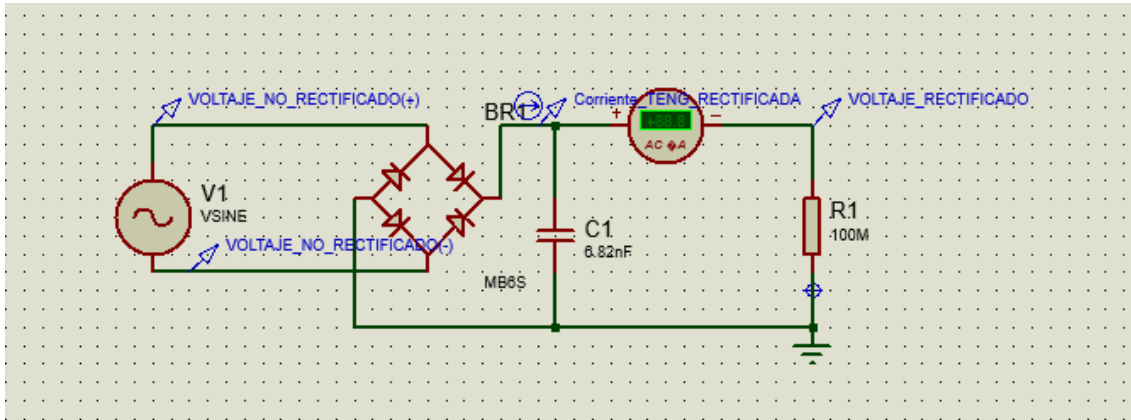
(b)

Figura. 20. (A)Rectificador de onda completa conectado al TENG sin filtro – PROTEUS

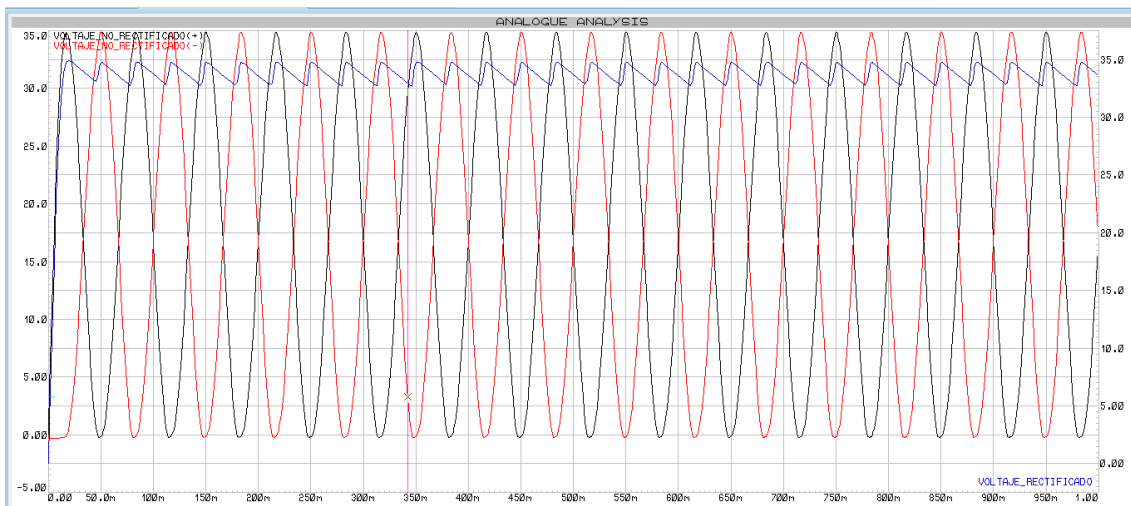
(B) Gráfica del voltaje



Los resultados obtenidos a través del software Proteus presentan un ambiente ideal por ende los resultados son muy cercanos al cálculo, en este caso el voltaje presenta un valor de 34.70 aproximadamente y la corriente es de 0.35uA.



(a)

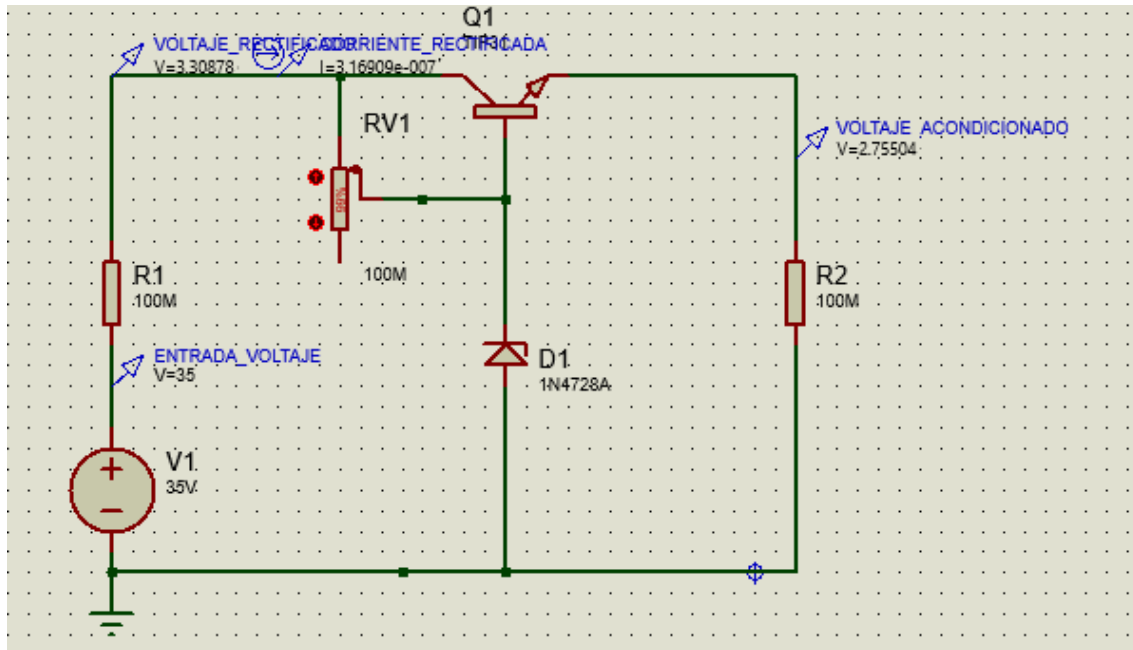


(b)

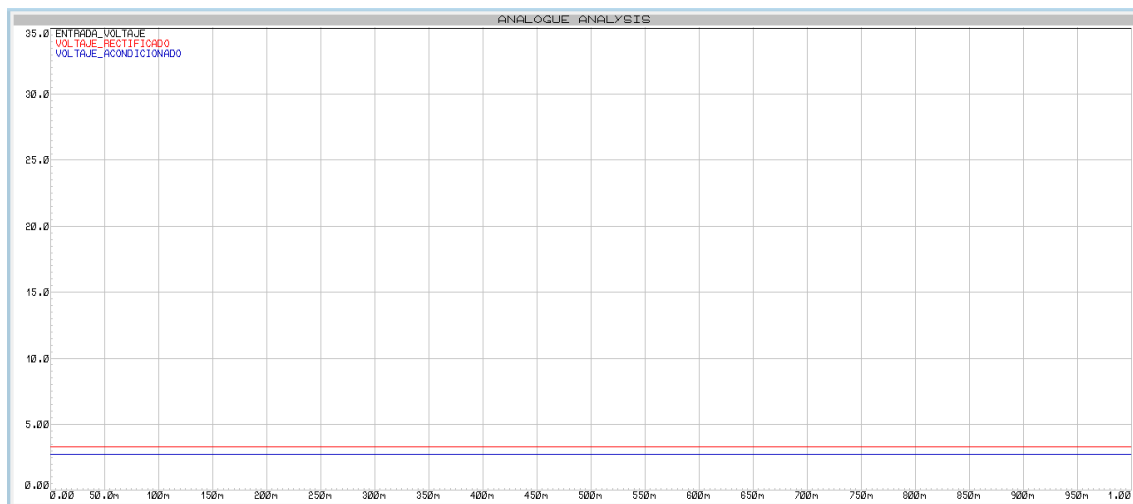
Figura. 21. (A) Rectificador de onda completa conectado al TENG con filtro capacitivo – PROTEUS

(B) Gráfica de voltaje

Al agregar el filtro capacitivo calculado previamente con un valor de 10 nF el voltaje de rizado es menor a 1 V tal como se observa en la señal amarilla, respecto a las escalas para la señal amarilla se consideró 4 V ya que se puede apreciar de mejor manera la forma de la señal misma que se observa en la Figura 21, la corriente varía de 0.35uA a 1.17uA esto se debe a los picos de carga del capacitor tal como se observa en la Figura 21.



(a)



(b)

Figura. 22. (A) Regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – PROTEUS

(B) Gráfica de voltaje

La Figura 22 se observa el comportamiento del regulador de voltaje con diodo Zener entrega aproximadamente 3.36 V dicho voltaje puede ser regulado a partir de la resistencia variable, este voltaje es idóneo para cargas pequeñas, respecto a las escalas se consideró 5 V para cada recuadro en el osciloscopio.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

#### **4.5 Simulación del Circuito en MATLAB**

La Figura 23 muestra el circuito del regulador de voltaje con diodo Zener, por su parte en la Figura 24 se observa la señal obtenida a partir de Matlab respecto al rectificador de onda completa con filtro capacitivo, como se observa en la gráfica el voltaje de entrada tiene picos de 35 V en la gráfica azul, tras la rectificación los valores concuerdan con los valores calculados previamente donde los diodos presentan una caída de voltaje, como se observa las líneas azules tienen picos más altos que los de las líneas naranjas la cual corresponde a el voltaje rectificado, por su parte la línea amarilla de la gráfica es el voltaje rectificado y filtrado que desciende a un valor de 10 V.

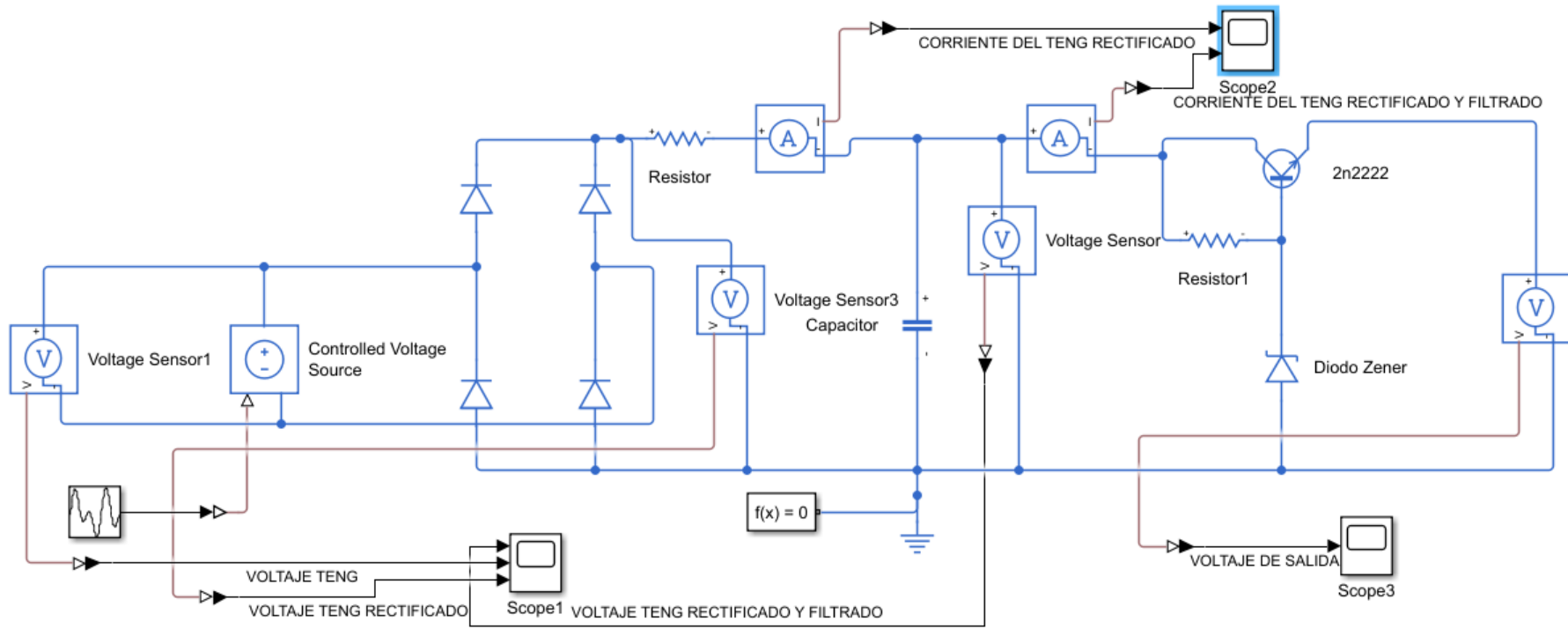


Figura. 23. Rectificador de onda completa conectado al TENG – SIMULINK



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

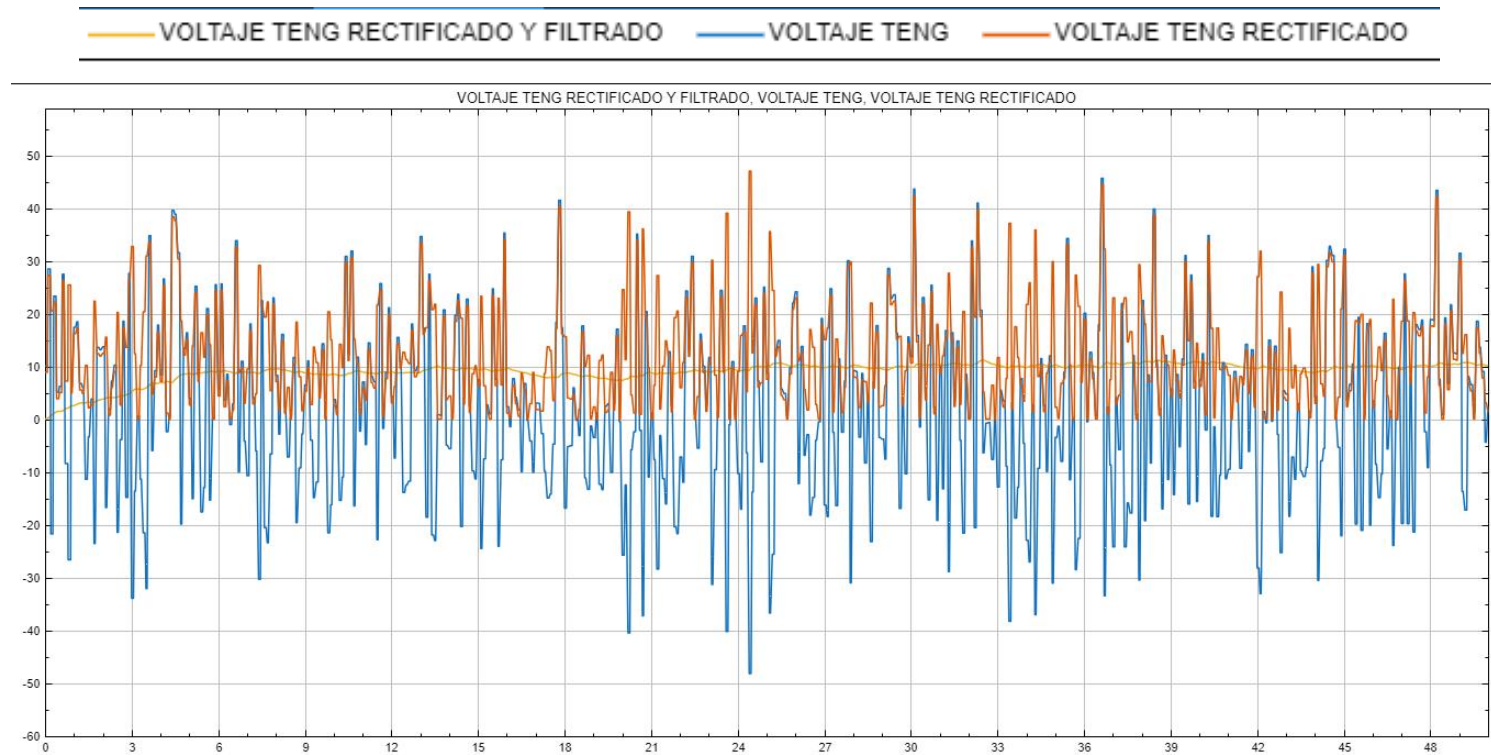


Figura. 24. Señales de voltaje del regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – SCOPE – SIMULINK fase rectificación y filtrado.

*Nota: Como se observa en la Figura 24 la gráfica de color azul es obtenida por el osciloscopio de SIMULINK en donde se tiene parte positiva y negativa, por su parte la gráfica de color anaranjado es la parte positiva rectificada sin fase de filtrado en donde se obtiene solo parte positiva por su parte la gráfica amarilla es la señal de voltaje rectificado y filtrado.*



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

La Figura 25 presenta los resultados tras la simulación del circuito regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG respecto a la corriente, en este caso se observa que la corriente tiene un pico de  $0.35\mu\text{A}$  en promedio correspondiente a la obtenida del TENG, tras el filtrado se logra suavizar parcialmente la corriente, eliminando parte del ruido y estabilizando levemente la corriente entregada al circuito la corriente resultante se encuentra entre los  $0.035\mu\text{A}$ , lo que demuestra las limitaciones del TENG en cuanto a su escalabilidad para aplicaciones prácticas de mayor consumo.

La Figura 26 muestra cómo evoluciona el voltaje de salida del circuito propuesto durante un intervalo de prueba. Inicialmente, se observa un incremento progresivo del voltaje hasta alcanzar una zona de estabilización en torno a los  $3.3\text{ V}$ , lo cual confirma que el regulador de voltaje está cumpliendo su función de estabilización en condiciones normales.

Las fluctuaciones menores que se presentan en la gráfica corresponden a las variaciones naturales en la entrada del sistema, así como a las características propias del circuito y sus componentes, como la resistencia serie equivalente, la calidad del filtrado, dichas variaciones pueden ser corregidas tras agregar un capacitor adicional sin embargo para el caso de estudio no es considerado.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



— CORRIENTE DEL TENG RECTIFICADO   
 — CORRIENTE DEL TENG RECTIFICADO Y FILTRADO

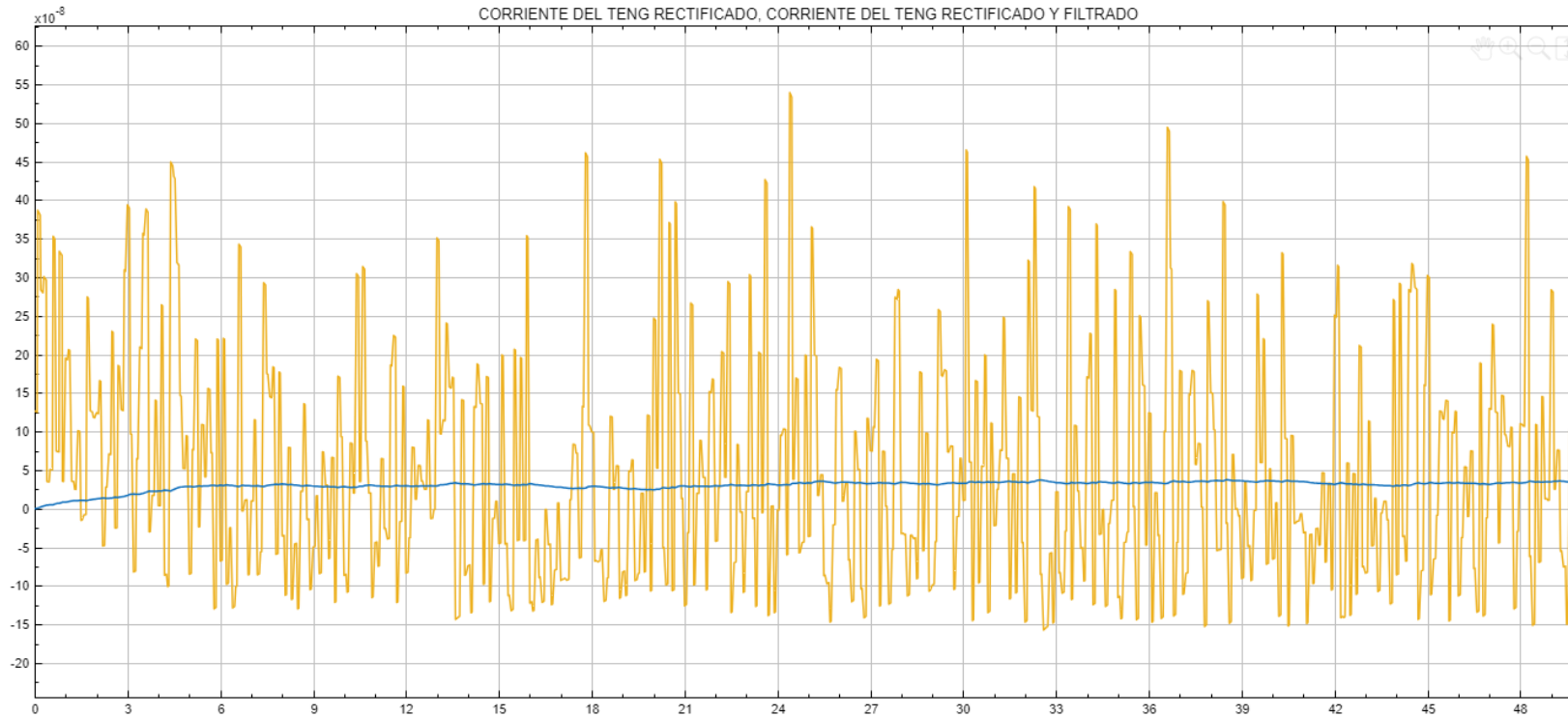


Figura. 25. Señales de corriente del regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – SCOPE – SIMULINK fase rectificación y filtrado.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



— VOLTAJE DE SALIDA

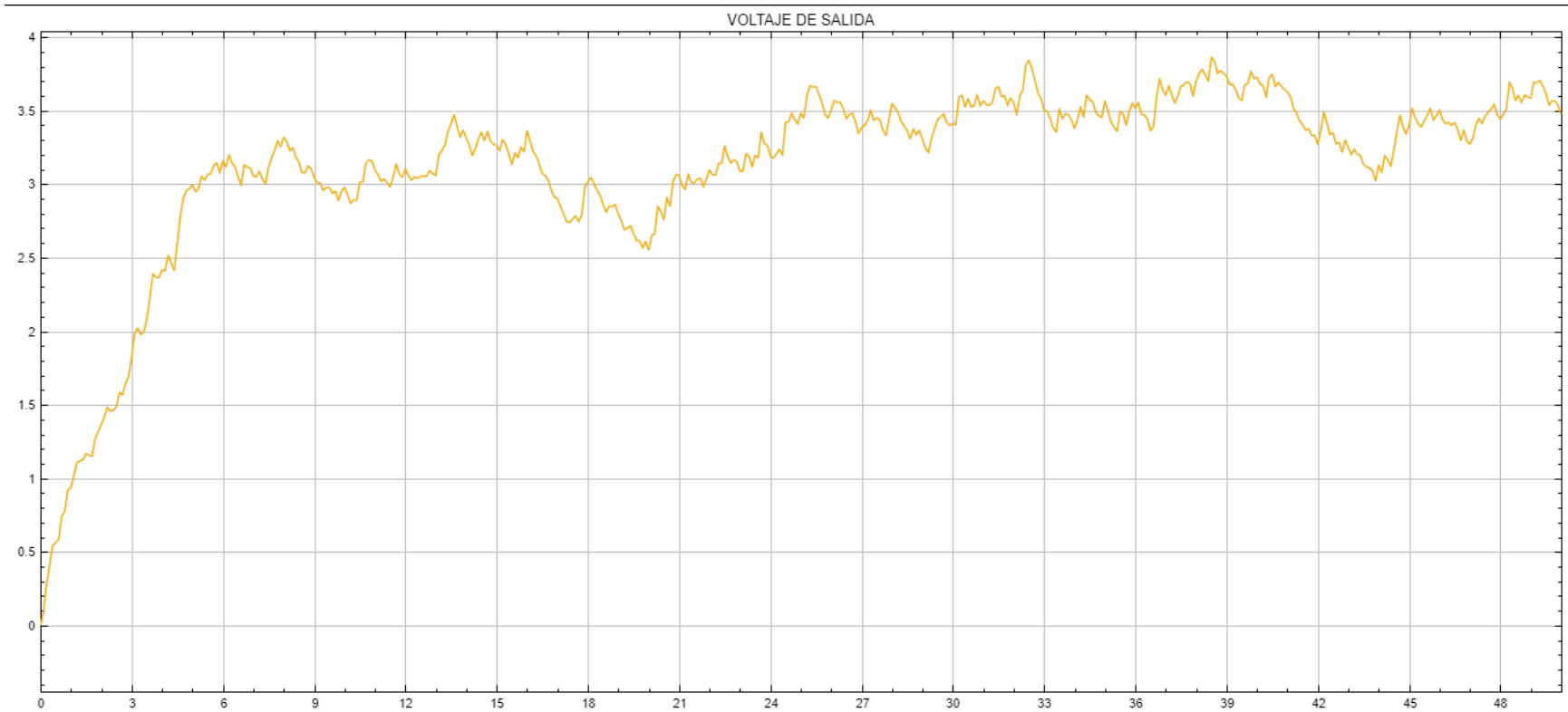


Figura. 26. Señales de voltaje del regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – SCOPE – SIMULINK fase de salida.



#### 4.6 Análisis de los resultados de las simulaciones

La señal generada por un generador triboeléctrico (TENG) presenta características similares a un ruido gaussiano debido a la naturaleza aleatoria del proceso triboeléctrico. Este tipo de generador convierte energía mecánica en energía eléctrica mediante el contacto y separación de dos materiales con diferente afinidad triboeléctrica. Sin embargo, factores como la rugosidad superficial, la presión de contacto, la velocidad de fricción, la humedad y otros parámetros ambientales influyen de manera aleatoria en la cantidad de carga transferida durante cada ciclo. Como resultado, la amplitud y duración de los pulsos eléctricos generados por el TENG varían en el tiempo, lo que provoca una señal con comportamiento pseudoaleatorio. Como se observa en el trabajo de investigación de “Nano generador triboeléctrico reciclado a base de polvo de cáscaras de girasol para recolección de energía” por Shaukat donde se observan señales similares a el ruido gaussiano.

Adicionalmente, el TENG opera típicamente en condiciones donde las señales eléctricas se ven afectadas por el entorno, introduciendo componentes adicionales de ruido térmico, electromagnético y vibracional. Estos factores externos, sumados al comportamiento inherente del sistema, refuerzan la apariencia estadística de la señal como una onda aleatoria centrada alrededor de una frecuencia mecánica dominante, pero con amplitudes variables. Aunque los pulsos pueden presentar cierta periodicidad si hay una fuente de excitación mecánica constante (por ejemplo, vibración a 15 Hz), la falta de uniformidad en cada ciclo provoca que la forma de la señal no sea perfectamente senoidal ni periódica.

Las simulaciones del circuito en Proteus y MATLAB/Simulink respectivamente, arrojan resultados favorables para el circuito regulador de voltaje con diodo Zener. En Proteus, la simulación del rectificador de onda completa sin filtro arrojó un voltaje de salida rectificado pulsante de 34.70 V, cercano al valor calculado de 34 V, con una corriente de 0.35  $\mu$ A dichos valores cumplen con los requerimientos con los valores calculados, además se observa la estabilidad y minimización de pérdidas, sin embargo, cabe aclarar que la señal obtenida tiene limitaciones en cuanto a la simulación de la señal de un generador triboeléctrico.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

La simulación en MATLAB/Simulink contrasta los resultados obtenidos en Proteus de forma precisa al emplear un modelo que tiene un comportamiento no lineal. A pesar de ello el rectificador de onda completa con filtro verifico las caídas de voltaje esperadas en los diodos y concordando con los valores calculados. El regulador con diodo Zener presentó una corriente de entrada con un pico de  $0.35 \mu\text{A}$ , consistente con los cálculos, y un voltaje de salida regulado de 5 V.

Los resultados obtenidos respaldan la elección del circuito seleccionado en primer lugar, existe una consistencia entre las simulaciones en Proteus y MATLAB y los cálculos teóricos a pesar de las limitaciones de Proteus en cuanto a la simulación de señales complejas. El análisis de pérdidas (Tabla 7) indica que el circuito con diodo Zener presenta las pérdidas más bajas ( $3.68 \mu\text{W}$ ), ideal para aplicaciones de bajo consumo como el sistema basado en TENG. La simplicidad del diseño del regulador con diodo Zener facilita su implementación en comparación con otras opciones que cuentan elementos adicionales de mayor consumo como el integrado NE555 para los convertidores Dc-Dc. La Tabla 6 respaldan la selección del regulador de voltaje con diodo Zener como el circuito más adecuado para el proyecto, debido a su bajo consumo y su sencillez.

Corriente Requerida (mA)	Cantidad de triboeléctricos Necesarios
1	2857
5	14285
10	28571
50	142857
100	285714

**TABLA 7.** Cantidad de triboeléctricos necesarios para generar 100mA de salida

Tras una breve evaluación lineal se obtuvo que para lograr el objetivo descrito en el alcance de 100mA, se requieren aproximadamente 285,714 triboeléctricos. Esto resalta la baja capacidad de corriente generada por cada unidad individual, lo que sugiere la necesidad de sistemas de acumulación y almacenamiento energético para hacer viable su uso en aplicaciones prácticas.



#### 4.7 Esquema Eléctrico del Circuito

A continuación, se presenta la descripción de los componentes y las conexiones del esquema eléctrico del circuito acondicionador.

##### 4.7.1 Descripción de los Componentes y Conexiones

El circuito cuenta con un puente de diodos, un capacitor de filtrado, un regulador de voltaje con diodo Zener y un convertidor DC-DC. La conexión de estos elementos permite transformar la señal generada de 15 Hz por el sistema triboeléctrico en una salida en corriente continua.

- **Puente de diodos:** Se encarga de la rectificación de la señal de corriente alterna generada por el sistema triboeléctrico, convirtiéndola en una señal pulsante de corriente continua.
- **Capacitor de filtrado:** Reduce la ondulación del voltaje rectificado, proporcionando una señal más estable.
- **Inductor de filtrado:** Suaviza la ondulación del voltaje rectificado, proporcionando una señal más estable.
- **Regulador de voltaje con diodo Zener:** Mantiene un voltaje de salida constante, adecuado para la alimentación de cargas de baja potencia.

Material	Características
Puente de diodos	Diodos Zener 1n4148
Capacitores	10nF
Diodo Zener	1N4733A
Resistor variable	potenciómetro 10k $\Omega$
Transistor NPN	Tip 31c

**TABLA 8. MATERIALES REALES**

En el circuito acondicionador de señal para el sistema triboeléctrico, se utilizaron componentes seleccionados por su disponibilidad, rendimiento y adecuación a las bajas potencias generadas. El puente de diodos fue construido con diodos 1N4148, debido a su velocidad de conmutación y baja capacitancia, lo que permite realizar una rectificación de la señal alterna proveniente del TENG hacia una señal de corriente continua pulsante.



Para el filtrado de la señal rectificadora, se empleó un condensador de 10 nF, el cual atenúa las fluctuaciones de voltaje y reduce el rizado residual. La regulación de voltaje se logró mediante un diodo Zener 1N4733A, que proporciona un voltaje de referencia constante en este caso 3.3 V. El control de corriente y la amplificación en la etapa final del circuito se efectuaron utilizando un transistor TIP31C, un dispositivo NPN de potencia que permite controlar el valor de salida, sin comprometer la estabilidad del sistema. Finalmente, se incorporó un potenciómetro de 10 k $\Omega$  como resistencia variable, el cual permite ajustar el voltaje de salida según los requerimientos específicos del circuito, facilitando el proceso de calibración en función de la carga conectada.

#### 4.7.2 Esquema Eléctrico

El esquema eléctrico del circuito diseñado se representa mediante un diagrama donde se detallan las conexiones entre los diferentes componentes electrónicos utilizados para el acondicionamiento de la energía generada por el sistema triboeléctrico. En este diagrama se incluyen los dispositivos de rectificación, filtrado y conversión de voltaje, con sus respectivas interconexiones, valores de componentes y configuraciones operativas.

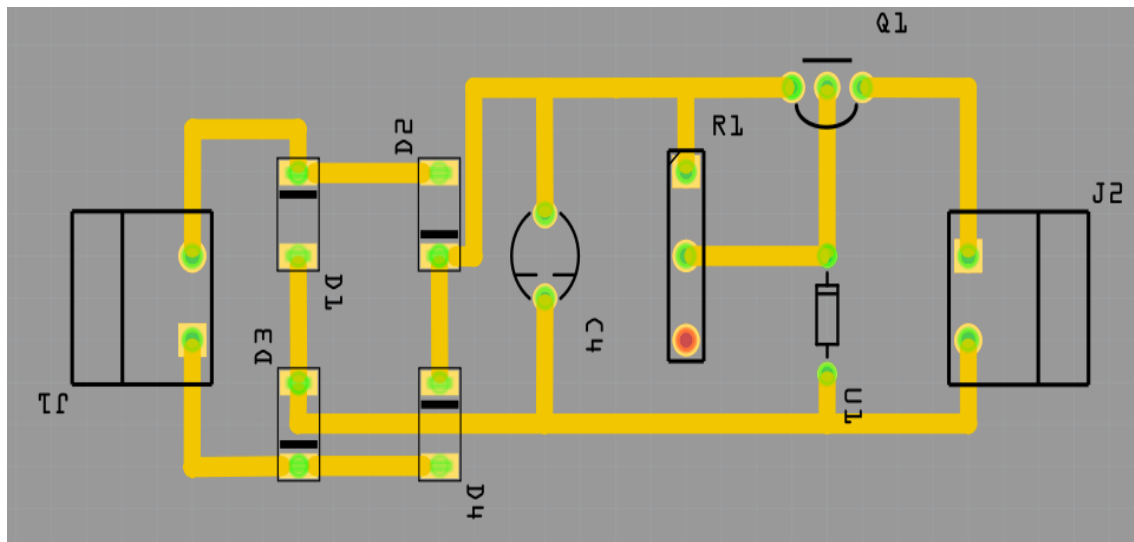


Figura. 27. Regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – PCB

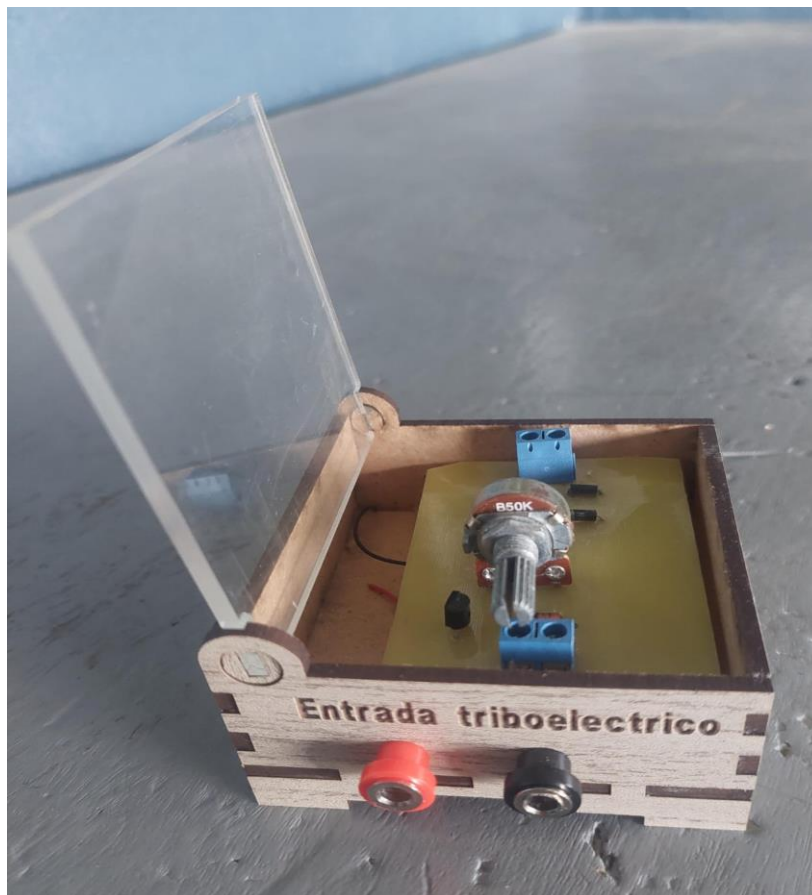
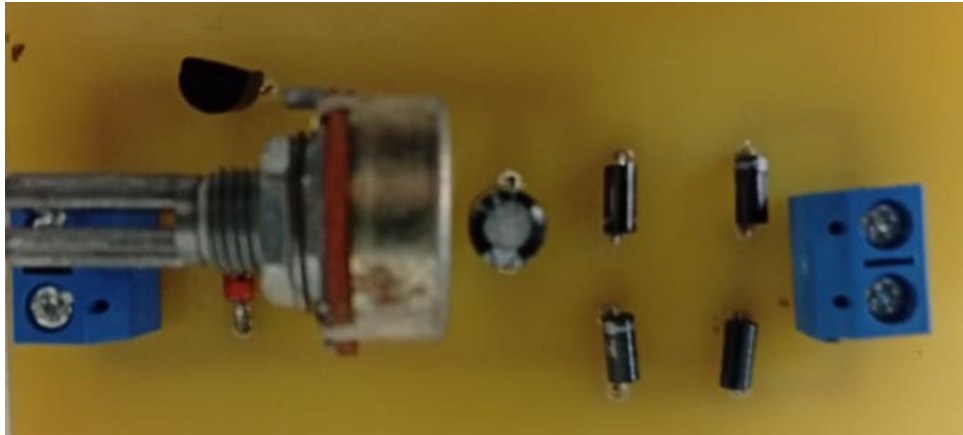


Figura. 28. Regulador de voltaje con diodo Zener conectado al TENG – Circuito impreso

#### 4.8 Pruebas Físicas del Circuito

Para validar el desempeño del circuito, se realizaron pruebas físicas en laboratorio bajo condiciones controladas. La metodología seguida incluyó los siguientes pasos:



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

1. **Montaje del circuito en una PCB:** Se ensamblaron los componentes de acuerdo con el esquema eléctrico diseñado en un circuito impreso para asegurar que sus conexiones sean estables.
2. **Medición de parámetros eléctricos:** Se utilizaron instrumentos como multímetros y osciloscopios para medir el voltaje de entrada, el voltaje de salida y la corriente suministrada por el circuito.
3. **Comparación con los valores teóricos y simulados:** Se analizaron las mediciones obtenidas y se contrastaron con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en Proteus y MATLAB.
4. **Pruebas de carga:** Se conectaron leds de carga ya que no necesitan de mucha corriente para encenderse.
5. **Evaluación de estabilidad y eficiencia:** Se evaluó el comportamiento del circuito en diferentes condiciones de carga para determinar si era capaz de suplir dichas cargas.

#### **4.9 Salida de voltaje del TENG**

La Figura 27 corresponde a una captura de señal en un osciloscopio HANTEK modelo 2D82AUTO, donde se observa la respuesta del tiempo y del voltaje de salida del TENG. La señal medida en el canal CH1, representada en color amarillo, exhibe un comportamiento de similar a él visto en las simulaciones en donde se observa una señal de tipo ruido gaussiano los niveles de voltaje varían en función del tiempo. Como se observa en la Figura 27 existen oscilaciones abruptas lo que confirma el comportamiento del TENG, en valores pico alcanza un valor de 35 V.

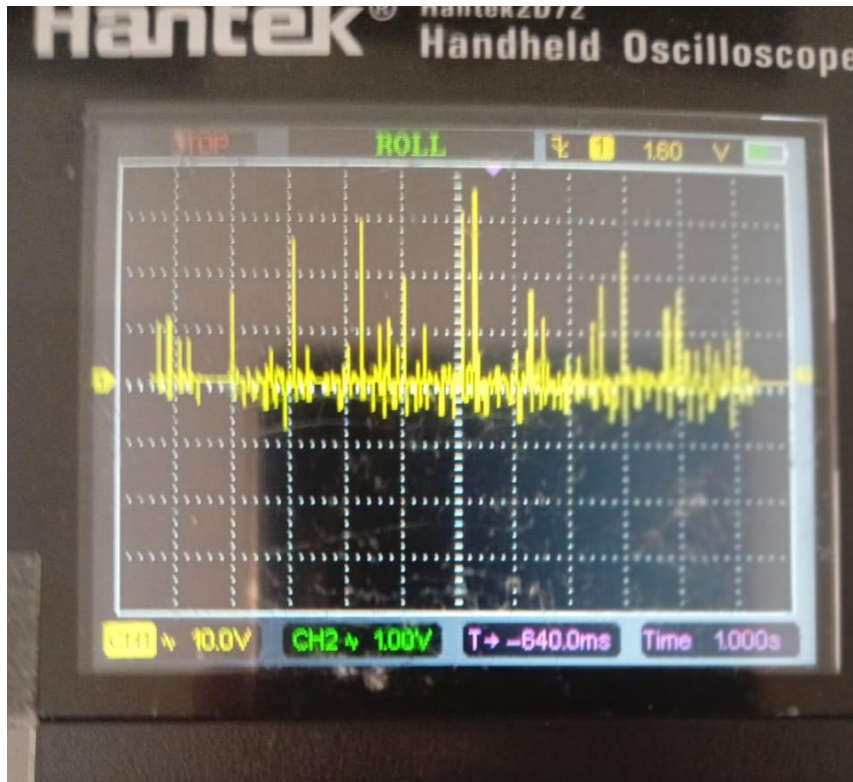


Figura. 29. Señal de salida tomada del TENG por un osciloscopio HANTEK modelo 2D82AUTO. Los resultados experimentales muestran que el funcionamiento del TENG el cual cumple con lo descrito previamente.

#### **4.10 Salida de voltaje del circuito**

La Figura 28 muestra la captura de señal en un osciloscopio HANTEK modelo 2D82AUTO, donde se observa la respuesta del tiempo y del voltaje de salida del circuito de acondicionamiento. La señal medida en el canal CH1, representada en color amarillo, exhibe un comportamiento de similar a él visto en las simulaciones los niveles de voltaje no varían en función del tiempo. Como se observa en la Figura 28 el voltaje de salida es estable rondando valores de 3 V a 3.2 V aproximadamente.

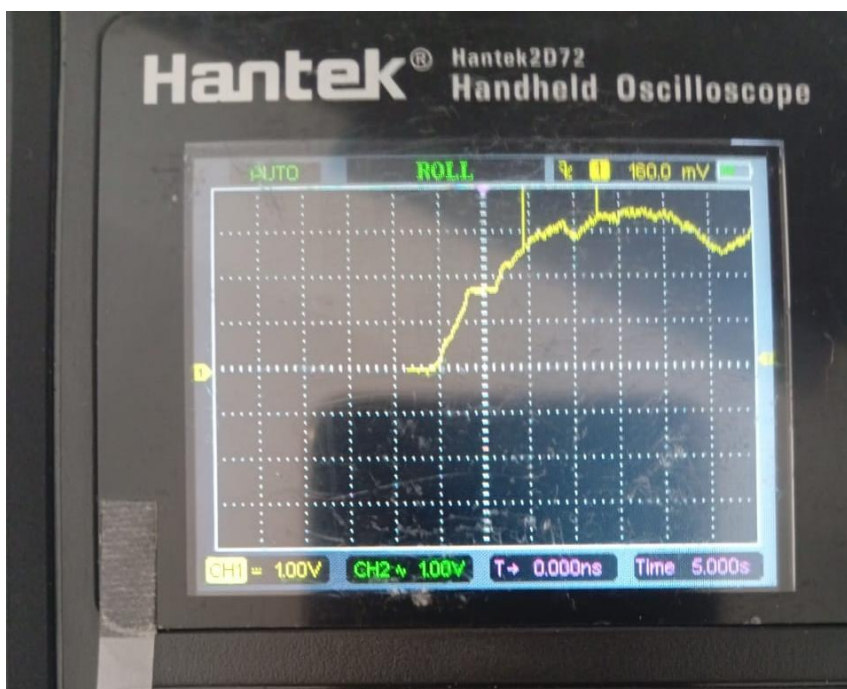


Figura. 30. Señal de salida tomada del circuito de acondicionamiento por un osciloscopio HANTEK modelo 2D82AUTO.

El circuito de acondicionamiento cumplió con los valores de salida esperados, con una reducción efectiva de la ondulación de voltaje y una regulación estable del voltaje de salida. Se observaron variaciones en los valores medidos en comparación con los obtenidos en simulación, atribuidas a tolerancias en los componentes y pérdidas en conexiones físicas.

Se verificó que el regulador de voltaje con diodo Zener proporciona un voltaje estable de aproximadamente 3.3 V, adecuado para aplicaciones de bajo consumo. Asimismo, el convertidor DC-DC logró ajustar el voltaje de salida según los requerimientos, permitiendo alimentar cargas específicas.

Parámetro	Simulación	Pruebas Reales	Diferencia
Voltaje de salida (v)	3.3 v	3.20 v	0.1 v
Corriente de salida (mA)	95 nA	80 nA	15 nA
Ondulación del voltaje (mv)	15 mv	20 mv	5 mv
Eficiencia del convertidor (%)	88%	80%	3%
Estabilidad del voltaje	Estable	variabilidad	Media

**TABLA 9.** Valores de salida del circuito



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

#### **4.11 Comparación entre Simulación y Pruebas Reales**

El análisis comparativo entre los resultados obtenidos en las simulaciones y las mediciones experimentales evidencia una correlación significativa en el comportamiento del circuito, lo que valida el diseño teórico y confirma su funcionalidad dentro de los parámetros establecidos. No obstante, se identificaron discrepancias menores en los valores de voltaje y corriente, los cuales pueden ser atribuidos a factores como la resistencia interna de los componentes pasivos, tolerancias, y pérdidas asociadas a las interconexiones del montaje físico. Las pruebas realizadas confirman que el circuito es capaz de convertir la señal con frecuencia de 15 Hz a una señal continua. Sin embargo, luego de las pruebas se observó que un solo triboeléctricos no es capaz de alimentar un circuito con mayor demanda de corriente, por ende se recomienda usar al menos 285,714 triboeléctricos de las características descritas en la Tabla 3 se recomienda una optimización en el diseño de la PCB, enfocada en la reducción de interferencias y pérdidas por inductancia parásita, así como una selección más precisa de componentes con menor dispersión en sus características eléctricas, todo esto con el fin de obtener una fuente de energía mayor y con mayores capacidades de potencia.

Adicionalmente, al evaluar la cantidad de triboeléctricos necesarios para alcanzar corrientes para aplicaciones prácticas, se determinó que, para generar 100 mA de corriente, se necesitan aproximadamente 285,714 triboeléctricos, considerando que cada dispositivo genera en promedio 350 nA. Esta cifra evidencia la baja capacidad de corriente de los sistemas triboeléctricos individuales.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

### **Conclusiones**

El análisis comparativo de la literatura evidenció que los sistemas triboeléctricos DC generan tensiones pulsantes, con corrientes en el rango de cientos de nA y frecuencias típicas de 10–50 Hz. Esta baja corriente requiere de circuitos de bajo consumo de los cuales se identificaron tres topologías principales que son: puente rectificador clásico, rectificador con MOSFET síncrono y limitación con diodo Zener concluyéndose que esta última ofrece la menor disipación de potencia sin comprometer la estabilidad de salida, por lo que constituye la base de diseño más adecuada para aplicaciones de baja potencia derivadas de TENG.

La investigación permitió la evaluación y el diseño circuitos de acondicionamiento para la energía generada por TENGs. Las simulaciones en Proteus y MATLAB mostraron que el regulador con diodo Zener disipa solo 3.68  $\mu$ W, convirtiéndose en la opción más eficiente con relación a los otros circuitos, se obtuvo una salida regulada de 3.3 V DC (rizado  $\leq 5$  %), suficiente para sensores de baja potencia. Sin embargo, la corriente individual del TENG de 350 nA limita el alcanzar 100 mA ya que se requiere de 2285714 generadores en paralelo.

La implementación del circuito acondicionador con diodo Zener corrobora los resultados del diseño y de la simulación, con una salida de 3,3 v DC, rizado  $\leq 5$  % y desvío  $< 3$  %. Las pequeñas discrepancias se deben a la ESR de los componentes y a pérdidas en el PCB, por lo que conviene usar elementos de menor ESR y optimizar el trazado de cobre, respecto a la corrientes tiene valores inferiores a 350 nA dichos resultados evidencian la limitada escalabilidad de los generadores triboeléctricos, y su baja eficiencia en cuanto a generación, por ende se concluye que con la tecnología actual la generación de energía eléctrica con generadores triboeléctricos es poco eficiente.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### **Recomendaciones**

Se recomienda investigar arquitecturas modulares de generadores triboeléctricos (TENG) en arreglos combinados paralelamente, utilizando ingeniería de superficies triboeléctricas mediante polímeros dopados o nano rugosidades funcionales, con el objetivo de reducir la resistencia serie efectiva y aumentar la densidad de carga transferida por ciclo. Dado que la corriente generada por cada TENG es extremadamente baja (350 nA por unidad), se sugiere emplear configuraciones en paralelo de múltiples generadores para incrementar la densidad de corriente y mejorar su aplicabilidad en sistemas electrónicos de mayor demanda. Además, se propone explorar el uso de sistemas de almacenamiento de energía como super-capacitores o baterías de bajo consumo, así como convertidores DC-DC de alta eficiencia, para gestionar de manera óptima la energía recolectada y maximizar su uso en aplicaciones prácticas. Finalmente, se recomienda investigar estrategias híbridas que integren TENG con otros micro generadores, como los piezoeléctricos o termoeléctricos, y aplicar técnicas de gestión energética mediante aprendizaje automático para optimizar la conversión y el despacho de energía en entornos dinámicos.



### Referencias bibliográficas.

- [1] L. Z. D. Liu, Z. L. Wang y J. Wang, "Nanogenerador triboeléctrico: de corriente alterna a corriente continua," ed. *iScience*, 2021.
- [2] W. He, "Boosting output performance of sliding mode triboelectric nanogenerator by charge space-accumulation effect," ed: *Nature Communications*.
- [3] G. Liu, "Power cables for triboelectric nanogenerator networks for large-scale blue energy harvesting," ed. *Nano Energy*, 2021.
- [4] X. L. W. X. L. Cao, R. N. Li, Z. L. Wang, and Z. Y. Wu, "Thermal-mechanical-electrical energy conversion system based on Curie effect and soft-contact rotary triboelectric nanogenerator," ed: *Nano Research*, 2023.
- [5] B. Cheng, ""High performance temperature difference triboelectric nanogenerator," vol. 12, ed: *Nature Communications*, 2021.
- [6] X. Y. Li, "Long-Lifetime Triboelectric Nanogenerator Operated in Conjunction Modes and Low Crest Factor," ed, 2020.
- [7] W. Liu, "Integrated charge excitation triboelectric nanogenerator," ed, 2019.
- [8] H. Y. Wu, "Achieving Remarkable Charge Density via Self-Polarization of Polar High- $\kappa$  Material in a Charge-Excitation Triboelectric Nanogenerator," ed, 2022.
- [9] W. C. He, "Large Harvested Energy by Self-Excited Liquid Suspension Triboelectric Nanogenerator with Optimized Charge Transportation Behavior," ed, 2023.
- [10] W. Jiang *et al.*, "Fully Bioabsorbable Natural-Materials-Based Triboelectric Nanogenerators," *Advanced Materials*, Article vol. 30, no. 32, 2018, Art no. 1801895, doi: 10.1002/adma.201801895.
- [11] F. Y. W. J. Li, Y. Y. Xiang, W. Zhang, K. Loos, "Enhanced triboelectric nanogenerators based on 2D smectite clay nanosheets with a strong intrinsic negative surface charge," ed, 2023.
- [12] J. Zhao, "Self-powered sensor for monitoring wind vibration on transmission lines based on an electromagnetic-triboelectric hybrid generator," ed, 2023.
- [13] Y. Q. Wang, "High-voltage output triboelectric nanogenerator with DC/AC optimal combination method," ed, 2022.
- [14] S. Lu, "Regulating the high-voltage and high-impedance characteristics of triboelectric nanogenerator toward practical self-powered sensors," ed, 2021.
- [15] X. P. Fu, "Ultra-Robust and High-Performance Rotational Triboelectric Nanogenerator by Bearing Charge Pumping," ed, 2023.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

- [16] G. P. Tan and J. J. P. Bautista, "Mobile Phone Charging via Utilization of Triboelectric Effect in Harnessing Electrical Energy from Disposed Human Hair," in *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, 28-31 Oct. 2018 2018, pp. 2297-2301, doi: 10.1109/TENCON.2018.8650095.
- [17] Z. Wu, J. Bao, Y. Zhang, Y. Chen, and X. Zhang, "Droplet Rapid-Analysis Method of Metal-Salt Solution Based on Triboelectric Effect," in *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)*, 23-27 June 2019 2019, pp. 1266-1269, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808301.
- [18] M. Molina, "Modelamiento de un sistema de nanogeneradores eléctricos basado en los efectos tribo y piezoeléctrico," Universidad Técnica del Norte, 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11214>
- [19] M. J. Morcillo Ortega and A. Gallego Pico, *Química básica*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia (in es), 2018, p. 968.
- [20] J. G. Roederer, *Electromagnetismo elemental*. Eudeba (in es), 2020, p. 405.
- [21] G. Queijo Garcia, *Fundamentos de tecnología eléctrica*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia (in es), 2018, p. 396.
- [22] L. W. Zhong, "Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors. ACS Publications," ed, 2019.
- [23] V. Natraj, "Introducción a los Nanogeneradores.," ed: Instituto Nacional de Ingeniería, 2019.
- [24] Z. L. Wang, "Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors," ed, 2019.
- [25] R. D. I. G. Dharmasena and S. R. P. Silva, "Towards optimized triboelectric nanogenerators," *Nano Energy*, vol. 62, pp. 530-549, 2019/08/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.05.057>.
- [26] A. Ghaffarinejad, J. Yavand Hasani, D. Galayko, and P. Basset, "Superior performance of half-wave to full-wave rectifier as a power conditioning circuit for triboelectric nanogenerators: Application to contact-separation and sliding mode TENG," *Nano Energy*, vol. 66, p. 104137, 2019/12/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104137>.
- [27] L. Xu *et al.*, "Coupled Triboelectric Nanogenerator Networks for Efficient Water Wave Energy Harvesting," *ACS Nano*, Article vol. 12, no. 2, pp. 1849-1858, 2018, doi: 10.1021/acsnano.7b08674.
- [28] P. A. San Miguel, *Electrónica Aplicada*. 2016.
- [29] R. Mijarez Castro, *Electronica*. Grupo Editorial Patria (in es), 2015, p. 421.
- [30] M. Garcia Lorenzo and P. Huerta Pellitero, *Electronica*. RA-MA Editorial (in es), 2015, p. 287.
- [31] F. E. Hoyos Velasco, "Técnicas de filtrado de IEM en convertidores electrónicos de potencia. Ingeniería e Investigación, 30 (2), 168-177," ed: D - Ingeniería e Investigación, 2010, p. 11.
- [32] M. H. Rashid, "Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones," ed: Pearson Educación, 2002.
- [33] A. Pozo Ruz and E. Casilari Perez, *Problemas de fundamentos de electrónica analógica y electrónica de potencia*. Servicio de Publicaciones y Divulgación Científica de la Universidad de Málaga (in es), 2017, p. 357.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

- [34] S. Zhang *et al.*, "Harvesting Multidirectional Wind Energy Based on Flow-Induced Vibration Triboelectric Nanogenerator with Directional Tuning Mechanism," *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 115974, 2024/10/11/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115974>.
- [35] "MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink," (in es).
- [36] "Introducción a MATLAB - MathWorks América Latina."
- [37] P. I. Pincay Llanos y J. P. Granes Pico, "*Diseño electrónico de un dispositivo medidor de factor de potencia para la industria*", Trabajo de Integración Curricular, Carrera de Ingeniería Electrónica y Automatización, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, sept. 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/21681/1/T-UCSG-PRE-TEC-CIEA-10.pdf>.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ANEXO I**



**KBPC40, 50/W SERIES**  
**40, 50A HIGH CURRENT BRIDGE RECTIFIER**

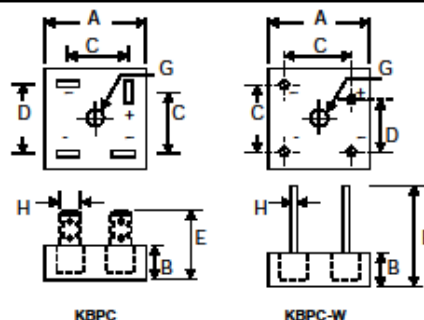
**Features**

- Diffused Junction
- Low Reverse Leakage Current
- Low Power Loss, High Efficiency
- Electrically Isolated Metal Case for Maximum Heat Dissipation
- Case to Terminal Isolation Voltage 2500V
- UL Recognized File # E157705

**Mechanical Data**

- Case: Metal Case with Electrically Isolated Epoxy
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Symbols Marked on Case
- Mounting: Through Hole for #10 Screw
- Weight: KBPC 31.6 grams (approx.)  
KBPC-W 28.5 grams (approx.)
- Marking: Type Number

"W" Suffix Designates Wire Leads  
 No Suffix Designates Faston Terminals



Dim	KBPC		KBPC-W	
	Min	Max	Min	Max
A	28.40	28.70	28.40	28.70
B	10.97	11.23	10.97	11.23
C	15.70	16.70	17.10	19.10
D	17.50	18.50	10.90	11.90
E	22.86	25.40	30.50	—
G	Hole for #10 screw, 5.080 Nominal			
H	6.35 Typical	0.970	1.070	—

All Dimension in mm

**Maximum Ratings and Electrical Characteristics** @T<sub>a</sub>=25°C unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
 For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristics	Symbol	-00/W	-01/W	-02/W	-04/W	-06/W	-08/W	-10/W	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V <sub>RRM</sub>								
Working Peak Reverse Voltage	V <sub>RWM</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	V
DC Blocking Voltage	V <sub>R</sub>								
RMS Reverse Voltage	V <sub>R(RMS)</sub>	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectifier Output Current @T <sub>C</sub> = 55°C	I <sub>O</sub>				40				A
					50				
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	I <sub>FSM</sub>				400				A
					400				
Forward Voltage Drop (per element)	V <sub>FM</sub>				1.2				V
Peak Reverse Current @T <sub>C</sub> = 25°C	I <sub>RM</sub>				10				µA
At Rated DC Blocking Voltage					1.0				mA



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



ANEXO II



DATA SHEET

[www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

**Bridge Rectifiers, 0.5 A**

**MB1S-MB8S**



SOIC4 W  
CASE 751EP

**Description**

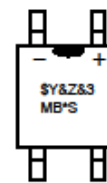
The MB family of bridge rectifiers is a 0.5 A rectifier family that achieves high surge current absorption within a very small foot print. Within its small 35 mm<sup>2</sup> form factor, the MB family shines in its surge capability. In order to absorb high surge currents, the design supports a 35 A I<sub>FSM</sub> rating and a 5.0 A<sup>2</sup>Sec I<sup>2</sup>T rating. Devices in the family are also rated to breakdown voltages of up to 1000 V. These features make the MB family ideal for small power supplies that need a little extra surge capability.

For higher I<sub>FAV</sub> current ratings, lower profile packaging, or lower V<sub>F</sub> values, explore the onsemi MDB family of bridge rectifiers. For improved V<sub>F</sub> and efficiency values in the MB package or even higher surge capability, ask about onsemi's pending MBxSV family.

**Features**

- Low-Leakage
- Surge Overload Rating: 35 A peak
- Ideal for Printed Circuit Board
- UL Certified: UL #E258596
- This Device is Pb-Free and RoHS Compliant

**MARKING DIAGRAM**



- \$Y = Logo
- &Z = Assembly Plant Code
- &3 = 3-Digit Date Code (Year & Week)
- MB\*S = Specific Device Code
- \* = 1/2/4/6/8

**ORDERING INFORMATION**

See detailed ordering and shipping information on page 2 of this data sheet.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



ANEXO III



DATA SHEET  
[www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

**Bridge Rectifiers, 0.5 A**  
**MB1S-MB8S**



SOIC4W  
CASE 751EP

**Description**

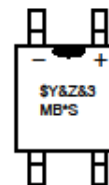
The MB family of bridge rectifiers is a 0.5 A rectifier family that achieves high surge current absorption within a very small foot print. Within its small 35 mm<sup>2</sup> form factor, the MB family shines in its surge capability. In order to absorb high surge currents, the design supports a 35 A I<sub>FSM</sub> rating and a 5.0 A<sup>2</sup>Sec I<sup>2</sup>T rating. Devices in the family are also rated to breakdown voltages of up to 1000 V. These features make the MB family ideal for small power supplies that need a little extra surge capability.

For higher I<sub>FAV</sub> current ratings, lower profile packaging, or lower V<sub>F</sub> values, explore the onsemi MDB family of bridge rectifiers. For improved V<sub>F</sub> and efficiency values in the MB package or even higher surge capability, ask about onsemi's pending MBxSV family.

**Features**

- Low-Leakage
- Surge Overload Rating: 35 A peak
- Ideal for Printed Circuit Board
- UL Certified: UL #E258596
- This Device is Pb-Free and RoHS Compliant

**MARKING DIAGRAM**



- \$Y = Logo
- &Z = Assembly Plant Code
- &3 = 3-Digit Data Code (Year & Week)
- MB\*S = Specific Device Code
- \* = 1,2,4,6,8

**ORDERING INFORMATION**

See detailed ordering and shipping information on page 2 of this data sheet.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ANEXO IV**



**KBPC40, 50/W SERIES**  
**40, 50A HIGH CURRENT BRIDGE RECTIFIER**

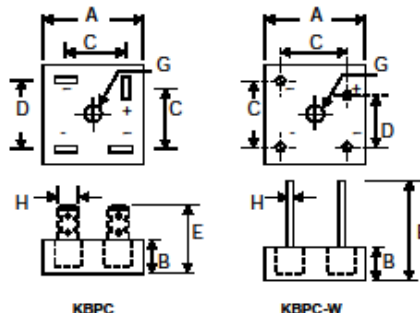
**Features**

- Diffused Junction
- Low Reverse Leakage Current
- Low Power Loss, High Efficiency
- Electrically Isolated Metal Case for Maximum Heat Dissipation
- Case to Terminal Isolation Voltage 2500V
- UL Recognized File # E157705

**Mechanical Data**

- Case: Metal Case with Electrically Isolated Epoxy
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Symbols Marked on Case
- Mounting: Through Hole for #10 Screw
- Weight: KBPC 31.6 grams (approx.)  
KBPC-W 28.5 grams (approx.)
- Marking: Type Number

\*W\* Suffix Designates Wire Leads  
 No Suffix Designates Faston Terminals



Dim	KBPC		KBPC-W	
	Min	Max	Min	Max
A	28.40	28.70	28.40	28.70
B	10.97	11.23	10.97	11.23
C	15.70	16.70	17.10	19.10
D	17.50	18.50	10.90	11.90
E	22.86	25.40	30.50	—
G	Hole for #10 screw, 5.080 Nominal			
H	6.35 Typical		0.970 1.070	

All Dimension in mm

**Maximum Ratings and Electrical Characteristics** @T<sub>A</sub>=25°C unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
 For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristics	Symbol	-00/W	-01/W	-02/W	-04/W	-06/W	-08/W	-10/W	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V <sub>RRM</sub>								V
Working Peak Reverse Voltage	V <sub>RWM</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	
DC Blocking Voltage	V <sub>R</sub>								
RMS Reverse Voltage	V <sub>R(RMS)</sub>	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectifier Output Current @T <sub>C</sub> = 55°C	I <sub>O</sub>				40				A
					50				
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	I <sub>FSM</sub>				400				A
					400				
Forward Voltage Drop (per element)	V <sub>FM</sub>				1.2				V
Peak Reverse Current @T <sub>C</sub> = 25°C	I <sub>RM</sub>				10				μA
At Rated DC Blocking Voltage @T <sub>C</sub> = 125°C					1.0				mA



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ANEXO V**



**KBPC40, 50/W SERIES**  
**40, 50A HIGH CURRENT BRIDGE RECTIFIER**

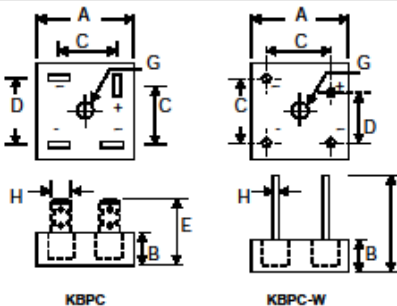
**Features**

- Diffused Junction
- Low Reverse Leakage Current
- Low Power Loss, High Efficiency
- Electrically Isolated Metal Case for Maximum Heat Dissipation
- Case to Terminal Isolation Voltage 2500V
- UL Recognized File # E157705

**Mechanical Data**

- Case: Metal Case with Electrically Isolated Epoxy
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Symbols Marked on Case
- Mounting: Through Hole for #10 Screw
- Weight: KBPC 31.6 grams (approx.)  
KBPC-W 28.5 grams (approx.)
- Marking: Type Number

"W" Suffix Designates Wire Leads  
 No Suffix Designates Faston Terminals



Dim	KBPC		KBPC-W	
	Min	Max	Min	Max
A	28.40	28.70	28.40	28.70
B	10.97	11.23	10.97	11.23
C	15.70	16.70	17.10	19.10
D	17.50	18.50	10.90	11.90
E	22.86	25.40	30.50	—
G	Hole for #10 screw, 5.08Ø Nominal			
H	6.35 Typical		0.97Ø 1.07Ø	

All Dimension in mm

**Maximum Ratings and Electrical Characteristics** @T<sub>c</sub>=25°C unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
 For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristics	Symbol	-00/W	-01/W	-02/W	-04/W	-06/W	-08/W	-10/W	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V <sub>RRM</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	V
Working Peak Reverse Voltage	V <sub>WRM</sub>								
DC Blocking Voltage	V <sub>R</sub>								
RMS Reverse Voltage	V <sub>RRMS</sub>	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectifier Output Current @T <sub>c</sub> = 55°C	I <sub>O</sub>				40				A
					50				
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	I <sub>FSM</sub>				400				A
					400				
Forward Voltage Drop (per element)	V <sub>FM</sub>				1.2				V
Peak Reverse Current	I <sub>RM</sub>				10				µA
At Rated DC Blocking Voltage					1.0				mA



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**ANEXO VI**

Philips Semiconductors Linear Products

Product specification

**Timer**

**NE/SA/SE555/SE555C**

**DESCRIPTION**

The 555 monolithic timing circuit is a highly stable controller capable of producing accurate time delays, or oscillation. In the time delay mode of operation, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For a stable operation as an oscillator, the free running frequency and the duty cycle are both accurately controlled with two external resistors and one capacitor. The circuit may be triggered and reset on falling waveforms, and the output structure can source or sink up to 200mA.

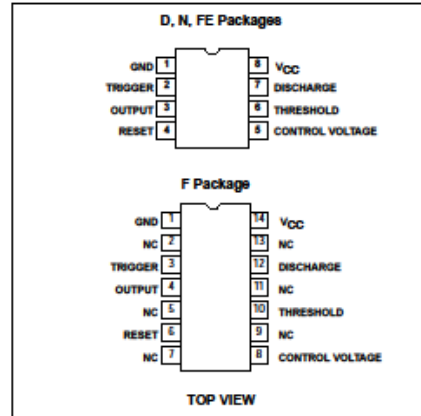
**FEATURES**

- Turn-off time less than 2µs
- Max. operating frequency greater than 500kHz
- Timing from microseconds to hours
- Operates in both astable and monostable modes
- High output current
- Adjustable duty cycle
- TTL compatible
- Temperature stability of 0.005% per °C

**APPLICATIONS**

- Precision timing
- Pulse generation
- Sequential timing
- Time delay generation
- Pulse width modulation

**PIN CONFIGURATIONS**



**ORDERING INFORMATION**

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
8-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0 to +70°C	NE555D	0174C
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to +70°C	NE555N	0404B
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +85°C	SA555N	0404B
8-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +85°C	SA555D	0174C
8-Pin Hermetic Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE555CFE	
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	SE555CN	0404B
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	SE555N	0405B
8-Pin Hermetic Cerdip	-55°C to +125°C	SE555FE	
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0 to +70°C	NE555F	0581B
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE555F	0581B
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE555CF	0581B



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ANEXO VII**



DATA SHEET

[www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

**Bridge Rectifiers, 0.5 A**

**MB1S-MB8S**

**Description**

The MB family of bridge rectifiers is a 0.5 A rectifier family that achieves high surge current absorption within a very small foot print. Within its small 35 mm<sup>2</sup> form factor, the MB family shines in its surge capability. In order to absorb high surge currents, the design supports a 35 A I<sub>FSM</sub> rating and a 5.0 A<sup>2</sup>Sec I<sup>2</sup>T rating. Devices in the family are also rated to breakdown voltages of up to 1000 V. These features make the MB family ideal for small power supplies that need a little extra surge capability.

For higher I<sub>FAV</sub> current ratings, lower profile packaging, or lower V<sub>F</sub> values, explore the onsemi MDB family of bridge rectifiers. For improved V<sub>F</sub> and efficiency values in the MB package or even higher surge capability, ask about onsemi's pending MBxSV family.

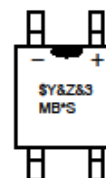
**Features**

- Low-Leakage
- Surge Overload Rating: 35 A peak
- Ideal for Printed Circuit Board
- UL Certified: UL #E258596
- This Device is Pb-Free and RoHS Compliant



SOIC4 W  
CASE 751EP

**MARKING DIAGRAM**



- \$Y = Logo
- &Z = Assembly Plant Code
- &3 = 3-Digit Date Code (Year & Week)
- MB\*S = Specific Device Code
- \* = 1/2/H/B/B

**ORDERING INFORMATION**

See detailed ordering and shipping information on page 2 of this data sheet.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**ANEXO VIII**



DATA SHEET  
[www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

**Bridge Rectifiers, 0.5 A**

**MB1S-MB8S**

**Description**

The MB family of bridge rectifiers is a 0.5 A rectifier family that achieves high surge current absorption within a very small foot print. Within its small 35 mm<sup>2</sup> form factor, the MB family shines in its surge capability. In order to absorb high surge currents, the design supports a 35 A I<sub>FSM</sub> rating and a 5.0 A<sup>2</sup>Sec I<sup>2</sup>T rating. Devices in the family are also rated to breakdown voltages of up to 1000 V. These features make the MB family ideal for small power supplies that need a little extra surge capability.

For higher I<sub>FAV</sub> current ratings, lower profile packaging, or lower V<sub>F</sub> values, explore the onsemi MDB family of bridge rectifiers. For improved V<sub>F</sub> and efficiency values in the MB package or even higher surge capability, ask about onsemi's pending MBxSV family.

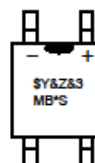
**Features**

- Low-Leakage
- Surge Overload Rating: 35 A peak
- Ideal for Printed Circuit Board
- UL Certified: UL #E258596
- This Device is Pb-Free and RoHS Compliant



SOIC4 W  
CASE 751EP

**MARKING DIAGRAM**



- \$Y = Logo
- &Z = Assembly Plant Code
- &S = 3-Digit Data Code (Year & Week)
- MB\*S = Specific Device Code
- \* = 1/2/4/6/8

**ORDERING INFORMATION**

See detailed ordering and shipping information on page 2 of this data sheet.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**



**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ANEXO IX**



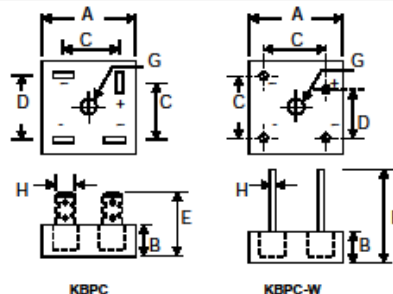
**KBPC40, 50/W SERIES**  
**40, 50A HIGH CURRENT BRIDGE RECTIFIER**

**Features**

- Diffused Junction
- Low Reverse Leakage Current
- Low Power Loss, High Efficiency
- Electrically Isolated Metal Case for Maximum Heat Dissipation
- Case to Terminal Isolation Voltage 2500V
- UL Recognized File # E157705

**Mechanical Data**

- Case: Metal Case with Electrically Isolated Epoxy
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Symbols Marked on Case
- Mounting: Through Hole for #10 Screw
- Weight: KBPC 31.6 grams (approx.)  
KBPC-W 28.5 grams (approx.)
- Marking: Type Number



Dim	KBPC		KBPC-W	
	Min	Max	Min	Max
A	28.40	28.70	28.40	28.70
B	10.97	11.23	10.97	11.23
C	15.70	16.70	17.10	19.10
D	17.50	18.50	10.90	11.90
E	22.86	25.40	30.50	—
G	Hole for #10 screw, 5.08Ø Nominal			
H	6.35 Typical		0.97Ø	1.07Ø

All Dimension in mm

"W" Suffix Designates Wire Leads  
 No Suffix Designates Faston Terminals

**Maximum Ratings and Electrical Characteristics** @T<sub>A</sub>=25°C unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
 For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristics	Symbol	-00/W	-01/W	-02/W	-04/W	-06/W	-08/W	-10/W	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V <sub>RRM</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	V
Working Peak Reverse Voltage	V <sub>RWM</sub>								
DC Blocking Voltage	V <sub>R</sub>								
RMS Reverse Voltage	V <sub>R(RMS)</sub>	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectifier Output Current @T <sub>C</sub> = 55°C	I <sub>O</sub>				40				A
					50				
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	I <sub>FSM</sub>				400				A
					400				
Forward Voltage Drop (per element)	V <sub>FM</sub>				1.2				V
Peak Reverse Current	I <sub>RM</sub>				10				µA
At Rated DC Blocking Voltage					1.0				mA