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 ALTERNA

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

AUTOR:

Josua Fernando Achig Beltrán

DIRECTORA:

Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc.

Ibarra, 2025

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:

	DATOS	DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004790422		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Achig Beltrán Josua Fernando		
DIRECCIÓN:	Urcuquí, Calle Guzmán, 10-06 y Calle Gonzáles Suárez		
EMAIL:	jfachigb@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	-	TELÉFONO MÓVIL:	0961106526

DATOS DE LA OBRA		
TÍTULO:	Implementación de circuitos para acondicionamiento de energía generada por sistemas triboeléctricos para aplicaciones en corriente alterna.	
AUTOR:	Josua Fernando Achig Beltrán	
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	30/06/2025	
PROGRAMA:	PREGRADO D POSGRADO	
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico	
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc. Ing. Julio Esteban Guerra Massón MSc.	

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 4 días del mes de julio de 2025

EL AUTOR:

.....

Nombre: Josua Fernando Achig Beltrán

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc. en calidad de director del señor estudiante Achig Beltrán Josua Fernando 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 alterna.

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

Ceipe A

Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a mi madre, quien han sido mi guía, mi fuerza y mi mayor inspiración. Gracias por su amor incondicional, por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo, la honestidad y la perseverancia. Su apoyo constante, incluso en los momentos más difíciles, y haberme impulsado a seguir adelante.

A mis abuelos, por sus sabias palabras, su apoyo y por haber sembrado en mí principios que valoro profundamente. Su presencia ha sido una fuente de calma y motivación en este camino.

A mi padre, quien, a pesar de la distancia y las circunstancias, siempre estuvo pendiente de mí. Aunque su presencia no fue constante en lo físico, su apoyo y preocupación nunca faltaron. Sus mensajes, sus consejos desde lejos y su forma particular de demostrar cariño me han acompañado en silencio, dándome fuerza en los momentos que lo necesitaba.

También deseo agradecer a todas aquellas personas que han estado a mi lado en este proceso: amigos, familiares, docentes y compañeros. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada momento compartido han hecho una diferencia en mi vida. Me han recordado que no estoy solo y que el camino es más llevadero cuando se camina acompaña.

Finalmente, quiero agradecer profundamente a una persona muy especial que, aunque hoy no está cerca físicamente, ha dejado una huella imborrable en mi vida. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su fe en mí siguen siendo una fuente de fortaleza y consuelo. Aun en la distancia, o incluso en la ausencia, su presencia se siente viva en mi corazón.

INDICE DE CONTENIDOS

AU TÉO	TORIZA CNICA I	CIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVER. DEL NORTE	.SIDAD II
CE	RTIFICA	DO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN	
CU.	RRICUL	AR	IV
AG	RADEC	IMIENTOS	V
INI	DICE DE	CONTENIDOS	VI
INI	DICE DE	FIGURAS	IX
INI	DICE DE	TABLAS	X
RES	SUMEN		XI
AB	STRACI		
1	INTRO	DUCCION	l
1.1	Plante	eamiento del problema	I
1.2	Objet	1V0S	l
l	.2.1 (Dbjetivo general	I
1	.2.2 (Objetivos especificos	2
1.3	Alcar	lice	2
1.4	JUSTIT		3
2	MARC		4
2.1	Anteo		4
2.2	Gene		0
2	.2.1 f		0
Z	.2.2 ľ	Promised des de les materiales	/
	2.2.2.1		0
	2.2.2.2	Valoaidad da sanamaión	o
	2.2.2.3	Humedad y condiciones ambientales	9 0
23	Circu	itos de acondicionamiento	9 0
2.5 2	31 (/
2	2311	Inversores Monofásicos	10
	2.3.1.1	Inversores Trifásicos	10
2	2.3.1.2 3.7 L	Reguladores de voltaie	11
-	2321	Comparación v retroalimentación	11
	2.3.2.2	Error v señal de control	12
		=	

2.3.2.	3 Control de la fuente de energía	12
2.3.2.	4 Retroalimentación continua	13
2.3.3	Convertidores AC- AC	13
2.3.3.	1 Cambio de Amplitud	13
2.3.3.	2 Cambio de Frecuencia	14
2.3.3.	3 Conversores de Frecuencia Variable (VFC)	14
3 MAT	ERIALES Y MÉTODOS	15
3.1 Mé	todos y metodología	16
3.1.1	Revisión bibliográfica	16
3.1.2	Diseño de los circuitos	16
3.1.3	Simulación de los circuitos	16
3.1.4	Selección de circuitos	17
3.1.5	Implementación del circuito	17
3.2 Ma	teriales y herramientas	17
3.2.1	Herramientas de investigación	18
3.2.2	Software de simulación	18
3.2.3	Materiales	18
3.2.4	Herramientas	18
3.3 Pro	cedimiento	19
3.3.1	Diseño de circuitos	19
3.3.1.	1 Diseño del circuito de rectificación	19
3.3.1.	2 Filtrado de onda rectificada	19
3.3.1.	3 Diseño de limitador de voltaje	20
3.3.1.	4 Diseño de los circuitos de inversión	20
3.3.2	Resultados	21
3.3.3	Análisis	21
4 RESU	JLTADOS Y ANÁLISIS	23
4.1 Pro	cedimiento	23
4.1.1.	1 Consideraciones generales de diseño	23
4.1.1.	1.1 Parámetros de entrada	23
4.1.1.	1.2 Parámetros de Salida	24
4.1.1.	1.3 Diseño de los circuitos de acondicionamiento	25
4.1.1.	1.4 Diseño del circuito de rectificación	25
4.1.1.	1.5 Filtrado de onda	26

4.1.1.1.6 Diseño de limitador de voltaje	26	
4.1.2 Modelado de fuente	30	
4.1.3 Creación de fuente simulada	30	
4.1.4 Simulación de circuitos	32	
4.1.4.1 Simulación de circuito de filtrado y limitación de voltaje	32	
4.1.4.1.1 Simulación con capacitor de 330uF	33	
4.1.4.1.2 Simulación con capacitor de 470uF	34	
4.1.4.2 Simulación de los circuitos de alternado controlados por Arduino	36	
4.1.4.2.1 Con apertura y cierre por IGBTs	38	
4.1.4.2.2 Con apertura y cierre por transistores	40	
4.1.4.2.3 Con apertura por Triacs y cierre por transistores	43	
4.1.4.3 Simulación de los circuitos de alternado controlados por integrad	o 46	
4.1.4.3.1 Con apertura y cierre por IGBTs	48	
4.1.4.3.2 Con apertura y cierre por transistores	51	
4.1.5 Resultados de formas de onda	54	
4.1.6 Análisis y comparación de circuitos	58	
4.1.6.1 Análisis de resultados	58	
4.1.6.2 Comparación de circuitos	58	
4.1.6.3 Selección de circuito	59	
4.1.7 Implementación de circuito	60	
4.1.7.1 Determinación de transistores	61	
4.1.7.2 Diseño PCB	61	
4.1.7.3 Construcción de circuito	63	
4.1.7.3.1 Creación de PCB	63	
4.1.7.3.2 Adición de componente	64	
4.1.8 Pruebas de laboratorio	66	
4.2 Resultados	66	
4.3 Análisis de resultados	68	
4.3.1 Análisis de requerimientos de nanogeneradores triboeléctricos	68	
4.3.2 Análisis de eficiencia del circuito	68	
5 CONCLUSIONES 70		
5 RECOMENDACIONES 71		
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72	
8 ANEXOS	79	

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Transferencia de electrones durante separación vertical de materiales [42].	6
Fig. 2 Diagrama de Flujo	15
Fig. 3 Diagrama de diseño de circuito de acondicionamiento	25
Fig. 4 Fuente de voltaje simulada	31
Fig. 5 Análisis análogo de fuente simulada	31
Fig. 6 Circuito de simulación de filtrado y limitación de voltaje	32
Fig. 7 Circuito simulado con capacitor de 330uF	33
Fig. 8 Variación de voltaje de regulador con capacitor de 330uF	34
Fig. 9 Circuito simulado con capacitor de 470uF	35
Fig. 10 Variación de voltaje de regulador con capacitor de 470uF	35
Fig. 11 Selección de programa complicado en Arduino simulado	36
Fig. 12 Conexión del Arduino en Proteus 8	37
Fig. 13 Conexión de diodo Zener para alimentación de 15V	38
Fig. 14 Circuito de alternación por IGBTs controlados por Arduino	39
Fig. 15 Conexión de diodo Zener para alimentación de 5V	41
Fig. 16 Circuito de alternación de transistores controlados por Arduino	42
Fig. 17 Conexión de regulador integrado 7812 para alimentación de 12V	44
Fig. 18 Circuito de alternación de Triacs y Transistores controlados por Arduino	45
Fig. 19 Conexión de circuito integrado CD4047	47
Fig. 20 Conexión de diodo Zener para alimentación de 12V	48
Fig. 21 Conexión de diodo Zener para alimentación de 20V	49
Fig. 22 Circuito de alternación de IGBTs	50
Fig. 23 Conexión del MOSTET a las resistencias de activación y descarga.	52
Fig. 24 Circuito de alternación de Transistores.	53
Fig. 25 Resultado de alternación por IGBTs controlados por Arduino	55
Fig. 26 Resultado de alternación por transistores controlados por Arduino	55
Fig. 27 Resultado de alternación por TRIACs y transistores controlados por Arduino	56
Fig. 28 Resultado de alternación por IGBTs controlados por integrado	57
Fig. 29 Resultado de alternación por transistores controlados por integrado	57
Fig. 30 Diseño PCB del circuito de acondicionamiento	62
Fig. 31 Diseño PCB para impresión	62
Fig. 32 Placa del circuito impreso tras el tratamiento químico	64
Fig. 33 Circuito de acondicionamiento ensamblado	65
Fig. 34 Resultado de la medición de la salida alterna del circuito implementado.	67
Fig. 35 Resultado de la medición de corriente alterna con el multímetro.	67

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 Breve resumen de materiales Triboeléctricos [42]	_ 7
TABLA 2 Parámetros de entrada.	_24
TABLA 3 Parámetros de salida.	_24
TABLA 4 Valores del circuito de alternación por IGBTs controlados por Arduino	_40
TABLA 5 Valores del circuito de alternación por transistores controlados por Arduino	_43
TABLA 6 Valores del circuito de alternación por TRIACs y transistores PNP controlados por Arduino	r _46
TABLA 7 Valores del circuito de alternación por IGBTs controlados por un integrado	_51
TABLA 8 Valores del circuito de alternación por transistores controlados por un integrado.	_54
TABLA 9 Comparación de voltajes y corrientes simuladas.	_59
TABLA 10 Cuadro de selección de circuito	_60

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfoca en el diseño, simulación e implementación de circuitos de acondicionamiento de energía para nanogeneradores triboeléctricos (TENG), orientados a aplicaciones en corriente alterna (AC). Los TENG representan una tecnología emergente de generación de energía basada en el efecto triboeléctrico y la electrificación por contacto, caracterizándose por producir altos voltajes y bajas corrientes en forma de pulsos no lineales. Estas características limitan su integración directa con sistemas eléctricos convencionales, lo que hace indispensable el desarrollo de circuitos acondicionadores adecuados para su aprovechamiento eficiente.

La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Técnica del Norte y comenzó con una revisión bibliográfica exhaustiva en bases de datos científicas como Scopus y Web of Science, donde se analizaron diferentes topologías de circuitos rectificadores, inversores, reguladores y convertidores. Se priorizó la búsqueda de configuraciones que permitieran transformar la señal de salida pulsante e irregular de los TENG en una salida alterna regulada, con características similares a las redes domésticas de 110V-127V AC y corriente de 100 mA.

Se diseñaron y simularon cinco circuitos de acondicionamiento utilizando herramientas como Proteus 8, considerando diferentes etapas de rectificación, filtrado, limitación y conversión de señal. Los circuitos fueron evaluados bajo distintos valores de capacitancia y cargas resistivas, seleccionando el más eficiente según parámetros de estabilidad de la señal, amplitud de salida y frecuencia. El circuito seleccionado fue implementado físicamente mediante el diseño de una placa de circuito impreso (PCB), fabricada utilizando el método de transferencia térmica.

Durante las pruebas experimentales, se logró obtener una salida de 122V RMS con una corriente de 101 mA y una forma de onda sinusoidal modificada de 60,039Hz, lo cual demuestra una alta eficiencia del circuito en la conversión de la energía generada por el TENG. Estos resultados permiten validar la funcionalidad del diseño propuesto, confirmando su viabilidad para alimentar dispositivos que requieren señales AC estables.

El trabajo concluye con una comparación entre los resultados simulados y los medidos experimentalmente, destacando el potencial de los TENG como fuente de energía alternativa cuando se complementan con circuitos de acondicionamiento adecuados, además de los desafíos técnicos asociados con la implementación a gran escala de estos sistemas de generación.

Palabras clave: Nanogeneradores triboeléctricos, Circuito de acondicionamiento, Energía Sostenible, Regulación de Voltaje.

ABSTRACT

This research work focuses on the design, simulation, and implementation of power conditioning circuits for triboelectric nanogenerators (TENG), aimed at alternating current (AC) applications. TENGs represent an emerging energy generation technology based on the triboelectric effect and contact electrification, characterized by producing high voltages and low currents in the form of non-linear pulses. These characteristics limit their direct integration with conventional electrical systems, making it essential to develop suitable conditioning circuits for efficient energy utilization.

The research was conducted in the laboratories of the Universidad Técnica del Norte and began with an exhaustive literature review in scientific databases such as Scopus and Web of Science, where various topologies of rectifier, inverter, regulator, and converter circuits were analyzed. The focus was on finding configurations that could transform the pulsating and irregular output signal of TENGs into a regulated AC output with characteristics similar to domestic power grids of 110V–120V AC and a current of 100 mA.

Five conditioning circuits were designed and simulated using tools such as Proteus 8, considering different stages of rectification, filtering, limiting, and signal conversion. The circuits were evaluated under different capacitance values and resistive loads, selecting the most efficient one based on parameters such as signal stability, output amplitude, and frequency. The selected circuit was physically implemented through the design of a printed circuit board (PCB), manufactured using the thermal transfer method.

During experimental testing, an output of 122V RMS with a current of 101 mA and a modified sine wave of 60.039 Hz was obtained, demonstrating the high efficiency of the circuit in converting the energy generated by the TENG. These results validate the functionality of the proposed design, confirming its feasibility for powering devices that require stable AC signals.

The study concludes with a comparison between simulated and experimentally measured results, highlighting the potential of TENGs as an alternative energy source

when complemented by appropriate conditioning circuits, as well as the technical challenges associated with the large-scale implementation of these generation systems.

Keywords: Triboelectric Nanogenerators, Conditioning Circuit, Sustainable Energy, Voltage Regulation.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema

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

1.1 Planteamiento del problema

Ecuador ha buscado impulsar la generación de energía mediante fuentes renovables no convencionales, como la energía eólica y solar. Sin embargo, estas fuentes de generación presentan sus propios desafíos, entre ellos se encuentran el alto coste de inversión y mantenimiento requerido para su implementación.

Los nanogeneradores triboeléctricos (TENG), si bien han provocado un creciente interés como una innovadora fuente de energía, la cual hace uso de materiales de bajo costo y fácil reciclaje, permite una producción escalable por su simplicidad de construcción, y a pesar de ser capaces de producir voltajes manejables para su adaptación a la mayoría de las aplicaciones, se enfrentan a dos grandes problemas, la muy baja corriente generada y la alta variabilidad del voltaje.

La naturaleza cambiante e inestable de la energía mecánica aprovechada por un TENG de contacto en AC, produce fluctuaciones de voltaje significativas, sumado a la baja corriente eléctrica generada, plantea un obstáculo práctico para su implementación y limita en gran medida su viabilidad como fuente de energía independiente para dispositivos de muy bajo consumo.

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.

1.2.2 Objetivos específicos

- Describir los diferentes sistemas de generación triboeléctrica y los circuitos utilizados para el aprovechamiento de energía generada por un TENG de salida AC.
- Diseñar los circuitos de acondicionamiento necesarios para aprovechar la energía generada por un TENG.
- Implementar los circuitos de acondicionamiento para su uso como fuente de energía para equipos en AC.

1.3 Alcance

Será realizado en los laboratorios de la Universidad Técnica del Norte. Se investigarán formas de generación de energía mediante un TENG y de los circuitos utilizados para el aprovechamiento de la energía generada por estos mismos, dicha investigación será realizada a través de las herramientas de investigación Scopus y Web of Science. Haciendo uso de la investigación realizada se describirán los sistemas de generación triboeléctrica más utilizados y los circuitos comúnmente usados para aprovechar la energía generada por los TENGs.

Se diseñarán los circuitos de acondicionamiento necesarios para aprovechar la energía generada por TENGs de salida en AC, para ello se diseñarán y simularán los cinco circuitos de acondicionamiento más utilizados para aprovechar la energía generada por TENGs de salida AC. Entre los circuitos simulados se determinará el circuito más adecuado que cumpla con los parámetros establecidos, principalmente la obtención de mayor potencia en su salida a voltaje estándar de uso doméstico en Ecuador y costos de creación del circuito.

El circuito determinado como más adecuado será implementado y testeado a través de instrumentos de medición tales como osciloscopio y multímetro dentro de los laboratorios de la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte para determinar su funcionamiento como circuito de acondicionamiento de energía. La expectativa es conseguir una salida de 110V-120V AC a corriente de 100 mA.

1.4 Justificación

El impacto viene dado porque las fuentes de energía limpias y sostenibles es uno de los mayores desafíos en la actualidad, tecnologías sumamente utilizadas como la generación hidráulica, solar, o eólica tienen una serie de inconvenientes que complica la generación ininterrumpida a lo largo del día [4-6].

La importancia es que la generación triboeléctrica permite aprovechar energías ambientales de baja frecuencia [9] que mediante otros medios serían difícilmente aprovechados y convertirlos en energía eléctrica con materiales de bajo costo y fácil reciclaje como son los polímeros [42].

El área de aplicabilidad de este proyecto es la generación de energía limpia y de bajo costo que facilite el abastecer de energía eléctrica a dispositivos de bajo consumo desconectados de otras fuentes de energía, por este motivo se establece que los beneficiarios del trabajo de grado serán comunidades rurales sin acceso a la red eléctrica ya que se proporciona una alternativa de energía sostenible, en el ámbito médico la generación aislada permite tener dispositivos médicos que no requieran de un constante mantenimiento para el cambio de baterías, también serán beneficiarios personas naturales que cuenten con dispositivos móviles puesto que, gracias al aprovechamiento de la energía generada por su movimiento, y de esta manera obtener una fuente de energía eléctrica sin importar donde se encuentren.

El proyecto es viable puesto que requiere de dispositivos electrónicos de fácil adquisición, y costos que se ajustan al presupuesto. Además, existe gran cantidad de información y de libre acceso acerca de circuitos eléctricos de potencia y acondicionamiento de energía, la misma que es muy variada, contiene ejemplos de casos prácticos y detalles técnicos necesarios para llevar a cabo la implementación.

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.

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% [1, 2], 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 [3]. 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 [4], o la variabilidad de la velocidad del viento[5, 6].

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 [7, 8].

La invención del nanogenerador 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 [9]. Por su capacidad de adaptación al medio, es capaz de obtener energía de fuentes irregulares y de frecuencia ultra baja como la energía azul [10-14] o la biomecánica la cual aprovecha el movimiento del 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 [15-19]. 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 [9, 20-22].

Los TENG cuentan con dos tipos de salida, corriente alterna (AC) y corriente continua (DC) [23, 24]. El modo de corriente alterna (AC) se produce mediante la fricción entre dos materiales dieléctricos con polaridades opuestas [25, 26]. Este tipo de salida conlleva una etapa previa de rectificación necesaria para poder aprovechar la energía generada en aplicaciones de dispositivos electrónicos, lo cual es una limitación en la conveniencia de este tipo de generadores [27, 28].

En la búsqueda de maximizar la eficiencia de los TENGs, se han propuesto e investigado varias formas para incrementar el rendimiento de estos en modo AC [29] ya que la producción de energía es muy limitada con voltajes de 137 voltios, corrientes de 12,1 microamperios y una densidad de potencia de 2,74 W por metro cuadrado [30], entre ellas se destacan estrategias como la excitación de carga [31], acumulación de carga espacial [25], material de alta permitividad eléctrica [32], y lubricación de terminal [33].

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 [34, 35].

El mecanismo operativo del TENG se basa en el efecto triboeléctrico e inducción electroestática [36], estos efectos se producen en el generador triboeléctrico al colocar en contacto dos materiales diferentes en los cuales sus superficies generan cargas positivas y negativas [37], 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 [38], 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 [39].

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 [40, 41].

2.2 Generación Triboeléctrica

La Generación triboeléctrica se basa en el aprovechamiento de la carga generada por dos materiales diferentes al entrar en contacto y ser separarlos, esto a su vez genera una diferencia de potencial, la cual es aprovechada por los nanogeneradores triboeléctricos [42].

2.2.1 Efecto Triboeléctrico

El efecto triboeléctrico, también conocido como electrificación por contacto o carga por fricción, es un fenómeno producido por el contacto de dos materiales diferentes, los cuales al separarse provocan la transferencia de electrones entre sus superficies y de esta manera generando cargas eléctricas opuestas como se muestra en la figura 1.



Fig. 1 Transferencia de electrones durante separación vertical de materiales [42].

La capacidad de transferencia de electrones inherente de los materiales involucrados es el principal factor en la generación de una diferencia de potencial eléctrico entre sus superficies, los materiales como la mica, lana, nylon o la seda tienen mayor tendencia a cargarse positivamente, mientras que materiales como el caucho de silicona, teflón, silicio o polímeros a cargarse negativamente [42]. Estos materiales se encuentran enlistados más ampliamente en la Tabla 1.

TABLA 1

Breve resumen de materiales Triboeléctricos [42].

Más cargados positivamente (+)	Δ
Piel de conejo, Pelo	Latón
Vidrio	Plata
Mica	Oro
Lana	Poliéster (PET
nailon	Poliestireno
Lead	Acrílico
Seda	Cloruro de polivinilo
Aluminio	Cloruro de polivinilo con plastificante
Papel	Silicio
Madera	Polietileno
Ámbar	Polipropileno
Lacre	Politrifluorocloroetileno
Globo de goma	Teflón (PTFE)
Níquel	Caucho de silicona
Cobre	Ebonita
∇	Más cargados negativamente (-)

Los polímeros con una fuerte tendencia a cargarse positivamente tienen constantes dieléctricas altas, alta polaridad e hidrofilicidad, además, aquellos con grupos funcionales oxigenados tendrán una mayor carga positiva que aquellos con grupos funcionales de nitrogenados [42].

2.2.2 Nanogeneradores triboeléctricos

Nanogenerador triboeléctrico (TENG) es el nombre dado al dispositivo capaz de recolectar la carga electroestática ocasionado por la fricción entre un par de materiales

nanoestructurados diferentes. El principal fundamento en el que los Nanogeneradores Triboeléctricos basan su funcionamiento para la recolección energética es la combinación del Efecto Triboeléctrico entre los dos materiales puestos en contacto. El circular de las cargas inducidas a través de este circuito es lo que posibilita la realización de un trabajo eléctrico útil en el circuito externo [43].

La captación de energía radica en la combinación del Efecto Triboeléctrico entre dos materiales en contacto, junto con la Inducción Electrostática entre el material dieléctrico cargado mediante electrización por contacto y su electrodo [44]. Este fenómeno tiene lugar cuando los materiales triboeléctricos se separan después de su contacto, y ambos electrodos se conectan a través de un circuito externo, estableciendo contacto con los dos materiales cargados triboeléctricamente a través de una lámina de material conductor [42]. La circulación de las cargas inducidas a través de este circuito posibilita la realización de trabajo eléctrico útil en dicho circuito externo.

La cantidad de energía generada se encuentra determinada por factores como las propiedades de los materiales, el área de contacto, velocidad de separación, humedad y factores ambientales.

2.2.2.1 Propiedades de los materiales

Las propiedades intrínsecas de los materiales utilizados en la elaboración de los nanogeneradores triboeléctricos que entrarán en contacto son de vital importancia ya que de ellos depende la cantidad de electrones que podrán desprenderse. Uno de los materiales debe tener una mayor facilidad para ceder electrones mientras que otro debe tener una alta capacidad para atrapar retener dichos electrones y así aumentar la diferencia de potencial entre ambos materiales [42].

2.2.2.2 Área de contacto

El segundo factor en la cantidad de energía generada es el área de contacto, mientras mayor sea el área de contacto, mayor será la diferencia de potencial generada esto debido al aumento de cargas transferidas de un material a otro.

Dentro del área de contacto es necesario destacar otro factor que aumenta el área de contacto como es el uso de superficies más rugosas las cuales pueden proporcionar mayores áreas de contacto al aprovechar el incremente de superficie en tres en dimensiones y no solo en dos como se lograría con un material liso, por lo tanto, aumentar la generación de carga.

2.2.2.3 Velocidad de separación

La velocidad de separación es otro factor que influye activamente en la diferencia de potencial alcanzada, ya que una separación más rápida puede aumentar la generación de carga triboeléctrica debido a la ruptura de enlaces y a la rápida transferencia de electrones [42].

2.2.2.4 Humedad y condiciones ambientales

El aumento de la humedad en el entorno de contacto de los materiales puede afectar negativamente en el intercambio de carga, tanto por la modificación de las propiedades naturales de los materiales sobre todo en aquellos con capacidad de almacenar agua en su estructura como en la capacidad de transferencia de carga por la intervención de las moléculas de agua el cual tiene valores de conductividad mucho mayores que el aire propiciando el retorno de carga entre los materiales en contacto impidiendo su aprovechamiento como diferencia de potencial para el circuito externo.

2.3 Circuitos de acondicionamiento

Los circuitos de acondicionamiento son un conjunto de componentes electrónicos diseñados para modificar una señal eléctrica de entrada y obtener una salida específica. Su función principal es adecuar la señal a las características necesarias para su consumo o visualización en etapas posteriores del sistema. Estos circuitos pueden realizar diversas funciones entre las que destacan los amplificadores, filtros, conversores, correctores, entre otras, dependiendo de los requisitos del sistema al que están destinados.

Además, un circuito de acondicionamiento ayuda a optimizar la señal eléctrica para que sea más adecuada y utilizable en las etapas subsecuentes de un sistema eléctrico. Este tipo de circuitos es comúnmente utilizado en áreas como la electrónica de instrumentación, sistemas de control, comunicaciones y procesamiento de señales, donde la calidad y la forma de la señal son críticas para el rendimiento del sistema. A continuación, se describen algunos de ellos como son los circuitos inversores, reguladores de voltaje y los conversores AC-AC.

2.3.1 Circuito inversor

Un circuito inversor se refiere a un dispositivo que convierte la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA). Este componente es esencial en sistemas de electrónica de potencia ya que viabiliza las aplicaciones de energía renovable o fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS).

El circuito inversor utiliza dispositivos semiconductores, como transistores de potencia o dispositivos IGBT (Transistores Bipolares de Puerta Aislada), para modular la corriente continua de entrada y generar una onda sinusoidal o cuadrada en la salida esto en función de la aplicación que tendrá dicha energía.

Además de convertir la corriente continua en corriente alterna, el circuito inversor también puede ofrecer control sobre la frecuencia y la amplitud de la señal de salida, esto permite la inyección de energía a la red tanto en sistemas eléctricos de 60Hz como de 50Hz [45].

Este tipo de circuito es crucial para la transmisión eficiente de energía eléctrica en sistemas donde la corriente continua es más práctica para la generación, transmisión o almacenamiento de energía como es el caso de las redes de corriente continua de alta tensión (HVDC) [45], pero se requiere corriente alterna para el uso final, volviendo indispensable la inversión de la señal antes de poder ser distribuida a los consumidores.

Existen principalmente dos tipos de inversores según su clasificación por número de fases siendo estos los monofásicos y los trifásicos.

2.3.1.1 Inversores Monofásicos

Como su nombre lo indica, los inversores monofásicos son circuitos que convierten la corriente continua en corriente alterna de una sola fase. Este tipo de inversor es utilizado en diversas aplicaciones, como sistemas de alimentación de emergencia como es el caso de los conocidos UPS, los cuales almacenan energía en forma de corriente continua dentro de bancos de baterías, esta energía deberá ser invertida al ocurrir una falla que corte el suministro eléctrico y así proporcionar energía eléctrica al sistema.

Otra aplicación muy importante de los inversores monofásicos, se encuentra en el ámbito de las fuentes de energía renovable, entre las cuales se encuentran fuentes como la fotovoltaica, piezoeléctrica, y algunos tipos de triboeléctrica, esta fuente proporciona energía eléctrica de corriente continua, por lo que es imprescindible el uso de un inversor para ser aprovechado en las residencias tanto en modo de conexión aislada como conectada a la red o no aislada [46].

2.3.1.2 Inversores Trifásicos

Los inversores trifásicos son circuitos cuya función es convertir la corriente continua en corriente alterna al igual que los inversores monofásicos, con la diferencia de que estos generan corrientes trifásicas con desfase de ciento veinte grados eléctricos entre fase y fase [47, 48].

Este tipo de inversores son mayormente utilizados para invertir la energía generada por plantas fotovoltaicas las cuales producen grandes cantidades de energía eléctrica en corriente continua debido a la naturaleza de su generación, además de su rápido incremento de uso en los últimos años [49], esta energía es convertida en corriente alterna mediante el uso de inversores trifásicos para poder ser inyectada a la red trifásica.

Sin embargo, inyectar altas cantidades de energía eléctrica a la red a través de inversores trifásicos contempla una gran complejidad, no solo por la coordinación y precisión necesaria para crear una señal trifásica de voltaje si no también por las caídas y aumentos de voltaje presenten de forma común en una red eléctrica, como cortocircuitos, ingreso de una carga de gran capacidad, conmutación de fuentes, entre otros [47].

2.3.2 Reguladores de voltaje

Es un dispositivo cuyo propósito es mantener la tensión de salida de una fuente eléctrica fija, aun cuando variaciones de voltaje en la entrada o la variación de carga del sistema. Un regulador de tensiones no sólo es esencial para el mantenimiento de la estabilidad y calidad de la energía eléctrica en fuentes de alimentación, plantas generadoras de electricidad y sistemas electrónicos susceptibles a fallas de energía en general. El regulador de voltaje monitorea constantemente la tensión de salida y ajusta activamente su funcionamiento para mantenerla dentro de los limites predefinidos [50]. Puede utilizar diferentes técnicas y topologías, como, por ejemplo: reguladores lineales o

conmutados, a fin de lograr ese control preciso. Son una herramienta esencial en sistemas donde la variabilidad de la tensión de entrada o los cambios intermitentes de carga puedan afectar negativamente el desempeño de dispositivos electrónicos conectados entre sí [51].

Su implementación es fundamental para lograr una operación estable de sistemas eléctricos y mantener intactos los dispositivos conectados, garantizando por tanto un suministro continuo y fiable. Estos componentes desempeñan un papel crucial en el control energético efectivo y protección de equipos sensibles a fluctuaciones de tensión [50].

De forma general los reguladores de tensión involucran los fundamentos de comparación y retroalimentación, error y señal de control, control de la fuente de energía y retroalimentación continua para su funcionamiento.

2.3.2.1 Comparación y retroalimentación

La tensión de salida es constantemente comparada con un valor de voltaje de referencia preestablecido, este proceso lo realiza un dispositivo de comparación que determina si la tensión de salida está dentro de los niveles establecidos con un margen de aceptación.

2.3.2.2 Error y señal de control

Si la variación de voltaje se encuentra fuera de los umbrales aceptados, se genera una señal de error con el valor de la variación entre la referencia y el voltaje real de salida, de tratarse de una señal de corriente alterna, este valor deberá contener tanto la magnitud como el desfase angular para poder enviar una señal de control adecuada.

2.3.2.3 Control de la fuente de energía

La señal de control es utilizada para ajustar la operación del regulador de voltaje. En función del tipo de regulador si es lineal o conmutado, se deberá controlar la variación de una resistencia, la modulación de la frecuencia de conmutación, o la calibración de otros parámetros que afecten la señal de salida.

2.3.2.4 Retroalimentación continua

El ajuste de voltaje debe realizarse de forma dinámica y continua, ya que las condiciones de carga y tensiones de entrada varían constantemente por lo que debe responder automáticamente para mantener la tensión de salida dentro de los valores permitidos.

2.3.3 Convertidores AC- AC

Un convertidor de voltaje AC a AC es un dispositivo diseñado para modificar las características de una fuente de corriente alterna de entrada, como son la amplitud, la frecuencia o la forma de onda, para adaptarla a los requisitos específicos del sistema o carga conectada [52].

Estos conversores son necesarios en diversas aplicaciones como sistemas de transmisión y distribución de energía, control de velocidad de motores eléctricos con los variadores de frecuencia y adaptación de fuentes para alimentación de dispositivos eléctricos.

El funcionamiento de estos convertidores se lleva a cabo mediante el uso de dispositivos semiconductores de potencia, como pueden ser transistores de conmutación, esto para ajustar dinámicamente la señal de salida. Este proceso se lleva normalmente con dos etapas para la conversión AC – AC pasando por una etapa intermedia de DC, sin embargo se está buscando circuitos de alta eficiencia capaces de realizar directamente la conversión sin esta etapa mediática [52].

Los convertidores AC - AC son de vital importancia para la conexión entre países con diferentes valores de frecuencia, esto aumenta la robustes y viabilidad de los sistemas de ambos países.

Estos pueden clasificarse en diferentes categorías por la naturaleza de la transformación que realizan, siendo estos cambios de amplitud o frecuencia y conversores de frecuencia variable.

2.3.3.1 Cambio de Amplitud

Modifican la amplitud de la señal de entrada. Un ejemplo común es el transformador o un autotransformador, que ajusta la relación de vueltas entre el devanado

primario y secundario para variar la amplitud de la tensión. Este es el caso de un convertidor AC – AC más utilizado ya que a nivel mundial se hace uso de transformadores para reducir o elevar el voltaje, desde transformadores pequeños para dispositivos eléctricos del hogar hasta altos valores de voltaje en la transmisión de energía para la disminución de pérdidas.

2.3.3.2 Cambio de Frecuencia

Ajustan la frecuencia de la señal de salida en relación con la señal de entrada. Esto es crucial en aplicaciones como la adaptación de frecuencia para dispositivos eléctricos que operan a diferentes frecuencias y en las conexiones entre países con diferentes frecuencias, como es el caso de la conexión de Brasil a 60Hz y Argentina de 50 Hz [52].

2.3.3.3 Conversores de Frecuencia Variable (VFC)

Permiten variar continuamente la frecuencia de salida, lo que es esencial en sistemas de control de velocidad de motores, esto es sumamente utilizado ya que permite controlar el arranque de un motor de manera eficiente, y adaptarse en dependencia de la fuerza que requiera este para arrancar [53, 54].

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo describe los procedimientos utilizados en la revisión bibliográfica, el diseño y simulación de circuitos, selección de circuitos, implementación de circuitos y prueba de funcionamiento del circuito de acondicionamiento de energía generada por TENGs para aplicaciones en corriente alterna. El diagrama de flujo correspondiente al proceso de llevado a cabo se muestra en la Figura 2.



Fig. 2 Diagrama de Flujo

La revisión bibliográfica empleó un método cualitativo dentro de una metodología inductiva para fundamentar el diseño experimental a partir de los estudios realizados. El diseño de los circuitos siguió un método cuantitativo y una metodología deductiva, formulando circuitos hipotéticos basados en principios teóricos. La simulación de los circuitos aplicó un método cuantitativo bajo una metodología deductiva, evaluando el rendimiento de los diseños en un entorno virtual. La selección de circuitos combinó métodos cualitativos y cuantitativos dentro de una metodología mixta para comparar los resultados simulados. Finalmente, la implementación del circuito empleó un método experimental y siguió una metodología deductiva, probando el circuito en condiciones reales para validar su rendimiento.

3.1 Métodos y metodología

En esta sección se describe la metodología utilizada para la revisión bibliográfica, diseño y simulación de los circuitos de acondicionamiento y selección de circuitos. Se detallan el análisis teórico, las simulaciones en software especializado y la evaluación de parámetros clave, lo que permitió identificar el circuito más adecuado para su posterior implementación en los laboratorios.

3.1.1 Revisión bibliográfica

Para el procedimiento de la revisión bibliográfica se aplicó un enfoque de investigación mixto (cuali-cuantitativo). Como método cualitativo, se empleó el análisis documental para comprender el estado del arte sobre sistemas triboeléctricos y circuitos de acondicionamiento. Desde el enfoque cuantitativo, se consideraron datos técnicos y parámetros de diseño obtenidos de fuentes especializadas. La metodología utilizada fue de tipo documental y analítica, basada en la búsqueda, selección y análisis de artículos científicos y estudios relevantes disponibles en bases de datos como Scopus y Web of Science. Se usaron criterios de búsqueda como TENG, AC, circuitos inversores, reguladores y convertidores, priorizando publicaciones recientes para garantizar un marco teórico actualizado y pertinente para el desarrollo del proyecto.

3.1.2 Diseño de los circuitos

Se empleó una metodología cuantitativa y experimental para el diseño de circuitos, partiendo de los parámetros obtenidos mediante la revisión documental. Cada circuito fue diseñado considerando datos técnicos recolectados y analizados previamente. Se utilizaron componentes con modelos específicos como transistores, IGBTs, MOSFETs, circuitos integrados y microcontroladores, así como componentes genéricos de fácil ajuste como resistencias, capacitores y diodos. El proceso se basó en simulaciones y análisis funcionales, propios del método experimental-aplicado, orientado a validar la viabilidad del diseño en condiciones reales.

3.1.3 Simulación de los circuitos

Se utilizó una metodología de tipo cuantitativa y experimental, utilizando el método de simulación computacional para analizar el comportamiento de los diseños propuestos. Se realizaron simulaciones para cada circuito, variando parámetros como el voltaje, la frecuencia y el

ciclo de trabajo de la fuente, con el fin de observar el desempeño del sistema ante diferentes condiciones de operación. Esta etapa permitió evaluar la respuesta del circuito ante fluctuaciones propias de la salida del TENG y cambios en la carga conectada, proporcionando datos cuantificables para su posterior validación.

3.1.4 Selección de circuitos

Se aplicó un enfoque cuantitativo y comparativo, utilizando una metodología analítica basada en los resultados obtenidos de las simulaciones. Los circuitos fueron evaluados según criterios técnicos específicos: voltaje de salida, pérdidas de corriente durante el funcionamiento y variabilidad del voltaje. Se empleó un método de valoración lineal comparativa, asignando una calificación a cada circuito en función de los valores máximos y mínimos alcanzados en cada criterio. Finalmente, mediante el análisis estadístico de los puntajes promedio, se seleccionó el circuito con el mejor desempeño global.

3.1.5 Implementación del circuito

Se usó una metodología experimental-aplicada con enfoque cuantitativo, orientada al desarrollo físico del prototipo. A partir del circuito previamente seleccionado mediante análisis comparativo, se procedió al diseño de la placa de circuito impreso (PCB) utilizando el software Proteus 8, aprovechando sus herramientas de simulación y diseño automatizado como el auto ruteo. El método de fabricación empleado fue el de transferencia térmica, apropiado para prototipos funcionales. Posteriormente, se adquirieron y organizaron los componentes electrónicos necesarios, que fueron instalados y soldados manualmente, asegurando precisión en el montaje y funcionalidad del circuito para su posterior fase de prueba y validación.

3.2 Materiales y herramientas

En la siguiente sección se describieron los materiales y herramientas utilizados para la implementación de los circuitos de acondicionamiento de energía generada por sistemas triboeléctricos (TENG).

3.2.1 Herramientas de investigación

Las herramientas de investigación utilizadas para la investigación fueron las bases de datos Scopus y Web of Science como las principales fuentes de información. Se buscó documentación de los componentes utilizados, artículos científicos, y estudios técnicos, enfocándose en los avances en la implementación de TENGs como alternativa ecológica de generación y formas de aprovechamiento de la energía generada, además de circuitos de acondicionamiento de energía.

3.2.2 Software de simulación

El diseño y simulación de los circuitos se llevó a cabo utilizando los softwares Proteus 8 y Simulink de Matlab. Estos softwares permitieron modelar el comportamiento de los circuitos en condiciones similares a las reales, variando parámetros como voltajes, frecuencias y ciclos de trabajo en la fuente simulada del grupo de TENGs y permitir analizar el rendimiento y eficiencia de cada diseño.

3.2.3 Materiales

Los circuitos de acondicionamiento fueron diseñados utilizando componentes electrónicos, microcontroladores y circuitos integrados. La selección de estos componentes se realizó cuidadosamente en función de su capacidad para soportar y manejar los parámetros de generación de los TENGs tales como tensiones, frecuencias y corrientes.

3.2.4 Herramientas

Para el montaje del circuito, se utilizaron varias herramientas. Entre ellas, un soldador con capacidad para soldar componentes electrónicos de control y potencia, así como alambre de estaño para realizar las conexiones entre los componentes. Se emplearon también pinzas de corte y punta fina para manipular y posicionar adecuadamente los componentes en la placa de prototipos. Por último, se utilizaron una fuente de alimentación regulable que permitirá proporcionar un voltaje estable y ajustable durante el proceso de pruebas del circuito.

3.3 Procedimiento

A continuación, se detallaron las actividades realizadas para el desarrollo y evaluación de circuitos de acondicionamiento de energía generada por sistemas triboeléctricos. Se inició con el diseño de los circuitos, enfocado en satisfacer los parámetros de salida definidos. Posteriormente, se procedió a la simulación de cada diseño mediante software, donde se analizaron el comportamiento eléctrico de cada circuito. Luego, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos para seleccionar el circuito más adecuado. Finalmente, se implementó y testeó en el laboratorio el circuito seleccionado para verificar su desempeño.

3.3.1 Diseño de circuitos

Se desarrolló el diseño de diferentes circuitos de acondicionamiento de energía para aplicaciones triboeléctricas. Se incluyeron consideraciones comunes a todos los diseños. Cada diseño se enfocó en cumplir con los parámetros de salida establecidos, como el voltaje, la corriente y frecuencia. Además, se seleccionaron los componentes más adecuados para optimizar la eficiencia del circuito, minimizando las pérdidas de potencia.

3.3.1.1 Diseño del circuito de rectificación

El objetivo es aprovechar la mayor cantidad de energía generada por el nanogenerador triboeléctrico motivo por el cual se optó por un rectificador de onda completa por puente de diodo. Las opciones en cuanto a la selección de los diodos a usar en el puente son: diodos schottky y diodos rectificadores. Si bien el diodo schottky tiene una menor caída de voltaje en comparación a los diodos rectificadores, para la aplicación de sistemas de nanogeneración triboeléctrica la mayor complicación radica en los bajos niveles de corriente, por lo que se optó por el uso de diodos rectificadores por sus menores corrientes de fuga.

3.3.1.2 Filtrado de onda rectificada

La finalidad del filtrado tras la rectificación fue disminuir el rizado de la onda, por este motivo se optó por un filtrado capacitivo con el cual se almacena el voltaje durante los picos generados por el TENG y suministra energía a la carga tras el paso de dicho pico, evitando así la disminución del voltaje por debajo del nivel deseado. Para el filtrado de la onda se hará uso de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{I_d}{F^*(V_p - V_{min})} \tag{1}$$

Donde:

C: Es el valor del capacitor requerido para el filtrado.

Id: Es la corriente de descarga del capacitor.

F: Es la frecuencia con la que se carga el capacitor.

Vp: Voltaje pico con el que es cargado el capacitor.

Vmin: Voltaje mínimo deseado durante la descarga del capacitor.

3.3.1.3 Diseño de limitador de voltaje

El limitador de voltaje cumple dos funciones dentro del circuito, la primera es suprimir el rizado remanente de la etapa de filtrado y la segunda es establecer el valor de voltaje pico que tendrá la salida dentro de los valores de uso residencial.

3.3.1.4 Diseño de los circuitos de inversión

Los circuitos de inversión fueron diseñados para alternar entre los ciclos positivo y negativo de una señal de corriente alterna. Para este propósito, se consideraron dos enfoques principales en la generación de pulsos de control: el primero, mediante el uso de una placa de desarrollo programable, y el segundo, empleando un circuito integrado de generación de pulsos.

Para determinar los valores de los componentes del circuito RC para el control de ancho de pulso del circuito integrado se utilizará la siguiente ecuación proporcionada por el fabricante.

$$F = 1 / (4, 4 x R * C)$$
⁽²⁾

Donde:

F = Frecuencia

R = Resistencia del circuito RC

C = Capacitancia del circuito RC

Por otro lado, el control de la apertura y cierre del flujo de voltaje se implementó utilizando diversos dispositivos electrónicos semiconductores de control.

3.3.2 Resultados

Para la obtención de resultados, se empleó un enfoque cuantitativo y experimental, aplicando una metodología empírica basada en la validación funcional de los circuitos. Tras la implementación física del diseño seleccionado, se realizaron mediciones utilizando instrumentos de laboratorio (multímetros y osciloscopios) bajo condiciones controladas. Se recopilaron datos relacionados con el voltaje de salida, la estabilidad de la señal, la respuesta ante carga y la eficiencia energética. Estos resultados fueron tabulados y organizados para facilitar su posterior análisis comparativo, constituyendo la base objetiva del desempeño real del circuito frente a las condiciones teóricas y simuladas.

3.3.3 Análisis

El análisis de resultados se desarrolló bajo una metodología analítica y comparativa, con un enfoque cuantitativo, permitiendo contrastar los datos experimentales con los obtenidos en las simulaciones previas. Se aplicaron herramientas estadísticas simples como el cálculo de promedios y porcentajes de variación para evaluar la consistencia del comportamiento del circuito, además de determinar el porcentaje de eficiencia alcanzado por el circuito usando la siguiendo ecuación.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100\% \tag{3}$$

Donde:

 η = Eficiencia del circuito

P salida = Potencia consumida por la carga

P entrada = Potencia total de funcionamiento del circuito

Además, se examinó el grado de coincidencia entre el modelo teórico y el circuito implementado, identificando las posibles fuentes de error o variación. Este análisis permitió

validar la funcionalidad del diseño, establecer su confiabilidad operativa y determinar su grado de adecuación como emulador de sistemas triboeléctricos.
CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Procedimiento

A continuación, se detallan las actividades realizadas para el desarrollo y evaluación de circuitos de acondicionamiento de energía generada por sistemas triboeléctricos. Se inició con el diseño de los circuitos, enfocado en satisfacer los parámetros de salida definidos. Posteriormente, se procedió a la simulación de cada diseño mediante software, donde se analizó el comportamiento eléctrico de cada circuito. Luego, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos para seleccionar el circuito más adecuado. Finalmente, se implementó y testeó en el laboratorio el circuito seleccionado para verificar su desempeño.

4.1.1 Diseño de circuitos

Se desarrolló el diseño de diferentes circuitos de acondicionamiento de energía para aplicaciones triboeléctricas. Se incluyeron consideraciones comunes a todos los diseños. Cada diseño se enfocó en cumplir con los parámetros de salida establecidos, como el voltaje, la corriente y frecuencia. Además, se seleccionaron los componentes más adecuados para optimizar la eficiencia del circuito, minimizando las pérdidas de potencia.

4.1.1.1 Consideraciones generales de diseño

A continuación, se describen los parámetros de diseño generales relacionados con el desarrollo común a todos los circuitos.

4.1.1.1.1 Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada establecidos para el diseño de los cinco circuitos de acondicionamiento son los valores que entrega un generador TENG [30], y son especificados en la Tabla 2.

TABLA 2

Magnitud	Valor
Voltaje	137V AC
Corriente	12.1 uA
Duración de pulso	5 ms
Frecuencia	10 Hz
Frecuencia	10 Hz

Parámetros de entrada.

Los valores fueron obtenidos de Nanogeneradores Triboeléctricos basados en caucho natural con nano fibras de celulosa y carbón activado [30].

4.1.1.1.2 Parámetros de Salida

Los parámetros de salida establecidos para el diseño de los cinco circuitos de acondicionamiento son especificados en la Tabla 3

TABLA 3

Parámetros de salida.

Magnitud	Valor
Voltaje RMS	110-127V AC
Voltaje Pico	155-179V AC
Corriente	100 mA
Duración de pulso	8.333 ms
Frecuencia	60Hz

Los valores considerados corresponden a los parámetros estándar de la red eléctrica de uso domiciliario en Ecuador, los cuales están definidos por la normativa nacional, establecidas por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL).

4.1.1.1.3 Diseño de los circuitos de acondicionamiento

La figura 3 ilustra el proceso desarrollado para el diseño de los circuitos de acondicionamiento, con el objetivo de garantizar una conversión eficiente de la energía generada por el sistema triboeléctrico.



Fig. 3 Diagrama de diseño de circuito de acondicionamiento

Como se muestra, el proceso de acondicionamiento de energía se basa en convertir la corriente alterna generada por el TENG, en corriente continua a un voltaje determinado e invertirla para alimentar la carga deseada.

4.1.1.1.4 Diseño del circuito de rectificación

El circuito de rectificación toma la corriente alterna a frecuencia de 10Hz generada por el nanogenerador triboeléctrico y la convierte en corriente continua a un voltaje constante.

El objetivo es aprovechar la mayor cantidad de energía generada por el nanogenerador triboeléctrico motivo por el cual se optó por un rectificador de onda completa por puente de diodo. Las opciones en cuanto a la selección de los diodos a usar en el puente son: diodos schottky y diodos rectificadores. Si bien el diodo schottky tiene una menor caída de voltaje en comparación a los diodos rectificadores, para la aplicación de sistemas de nanogeneración triboeléctrica la mayor complicación radica en los bajos niveles de corriente, por lo que se optó por el uso de diodos rectificadores por sus menores corrientes de fuga.

4.1.1.1.5 Filtrado de onda

La finalidad del filtrado tras la rectificación fue disminuir el rizado de la onda, por este motivo se optó por un filtrado capacitivo con el cual se almacena el voltaje durante los picos generados por el TENG y suministra energía a la carga tras el paso de dicho pico, evitando así la disminución del voltaje por debajo del nivel deseado.

El voltaje de salida considerado varía entre 155V y 179V, por lo que la selección del capacitor se realizó de la siguiente manera:

$$C = \frac{I_{descarga \ del \ capacitor}}{F^*(V_p - V_{min})}$$
(1)
$$C_{min} = \frac{0.1A}{10Hz * (194V - 155V)} = 256.41uF$$

$$C_{max} = \frac{0.1A}{10Hz * (194V - 179V)} = 666.67uF$$

Se seleccionan capacitores comerciales con valores próximos a los calculados realizados, siendo estos 330 μ F como valor de capacitor mínimo (Cmin) y 560 μ F como valor de capacitor máximo (Cmax).

4.1.1.1.6 Diseño de limitador de voltaje

Posteriormente al filtrado de la onda, se aplicó un limitador de voltaje fijo con el objetivo de limitar el voltaje a un valor entre 155V y 179V.

Para cumplir dicho objetivo se realizó un limitador de voltaje fijo con dos diodos Zener en serie cada uno con un valor de ruptura de 82V (dato de fabricante) con los que se obtuvo un voltaje fijo de 162V, valor que se encuentra dentro del rango de voltaje que se desea limitar (155-179V).

A su vez, cuenta con una resistencia de 1k ohm en serie para limitar la corriente que fluye por los diodos Zener por debajo de su valor límite de 250mA (dato de fabricante), adicionalmente, se incorporó un capacitor cuyo valor fue determinado mediante un proceso iterativo, ajustando su capacidad hasta alcanzar un nivel de rizado inferior a 0,01 V. Como resultado, se seleccionó un capacitor de 1 μ F a 200V conectado en paralelo a los diodos Zener, el cual cumple con este criterio de estabilidad del voltaje.

Finalmente, se conectó la base de un transistor NPN al cátodo del arreglo de diodos Zener, con la finalidad de que dicho transistor sea quien soporte la corriente de la carga y disipe la diferencia de potencial, motivo por el cual se toma en cuenta las siguientes consideraciones para la selección del transistor.

- Voltaje colector emisor mayor a $137 * \sqrt{2} = 193.74V$.
- Corriente colector emisor mayor a 100mA.
- Capacidad de disipación mayor a P = 193.74V * 0.1A = 3.18W.

4.1.1.2 Diseño de circuito alternador controlado por Arduino, con apertura y cierre por IGBTs

La apertura y cierre de los IGBTs es controlado por un Arduino a través de optoacopladores, esto con la finalidad de aislar la parte de control de la parte de fuerza y por la incapacidad del Arduino para proporcionar una salida de 15V para la activación de los IGBTs.

La selección de los IGBTs se realizó con los siguientes parámetros:

- Voltaje colector emisor mayor a 193.74V.
- Corriente colector emisor mayor a 100mA.
- Tiempo de conmutación menor a $\frac{1}{2F_{salida}} = \frac{1}{2*60} = 8.333$ ms.

4.1.1.3 Diseño de circuito alternador controlado por Arduino, con apertura y cierre por transistores

La apertura y cierre de los transistores es controlado por un Arduino a través de optoacopladores, esto con la finalidad de aislar la parte de control de la parte de fuerza, además, por la limitación del voltaje de activación del transistor tipo PNP. En cuanto a los transistores de tipo NPN si bien pueden ser activados directamente desde las salidas del Arduino se optó por añadir el optoacoplador para evitar problemas de sincronización por la diferencia del método de apertura y cierre.

El circuito consta de 4 transistores, dos de tipo PNP para el control de la línea positiva y dos de tipo NPN para el control de la línea negativa o tierra.

La selección de los transistores se realizó con los siguientes parámetros:

- Voltaje colector emisor mayor a 193.74V.
- Corriente colector emisor mayor a 100mA.
- Tiempo de conmutación menor a $\frac{1}{2F_{salida}} = \frac{1}{2*60} = 8.333$ ms.

4.1.1.4 Diseño de circuito alternador controlado por Arduino, con apertura por TRIACs y cierre por transistores

La apertura y cierre tanto de los TRIACs como de los transistores es controlado por un Arduino a través de optoacopladores, esto con la finalidad de aislar la parte de control de la parte de fuerza.

El circuito consta de dos TRIACs para el control de la línea positiva y de dos transistores tipo NPN para el control de la línea negativa o tierra y la desconexión de los TRIACs al privarlos de un punto a tierra y así disminuir los valores de corriente del TRIAC por debajo de su valor de mantenimiento.

La selección de los transistores y TRIACs se realizó con los siguientes parámetros:

- Voltaje colector emisor mayor a 193.74V.
- Corriente colector emisor mayor a 100mA.
- Tiempo de conmutación menor a $\frac{1}{2F_{salida}} = \frac{1}{2*60} = 8.333$ ms.

4.1.1.5 Diseño de circuito alternador controlado por integrado, con apertura y cierre por IGBTs

La apertura y cierre de los IGBTs es controlado por el circuito integrado CD4047 a través de optoacopladores, esto con la finalidad de aislar la parte de control de la parte de

fuerza y por la incapacidad del integrado para proporcionar una salida de 15V para la activación de los IGBTs.

La selección de los IGBTs se realizó con los siguientes parámetros:

- Voltaje colector emisor mayor a 193.74V.
- Corriente colector emisor mayor a 100mA.
- Tiempo de conmutación menor a $\frac{1}{2F_{salida}} = \frac{1}{2*60} = 8.333$ ms.

4.1.1.6 Diseño de circuito alternador controlado por integrado, con apertura y cierre por transistores

La apertura y cierre de los transistores es controlado por el circuito integrado CD4047 a través de MOSFETs, esto con la finalidad de disminuir la corriente requerida del integrado para la correcta operación de los transistores, además, debido a la necesidad de un paso seguro a tierra para el accionamiento del transistor tipo PNP. En cuanto a los transistores de tipo NPN la corriente proporcionada por el circuito integrado es inferior a los valores de requeridos para el funcionamiento de estos equipos por lo que se optó por añadir un MOSFET en configuración de desconexión, y así evitar problemas de sincronización por la diferencia del método de control de apertura y cierre.

El circuito consta de 4 transistores, dos de tipo PNP para el control de la línea positiva y dos de tipo NPN para el control de la línea negativa o tierra.

La selección de los transistores se realizó con los siguientes parámetros:

- Voltaje colector emisor mayor a 193.74V.
- Corriente colector emisor mayor a 100mA.
- Tiempo de conmutación menor a $\frac{1}{2F_{salida}} = \frac{1}{2*60} = 8.333$ ms.

4.1.2 Modelado de fuente

El modelado de la fuente consistió en el análisis y representación matemática de un sistema que simula las características de generación de energía eléctrica de los nano generadores triboeléctricos. Este proceso partió de la similitud presente entre la onda generada por un TENG y la respuesta de la acumulación de armónicos consecutivos de igual magnitud.

A través del software MATLAB, se generó la representación de los armónicos del 1 al 20, dado que esta cantidad de armónicos permite obtener un tiempo de impulso equivalente al de un generador triboeléctrico, cada uno de los armónicos son con el mismo intervalo de tiempo entre cada punto de 0.0001s, mismos que, al ser sumados y multiplicados por un factor de 9.3384, ajustan el nivel de voltaje a la magnitud deseada. Este factor se obtuvo al dividir el voltaje nominal requerido de 137 V generado por el TENG entre el voltaje resultante de la suma de los armónicos. Estos 10000 valores son transpuestos, corregidos, agrupados en una tabla y transformados en una matriz de celdas para poder ser exportados a través del mismo software a un documento de Excel con el código adjunto en el Anexo A.

De dicho documento se copiaron los datos a un archivo de texto para ser legibles para el software de Proteus 8 y así contar con una fuente representativa de un TENG para la posterior simulación.

4.1.3 Creación de fuente simulada

La creación de la fuente fue realizada en el software Proteus 8, en el cual se hizo uso de un generador de ondas a partir de archivo, en el cual se seleccionó el archivo de datos creado de tipo texto en el que los pares de coordenadas de tiempo-voltaje se encuentran separados por un salto de línea, y los valores de tiempo y voltaje son separados por un carácter de tabulación para poder ser leídos correctamente por el Software.

Dicho generador de ondas fue conectado a un *Arbitrary Voltage Controlled Voltage Source* como se muestra en la figura 4 con la referencia a tierra.



Fig. 4 Fuente de voltaje simulada

De este modo, el generador de ondas envía la señal de control para que la fuente de voltaje produzca los valores de voltaje previamente definidos. Como resultado, se obtuvo la gráfica de voltaje mostrada en la figura 5, correspondiente al voltaje generado por la fuente. En esta, se observa un valor de voltaje pico de 137 V a una frecuencia de 10 Hz, confirmando que la señal resultante es equivalente a la generada por un TENG.



Fig. 5 Análisis análogo de fuente simulada

Con esta fuente simulada se pasó a la etapa de simulación de circuitos.

4.1.4 Simulación de circuitos

Se procedió a simular los diseños de circuito mediante software, con el fin de observar su comportamiento ante distintas condiciones de carga y variaciones en la entrada. Las simulaciones permitirán analizar parámetros críticos, como eficiencia, pérdidas de energía y estabilidad, antes de realizar pruebas físicas.

4.1.4.1 Simulación de circuito de filtrado y limitación de voltaje

A partir de la fuente simulada se realizó la simulación de las etapas de rectificación, filtrado y limitación de voltaje. El voltaje resultante de esta etapa debe ser idealmente de 163V con una corriente de 100mA, para ello se realizó el cálculo mediante la ley de Ohm, del cual se determinó que la resistencia de requerida es de aproximadamente 1600 Ω , por lo que dicha carga fue la seleccionada para la simulación.



Fig. 6 Circuito de simulación de filtrado y limitación de voltaje

El circuito representado en la figura 6 fue simulado bajo dos condiciones de operación: la primera utilizando un capacitor de $330 \,\mu\text{F}$ y la segunda con un capacitor de $470 \,\mu\text{F}$. Estos valores de capacitancia fueron seleccionados por encontrarse dentro del rango determinado en los cálculos de filtrado de la señal.

4.1.4.1.1 Simulación con capacitor de 330uF

Como se muestra en la figura 7, durante la simulación del circuito con el capacitor de 330uF, el voltaje osciló entre 163V y 160V y la corriente requerida del sistema triboeléctrico en operación varío entre 1,47A y 1,74A.



Fig. 7 Circuito simulado con capacitor de 330uF

Con esta configuración, el circuito tiene una variación de voltaje de 3V la cual se puede ver reflejada en la figura 8 y una variación en el requerimiento de corriente de 270mA (1,47A y 1,74A).



Fig. 8 Variación de voltaje de regulador con capacitor de 330uF.

Al calcular el porcentaje de variación de la siguiente manera $\frac{3}{163} * 100\%$ se determinó que la variación de voltaje representa únicamente el 1,84% del voltaje continuo ideal de 163V con esta configuración de circuito.

4.1.4.1.2 Simulación con capacitor de 470uF

Comparativamente, en la figura 9 se muestra el resultado de la simulación del circuito con el capacitor de 470uF, donde el voltaje osciló entre 163V y 162,7V y la corriente requerida del sistema triboeléctrico en operación varió entre 1,51A y 1,94A.



Fig. 9 Circuito simulado con capacitor de 470uF

Con esta configuración, el circuito tiene una variación de voltaje de 300mV variación que es casi imperceptible en la figura 10 y una variación en el requerimiento de corriente de 430mA (1,51A-1,94A).



Al calcular el porcentaje de variación de la siguiente manera $\frac{0.3}{163} * 100\%$ se determinó que la variación de voltaje representa únicamente el 0,184% del voltaje continuo ideal de 163V con esta configuración de circuito, lo que muestra la mejora sustancial en la capacidad de mantener el voltaje estable, sin presentar un incremento significativo en el consumo de corriente pico siendo este de 200mA.

Tomando en cuenta estas consideraciones, el circuito que será utilizado como para la rectificación es el que cuenta con el capacitor de 470uF.

4.1.4.2 Simulación de los circuitos de alternado controlados por Arduino

Los circuitos controlados por Arduino hacen uso de la capacidad de cómputo de esta placa de desarrollo para generar el tren de pulsos que controlará la apertura y cierre de los diferentes elementos de control de potencia, para ello se realizó un código mediante el software Arduino IDE, dicho programa se encuentra en el Anexo B.

Al compilar correctamente este código, se generó un archivo con la extensión .hex cuya ruta se muestra en la sección de salida del software, misma que fue copiada y pegada en la sección de *Program Files* de la interfaz de Arduino en el software Proteus 8 como se muestra en la figura 11.

ARDUNO MEGA2560	+ Editar componente				2 ×
	Beferencia:	ARD1	Oculto:		
	Valor Elem:	ABDUINO MEGA2560	Oculto:	0	Booka
	Elemento:	Nuevo			Editar codigo
		Hanne		_	Cancelar
	The Engineering Projects:	www.TheEngineeringProjects.com	Hide All	~	
	PROGRAM FILE:	378679F76/Puente_HF.ino.hex	Hide All	100	
	CLKDIV8 (Divide clock by 8)	(1) Unprogrammed	Hide All	~	
	CKOUT (Clock output)	(1) Unprogrammed	Hide All	~	
18	WDTON (Watchdog timer always on)	(1) Unprogrammed	Hide All		
	BOOTRST (Select Reset Vector)	(1) Unprogrammed ~	Hide All		
	CKSEL Fuses:	(0000) Ext. Clock	Hide All	~	
GND PBPOCIARCICPCNIT	Boot Loader Size:	(00) 4096 words. Starts at 0x1F(~	Hide All	~	
AL PRIADCE PRIADCE PRIADCEAPCINTS	SUT Fuses:	(00) ~	Hide All	~	
AL PERMICE PERMICE	Clock Frequency:	16MHz	Hide All	~	
Ad Prevadoritor	ARDUINOMEGA2560	(Default)	Hide All	~	
PRANDCATCK 5 PRANCATCK	MEGA2560	(Default)	Hide All	~	
	Advanced Properties:				
	Disassemble Binary Code ~	No	Hide All	~	
ALE PROADCISPCENTS1 B ALE PROADCISPCENTS2 B ALE PROADCISPCENTS2 B ALE PROADCISPCENTS2 B ALE PROADCISPCENTS2 B ALE PROADCISPCENTS1 B ALE PROACCISPCENTS1 B	Other Properties:				
	outor roponos.				
2 SALIPCARDINITZ					
Check Control of Contr				Ŧ	
	Excluir de la simulación	🗆 Enlazar hoja hija			
	Excluir del Diseño PCB	 Ocultar pines comunes Editar tadas las ampiedades es 	-		

Fig. 11 Selección de programa complicado en Arduino simulado

Con este proceso realizado, Arduino puede funcionar dentro de la simulación de Proteus 8 y realizar las acciones determinadas por la programación donde los pines que se usó para las salidas son los 46, 48, 50, y 52.

El consumo por cada pin de salida en estado operativo para el accionamiento de los optoacopladores es de 171mA como se muestra en el amperímetro conectado al pin 52 de Arduino en la figura 12.



Fig. 12 Conexión del Arduino en Proteus 8

De esta forma el consumo continuo fue el equivalente a dos salidas, las cuales permanecen activas simultáneamente, dando como resultado 171mA * 2 = 342mA, más la corriente de consumo del Arduino Mega en estado pasivo de 80mA, dio como resultado una corriente de 422mA.

4.1.4.2.1 Con apertura y cierre por IGBTs

El tren de pulsos generados por el Arduino pasa a través de los optoacopladores 4n36 cuyo emisor se encuentra conectado a la puerta de cada IGBT a través de una resistencia de activación, para limitar el flujo de corriente con una derivación a tierra a través de una resistencia de mayor valor para la descarga de la puerta.

La conexión del colector de los optoacopladores se divide en dos tipos, el primero toma un voltaje del polo positivo del circuito de limitación, esto para brindar una diferencia de potencial baja entre el emisor y la base del IGBT, de esta forma el IGBT trabaja en zona de saturación durante el control del polo positivo del circuito. La segunda forma de conexión del colector del optoacoplador, se la realizó brindándole una fuente de 15V con la integración de un diodo Zener 1n4744A como se muestra en la de la figura 13.



Fig. 13 Conexión de diodo Zener para alimentación de 15V

De esta forma fueron activados dos optoacopladores de diferente conexión simultáneamente y con ellos la alternación de los IGBTs, para obtener un cambio de polaridad periódico cada medio ciclo a la frecuencia seleccionada como se puede observar en la figura 14.



Fig. 14 Circuito de alternación por IGBTs controlados por Arduino

Los valores esenciales tanto de consumo pasivo de la simulación de este circuito y como los valores de medición en la carga se encuentran transcritos en la tabla 4.

TABLA 4

Valor medido
16,1 mA
1,46 mA
95,8 mA
130V
153V

Valores del circuito de alternación por IGBTs controlados por Arduino.

Como resultado de la suma de las corrientes de activación de los IGBTs a través de los optoacopladores de 16,1mA y 1,46mA y la corriente perdida en la limitación de voltaje de la alimentación de 15V con un valor de 1,5mA, dio como resultado un total de 19,06 mA, el cual al ser añadido a la corriente de operación del Arduino de 422mA resulta en una corriente de 441,06mA. Además, el circuito presenta un voltaje de 153V lo que representa una caída de voltaje de 10V entre la fuente rectificada de 163V y el voltaje en la carga.

4.1.4.2.2 Con apertura y cierre por transistores

El tren de pulsos generados por el Arduino pasa a través de los optoacopladores 4n36 los cuales tienen dos conexiones diferentes, la primera de ellas para el control de los transistores de tipo PNP en la cual el emisor del optoacoplador se encuentra aterrado y el colector es conectado a la base del transistor a través de una resistencia para limitar el flujo de corriente cuyo valor es determinado en función de la ganancia con la que cuente el transistor. En la segunda forma de conexión del optoacoplador para el control de los transistores de tipo NPN, el emisor del optoacoplador se conecta a la base del transistor a través de una resistencia para el control de los transistores de tipo NPN, el emisor del optoacoplador se conecta a la base del transistor a través de una resistencia que de igual forma depende de la ganancia del transistor empleado, y el colector de una fuente de 5,1V generada con el uso de un diodo Zener 1n4733A como se muestra en la figura 15.



Fig. 15 Conexión de diodo Zener para alimentación de 5V

De esta forma fueron activados dos optoacopladores de diferente conexión simultáneamente y con ellos la alternación de los transistores, para obtener un cambio de polaridad periódico cada medio ciclo a la frecuencia seleccionada como se puede observar en la figura 16.



Fig. 16 Circuito de alternación de transistores controlados por Arduino

Los valores esenciales tanto de consumo pasivo de la simulación de este circuito y como los valores de medición en la carga se encuentran transcritos en la tabla 5.

TABLA 5

Procedencia del consumo	Valor medido
Corriente de transistor NPN	12,4
Corriente de transistor PNP	5,39
Corriente en la carga	102 mA
Voltaje AC en la carga	163V
Voltaje DC en la carga	163V

Valores del circuito de alternación por transistores controlados por Arduino.

El consumo pasivo de este circuito resultante de la suma de la corriente de activación del transistor de tipo PNP de 5,39mA, la corriente de activación del transistor de tipo NPN de 12,4mA y la corriente perdida en la limitación de voltaje de la alimentación de 5,1V con un valor de 0,79mA dio un total de 18,58mA, el cual al ser añadido a la corriente de operación del Arduino de 422mA resulta en una corriente de 440,58mA. Además, el circuito presenta un voltaje de 163V lo que muestra la ausencia de pérdida de voltaje entre la fuente rectificada y la carga.

4.1.4.2.3 Con apertura por Triacs y cierre por transistores

El tren de pulsos generados por el Arduino pasa a través de los optoacopladores Moc3021 los cuales tienen uno de los ánodos de su salidas tipo Triac conectada a la puerta del Triac de fuerza a través de una resistencia para limitar la corriente de activación y su segunda salida conectada a una fuente de 12 V proveniente del regulador integrado 7812 conectado como se muestra en la figura 17.



Fig. 17 Conexión de regulador integrado 7812 para alimentación de 12V

De esta forma fueron activados dos optoacopladores simultáneamente, uno conectado a un Triac y el segundo conectado a un transistor de tipo NPN y de esta forma obtener un cambio de polaridad periódico cada medio ciclo a la frecuencia seleccionada como se puede observar en la figura 18.



Fig. 18 Circuito de alternación de Triacs y Transistores controlados por Arduino

Los valores esenciales tanto de consumo pasivo de la simulación de este circuito y como los valores de medición en la carga se encuentran transcritos en la tabla 6.

TABLA 6

Valores del circuito de alternación por TRIACs y transistores PNP controlados por

Procedencia del consumo	Valor medido
Corriente de activación TRIAC	375 mA
Corriente de transistor NPN	220 mA
Voltaje DC en la carga	162V

Arduino.

El consumo pasivo de este circuito resultante de la suma de la corriente de activación del transistor de tipo NPN de 220mA, la corriente de activación del Triac de 375mA y la corriente perdida en la limitación de voltaje de la alimentación de 12V con un valor de 241mA dio un total de 836mA, el cual al ser añadido a la corriente de operación del Arduino de 422mA resulta en una corriente de 1258mA. Además, el circuito presenta un voltaje de 162,3V lo que representa una caída de voltaje de 0,7V entre la fuente rectificada de 163V y el voltaje en la carga.

4.1.4.3 Simulación de los circuitos de alternado controlados por integrado

Los circuitos controlados por integrado hacen uso de la capacidad del circuito integrado CD4047 de crear pulsos alternados a una frecuencia establecida por la respuesta de un circuito RC conectado a sus pines 1, 2 y 3. La conexión de dicho circuito se encuentra en la figura 19.



Fig. 19 Conexión de circuito integrado CD4047

Se incorpora dentro del circuito una resistencia de 330Ω en la entrada de voltaje para limitar la corriente que ingresa al integrado. Para el control de la frecuencia se calculó la resistencia y capacitancia necesaria de la siguiente manera.

$$F = 1 / (4,4 x R * C)$$
(2)

$$F = 1/(4,4 x (350x10^{3} + (100x10^{3})x28\%)x10x10^{-9})$$

$$F = 60,125 Hz$$

Se optó por añadir un potenciómetro en lugar de una resistencia fija para calibrar la frecuencia del circuito real, dado que los capacitores y resistencias tienen un margen de variación el cual debe ser compensado añadiendo o reduciendo resistencia al circuito RC final.

La alimentación del circuito se la realizó a partir de un regulador de voltaje basado en el diodo Zener 1N4742A conectado como se muestra en la figura 20.



Fig. 20 Conexión de diodo Zener para alimentación de 12V

De esta forma el consumo continuo de este integrado en funcionamiento es el equivalente a la corriente de cada canal del integrado de 0,24mA más 11,6mA del consumo pasivo máximo del circuito de regulación dando como resultado 11,84mA de consumo total pasivo por la generación del tren de pulsos.

4.1.4.3.1 Con apertura y cierre por IGBTs

El tren de pulsos generados por el integrado pasa a través de los optoacopladores 4n36 cuyo emisor se encuentra conectado a la puerta de cada IGBT a través de una resistencia para limitar el flujo de corriente de activación y con una derivación a tierra a través de una resistencia de mayor valor para la descarga de la puerta.

La conexión del colector de los optoacopladores se divide en dos tipos, el primero toma un voltaje del polo positivo del circuito de limitación, esto para brindar una diferencia de potencial baja entre el emisor y la base del IGBT, de esta forma el IGBT trabaja en zona de saturación durante el control del polo positivo del circuito. La segunda forma de conexión del colector del optoacoplador, se la realizó brindándole una fuente de 20V con la integración de un diodo Zener 1n4747A como se muestra en la de la figura 21.



Fig. 21 Conexión de diodo Zener para alimentación de 20V

De esta forma fueron activados dos optoacopladores de diferente conexión simultáneamente y con ellos la alternación de los IGBTs, para obtener un cambio de polaridad periódico cada medio ciclo a la frecuencia seleccionada como se puede observar en la figura 22.



Fig. 22 Circuito de alternación de IGBTs

Los valores esenciales tanto de consumo pasivo de la simulación de este circuito y como los valores de medición en la carga se encuentran transcritos en la tabla 7.

TABLA 7

Procedencia del consumo	Valor medido
Corriente de activación IGBT1	13,5 mA
Corriente de activación IGBT2	1,93 mA
Corriente en la carga	79,8 mA
Voltaje AC en la carga	60,4 V
Voltaje DC en la carga	128 V

Valores del circuito de alternación por IGBTs controlados por un integrado.

Como resultado de la suma de las corrientes de activación de los IGBTs a través de los optoacopladores con valores de 13,5mA para el IGBT1y 1,93mA para el IGBT2, y la corriente perdida en la limitación de voltaje de la alimentación de 20V con un valor de 3,39mA, dio como resultado un total de 18,82mA, el cual, al ser añadido a la corriente de operación del integrado de 11,84mA resulta en una corriente de 30,66mA. Además, el circuito presenta un voltaje de 128V lo que representa una caída de voltaje de 35V entre la fuente rectificada de 163V y el voltaje en la carga.

4.1.4.3.2 Con apertura y cierre por transistores

El tren de pulsos generados por el integrado genera la diferencia de potencial necesaria para el accionamiento de los MOSFETs, esto se realizó a través de una resistencia para limitar la corriente de activación y una resistencia de descarga de mayor valor a tierra como se muestra en la figura 23.



Fig. 23 Conexión del MOSTET a las resistencias de activación y descarga.

El control de los transistores por medio de los MOSFETs se realiza de dos formas diferentes, la primera de ellas corresponde al control de los transistores de tipo PNP en la cual el MOSFET cuyo SOURCE se encuentra aterrado, permite el paso de corriente hacia tierra a través de una resistencia conectada entre la base del transistor y el Drain del MOSFET, dicha resistencia depende de la ganancia con la que cuente el transistor, la corriente deseada en la carga y el valor del voltaje aplicado al emisor del transistor. En la segunda forma de conexión de los MOSFETs para el control de los transistores de tipo NPN, el Drain del MOSFET se bifurca entre una conexión a la fuente de 12V a través de una resistencia de limitación de corriente, y una conexión directa a la base del transistor, mientras que el SOURCE es aterrado.

De esta forma fueron activados dos MOSFETs con diferente conexión simultáneamente y con ellos la alternación de los transistores, para obtener un cambio de polaridad periódico cada medio ciclo a la frecuencia seleccionada como se puede observar en la figura 24.



Fig. 24 Circuito de alternación de Transistores.

Los valores esenciales tanto de consumo pasivo de la simulación de este circuito y como los valores de medición en la carga se encuentran transcritos en la tabla 8.

TABLA 8

Procedencia del consumo	Valor del consumo en mA
Corriente de transistor PNP	4,93 mA
Corriente de transistor NPN	3,65 mA
Voltaje AC en la carga	163 V
Voltaje DC en la carga	163 V

Valores del circuito de alternación por transistores controlados por un integrado.

El consumo pasivo de este circuito resultante de la suma de la corriente de activación del transistor de tipo PNP de 4,93mA, la corriente de activación del transistor de tipo NPN de 3,65mA y la corriente de fuga de 0,16mA dio un total de 8,74mA, el cual al ser añadido a la corriente de operación del integrado de 11,84mA resulta en una corriente de 20,58mA. Además, el circuito presenta un voltaje de 163V lo que muestra la ausencia de pérdida de voltaje entre la fuente rectificada y la carga.

4.1.5 Resultados de formas de onda

Los resultados de los circuitos simulados son detallados mediante gráficas de tipo *Analogue Analysis* generadas por el programa Proteus 8 donde se realizaron las simulaciones de los circuitos, en ellas se observa el comportamiento durante la mitad superior del ciclo.

La figura 25 es el resultado del circuito de alternación basado en IGBTs controlados por Arduino, en ella se observa que el voltaje pico es de 155V, sin embargo, este voltaje se mantiene únicamente hasta por dos ciclos continuos, tras los cuales el voltaje decae paulatinamente hasta llegar a 105 Voltios.



Fig. 25 Resultado de alternación por IGBTs controlados por Arduino

En la figura 26 se observa una mejora significativa al usar transistores en cuanto al mantenimiento del voltaje, siendo capaz de mantener un voltaje pico de 163V durante todos sus ciclos, además se observan pequeñas fluctuaciones en algunos de los picos debido a la incapacidad del capacitor seleccionado en el circuito de filtrado para mantener un voltaje perfectamente constante sobre los 163V.



Fig. 26 Resultado de alternación por transistores controlados por Arduino

Como muestra la figura 27, la alternación mediante TRIACs genera un gran número de fluctuaciones debido a la exigencia de corriente de este circuito, dando como resultado fluctuaciones significativamente mayores durante los periodos de descarga del capacitor de filtrado, también es posible observar un pico de sobrevoltaje al enviar la señal de apagado debido a la recuperación de sus cargas almacenadas, además de la presencia de una ligera curvatura al pasar por debajo de su corriente de mantenimiento, finalmente, se observa que en su estado inactivo, este circuito permanece con una diferencia de potencial de 10V, lo que produce una perdida constante de 10V al analizar los dos semiciclos en la carga.



Fig. 27 Resultado de alternación por TRIACs y transistores controlados por Arduino

La figura 28 es el resultado del circuito de alternación basado en IGBTs controlados integrado, y de manera similar al control por Arduino, en ella se observa que el voltaje pico es de 128V, además, este voltaje se mantiene únicamente hasta por dos ciclos continuos, tras los cuales el voltaje decae paulatinamente hasta llegar a 102 Voltios.



Fig. 28 Resultado de alternación por IGBTs controlados por integrado

Por último, la figura 29 muestra nuevamente el desempeño del circuito de alternación por transistores siendo capaz de mantener un voltaje estable en 163V, y en contraparte con el circuito controlado por Arduino, este presenta una variación ligeramente mayor de voltaje durante el final del periodo de descarga del capacitor del circuito de filtrado.



Fig. 29 Resultado de alternación por transistores controlados por integrado

Estos circuitos fueron simulados bajo las mismas condiciones de operación, siendo estas, una frecuencia de 60 Hz y una carga de 1600ohms.

4.1.6 Análisis y comparación de circuitos

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, se realizará un análisis comparativo entre los diseños. Este análisis permitirá identificar el circuito con mejor desempeño, seleccionando así el más adecuado para la implementación práctica.

4.1.6.1 Análisis de resultados

Los resultados de la simulación muestran diferencias significativas en el comportamiento del voltaje según el tipo de dispositivo utilizado y la forma de conmutación.

Los circuitos basados en IGBTs presentan un comportamiento variable según el tipo de control. El sistema controlado por Arduino alcanza un voltaje pico de 155V, pero solo lo mantiene por dos ciclos antes de descender a 105V, mientras que el sistema con control integrado logra 128V con una caída similar hasta 102V. Esto sugiere que ambos sistemas enfrentan limitaciones para mantener un voltaje constante a lo largo del tiempo.

Por otro lado, los circuitos de alternación mediante transistores muestran un mejor desempeño en la estabilidad del voltaje. Se alcanza un pico de 163V, que se mantiene constante durante todos los ciclos, aunque con pequeñas fluctuaciones debido a la capacidad del capacitor de filtrado.

En contraste, los circuitos basados en TRIACs presentan mayores fluctuaciones debido a su alta demanda de corriente y la recuperación de cargas almacenadas, generando picos de sobrevoltaje y una pérdida constante de 10V en el estado inactivo.

En general, los resultados indican que los transistores ofrecen una mejor estabilidad en el mantenimiento del voltaje en comparación con los TRIACs, aunque con algunas variaciones que podrían optimizarse mejorando el diseño del circuito de filtrado.

4.1.6.2 Comparación de circuitos

En esta sección se realiza un análisis comparativo entre los distintos circuitos de alternación evaluados. La comparación permite identificar las ventajas y desventajas de cada método de conmutación y los efectos del tipo de transistor empleado en la alternación del voltaje. Con esta evaluación, se busca determinar el circuito más eficiente para aplicaciones
específicas de conversión y acondicionamiento de energía. Esta comparación se centró en la tabla 9.

TABLA 9

Circuitos	Voltaje de salida	Corriente de funcionamiento	Variación de voltaje
IGBTs Arduino	155 V	441,06 mA	50 V
Transistores Arduino	163 V	440,58 mA	0,5 V
Triacs Arduino	162,3 V	1258 mA	5 V
IGBTs Integrado	128 V	30,66 mA	26 V
Transistores Integrado	163 V	20,58 mA	1 V

Comparación de voltajes y corrientes simuladas.

En esta tabla el voltaje de salida es el voltaje medido en la carga, la variación de voltaje es la diferencia entre el voltaje pico máximo y mínimo por ciclo, y la corriente de funcionamiento es la suma entre el consumo del conmutador (422mA para el Arduino y 11,84mA para el integrado) y las pérdidas de corriente en activación.

4.1.6.3 Selección de circuito

En esta sección, se analiza el criterio de selección basado en los resultados obtenidos en la simulación, con la finalidad de determinar cuál es el circuito que ofrece el mejor rendimiento en términos de alternación y eficiencia.

Para determinar cuál es el circuito más adecuado para la implementación, se asignó a cada circuito una calificación en función de una distribución lineal tomando como extremos los máximos y mínimos alcanzados, de tal manera que el circuito cuyo parámetro sea más

favorable se verá representado por el número 1, mientras que el menos favorable tendrá el valor de 0 y los parámetros de los demás circuitos tendrán valores intermedios en función de que tan cerca se encuentren del valor más favorable. Este proceso es repetido en cada uno de los criterios y promediados para determinar el circuito con mejores resultados para su posterior implementación. El resultado de este procedimiento se muestra en la tabla 10.

TABLA 10

Circuitos	Voltaje de salida	Corriente de funcionamiento	Variación de voltaje	Promedio
IGBTs Arduino	0,771428571	0,660196215	0	0,477208262
Transistores Arduino	1	0,660584119	1	0,886861373
Triacs Arduino	0,98	0	0,909090909	0,62969697
IGBTs Integrado	0	0,991854019	0,484848485	0,492234168
Transistores Integrado	1	1	0,98989899	0,996633

Cuadro de selección de circuito.

De este modo, el circuito seleccionado fue aquel que tuvo un puntaje promedio mayor, siendo este el circuito de alternación por transistores controlados por integrado con un promedio de 0,996633.

4.1.7 Implementación de circuito

En esta fase se llevará a cabo la construcción del circuito seleccionado, empleando los componentes previamente definidos en el diseño. Se ensamblarán y conectarán los elementos, siguiendo el esquema, para asegurar un funcionamiento óptimo. Esta etapa permitirá dar forma física al diseño simulado, preparando el circuito para las posteriores pruebas de validación en el entorno de laboratorio.

4.1.7.1 Determinación de transistores

Para la implementación de circuitos de acondicionamiento de energía, la elección de transistores es la parte más importante en cuanto a la selección de materiales, debido a su relevancia dentro del circuito como parte primordial del circuito de inversión, y a partir del cual se determinaron los demás materiales del circuito. Tras realizar un análisis exhaustivo de las características eléctricas, térmicas y de confiabilidad requeridas para los transistores en este circuito de acondicionamiento de energía provenientes de generadores triboeléctricos (TENG), se decidió que los transistores más adecuados para este propósito son los transistores MJE350 y MJE340.

4.1.7.2 Diseño PCB

El diseño de un circuito impreso (PCB) es un aspecto fundamental en la implementación de sistemas electrónicos, ya que garantiza el funcionamiento adecuado de los componentes en un espacio compacto. EL diseño PCB se realizó buscando la optimización del espacio para el circuito, además de la reducción de interferencias y asegurando la correcta distribución de la energía.

El proceso de creación de un PCB comienza con la elaboración del esquema eléctrico, mismo que parte del diseño simulado, desde el cual se retiran componentes de simulación como voltímetros, amperímetros, osciloscopio y fuentes de energía, las cuales son reemplazas por bornes de conexión que faciliten la conexión del circuito tanto a la carga, como a la fuente de energía como son los nanogeneradores triboeléctricos, además de la inclusión de la conexión de pines ocultos de ciertos dispositivos.

A partir de este esquema, se diseñó el *layout* del PCB, donde se definieron la ubicación de los componentes en la placa y las rutas de las conexiones o pistas haciendo uso de herramientas integradas dentro del programa Proteus 8 que facilitan la labor de encontrar una ruta óptima y reduce la posibilidad de fallos humanos en el diseño, como el olvido de

conexiones o conexiones erróneas, además de permitir el determinar condiciones de creación y ser alertados en caso de infringirlas. El resultado de este proceso se puede observar en la figura 30.



Fig. 30 Diseño PCB del circuito de acondicionamiento.

Posteriormente, se llevó a cabo la generación de archivos de fabricación, que incluyen la información necesaria para la producción del PCB, como pistas, vía e indicadores de posición de componentes, mismo que puede ser observado en la figura 31.



Fig. 31 Diseño PCB para impresión

Este circuito constituye la base para construcción del circuito impreso (PCB). A partir de la disposición y las conexiones de los componentes definidos en el diseño, se puede proceder a la creación de la placa de circuito impreso, que garantizará la integración y el funcionamiento de todos los elementos electrónicos involucrados en el sistema.

4.1.7.3 Construcción de circuito

En esta fase, se materializan los conceptos previos de diseño, convirtiendo los esquemas y diagramas en un circuito funcional. En este contexto, se abordará el proceso de construcción del circuito, destacando las fases y los aspectos técnicos que garantizan su correcta implementación y funcionamiento.

4.1.7.3.1 Creación de PCB

La creación de una PCB se llevó a cabo mediante el proceso tradicional del planchado. Tras haber completado el diseñó del esquema del circuito utilizando el software Proteus 8, donde se definieron las conexiones entre los componentes, fue impreso en papel fotográfico brillante utilizando una impresora láser, preparando así el circuito para su manufactura.

Una vez impreso el diseño del circuito, este fue cuidadosamente recortado y transferido a una baquelita con una capa de cobre, previamente limpiada para eliminar impurezas superficiales. El proceso de transferencia se realizó aplicando calor constante durante 20 minutos, utilizando una plancha para asegurar una adherencia uniforme del tóner. Posteriormente, el papel fue retirado sumergiéndolo en agua, lo que permitió la completa transferencia del diseño a la superficie de cobre

A continuación, la placa fue sumergida en una solución de cloruro férrico para eliminar el cobre no deseado, mientras que el cobre recubierto por la capa de tóner se mantuvo intacta por la ausencia de contacto directo con el ácido. Una vez retirado por completo el cobre no deseado, la placa fue enjuagada con abundante agua, para después limpiarla con un solvente de pintura hasta dejar el cobre de las pistas expuesto, como se muestra en la figura 32.



Fig. 32 Placa del circuito impreso tras el tratamiento químico

Finalmente, se perforaron los orificios para los componentes y se realizó una inspección para verificar que todas las conexiones fueran correctas y funcionales con ayuda de un multímetro en su función de prueba de continuidad.

4.1.7.3.2 Adición de componente

La adición de componentes a la PCB manufacturada representa la última etapa crítica antes de realizar las pruebas experimentales. En este proceso, se asegura que cada componente esté correctamente colocado y soldado, estableciendo las conexiones necesarias para verificar el funcionamiento del circuito.

Una vez completado el diseño y la fabricación de la placa de circuito impreso (PCB), se procedió al montaje de los componentes electrónicos, como resistencias, transistores,

capacitores y otros, en sus ubicaciones correspondientes. Este proceso se llevó a cabo utilizando un cautín, una herramienta de soldadura que permitió fijar los componentes a la placa mediante la aplicación de soldadura.

El proceso comenzó con la colocación de los componentes en las posiciones indicadas por el diseño de la PCB. Los terminales de los componentes se insertaron en los agujeros correspondientes de la placa, asegurándose de que estuvieran alineados correctamente. Luego, se utilizó el cautín para calentar la soldadura, que, al fundirse, cubrió las patas de los componentes y las pistas de la PCB, estableciendo conexiones eléctricas permanentes. Durante la soldadura, se controló la temperatura del cautín y el tiempo de exposición para evitar dañar los componentes o la placa. Tras completar la soldadura, se verificó la integridad de las conexiones mediante una inspección visual para asegurarse de que no hubiera cortocircuitos ni soldaduras frías, lo que garantizó un funcionamiento confiable del circuito. El resultado de la culminación de este proceso puede ser visto en la figura 33.



Fig. 33 Circuito de acondicionamiento ensamblado

El circuito de acondicionamiento fue testeado de manera preliminar con un multímetro para verificar la continuidad de las conexiones y la ausencia de cortocircuitos, para posteriormente pasar a las pruebas de laboratorio.

4.1.8 Pruebas de laboratorio

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de potencia de la carrera de Electricidad, un espacio equipado con los recursos necesarios para el desarrollo de este tipo de experimentos. En dicho laboratorio, se procedió a alimentar el circuito implementado utilizando una fuente de energía alterna, la cual fue conectada a un transformador con una potencia nominal de 1 kVA. Este transformador permitió obtener un voltaje de salida cercano a 137 V AC, el cual fue suministrado directamente al circuito con el fin de evaluar su comportamiento bajo condiciones controladas, donde se realizaron mediciones mediante el uso de un multímetro para verificar los valores obtenidos de voltaje alterno, y un osciloscopio para visualizar de forma precisa la forma de onda obtenida, así como los valores de voltaje y frecuencia.

4.2 Resultados

En este apartado se detallan los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales llevadas a cabo en el laboratorio. Estos resultados permiten analizar el comportamiento del circuito implementado bajo diferentes condiciones de operación, así como verificar el cumplimiento de los parámetros establecidos en el diseño.

En la Figura 34 se presenta el resultado de la prueba realizada al circuito implementado, donde es posible observar de manera detallada los parámetros eléctricos más relevantes. En dicha imagen se aprecia la forma de onda de la señal obtenida, así como los valores correspondientes al voltaje pico, voltaje RMS y la frecuencia de operación, durante uno de los semiciclos de la onda resultante.



Fig. 34 Resultado de la medición de la salida alterna del circuito implementado.

Los valores de voltaje obtenidos fueron, 122V RMS y 182Vpico, además de una frecuencia de 60,039Hz, esto con una carga resistiva de $12k\Omega$. Mientras que el valor de voltaje alterno medidos a través del multímetro se muestra en la Figura 35.



Fig. 35 Resultado de la medición de corriente alterna con el multímetro.

E1

valor de

voltaje alterno obtenido de la medición con el multímetro es de 183,6V AC, realizando la prueba con una carga resistiva de $8k\Omega$.

4.3 Análisis de resultados

En esta sección se presenta el análisis de los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales sobre el circuito implementado y simulaciones realizadas. El propósito de este análisis es evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones específicas de operación y contrastar los datos empíricos con los valores teóricos o simulados previamente. A través de la interpretación de los parámetros eléctricos medidos, se busca determinar el grado de cumplimiento de los objetivos del diseño, así como identificar posibles desviaciones, sus causas y su impacto en el rendimiento del circuito.

4.3.1 Análisis de requerimientos de nanogeneradores triboeléctricos

A través de la simulación se determinó que la corriente necesaria para el funcionamiento del circuito es de entre 1,51A y 1,94A, con dicho valor de corriente se puede calcular el número de TENGs necesarios en un arreglo en paralelo, ya que cada uno genera una salida de corriente de 12.1uA, de esta forma se estima un aproximado de entre 124793 y 160330 TENGs para obtener una generación de 100mA a valores nominales de la red.

La implementación de un arreglo eléctrico compuesto por 16000 nanogeneradores triboeléctricos (TENGs) conectados en paralelo representa un desafío técnico considerable debido a múltiples factores asociados tanto al diseño como a la operación del sistema. Como la gestión de un número tan elevado de dispositivos, lo cual implica una complejidad significativa en términos de interconexión física, ya que cada unidad debe estar correctamente acoplada para garantizar una distribución uniforme de corriente sin generar desequilibrios entre los nodos. Además, la variabilidad inherente al comportamiento individual de cada TENG puede provocar desfasajes o interferencias que afecten negativamente la eficiencia global del conjunto.

4.3.2 Análisis de eficiencia del circuito

El circuito seleccionado al ser el que presenta las menores pérdidas de corriente y una caída de voltaje muy baja en comparación con algunos de los circuitos simulados, es también el más eficiente de ellos. Tomando en cuenta que la salida del circuito es de 100mA a 122V

RMS, con una pérdida de corriente total de 20,58mA, y un voltaje de entrada de 137V RMS la eficiencia del circuito fue calculada de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100\%$$
(3)

$$\eta = \frac{V_{salida} * I_{salida}}{V_{entrada} * I_{total}} * 100\%$$
(3)

$$\eta = \frac{122V * 100mA}{137V * (100mA + 20,58mA)} * 100\%$$

$$\eta = \frac{12200}{16519,46} * 100\%$$

$$\eta = 73,85\%$$

La eficiencia del circuito de acondicionamiento de 73,85% es relativamente baja en comparación a la eficiencia de otros circuitos de acondicionamiento convencionales, sin embargo, este circuito presenta una gran ventaja en cuanto al escalamiento de su eficiencia puesto que la mayor parte de las pérdidas son fijas, mientras que la potencia de salida puede ser incrementada con facilidad haciendo uso de transistores con mayor ganancia. Por ejemplo, un transistor con 5 veces más ganancia permitiría que el circuito pase a tener la eficiencia calculada a continuación:

$$\eta = \frac{122V * 500mA}{137V * (500mA + 20,58mA)} * 100\%$$
$$\eta = 85,53\%$$

De esta forma, el circuito podría alcanzar una eficiencia del 85%, lo cual representa una mejora significativa en comparación con los valores obtenidos inicialmente. Además, una eficiencia del 85% es más adecuada para aplicaciones donde se trabaja con fuentes de energía no convencionales, como los nanogeneradores triboeléctricos, y así optimizar el rendimiento del sistema sin comprometer su estabilidad operativa.

Conclusiones

La investigación permitió identificar y clasificar los principales sistemas de generación triboeléctrica, destacando aspectos de la generación como las propiedades de los materiales, área de contacto, velocidad de separación y condiciones ambientales como la humedad. Además, se analizaron los distintos circuitos de acondicionamiento utilizados para maximizar el aprovechamiento de la energía generada por TENGs de salida en corriente alterna (AC), confirmando la necesidad de integrar etapas de rectificación, filtrado, regulación y conversión para lograr una entrega energética estable y funcional.

A través del proceso de diseño, se elaboraron múltiples propuestas de circuitos de acondicionamiento en diferentes etapas como fueron la rectificación, limitación e inversión, que permitieron adaptar las características variables de la salida de un TENG a parámetros eléctricos previamente establecidos de 110-127V AC, 100 mA a 60Hz.

La implementación del circuito de acondicionamiento seleccionado demostró ser eficaz como fuente de energía en corriente alterna, logrando una salida de 122 V RMS y 182Vpico con una corriente de 101 mA y una forma de onda sinusoidal modificada con frecuencia de 60,039Hz, lo que valida su uso en aplicaciones de baja potencia. Esta etapa confirmó que, con un diseño y conversión adecuados, la energía generada por un TENG puede ser estabilizada y entregada de forma confiable a dispositivos que requieren alimentación en AC.

Recomendaciones

Se recomienda continuar con el desarrollo de técnicas de optimización para los circuitos de acondicionamiento, con el fin de mejorar su eficiencia y adaptabilidad frente a las variaciones en la señal generada por los TENGs. Asimismo, sería conveniente explorar la integración de sistemas de almacenamiento energético y control inteligente que permitan una gestión más eficaz de la energía recolectada, especialmente cuando se desea alimentar cargas en corriente alterna. Finalmente, se sugiere realizar pruebas a mayor escala con arreglos múltiples de TENGs, lo cual permitiría evaluar la viabilidad del sistema en aplicaciones reales de baja potencia.

Referencias bibliográficas

[1] Ministerio de Energía y Minas (2023, March 22). INFORME RENDICIÓN DE CUENTAS AÑO 2022 (7th ed.) [Online]. Available: https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/wp-1679521334657.pdf

[2] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2023, March 28). Atlas del sector eléctrico ecuatoriano 2022 (4th ed.) [Online]. Available: https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2023/03/Atlas-2022_baja.pdf

[3] CENACE (2023, April 1). INFORME ANUAL 2022 (7th ed.) [Online]. Available: https://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/04/Parte-1-Informe-Anual-2022.pdf

[4] K. S. Mohan, S. Mahapatra, D. J. L. Febin, T. Perumal, S. Raj, and P. Prabhakaran, "Economic feasibility studies of simple and discounted payback periods for 1 MWp ground mounted solar PV plant at tirupati airport," in Smart Grids and Microgrids: Technology Evolution, 2022, pp. 59-73.

[5] W. M. Amirul Bin Mohd Adnan, A. Bt Abdul Aziz, and L. B. Raya, "Feasibility Study of Wind Power Generation System Using Small Scale Wind Turbines," in 2022 IEEE 10th Conference on Systems, Process and Control, ICSPC 2022 - Proceedings, 2022, pp. 166-169, doi: 10.1109/ICSPC55597.2022.10001785.

[6] J. J. Bouendeu, F. A. Talla Konchou, M. N. B. Astrid, M. F. Elmorshedye, and T. René, "A systematic techno-enviro-socio-economic design optimization and power quality of hybrid renewable microgrids," Renewable Energy, Article vol. 218, 2023, Art no. 119297, doi: 10.1016/j.renene.2023.119297.

[7] Z. Li, Z. Sun, W. Zhang, and S. Li, "Environmental Impact of the Recycling of Ni-Co-Containing Saggars—A LCA Case Study in China," Sustainability (Switzerland), Article vol. 15, no. 9, 2023, Art no. 7442, doi: 10.3390/su15097442.

[8] K. Raj and A. P. Das, "Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution," Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Article vol. 5, pp. 79-85, 2023, doi: 10.1016/j.enceco.2023.02.001.

[9] S. Fu et al., "High Output Performance and Ultra-Durable DC Output for Triboelectric Nanogenerator Inspired by Primary Cell," Nano-Micro Letters, vol. 14, no. 1, p. 155, 2022/08/02 2022, doi: 10.1007/s40820-022-00898-2.

[10] L. Liu, Q. Shi, and C. Lee, "A novel hybridized blue energy harvester aiming at all-weather IoT applications," Nano Energy, vol. 76, p. 105052, 2020/10/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105052.

[11] L. Zhang et al., "Benzoate anions-intercalated NiFe-layered double hydroxide nanosheet array with enhanced stability for electrochemical seawater oxidation," Nano Research Energy, vol. 1, p. 9120028, 2022, doi: 10.26599/NRE.2022.9120028.

[12] W. Xie et al., "A Nonresonant Hybridized Electromagnetic-Triboelectric Nanogenerator for Irregular and Ultralow Frequency Blue Energy Harvesting," Research, vol. 2021, doi: 10.34133/2021/5963293.

[13] L. Liu, Q. Shi, J. S. Ho, and C. Lee, "Study of thin film blue energy harvester based on triboelectric nanogenerator and seashore IoT applications," Nano Energy, vol. 66, p. 104167, 2019/12/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104167.

[14] D. Tan et al., "Anti-Overturning Fully Symmetrical Triboelectric Nanogenerator Based on an Elliptic Cylindrical Structure for All-Weather Blue Energy Harvesting," Nano-Micro Letters, vol. 14, no. 1, p. 124, 2022/05/11 2022, doi: 10.1007/s40820-022-00866-w.

[15] T. He, X. Guo, and C. Lee, "Flourishing energy harvesters for future body sensor network: from single to multiple energy sources," iScience, vol. 24, no. 1, 2021, doi: 10.1016/j.isci.2020.101934.

[16] Y. Li et al., "Recent Progress in Self-Powered Wireless Sensors and Systems Based on TENG," Sensors, vol. 23, no. 3, doi: 10.3390/s23031329.

 [17] A. Babu, I. Aazem, R. Walden, S. Bairagi, D. M. Mulvihill, and S. C. Pillai,
 "Electrospun nanofiber based TENGs for wearable electronics and self-powered sensing,"
 Chemical Engineering Journal, vol. 452, p. 139060, 2023/01/15/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139060.

[18] C. Zhang et al., "Customizing Triboelectric Nanogenerator on Everyday Clothes by Screen-Printing Technology for Biomechanical Energy Harvesting and Human-Interactive Applications," ADVANCED MATERIALS TECHNOLOGIES, vol. 8, no. 4, FEB 2023, doi: 10.1002/admt.202201138.

[19] J. Zhao et al., "Self-powered sensor for monitoring wind vibration on transmission lines based on an electromagnetic-triboelectric hybrid generator," Sustainable Energy & Fuels, 2023 Sep 2023, doi: 10.1039/d3se00995.

[20] Y. Q. Wang et al., "High-voltage output triboelectric nanogenerator with DC/AC optimal combination method," Nano Research, vol. 15, no. 4, pp. 3239-3245, Apr 2022, doi: 10.1007/s12274-021-3956-0.

[21] S. Lu et al., "Regulating the high-voltage and high-impedance characteristics of triboelectric nanogenerator toward practical self-powered sensors," Nano Energy, vol. 87, Sep 2021, Art no. 106137, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106137.

[22] X. P. Fu et al., "Ultra-Robust and High-Performance Rotational Triboelectric Nanogenerator by Bearing Charge Pumping," Energy & Environmental Materials, 2023 Jan 2023, doi: 10.1002/eem2.12566.

[23] Z. Zhao, D. Liu, Y. Li, Z. L. Wang, and J. Wang, "Direct-current triboelectric nanogenerator based on electrostatic breakdown effect," Nano Energy, vol. 102, p. 107745, 2022/11/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107745.

[24] D. Liu, L. Zhou, Z. L. Wang, and J. Wang, "Triboelectric nanogenerator: from alternating current to direct current," iScience, vol. 24, no. 1, 2021, doi: 10.1016/j.isci.2020.102018.

[25] W. He et al., "Boosting output performance of sliding mode triboelectric nanogenerator by charge space-accumulation effect," Nature Communications, vol. 11, no. 1, p. 4277, 2020/08/26 2020, doi: 10.1038/s41467-020-18086-4.

[26] G. Liu et al., "Power cables for triboelectric nanogenerator networks for largescale blue energy harvesting," Nano Energy, vol. 75, p. 104975, 2020/09/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104975.

[27] X. L. Cao, X. L. Wei, R. N. Li, Z. L. Wang, and Z. Y. Wu, "Thermalmechanical-electrical energy conversion system based on Curie effect and soft-contact rotary triboelectric nanogenerator," Nano Research, vol. 16, no. 2, pp. 2502-2510, Feb 2023, doi: 10.1007/s12274-022-5056-1.

[28] B. Cheng et al., "High performance temperature difference triboelectric nanogenerator," Nature Communications, vol. 12, no. 1, p. 4782, 2021/08/06 2021, doi: 10.1038/s41467-021-25043-2.

[29] X. Y. Li et al., "Long-Lifetime Triboelectric Nanogenerator Operated in Conjunction Modes and Low Crest Factor," Advanced Energy Materials, vol. 10, no. 7, Feb 2020, Art no. 1903024, doi: 10.1002/aenm.201903024.

[30] P. Mekbuntoon, W. Kaeochana, T. Prada, I. Appamato, and V. Harnchana, "Power Output Enhancement of Natural Rubber Based Triboelectric Nanogenerator with Cellulose Nanofibers and Activated Carbon," Polymers, Article vol. 14, no. 21, 2022, Art no. 4495, doi: 10.3390/polym14214495.

[31] W. Liu et al., "Integrated charge excitation triboelectric nanogenerator," Nature Communications, vol. 10, no. 1, p. 1426, 2019/03/29 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09464-8.

[32] H. Y. Wu et al., "Achieving Remarkable Charge Density via Self-Polarization of Polar High-<i>k</i> Material in a Charge-Excitation Triboelectric Nanogenerator," Advanced Materials, vol. 34, no. 13, Apr 2022, Art no. 2109918, doi: 10.1002/adma.202109918.

[33] W. C. He et al., "Large Harvested Energy by Self-Excited Liquid Suspension Triboelectric Nanogenerator with Optimized Charge Transportation Behavior," Advanced Materials, vol. 35, no. 7, Feb 2023, doi: 10.1002/adma.202209657.

[34] H. Zhang, D. Galayko, and P. Basset, "A Conditioning System for High-Voltage Electrostatic/Triboelectric Energy Harvesters Using Bennet Doubler and Self-Actuated Hysteresis Switch," in 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems and Eurosensors XXXIII, TRANSDUCERS 2019 and EUROSENSORS XXXIII, 2019, pp. 346-349, doi:

10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808359. [Online]. Available: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0 85071906443&doi=10.1109%2fTRANSDUCERS.2019.8808359&partnerID=40&md5=37 cd530a2296ac5c13c58d9c99e47b9b cd530a2296ac5c13c58d9c99e47b9b

[35] Z. Zhao, Q. Zhu, Y. Lu, Y. Mi, X. Cao, and N. Wang, "Chemical Sensor Based on Piezoelectric/Triboelectric Nanogenerators: A Review of the Modular Design Strategy," Chemosensors, Review vol. 11, no. 5, 2023, Art no. 304, doi: 10.3390/chemosensors11050304.

[36] J. You et al., "Simulation model of a non-contact triboelectric nanogenerator based on electrostatic induction," Ecomat, 2023 Jul 2023, Art no. e12392, doi: 10.1002/eom2.12392.

[37] W. J. Li, F. Yan, Y. Y. Xiang, W. Zhang, K. Loos, and Y. T. Pei, "Enhanced triboelectric nanogenerators based on 2D smectite clay nanosheets with a strong intrinsic negative surface charge," Nano Energy, vol. 112, Jul 2023, Art no. 108487, doi: 10.1016/j.nanoen.2023.108487.

[38] G. Fatti et al., "Rational Design Strategy for Triboelectric Nanogenerators Based on Electron Back Flow and Ionic Defects: The Case of Polytetrafluoroethylene," Advanced Electronic Materials, 2023 Sep 2023, doi: 10.1002/aelm.202300333.

[39] J. J. Shao, D. Liu, M. Willatzen, and Z. L. Wang, "Three-dimensional modeling of alternating current triboelectric nanogenerator in the linear sliding mode," Applied Physics Reviews, vol. 7, no. 1, Mar 2020, Art no. 011405, doi: 10.1063/1.5133023.

[40] H. Singh, A. Sheetal, J. Kaur, M. Singh, and M. Sharma, "Generation of Electrical Energy Using Fish Market Waste Fish Fin from Mechanical Motion for Battery-Less Self-Powered Wearable Sensors and IoT Devices," Electronic Materials Letters, vol. 19, no. 5, pp. 483-494, Sep 2023, doi: 10.1007/s13391-023-00420-9.

[41] X. M. Fan et al., "Triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator driven by wind for self-powered wireless transmission in Internet of Things and self-powered wind speed sensor," Nano Energy, vol. 68, Feb 2020, Art no. 104319, doi: 10.1016/j.nanoen.2019.104319.

[42] S. H. Pan and Z. N. Zhang, "Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review," Friction, vol. 7, no. 1, pp. 2-17, Feb 2019, doi: 10.1007/s40544-018-0217-7.

[43] M. O. M. Abdelrahim and L. N. Lee, "Design of DC-Triboelectric Nanogenerator for Energy Harvesting," International Journal of Technology, vol. 13, no. 6, pp. 1308-1316, Nov 2022, doi: 10.14716/ijtech.v13i6.5929.

[44] M. U. Bukhari, K. Riaz, T. Tauqeer, M. Sajid, and Ieee, "Simple and low cost triboelectric nanogenerator (TENG) for resource limited environment," 2019 International Conference on Robotics and Automation in Industry (Icrai), 2019, doi: 10.1109/icrai47710.2019.8967354.

[45] Z. X. Zhou et al., "AC fault ride through control strategy on inverter side of hybrid HVDC transmission systems," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 7, no. 5, pp. 1129-1141, Sep 2019, doi: 10.1007/s40565-019-0546-1.

[46] M. H. Mohamed Hariri, M. K. Mat Desa, S. Masri, and M. A. Mohd Zainuri, "Grid-Connected PV Generation System—Components and Challenges: A Review," Energies, vol. 13, no. 17, doi: 10.3390/en13174279.

[47] Q. G. Han, X. Wang, P. F. Hu, M. L. Wang, X. Luo, and W. H. Hou, "Multi-Mode Voltage Sag/Swell Generator Based on Three-Phase Inverter Circuit," Energies, vol. 14, no. 20, Oct 2021, Art no. 6520, doi: 10.3390/en14206520.

[48] T. Lehmeier, A. Amler, Y. Zhou, and M. März, "Three-Phase ARCP Inverter Using Soft-Switching With a Single Shared Inductor," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 2, pp. 2505-2521, 2024, doi: 10.1109/TPEL.2023.3325162.

[49] C. Chen, T. Wu, Y. X. Gu, and C. L. Shi, "A Novel Non-Isolated Step-Up DC/AC Inverter with Less Switches," Electronics, vol. 11, no. 16, Aug 2022, Art no. 2477, doi: 10.3390/electronics11162477.

[50] B. Abegaz, J. Kueber, and Ieee, "Smart Control of Automatic Voltage Regulators using K-means Clustering," 2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (Sose), pp. 328-333, 2019, doi: 10.1109/sysose.2019.8753873.

[51] D. I. Panfilov, M. I. Petrov, M. G. Astashev, and Ieee, "Application of AC Voltage Regulators for Asynchronous Motors Connection to the Power Supply," 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (Iwed) Proceedings, 2019, doi: 10.1109/iwed.2019.8664380.

[52] P. Szczesniak, "Challenges and Design Requirements for Industrial Applications of AC/AC Power Converters without DC-Link," Energies, vol. 12, no. 8, Apr 2019, Art no. 1581, doi: 10.3390/en12081581.

[53] M. Salem et al., "Three-Phase Series Resonant DC-DC Boost Converter With Double LLC Resonant Tanks and Variable Frequency Control," Ieee Access, vol. 8, pp. 22386-22399, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2969546.

[54] R. Matsuzuka et al., "Switched-capacitor voltage buck converter with variable step-down and switching frequency controllers for low-power and high-efficiency IoT devices," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 62, no. SC, Apr 2023, Art no. Sc1082, doi: 10.35848/1347-4065/acba22.

```
Anexos
Anexo A
clear all
clc
f0=10;
f1=f0*1;
t=1/(2*f0):0.0001:1+1/(2*f0);
y=sin(2*pi*f1*t);
f2=f0*2;
y2=sin(2*pi*f2*t);
f3=f0*3;
y3=sin(2*pi*f3*t);
f4=f0*4;
y4=sin(2*pi*f4*t);
f5=f0*5;
y5=sin(2*pi*f5*t);
f6=f0*6;
y6=sin(2*pi*f6*t);
f7=f0*7;
y7=sin(2*pi*f7*t);
f8=f0*8;
y8=sin(2*pi*f8*t);
f9=f0*9;
y9=sin(2*pi*f9*t);
f10=f0*10;
y10=sin(2*pi*f10*t);
f11=f0*11;
y11=sin(2*pi*f11*t);
f12=f0*12;
y12=sin(2*pi*f12*t);
f13=f0*13;
y13=sin(2*pi*f13*t);
f14=f0*14;
y14=sin(2*pi*f14*t);
f15=f0*15;
y15=sin(2*pi*f15*t);
```

```
f16=f0*16;
y16=sin(2*pi*f16*t);
f17=f0*17;
y17=sin(2*pi*f17*t);
f18=f0*18;
y18=sin(2*pi*f18*t);
f19=f0*19;
y19=sin(2*pi*f19*t);
f20=f0*20;
y20=sin(2*pi*f20*t);
x=(y+y2+y3+y4+y5+y6+y7+y8+y9+y10+y11+y12+y13+y14+y15+y16+y17+y18+y19+y20)*9.3384
;
plot(t,x);
x1=transpose(x);
t1=transpose(t);
t2=t1-1/(2*f0);
T=table(t2, x1);
```

```
C=table2cell(T);
```

```
xlswrite('TablaC.xlsx',C);
```

Anexo B

//Definición de variables

- int Q1 = 52;
- int Q2 = 50;
- int Q3 = 48;
- int Q4 = 46;

float valor;

float Frec = 60;

void setup(){

//Definición de pines como salidas

pinMode(Q1, OUTPUT);

pinMode(Q2, OUTPUT);

pinMode(Q3, OUTPUT);

pinMode(Q4, OUTPUT);

//Encerado de los pines de salida

digitalWrite(Q1, 0);

digitalWrite(Q2, 0);

digitalWrite(Q3, 0);

digitalWrite(Q4, 0);

//Cálculo de tiempo entre pulsos

```
valor=(1/Frec)*500;
```

}

void loop(){

//Ejecución de secuencia de encendido y apagado

digitalWrite(Q1, 1);

digitalWrite(Q4, 1);

delay(valor);

digitalWrite(Q1, 0);

digitalWrite(Q4, 0);

digitalWrite(Q2, 1);

digitalWrite(Q3, 1);

delay(valor);

digitalWrite(Q2, 0);

digitalWrite(Q3, 0);

}