

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



COSECHA DE ENERGÍA A PARTIR DE SISTEMAS

PIEZOELÉCTRICOS

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR:

Ronald Kevin Fierro Parra

ASESOR:

Carlos Bernardino Silva Cárdenas

Lima, febrero, 2024

Informe de Similitud

Yo,CARLOS SILVA CARDENAS.....,


docente de la Facultad de ...CIENCIAS E INGENIERIA de la Pontificia Universidad Católica del Perú,
asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado:

Cosecha de energía a partir de sistemas piezoeléctricos

del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) RONALD KEVIN FIERRO PARRA ,dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 09/03/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: ...LIMA, 14 MARZO 2024...

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>SILVA CARDENAS, CARLOS BERNARDINO</u>	
DNI:08014721	Firma 
ORCID: 0000-0003-4653-0915	

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se propone un circuito optimizado de cosecha de energía piezoeléctrica. Este circuito presenta un modelo que depende de la arquitectura y estrategia de conmutación que se basa en la arquitectura de cosecha de energía sincronizada de interruptores en inductores (SSHI). La eficiencia de la cosecha de energía se lleva a cabo gracias al circuito paralelo de SSHI (P-SSHI) y el circuito serie de SSHI (S-SSHI) que por sí solas logran mejorar la eficiencia en la cosecha de energía. La integración de estos dos circuitos permite reducir, en mayor porcentaje, la disipación de energía en el proceso de cosechar energía piezoeléctrica. Esto debido a que el circuito P-SSHI acelera la carga (descarga) del capacitor intrínseco del transductor piezoeléctrico debido a la conexión en paralelo de un inductor y el circuito S-SSHI aprovecha la energía transferida al inductor.

Se utilizó el software Proteus 8 Profesional para realizar la implementación del circuito propuesto y las simulaciones a distintas frecuencias para comprobar la eficiencia en la cosecha de energía. Los resultados de potencia recolectada que se obtuvieron en comparación con un circuito de referencia que se encuentra en el estado del arte son de 3.8 veces mayor dentro de un rango de operación con frecuencia de 5 Hz a 30 Hz

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1: PROBLEMA ENERGÉTICO Y VISTA ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA DE COSECHA DE ENERGÍA.....	3
1.1. Motivación y desarrollo de la problemática	3
1.2. Estado del arte:	5
1.2.1. A Novel Sensor for Vibration Frequency Measurement with Piezoelectric Kinetic Energy Harvesting ..	6
1.2.2. Green Energy Harvesting Using Piezoelectric Materials from Bridge Vibrations	7
1.2.3. Energy Harvesting using Piezoelectric Element for Human Daily Life	8
1.2.4. Energy Harvesting through Piezoelectric Tile	9
1.2.5. Energy Harvesting by Piezoelectric Sensor Array in Road Using Internet of Things	10
1.2.6. Optimised Model for Piezoelectric Energy Harvesting Circuits Design.....	11
1.3. Justificación.....	12
1.4. Objetivos	14
1.4.1. Objetivo general	14
1.4.2. Objetivos específicos	15
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MECANISMO PIEZOELÉCTRICO RECOLECTOR DE ENERGÍA	16
2.1 Materiales piezoeléctricos	16
2.1.1. Materiales piezoeléctricos naturales	17
2.1.2. Materiales piezoeléctricos sintéticos.....	18
2.2 Rectificador de onda completa	20
2.3 Unidades de almacenamiento	22
2.4 Modelo recolector de energía piezoeléctrica genérico	23
2.5 Modelo del circuito de optimización.....	25
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA PROPUESTA PARA EL CIRCUITO ELÉCTRICO RECOLECTOR DE ENERGÍA OPTIMIZADO ...	28
3.1. Análisis de los módulos que conforman el circuito de referencia	28
3.1.1. Modelo de circuito recolector de energía	29
3.1.2. Comparador & gate	30
3.1.3. Multivibrador monoestable.....	31
3.2. Implementación del circuito de referencia	33
3.3. Simulación y verificación del circuito de referencia.....	34
3.4. Propuesta de optimización	35
3.4.1. Arquitectura de recolección energía de interruptores sincronizados en paralelo en el inductor (P-SSHI) 35	
3.4.2. Arquitectura de recolección energía de interruptores sincronizados en serie en el inductor (S-SSHI).37	
3.4.3. Integración de P-SSHI y S-SSHI	38
CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS	40

4.1.	Simulaciones	42
4.1.1.	Frecuencia del transductor piezoeléctrico a 10Hz	43
4.1.2.	Frecuencia del transductor piezoeléctrico a 20 Hz	44
4.1.3.	Frecuencia del transductor piezoeléctrico a 30 Hz	46
4.2.	Comparación con el circuito de referencia	48
4.3.	Comparación con otros circuitos de cosecha de energía piezoeléctrica recientes.....	50
CONCLUSIONES.....		52
RECOMENDACIONES		53
TRABAJOS FUTUROS		54
BIBLIOGRAFÍA		55
ANEXOS.....		57



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe gran preocupación por el calentamiento global y la contaminación ambiental que lo produce. Gran parte de esta contaminación es causada por la generación de energía que abastece el mundo a partir de combustibles fósiles. Por ello, surge la necesidad del uso de fuentes de energía limpias, renovables que no emitan gases de efecto invernadero al medio ambiente. Una de las alternativas del uso energías limpias es la cosecha de energía cinética.

La energía cinética es un tipo de energía que se encuentra en el ambiente y puede ser recolectada a través de sistemas piezoeléctricos. Estos sistemas son capaces de transformar la energía mecánica a energía eléctrica. Sin embargo, durante el proceso de transformación de energía existe cierta disipación de energía a través del circuito empleado. Es por ello que en este trabajo de tesis se tiene como objetivo reducir la disipación de energía de un circuito recolector de energía piezoeléctrica y, de esta manera, obtener mejores resultados de energía recolectada.

Esta tesis se enfoca en la optimización de un circuito de referencia recolector de energía cinética a partir de sistemas piezoeléctricos aprovechando la resonancia de los circuitos para obtener mejores resultados en el proceso de cosechar energía.

El presente trabajo de tesis se organiza en cuatro capítulos. En el capítulo 1, se desarrolla la problemática que motiva el estudio de este trabajo y vista de la tecnología actual de circuitos recolectores de energía cinética a partir de materiales piezoeléctricos. En el capítulo 2, se presentan los fundamentos teóricos sobre los materiales piezoeléctricos para entender su funcionamiento. En el capítulo 3, se presentan el análisis de cada módulo un circuito de referencia que se encuentra en el estado del arte para, posteriormente, ser optimizado y presentar un circuito optimizado. Finalmente, en el capítulo 4, se presentan las simulaciones y resultados obtenidos del circuito propuesto empleando el software Proteus 8 Profesional.

CAPÍTULO 1: PROBLEMA ENERGÉTICO Y VISTA ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA DE COSECHA DE ENERGÍA

1.1. Motivación y desarrollo de la problemática

El consumo energético en el mundo ha crecido a lo largo de los años y, según la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, IEA), este consumo continuará creciendo en los siguientes 25 años [1].

Existen diversas fuentes generadoras de energía entre ellas se tiene a las fuentes renovables y no renovables. Por un lado, las energías renovables (energías limpias) se denominan como “inagotables” debido a que se generan a partir de fuentes naturales como el viento, agua, sol, movimiento, etc. Por otro lado, las energías no renovables provienen de combustibles nucleares o fósiles como el petróleo, gas natural, carbón o energía nuclear. Estos últimos se han empleado durante muchos años y se siguen utilizando por el mundo [2]. Asimismo, se puede observar en la figura 1 que el mayor porcentaje de fuentes o suministros de energías desde el año 1990 al 2018 son fuentes de energía no renovables [3]. Toe (Ton of Oil Equivalent) es una unidad de energía, la equivalencia es la energía que se obtiene en una tonelada de petróleo.

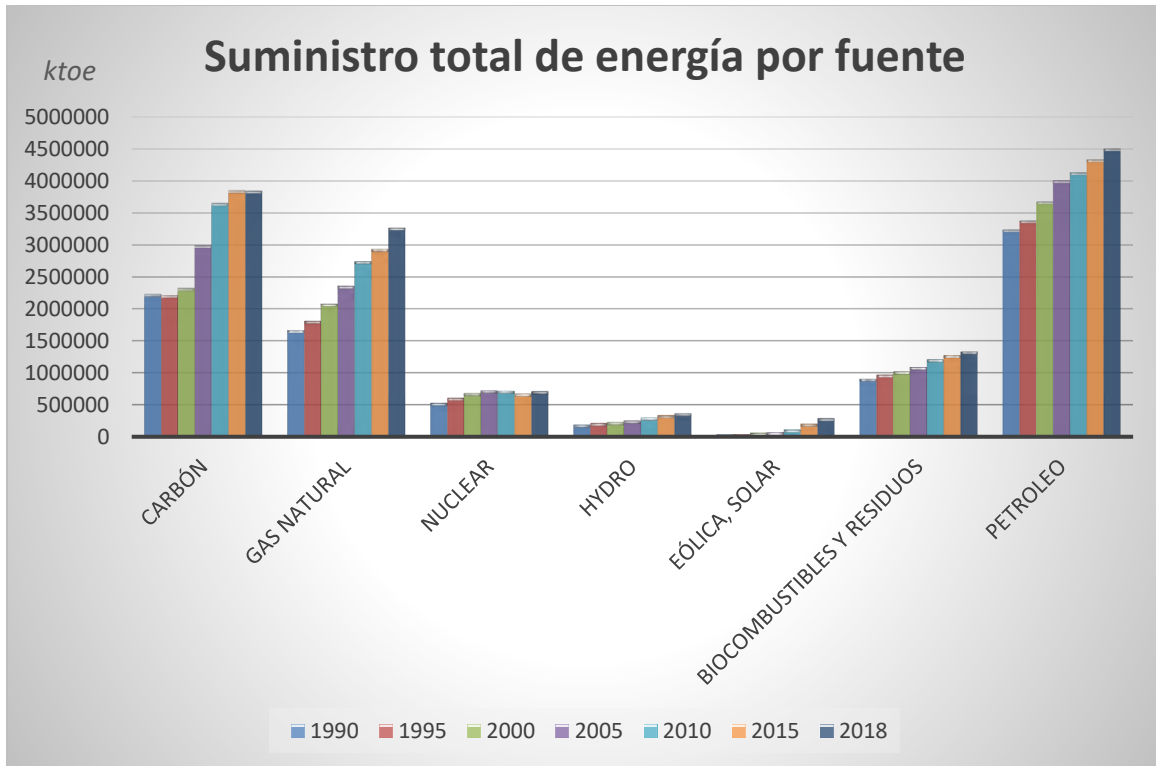


Figura 1. Gráfica de tipos de fuentes de energía desde 1990-2018 [3].

Esto genera preocupación debido a que los suministros de energía a partir de la combustión de combustibles fósiles no solo ocasionan el desperdicio de energía, sino también contaminan el medio ambiente. Además, estas fuentes no renovables son limitadas y altamente contaminantes a nivel mundial ya que emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera como CO_2 . Esto se traduce en un alto riesgo para la salud de los seres humanos [2][4].

Por tal motivo, la humanidad ha comenzado a adquirir conciencia sobre los problemas ambientales, económicos y de sustentabilidad que implica seguir dependiendo, principalmente, de la explotación de los combustibles fósiles para cubrir con el consumo energético del mundo. De esta manera, se ha buscado nuevas fuentes de energía alternativa que puedan reemplazar las fuentes energéticas actuales ya sea por su menor efecto contaminante o, fundamentalmente, por su

posibilidad de renovación. Por lo tanto, la cosecha de energía renovable y limpia del medio ambiente resulta ser atractiva y se hace más popular en el mercado energético mundial [5].

Actualmente, existen diferentes tipos de energía que se desecha en la vida cotidiana como la energía generada al caminar, energía al conducir una bicicleta, vibración de los puentes, la luz eléctrica en la calle, el calor residual de los motores, entre otros. Esto ha motivado a los investigadores a explorar tecnologías que permitan capturar la energía que está disponible en el medio ambiente especialmente si pensamos en los dispositivos electrónicos de relativo bajo consumo de energía. La cosecha de energía, un tipo de generación de energía, resuelve muchos de los inconvenientes de la batería de los dispositivos pequeños [6].

La cosecha de energía, proceso por el cual se captura y se almacena la energía que está en el ambiente, se denomina en inglés “Energy Harvesting (EH)” o “Energy Scavenging (ES)”. Estos términos hacen referencia, principalmente, para pequeñas cantidades de cosecha de energía (pequeña escala) aproximadamente de $10^{-6}W$ a $10^{-3}W$ [7].

Una de las energías ambientales más omnipresente es la energía cinética. Esta energía se puede capturar, almacenar y convertir en energía eléctrica útil [8]. La energía cinética que se desperdicia al caminar, se puede aprovechar aplicando cosecha de energía a través de sistemas piezoeléctricos (Piezoelectric Energy Harvesting, PEH). Este tipo de energía es una solución que se emplea para impulsar dispositivos con poco consumo de energía [9].

1.2. Estado del arte:

Los trabajos que se presentan a continuación son algunos estudios y/o propuestas más importantes, desarrolladas hasta el momento, relacionados con esta tesis, cosecha de energía a partir de energía cinética.

1.2.1. A Novel Sensor for Vibration Frequency Measurement with Piezoelectric Kinetic Energy Harvesting

Propuesto en el año 2018 por los autores Sheng Zhao, Haipeng Fu, Kaixue Ma y Jianguo Ma [10]. En este trabajo se propone la conversión de energía cinética en energía eléctrica a través del seguimiento automático de la frecuencia de vibración. Se basa en un sensor de vibración con la capacidad de recolectar energía para la medición en tiempo real de la frecuencia de vibración. La conversión de energía y la medición de frecuencia se obtiene con la ayuda de un dispositivo que recolecta energía piezoeléctrica (PZ EHD, piezoelectric energy harvesting device).

Este documento se basa en una arquitectura de recolección sincronizada de interruptores en inductores (SSHI, Synchronized Switch Harvesting on Inductor). Implementa un circuito basado en la técnica cambio de voltaje del transductor piezoeléctrico para recolectar energía de forma eficiente con la ayuda de un circuito de control de un interruptor adaptativo que activa, de manera automática, un interruptor llamado Bias-Flip. También, para la medición de frecuencia de vibración contiene un circuito de acondicionamiento de señal que está diseñado.

Adicionalmente, se diseña y se fabrica una configuración experimental.

Finalmente, se demuestra experimentalmente que el circuito implementado tiene la capacidad de medir la frecuencia de vibración dentro de un rango de 80 a 130 Hz. Esta frecuencia medida mantiene un error relativo promedio de 0.041% luego de la calibración. Asimismo, se verifica que el sistema es capaz de recolectar suficiente energía para cubrir el consumo de energía del sistema dentro de un rango de frecuencia de 96 – 116 Hz con una aceleración 2 g con 74% de eficiencia Bias-Flip [10].

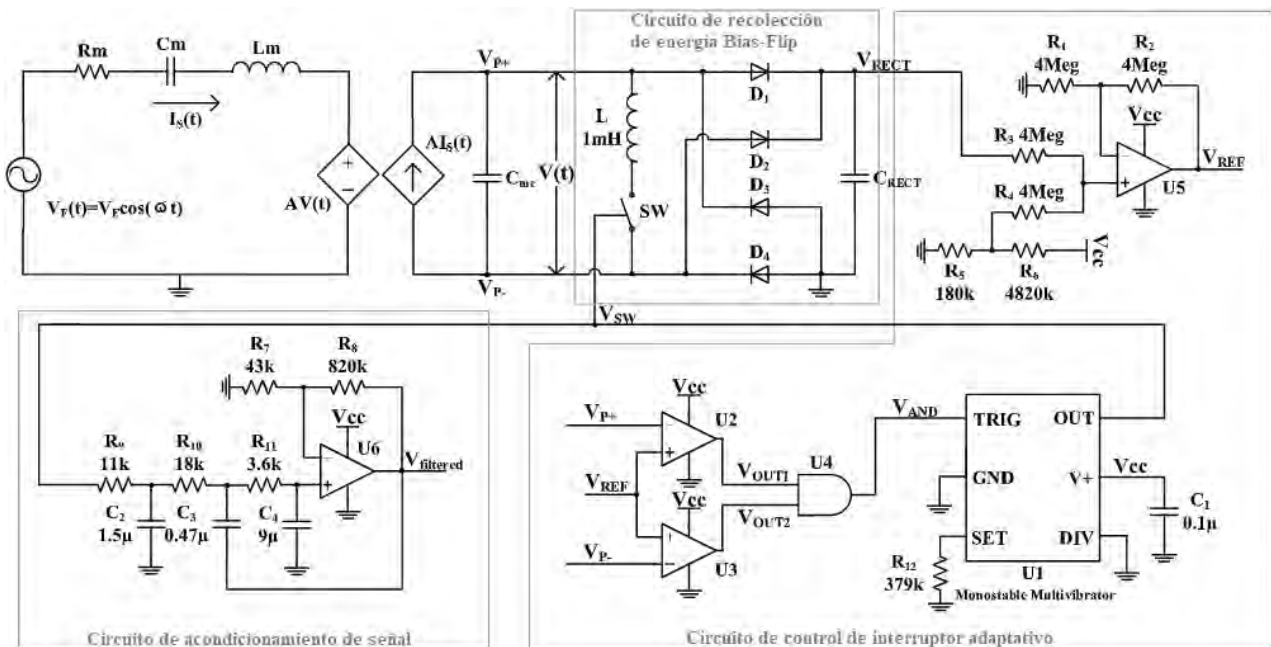


Figura 2. Circuito esquemático de recolector de energía empleando la técnica Bias-Flip [10].

1.2.2. Green Energy Harvesting Using Piezoelectric Materials from Bridge Vibrations

Propuesto en el año 2018 por los autores Sumit Balgavhar y Suresh Bhalla [11].

En este trabajo lo que se propone es la recolección de energía piezoeléctrica (PEH) a partir de las vibraciones de un puente. Esta propuesta es atraída por los autores no solo porque provee energía limpia y autónoma para la alimentación de dispositivos móviles, sino también porque coopera en la formación de una ciudad inteligente (Smart city). Este documento se enfoca en la captura de energía que se genera por las vibraciones de puentes de baja frecuencia. Incluye medición de vibraciones de un paso elevado de la ciudad y, luego, un experimento en laboratorio donde se hace uso de un circuito rectificador tradicional de baja frecuencia y vibraciones de pequeña amplitud para el almacenamiento de energía. Asimismo, se han acercado a los problemas prácticos/típicos que conlleva la PEH por las vibraciones del puente y los circuitos eléctricos [11].

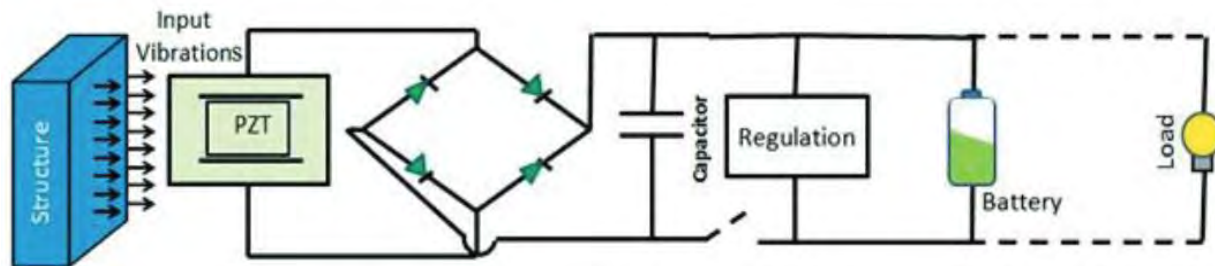


Figura 3. Recolector de energía piezoeléctrico típico [11].

1.2.3. Energy Harvesting using Piezoelectric Element for Human Daily Life

Propuesto en el año 2019 por los autores Jae Yong Lee, Sanghoon Lee, Myeong-in Choi, Lee Won Park, Hangbae Chang, Keonhee Cho, Seung Min Kim y Sehyun Park [6].

En este trabajo se presenta el estudio de la generación de energía mediante recolección de energía (EH) que se genera a partir de los pasos de una persona haciendo uso de un elemento piezoeléctrico. En la parte de medición, la cantidad de energía se mide con la ayuda de un circuito rectificador que transforma la energía alterna (AC) en energía continua (DC). En la parte de almacenamiento, los datos medidos se almacenan en un hardware de base de datos. El sistema está configurado por un módulo WiFi que permite acceder al servidor web. Con los datos recopilados del sistema es capaz de predecir la energía recolectada por cada paso de una persona. Luego, con cada paso por energía y la cantidad de pasos en un día de una persona durante cuatro semanas, se estima la potencia por día que se genera y la potencia acumulada. Finalmente, los resultados que se obtienen demuestran que la energía generada por paso es un valor cercano a 0.74 nW, la energía generada en un día es cercano a 8.3 mW y la cantidad total de energía generada durante 4 semanas es aproximadamente 232 mW. En este artículo se pretende desarrollar un elemento piezoeléctrico de bajo costo y de material cerámico con dimensiones similares a las de una moneda (20 mm de diámetro) que se pueda adquirir con facilidad [6].

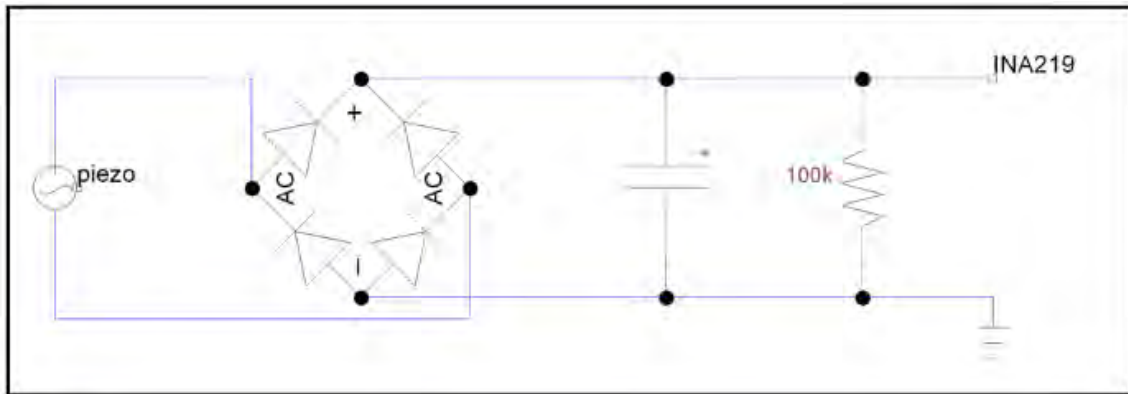


Figura 4. Circuito para entorno de simulación [6].

1.2.4. Energy Harvesting through Piezoelectric Tile

Propuesto en el año 2020 por los autores Ritul Saini, Sanjana, Shubham Gairola, Vishal Vinayak y Mr. Kuldeep Singh [9].

En este trabajo se desarrolla el modelo de una loseta piezoeléctrica que genera energía cuando se emplea presión sobre ella. La generación de voltaje se almacena en un condensador. Luego, mientras el condensador se carga a la tensión nominal (tensión por encima del de la batería), la batería continúa cargándose. De esta manera, la propuesta de este documento expone una forma fácil pero eficaz de generar energía por medio de la piezoelectricidad. Adicionalmente, se emplea la conexión de varios cristales piezoeléctricos juntos ya que favorece a generar un voltaje suficiente para ser almacenada en una batería y soluciona la limitación que se presenta con el uso de un solo cristal piezoeléctrico (genera una cantidad menor de voltaje cuando se somete a un efecto piezoeléctrico). Asimismo, la energía almacenada en la batería puede ser utilizada para alimentar diferentes dispositivos que consumen regular electricidad.

La implementación de esta loseta conlleva a que la utilización de la energía piezoeléctrica en la vida cotidiana sea sencilla y factible [9].



Figura 5. Conexión de loseta piezoeléctrica [9].

1.2.5. Energy Harvesting by Piezoelectric Sensor Array in Road Using Internet of Things

Propuesto en el año 2019 por los autores Suresh Kumar, Jeni Narayan, Kaviyaraj y Saleekha [12]. En este trabajo se propone la generación de electricidad en las carreteras, a través del uso de sensores piezoeléctricos. Estos sensores trabajan convirtiendo la energía mecánica (generada por presión) en energía eléctrica. La energía eléctrica se genera a partir de la vibración, presión en el sensor piezoeléctrico que se ubica en las carreteras. Este sensor es capaz de generar electricidad aprovechándose de la presión que ejerce un vehículo cuando se mueve sobre este sistema. Esta energía generada es almacenada y, posteriormente, se emplea, por ejemplo, alumbrado público [12]. En la figura 6 se muestra el principio de funcionamiento de sensor piezoeléctrico de esta propuesta.

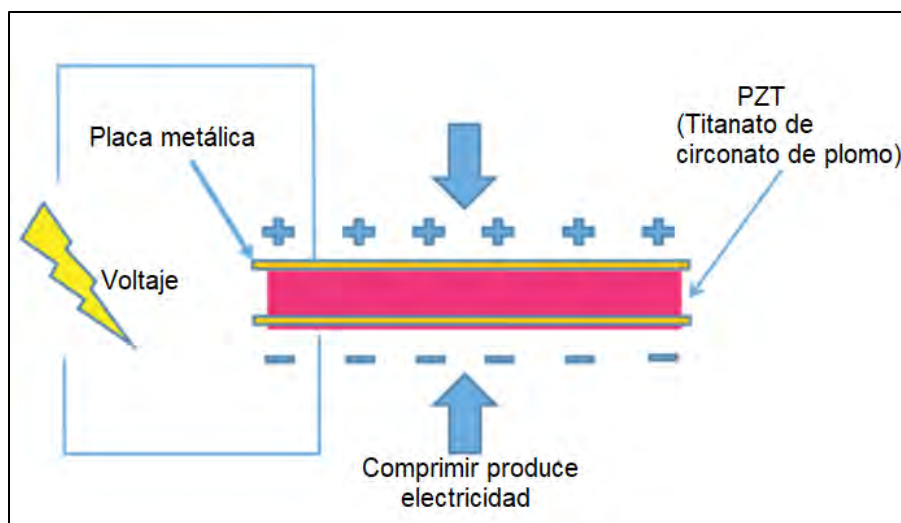


Figura 6. Funcionamiento del sensor piezoeléctrico [12].

1.2.6. Optimised Model for Piezoelectric Energy Harvesting Circuits Design

Propuesto en el año 2021 por los autores Lakhdar Mamouri, Liana Wassouf, Vincent Frick, Tedjani Mesbahi, Ehsan Jamshidpour [13].

En este trabajo se presenta un modelo optimizado destinado al diseño de sistemas integrados para la recolección de energía piezoeléctrica. Estos sistemas implementan un circuito de Rectificador Activo Completo (FAR, Full Active Rectifier). La eficiencia de este circuito depende de la arquitectura y estrategia de conmutación. Este documento se enfoca en una arquitectura de recolección sincronizada de interruptores en capacitores (SSHC, Synchronized Switch Harvesting on Capacitor) que logra mejor eficiencia de recolección de energía. El principio de funcionamiento de esta arquitectura se basa en el cambio de voltaje a través del transductor piezoeléctrico en el instante de cruce por cero de la corriente. SSHC se basa en la rectificación activa y requiere de un control dedicado.

En este artículo se presenta un modelo optimizado que tiene en cuenta la especificidad de la rectificación de señal del transductor piezoeléctrico. Asimismo, toma en cuenta que el proceso de

cambiar el voltaje del transductor piezoeléctrico para aumentar la eficiencia de recolección depende, en gran porcentaje, de la secuencia de conmutación y los parámetros de los dispositivos de la arquitectura.

También, se presenta comparaciones de las simulaciones y resultados experimentales que demuestra la confiabilidad del modelo propuesto [13].

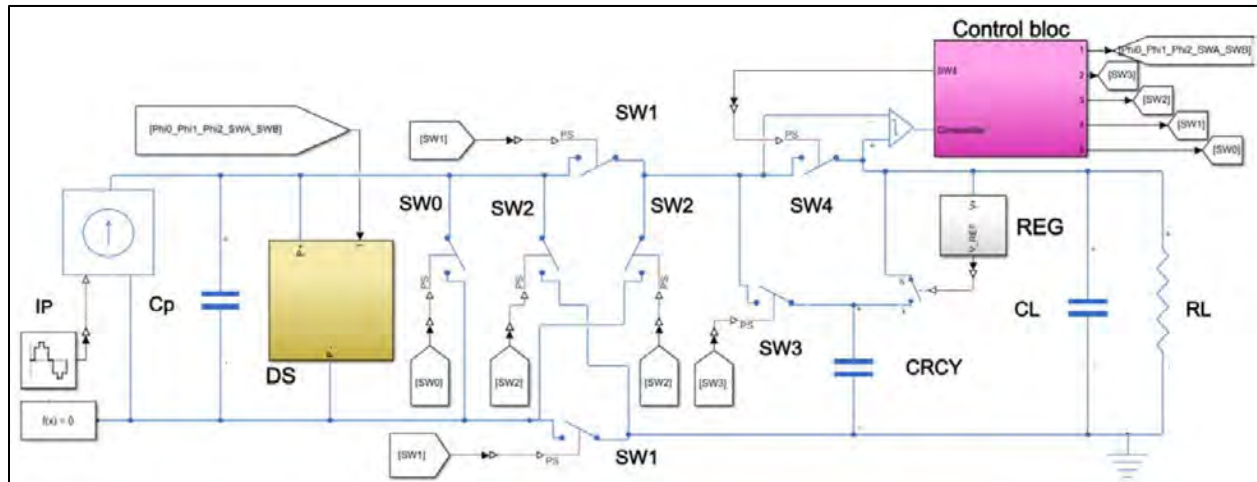


Figura 7. Modelo del Rectificador Activo Completo recolector de energía piezoeléctrica implementado en Matlab-Simulink® [13].

1.3. Justificación

Por un lado, existen dispositivos que requieren pequeñas cantidades de energía para su funcionamiento y, por otro lado, existe mucha energía desperdiciada en el ambiente, una de ellas es la energía cinética.

Debido a esto, se han desarrollado varios métodos para capturar esta energía desperdiciada. Una de ellas es la recolección de energía cinética con ayuda de los sistemas piezoeléctricos.

La energía piezoeléctrica se genera cuando se aplica fuerza mecánica a un material piezoeléctrico para deformarlo levemente (alinear los dipolos), esto genera un reordenamiento que a su vez cambia la densidad del dipolo y, por tanto, desarrolla un campo eléctrico. El material piezoeléctrico

genera potencial eléctrico como consecuencia a este cambio en los campos eléctricos [9]. En palabras simples, el elemento piezoeléctrico esta hecho de un material que produce cargas eléctricas cuando se aplica fuerza mecánica en este [6].

La recolección o cosecha de energía piezoeléctrica (PEH) ha recibido mayor popularidad por parte de los investigadores ya que los avances tecnológicos de los materiales y procesos de fabricación a micro y nano escala han permitido la fabricación de generadores piezoeléctricos con características más favorables. Estas características se refieren a un mejor factor de acoplamiento electromecánico, coeficiente piezoeléctrico, flexibilidad, capacidad de estiramiento, capacidad de integración de diferentes aplicaciones y durabilidad. Prueba de lo mencionando en este párrafo es , de acuerdo con la figura 7, la cantidad de documentos con respecto a sistemas piezoeléctricos se ha ido incrementando [8]. Especialmente, se puede observar que en los cuatro últimos años el aumento de número de publicaciones es mayor que los años anteriores.

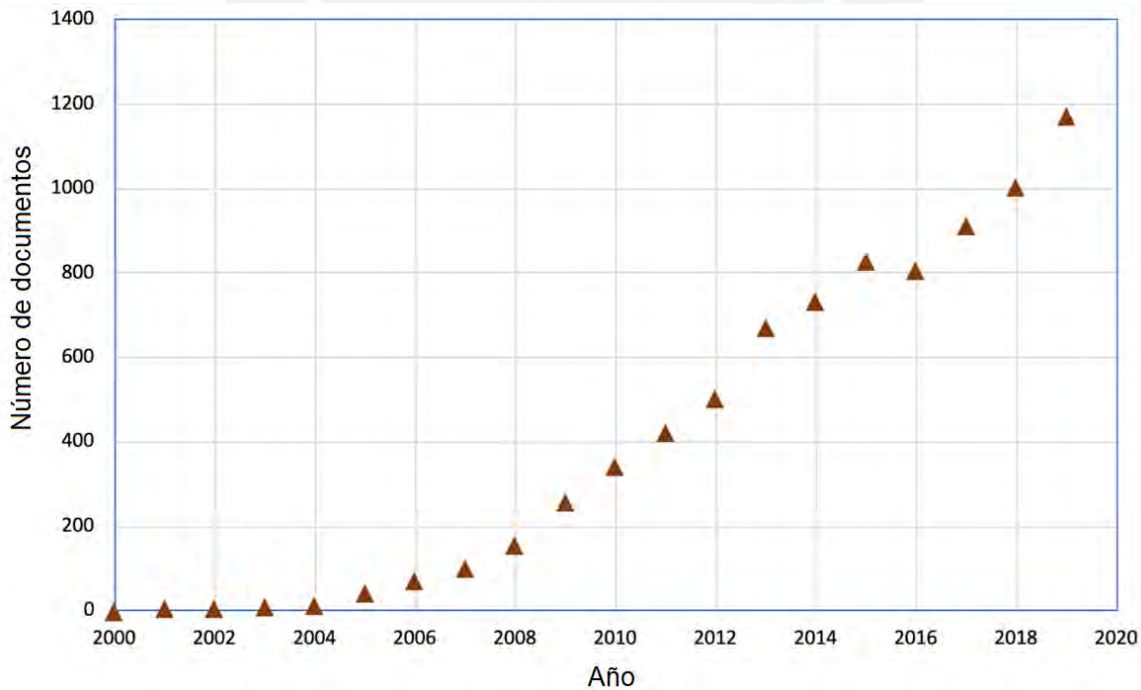


Figura 8. Número de documentos sobre recolección de energía piezoeléctrica [8].

Según la IEA, la transformación de los suministros eléctricos a nivel mundial por el incremento de fuentes de generación renovable produce transformación energética por energía limpia ya que se busca reducir los altos niveles de emisión de gases de efecto invernadero [14]. Por ello, la cosecha de energía a través de elementos piezoeléctricos resulta ser una de las más prometedoras tecnologías para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía naturales, como vibraciones existentes en los puentes (pequeña amplitud y baja frecuencia). PEH puede desempeñar el papel de una fuente de energía sostenible y ecológica para dispositivos de bajo consumo de energía. De este modo, se puede sustituir a las baterías que no solo tienen una vida útil limitada, sino también afectan al medio ambiente con los derivados de la eliminación [11]. Por otro lado, en el futuro, se prevé que diversos dispositivos electrónicos serán suministrados de energía por generadores piezoeléctricos. Asimismo, la tecnología de la transducción piezoeléctrica es la cosecha de energía más promisoría que ha hallado aplicaciones en diversos campos como estructuras, transporte, electrónica inalámbrica, Internet de las cosas (IoT), sistemas microelectromecánicos, dispositivos biomédicos portátiles e implantables, entre otros [8].

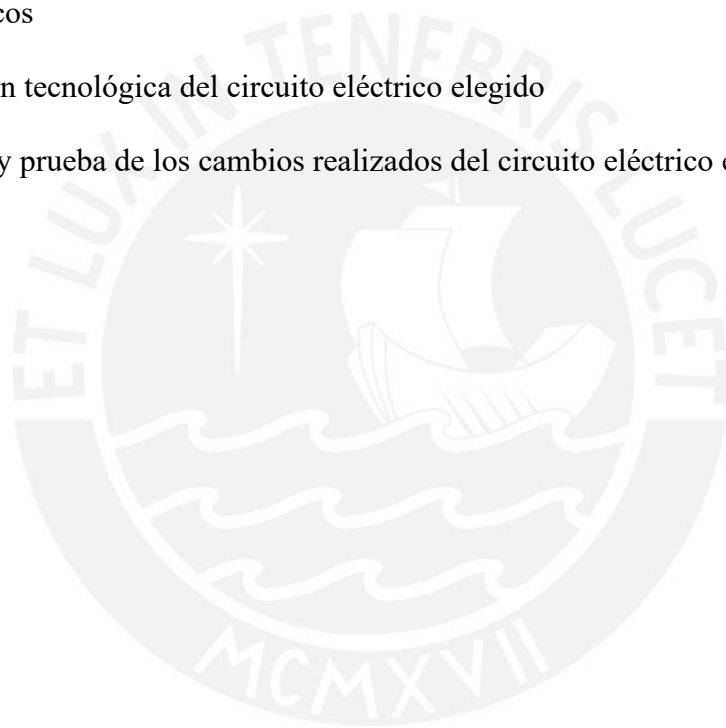
1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- ❖ Proponer un circuito que permita mayores porcentajes en la cosecha de energía a partir de la energía cinética respecto al estado del arte.
- ❖ Trabajar en un determinado módulo de un circuito eléctrico ya implementado que se encuentra en el estado del arte para obtener mejores resultados en cosecha de energía.

1.4.2. Objetivos específicos

- ❖ Estudio de las tecnologías actuales con respecto a la cosecha de energía a partir de energía cinética
- ❖ Estudio de los sistemas piezoeléctricos más adecuados para la cosecha de energía mediante energía cinética
- ❖ Selección y estudio de un circuito eléctrico para la cosecha de energía de sistemas piezoeléctricos
- ❖ Optimización tecnológica del circuito eléctrico elegido
- ❖ Simulación y prueba de los cambios realizados del circuito eléctrico elegido



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MECANISMO PIEZOELÉCTRICO RECOLECTOR DE ENERGÍA

Los materiales piezoeléctricos resultan ser muy atractivos para diversas aplicaciones vinculadas con la conversión efectiva de energía mecánica en energía eléctrica a pequeña escala (recolección de energía). Esto se debe a que los materiales piezoeléctricos poseen alto rendimiento piezoeléctrico, fuerte acoplamiento electromecánico, grandes cifras de mérito y considerable anisotropía. En base a estos factores mencionados, se puede seleccionar los materiales piezoeléctricos apropiados. Por ello, veremos en las siguientes líneas los tipos de materiales piezoeléctricos que existen.

2.1 Materiales piezoeléctricos

La palabra *piezo* proviene del griego que se refiere a presionar y piezoelectricidad significa, en griego, electricidad resultante de la presión [15].

La piezoelectricidad es un fenómeno que se produce en determinados cristales los cuales presentan dos efectos piezoeléctricos. Por un lado, se puede observar en la figura 9 el efecto piezoeléctrico directo. Este efecto ocurre cuando el material es sometido a tensiones mecánicas generando la formación de momentos dipolares netos que ocasionan polarización y un campo eléctrico. Por otro lado, en la figura 10 se muestra el efecto piezoeléctrico inverso (recíproco al efecto directo). Este efecto ocurre cuando el material, al ser sometido a un campo eléctrico, se deforma debido a fuerzas internas que se producen [16].

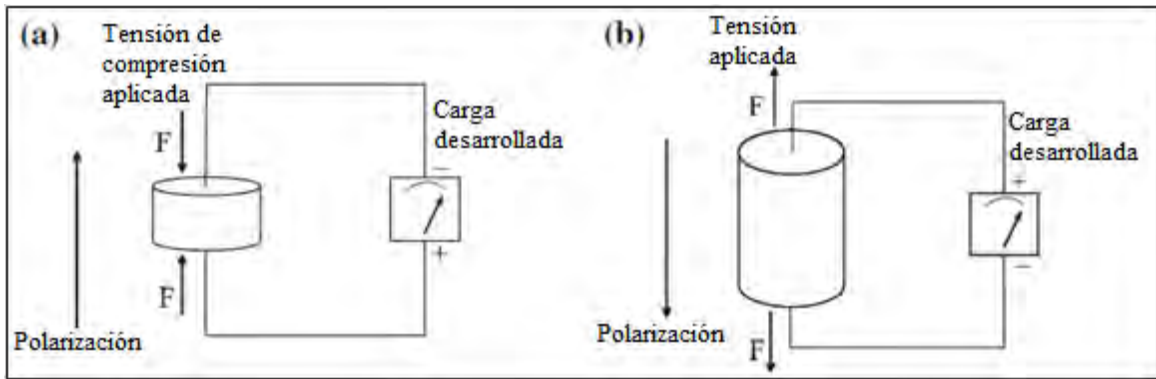


Figura 9. Efecto piezoeléctrico directo: (a) tensión de compresión aplicada y (b) tensión aplicada [15].

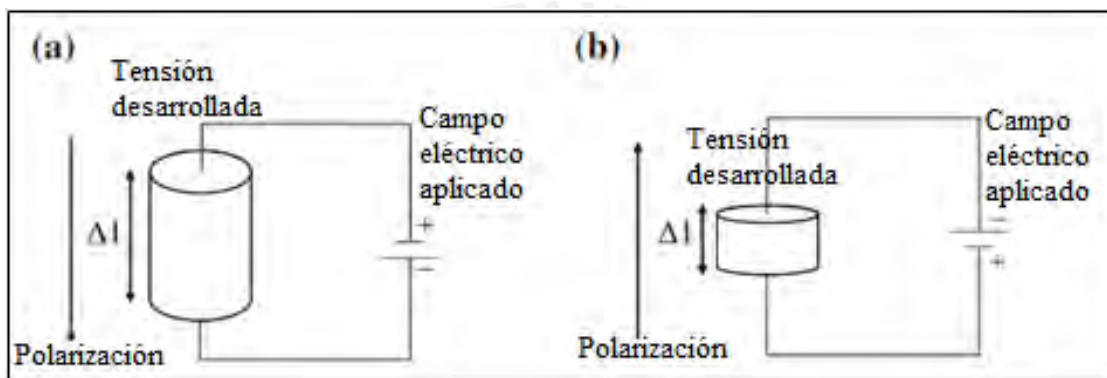


Figura 10. Efecto piezoeléctrico inverso en el campo eléctrico aplicado [15].

Dentro de los materiales piezoeléctricos que existen se puede dividir en dos grupos: materiales naturales y materiales sintéticos (Ferroeléctricos y cerámicas).

2.1.1. Materiales piezoeléctricos naturales

Los materiales piezoeléctricos que pertenecen a este grupo son los materiales cristalinos como el cuarzo ($Si O_2$), la sal de Rochelle (primer material ferroeléctrico), el topacio, los minerales del grupo de la turmalina y algunas sustancias orgánicas como la seda, la madera, el esmalte, la dentina, los huesos, el cabello, el caucho [15]. En la figura 11, se puede observar la estructura atómica de una celda unitaria de cuarzo. Cabe resaltar que la estructura es un tetraedro constituido

por átomos de O_2 alrededor del átomo de Si . Además, el átomo de Si se encuentra equidistante de cada átomo de O_2 .

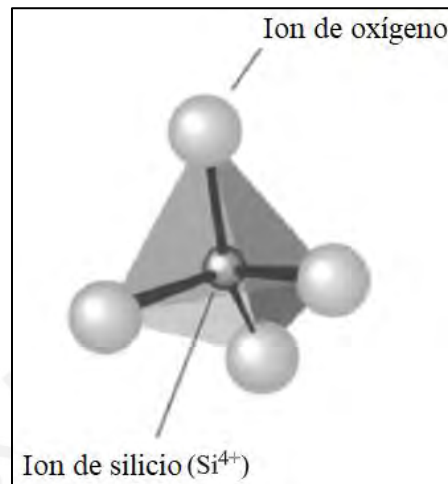


Figura 11. Celda unitaria de Cuarzo [15].

2.1.2. Materiales piezoeléctricos sintéticos

Durante la segunda guerra mundial, en EE. UU, Japón y la Unión Soviética, se desarrollaron materiales cerámicos y ferroeléctricos con los cuales se obtuvieron propiedades piezoeléctricas y dieléctricas 100 veces superiores a las de los materiales piezoeléctricos naturales.

Los materiales piezoeléctricos sintéticos son los cristales análogos de cuarzo, cerámicas, polímeros y compuestos.

Existen 32 clases de cristales que se distribuyen en 7 grupos diferentes: monoclinico, triclinico, ortorrómbico, tetragonal, trigonal, hexagonal y cúbico. Sin embargo, de estas 32 clases, 12 de ellos no permiten propiedades piezoeléctricas. De los 20 restantes, 10 son polares y 10 son no polares. Los polares muestran una polarización natural sin necesidad de estrés mecánico a causa del momento dipolar eléctrico que no desaparece y está asociado a su celda unitaria. En cambio, los no polares sí necesitan de estrés mecánico para producir polarización [15].

En esta tesis nos centraremos en las cerámicas piezoeléctricas debido a que son de fácil fabricación, moldeado con bajo precio, mayor rango de temperatura y mayor sensibilidad [16]. La cerámica piezoeléctrica es una masa maciza de cristales de perovskita. En la figura 12, se puede observar la estructura de perovskita con la siguiente forma $A B O_3$ como fórmula química, donde A es el ion metálico más grande, generalmente plomo Pb o bario Ba, B es el ion metálico más pequeño, generalmente titanio Ti o circonio Zr.

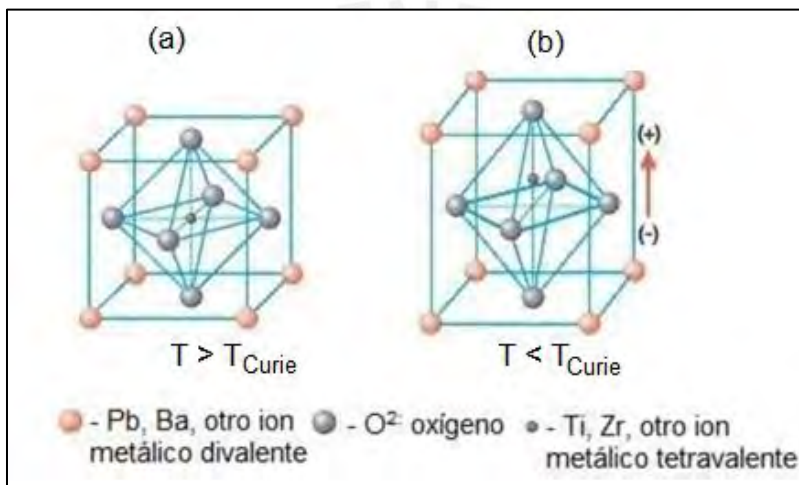


Figura 12. Estructura cristalina de una cerámica piezoeléctrica tradicional ($Ba Ti O_3$) a una temperatura por encima (a) y por debajo (b) de Punto de Curie [17].

Las familias de cerámicas artificiales con estructura cristalina de perovskita pueden ser:

- ❖ Titanato de bario ($Ba Ti O_3$)
- ❖ Titanato de plomo ($Pb Ti O_3$)
- ❖ Titanato de circonato de plomo, más conocido como PZT ($Pb [Zr_x Ti_{1-x}] O_3$, $0 < x < 1$)
- ❖ Niobato de potasio ($K Nb O_3$)
- ❖ Niobato de litio ($Li Nb O_3$)
- ❖ Tantalato de litio ($Li Ta O_3$)
- ❖ Otras piezocerámicas sin plomo

2.2 Rectificador de onda completa

La señal generada por el material piezoeléctrico de acuerdo a la figura 9 y figura 10 resulta ser una señal alterna y, por ello, necesita ser rectificada para que, posteriormente, se pueda almacenar la energía convenientemente. El rectificador de onda completa sirve para convertir la señal alterna (AC) que se genera en el material piezoeléctrico a señal continua (DC). Esta señal continua sirve para cargar la unidad de almacenamiento que se detallará más adelante.

En esta tesis se utilizará diodos para implementar el proceso de rectificación debido a que un diodo permite el flujo de la corriente en un solo sentido y no bidireccional. Los diodos se conectan en un circuito de puente que facilita la obtención de una misma polaridad a la salida a partir de dos polaridades (opuestas) en la entrada [9].

Por un lado, se puede observar en la figura 13 cuando la tensión generada es positiva, la ruta de la corriente es, primero, por el diodo D1 hasta llegar al nodo 1 y, luego, regresa por el diodo D2. Por otro lado, cuando la tensión es negativa, la ruta de la corriente es en sentido inverso. En este caso, primero pasa por el diodo D3 (para llegar al nodo 1) y, luego, regresa por el diodo D4. En ambas rutas que toma la corriente, siempre da como resultado una tensión positiva en el nodo 1.

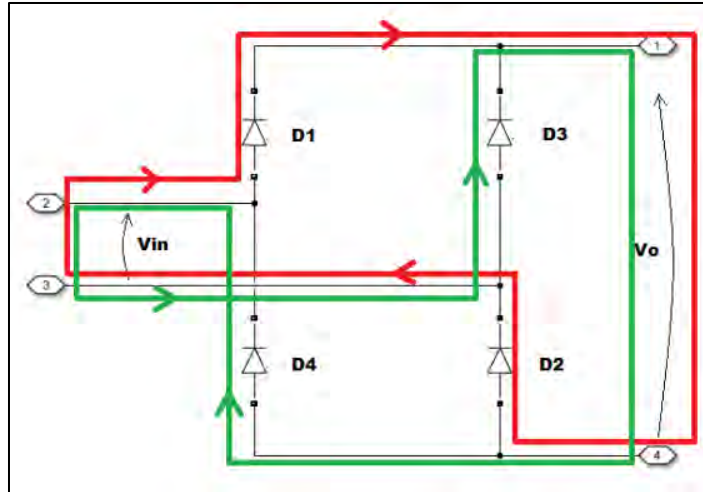


Figura 13. Puente rectificador de diodos. Rojo tensión positiva.
Verde tensión negativa [16].

Asimismo, en la figura 14 se puede muestra el resultado del efecto de una señal de onda sinusoidal después de un puente rectificador de diodos como se mencionó en el párrafo anterior.

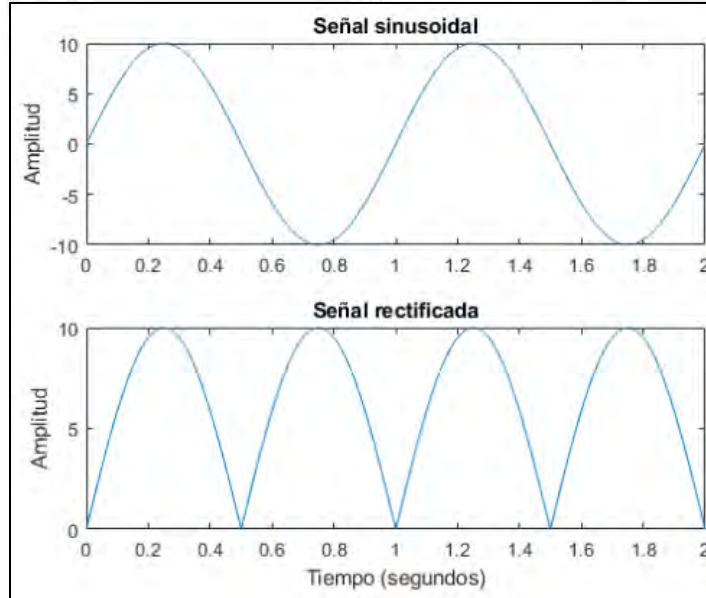


Figura 14. Señal rectificada de onda completa [16].

2.3 Unidades de almacenamiento

La energía obtenida, luego de haber rectificado y filtrado la señal en el material piezoeléctrico, se necesita almacenar en un dispositivo que permita almacenar energía eléctrica como un supercondensador, condensador electroquímico de doble capa o una batería.

Un condensador es capaz de almacenar energía eléctrica al acumular carga en sus placas. Este componente, al estar conectado a una fuente de corriente continua (DC) empieza a cargarse almacenando energía eléctrica. Esta energía almacenada se libera cuando el condensador es conectado a una carga (dispositivo de bajo consumo).

Por otro lado, una batería emplea procesos electroquímicos para almacenar energía. Por ello, la ventaja de los condensadores con respecto a las baterías es que pueden descargar energía más rápido ya que dependen solo de su tiempo de constante [9].

En la ecuación (1) se muestra una relación entre la carga almacenada, energía eléctrica almacenada y el voltaje que se desarrolla en el condensador.

$$W = \frac{1}{2} * \left(\frac{Q^2}{C} \right) = \frac{1}{2} * C * V^2 \quad (1)$$

Donde:

Q: Cantidad de carga almacenada en el condensador

C: Capacitancia del condensador

V: Voltaje desarrollado a través del condensador

W: Energía (en julios) almacenada en el condensador

Por lo tanto, requisitos relevantes para la elección del condensador que permite el almacenamiento de energía eléctrica recolectada del sistema piezoeléctrico son:

- ❖ Capacitancia
- ❖ Voltaje de trabajo máximo. Este requisito se elige para cargar dispositivos de bajo consumo. Por ejemplo, 5 voltios es un valor común.
- ❖ Sobretensión
- ❖ Rango de temperatura de funcionamiento

2.4 Modelo recolector de energía piezoeléctrica genérico

Un recolector de energía por sistemas piezoeléctricos extrae energía a partir del movimiento y la convierte en energía eléctrica. Luego esta energía es almacenada y/o entregado a una carga eléctrica. El modelo del funcionamiento de un recolector de energía, generalmente, se puede dividir en tres fases como se muestra en la figura 15.

- ❖ La fase 1 pertenece a la transferencia de energía mecánica. En esta fase se incluye la estabilidad mecánica del transductor piezoeléctrico y adaptación de impedancia mecánica.
- ❖ La fase 2 pertenece a la transducción de energía mecánica-eléctrica. En esta fase se tiene en cuenta la relación con el factor de acoplamiento electromecánico en la estructura del transductor compuesto.
- ❖ La fase 3 pertenece a la transferencia de energía eléctrica. En esta fase se incluye la adaptación de impedancia eléctrica para la transferencia de energía a un dispositivo de almacenamiento

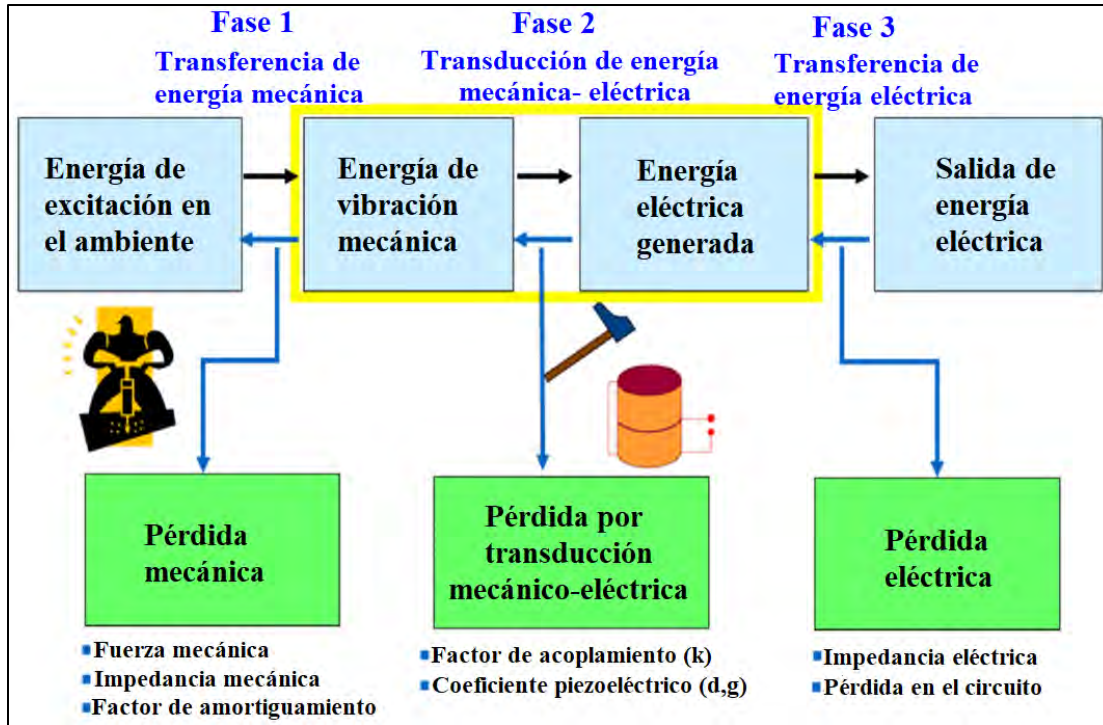


Figura 15. Tres fases principales asociados con la recolección de energía piezoeléctrica [18].

Se puede observar, también, que existen pérdidas en cada fase de transferencia o recolección de energía.

En primer lugar, la pérdida mecánica se agrupa las pérdidas que se ocasionan en la parte de generación de energía. Entre ellas tenemos a la fuerza mecánica que se ejerce en el dispositivo piezoeléctrico, factor de amortiguamiento e impedancia mecánica/acústica. La impedancia mecánica Z es utilizado para estimar la transferencia de energía de ondas sonoras entre dos materiales.

En segundo lugar, en la pérdida por transducción mecánico-eléctrica se tiene en cuenta dos aspectos. Por un lado, el factor de acoplamiento (k) está relacionado con la tasa de conversión entre la energía eléctrica y la energía mecánica. Por otro lado, el coeficiente piezoeléctrico (constante de deformación piezoeléctrica d , constante de voltaje piezoeléctrico g) hace referencia a la permisividad relativa del sistema piezoeléctrico [18].

Finalmente, la pérdida eléctrica hace referencia a la pérdida en un circuito convertidor DC/DC que permite acumular la energía eléctrica generada de sistema recolector de energía piezoeléctrica. Sin embargo, en esta tesis no se hará uso de este tipo de convertidores.

2.5 Modelo del circuito de optimización

La relación con lo expuesto en el capítulo 2 y el trabajo que se está realizando en esta tesis es que el circuito (elegido como objeto de estudio y optimización) de la figura 2 es un recolector de energía eléctrica que parte de un dispositivo piezoeléctrico. El circuito elegido fue presentado estado del arte del capítulo 1 en el punto **1.2.1** llamado A Novel Sensor for Vibration Frequency Measurement With Piezoelectric Kinetic Energy Harvesting.

Se puede observar en la figura 16 que el diagrama (propuesto en el paper del circuito a trabajar) presenta un modelo similar a la figura 15 que contiene las tres fases principales que se vinculan con un recolector de energía piezoeléctrica. Sin embargo, considera algunas particularidades extras:

- ❖ Un sensor de vibración con la capacidad de recolectar energía basado en la técnica Bias-Flip para la medición de frecuencia. Esta técnica, permite medir la frecuencia de vibración (con ayuda del circuito de acondicionamiento de señal) y recolectar energía cinética con alta eficiencia.
- ❖ Un esquema de control de interruptor adaptativo que permite activar el interruptor Bias-Flip cuando detecta el cambio de polaridad de la corriente producida por el dispositivo piezoeléctrico recolector de energía.
- ❖ Un multivibrador monoestable genera un interruptor fijo a tiempo. Es decir, este monoestable se emplea para activar el interruptor automáticamente en instantes óptimos.

- ❖ Este circuito de cosecha de energía basado en la técnica Bias-Flip se utiliza para extraer y rectificar la energía de corriente alterna (AC), generada desde el transductor piezoeléctrico, a energía de corriente continua (DC) que posteriormente es dirigida al circuito gestor de energía.

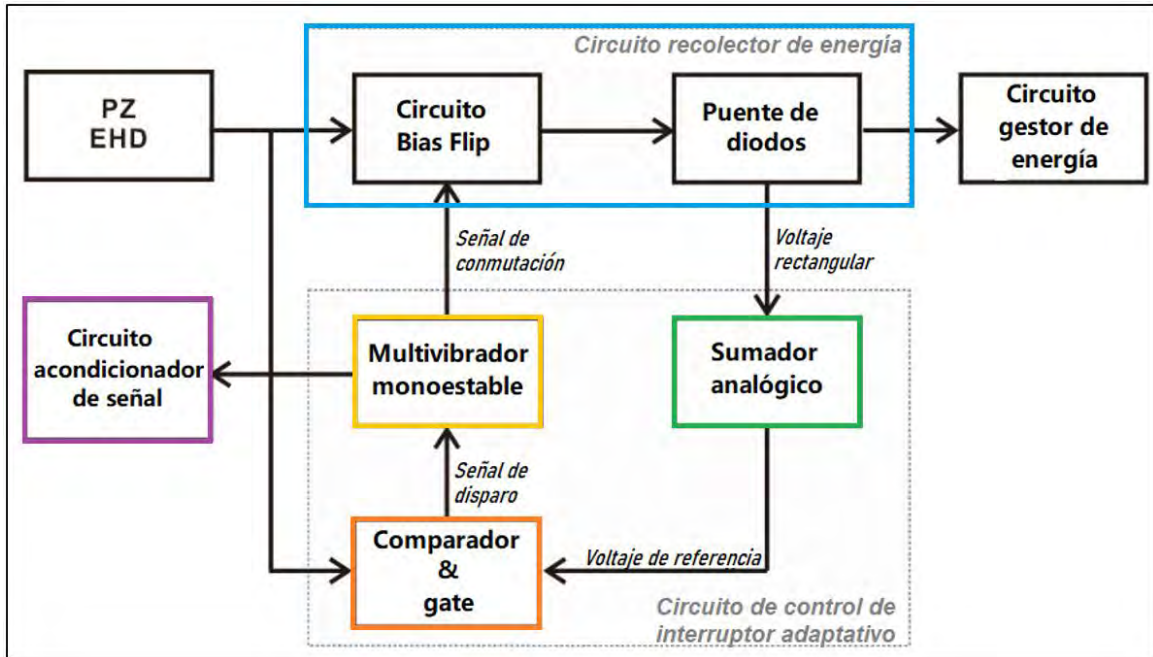


Figura 16. Diagrama del sistema recolector de energía piezoeléctrica empleando la técnica Bias-Flip [10].

Según lo mencionado en el paper del circuito de la figura 16, el sistema propuesto es capaz de medir la frecuencia de vibración dentro del rango de 80 – 130 Hz y que puede alimentarse por sí misma en un rango de 96-116 Hz. Además, para aumentar el ancho de banda se tiene que reducir la resistencia del bucle Bias-Flip.

Por ello, se ha pensado trabajar en el circuito de control de interruptor adaptativo debido a que en este módulo contiene al multivibrador monoestable, comparador y sumador analógico, los cuales operan bajo un determinado rango de frecuencia y fuente de alimentación según las especificaciones técnicas de cada componente. Estas podrían ser modificadas y/o reemplazadas de

tal manera que nos permita ampliar un rango de frecuencia de trabajo o mejorar el circuito que permita recolectar mayores porcentajes energía.



CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA PROPUESTA PARA EL CIRCUITO ELÉCTRICO RECOLECTOR DE ENERGÍA OPTIMIZADO

En este capítulo se presenta la implementación del circuito recolector de energía piezoeléctrica como objeto de estudio y optimización.

En primer lugar, se ha tomado como referencia el circuito que forma parte del estado del arte titulado *A Novel Sensor for Vibration Frequency Measurement With Piezoelectric Kinetic Energy Harvesting* [10].

Luego, se busca implementar el circuito de referencia reemplazando algunos componentes obsoletos que se menciona en [10] o con fines de simulación. De esta manera, se puede determinar el punto de partida en la cosecha de energía y, posteriormente, se compara con la propuesta de la tesis.

3.1. Análisis de los módulos que conforman el circuito de referencia

Según el diagrama de la figura 16 de la página 27, se procede a implementar cada módulo que concierne a la cosecha de energía piezoeléctrica. Primero, se implementa el circuito recolector de energía (recuadro de color celeste) incluyendo el modelo de circuito equivalente para el dispositivo piezoeléctrico. Luego, se implementa y verifica el funcionamiento del Comparador & gate (recuadro de color anaranjado) y multivibrador monoestable (recuadro de color amarillo). Esto debido a que se tuvo que reemplazar algunos componentes que se empleó en el estudio del circuito de referencia.

3.1.1. Modelo de circuito recolector de energía

Esta etapa del circuito se muestra en la figura 17 donde la parte mecánica se modela mediante la fuente V3 que representa la magnitud de la fuerza de vibración del elemento piezoeléctrico. Los componentes conectados en serie a V3 como a inductancia L3, la resistencia R3 y la capacitancia C6 representan la masa efectiva, la amortiguación mecánica y la rigidez mecánica del dispositivo recolector de energía, respectivamente. De manera similar, en la parte eléctrica, la capacitancia C8 modela la capacitancia intrínseca fijada del elemento piezoeléctrico. Luego el acoplamiento electromagnético entre la parte mecánica y eléctrica se representa mediante E3 (fuente de voltaje controlada por voltaje) y F3 (fuente de corriente controlado por corriente) [10].

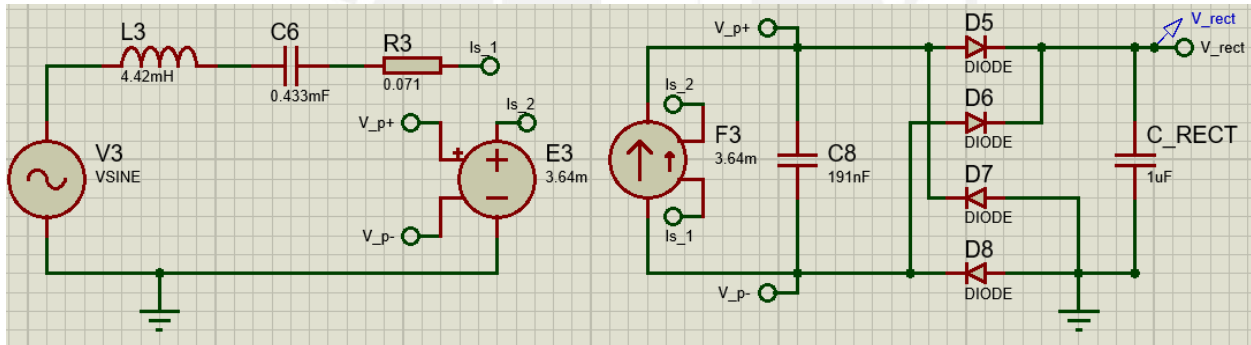


Figura 17. Modelo recolector de energía piezoeléctrica [10].

En la figura 18 podemos observar que el voltaje en el condensador C_RECT alcanza, aproximadamente, 25 μV en una simulación de 10 segundos.

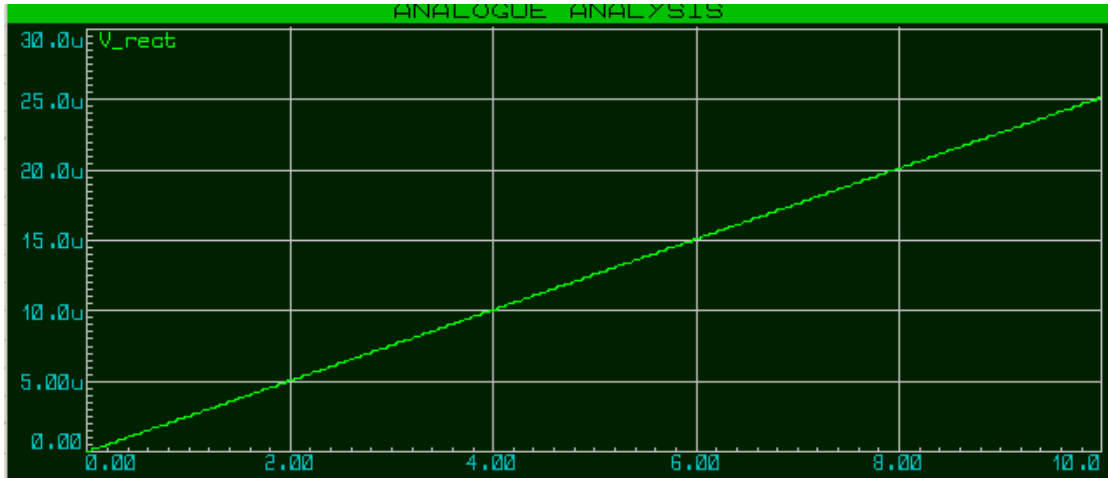


Figura 18. Simulación del modelo recolector de energía piezoeléctrica.

3.1.2. Comparador & gate

Para esta etapa, se reemplazó el comparador de voltaje TLV3492 que se menciona en [10] por un comparador que sí se encuentra en la librería del software de Proteus, solo para efectos de simulación. Seguidamente, se verificó la comparación entre un voltaje DC y un pulso triangular. En la figura 19 se muestra el elemento comparador y la gráfica resultante que demuestra el funcionamiento de la comparación que se requiere para implementarlo en esta etapa.

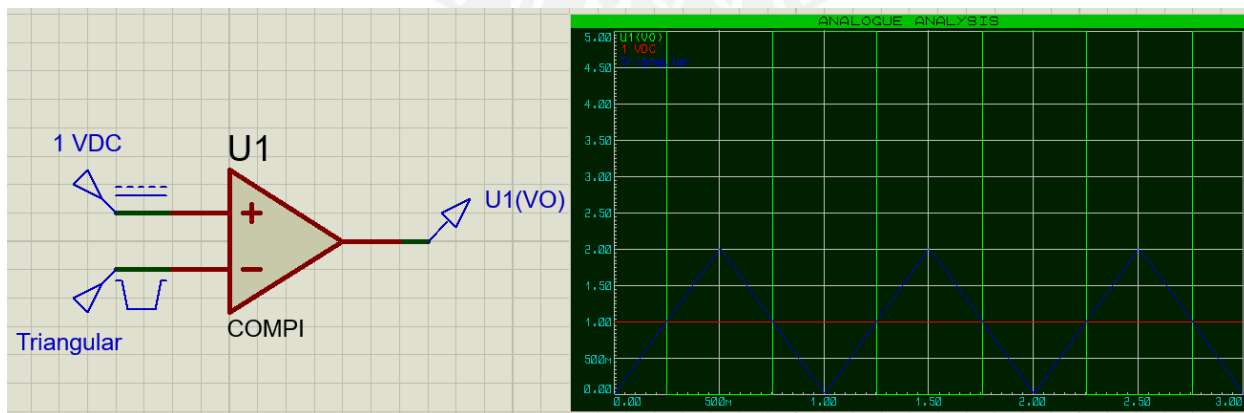


Figura 19. Prueba de simulación del comparador.

3.1.3. Multivibrador monoestable

Para esta etapa, se reemplazó el multivibrador LTC6993-1 que menciona en el documento del circuito de referencia por el multivibrador comercial NE555 (ver en ANEXOS) para poder simularlo en el software Proteus 8 Professional. En primer lugar, se verificó el funcionamiento encendiendo un led. En la figura 20 se muestra la conexión del multivibrador en modo monoestable en el cual se enciende un led durante un tiempo determinado T , definido por $R1$ y $C1$, cuando se acciona el pulsador que conecta a GND el pin 2 del monoestable.

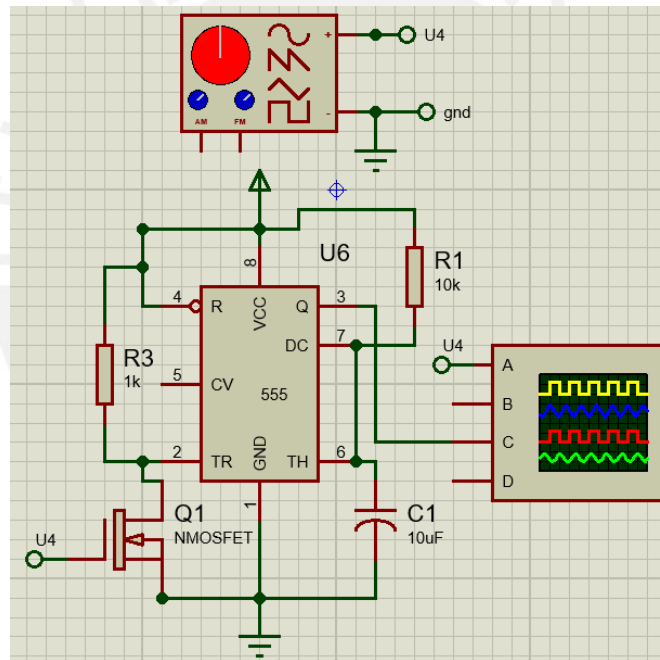


Figura 20. Circuito modo monoestable NE555.

La resistencia $R3$ (resistencia de pull-up) es $1\text{ k}\Omega$ debido a que así lo sugiere la ficha técnica del fabricante para modo monoestable del integrado NE555. Se emplea un mosfet para generar el disparo del multivibrador por el pin 2. La resistencia $R2$ solo se empleó para fines de simulación

de encendido del led, mas no en la implementación del circuito de referencia. La resistencia $R1$ y el capacitor $C1$ se obtuvieron de la ecuación (2).

$$T = 1.1 * R * C \quad (2)$$

Donde:

T : es el tiempo que se requiere que la salida por en pin 3 permanezca en nivel alto.

R : es la resistencia $R1$

C : es la capacitancia $C1$

Se define un $T \approx 0.1$ s para simular el pulso que se emplea en el circuito de referencia. Luego se elige $C1 = 10 \mu F$ por lo que nos da como resultado $R1 = 10 k\Omega$

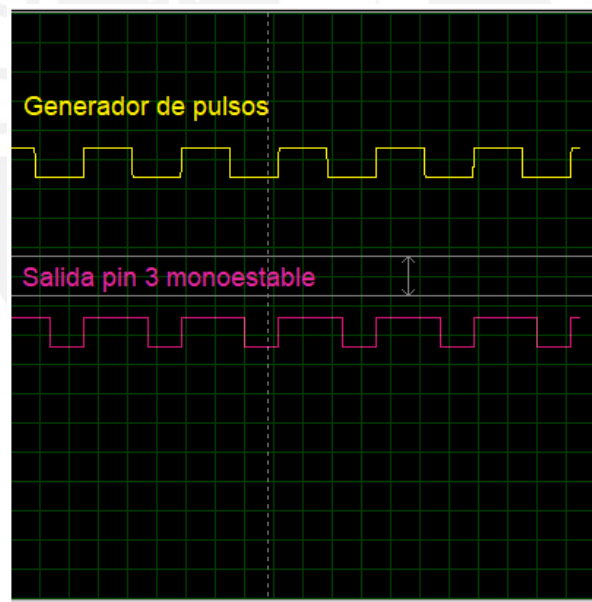


Figura 21. Gráfica de la salida del monoestable.

Se puede observar que la salida del pin3 retiene el pulso y esto se modifica con $C1$ y $R1$.

3.2. Implementación del circuito de referencia

Las arquitecturas de recolección sincronizada de interruptores en inductores (Synchronized Switch Harvesting on Inductor, SSHI) o en capacitores (Synchronized Switch Harvesting on Capacitor, SSHC) logran, en la actualidad, mejor eficiencia de cosecha de energía. El principio de estas arquitecturas consiste en invertir el voltaje a través del transductor piezoeléctrico en cada momento de cruce por cero de la corriente de este [13].

El modelo de referencia se caracteriza por implementar una técnica basada en la arquitectura SSHI en el cual el inductor L2 que se conecta en paralelo al capacitor C8 en el instante de cruce por cero de la corriente en el transductor piezoeléctrico.

En la figura 22 se puede observar la implementación del circuito de referencia con los componentes mencionados y analizados previamente.

Este circuito se caracteriza por las siguientes particularidades:

- ❖ Es un circuito recolector de energía con la capacidad de medir frecuencia de vibración.
- ❖ Circuito interruptor automático en inductor SSHI.
- ❖ Multivibrador monoestable que genera la señal de conmutación del interruptor.

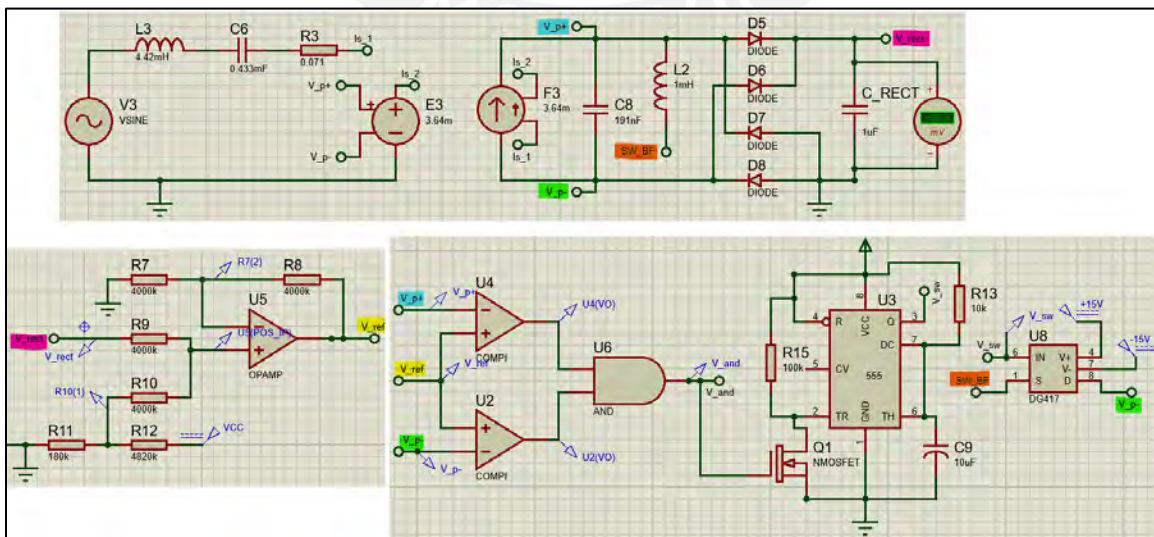


Figura 22. Circuito recolector de energía piezoeléctrico de referencia [10].

El capacitor C8 es el principal causante de pérdidas en el proceso de cosecha de energía y se muestra en todo modelo eléctrico de material piezoeléctrico. Las pérdidas se ocasionan cuando se produce la carga (descarga) del C8 y luego, después de la carga (descarga), la corriente I generada en el dispositivo piezoeléctrico atraviesa el puente de diodos. El circuito de referencia acelera el proceso de que la corriente I atraviese sin esperar la carga y descarga de C8 [10].

3.3. Simulación y verificación del circuito de referencia.

En esta etapa se simula el circuito de referencia implementado para hacer mediciones del voltaje de interés (V_{rect}) y así determinar un punto de partida en la cosecha de energía.

En la figura 23 se muestra que el voltaje de interés (V_{rect}) alcanza cerca de 225 a 230 mV y luego se ralentiza el incremento del voltaje.

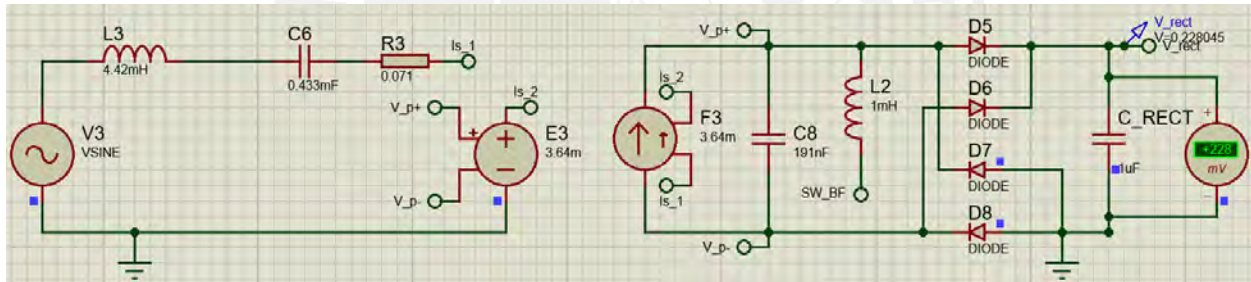


Figura 23. Simulación del circuito recolector de energía piezoeléctrica de referencia.

La figura 24 muestra la gráfica de la medición del voltaje en V_{rect} donde se puede observar que el voltaje en el condensador C_RECT varía, aproximadamente desde 160 mV hasta 220 mV en 10 segundos.

El circuito de referencia con la técnica del interruptor automático alcanza 60 mV frente a 25uV de la figura 18.

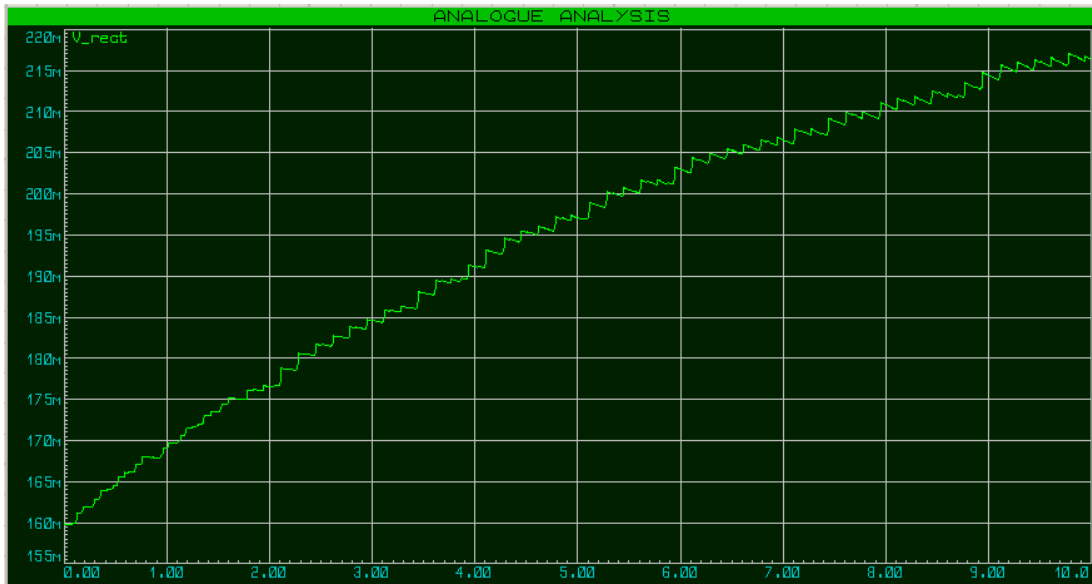


Figura 24. Gráfica de la simulación del circuito de referencia implementado.

3.4. Propuesta de optimización

Tomando en cuenta lo obtenido en la figura 23 y figura 24 se plantea estos resultados como punto de partida en el voltaje de interés ($V_{rect} \approx 220 \text{ mV}$)

La propuesta de esta tesis consiste en la integración de 2 arquitecturas SSHI. La primera se trata de un interruptor sincronizados en paralelo en el inductor (P-SSHI) y la segunda se trata de otro interruptor sincronizados en serie en el inductor (S-SSHI) que se muestra a continuación.

3.4.1. Arquitectura de recolección energía de interruptores sincronizados en paralelo en el inductor (P-SSHI)

En la figura 25 se puede observar la arquitectura P-SSHI que consiste en que justo en el instante que el capacitor C_{mc} se encuentra en carga (descarga) disipando energía, se acciona un interruptor que posiciona al inductor L en paralelo a C_{mc} . De esta manera, se convierten en circuito tanque que acelera en proceso de carga(descarga) del capacitor. Luego, la corriente I que se genera en el

circuito puede atravesar el puente rectificador de diodos con menos tiempo de espera en la carga (descarga) de C_{mc} .

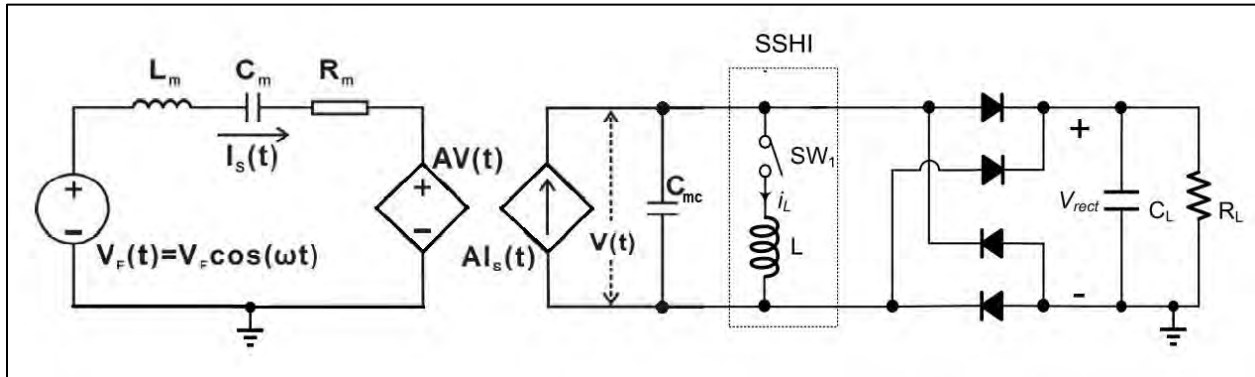


Figura 25. Circuito recolector de energía piezoeléctrica P-SSHI

Se pasa a hacer una breve simulación de esta arquitectura y se activa el interruptor con ayuda del monoestable 555 que recibe señales cuadradas de un generador de ondas cuadradas a la misma frecuencia de la fuente. El generador de ondas solo se ha empleado para verificar que esta arquitectura por sí sola mejora la cosecha de energía.

En la figura 26 se muestra la gráfica de 10 segundos de simulación del circuito P-SSHI donde $V_{rect} \approx 120 \mu V$ que es un resultado mayor a la que obtiene en la figura 18 donde solo se alcanza aproximadamente $25 \mu V$.

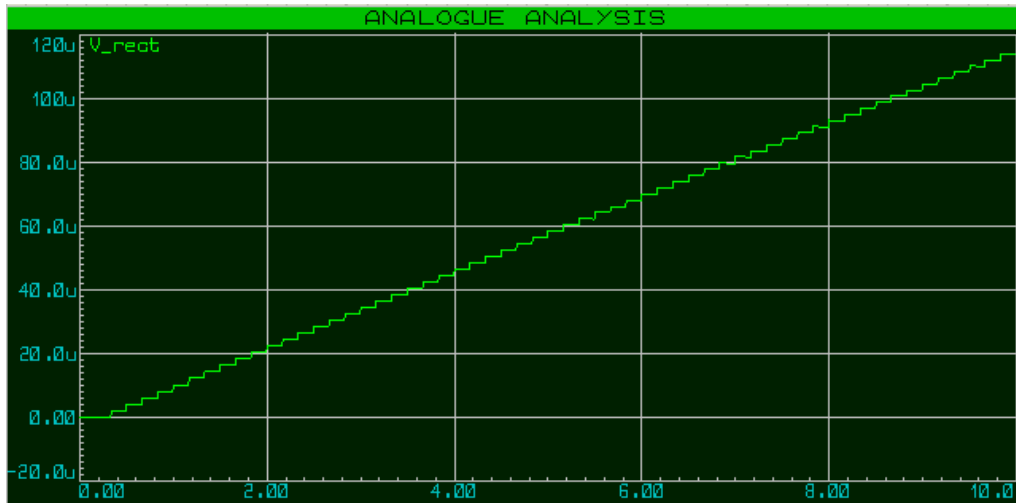


Figura 26. Gráfica del circuito recolector de energía P-SSHI.

3.4.2. Arquitectura de recolección energía de interruptores sincronizados en serie en el inductor (S-SSHI)

En la figura 27 se muestra la arquitectura que se emplea luego de que el C_{mc} de haya cargado(descargado); es decir, en el instante que la corriente comienza a atravesar el puente rectificador de diodos. La energía traspasada de C_{mc} a L también atraviesa el puente de diodos. De esta manera evitamos menos disipación de energía en la cosecha de energía.

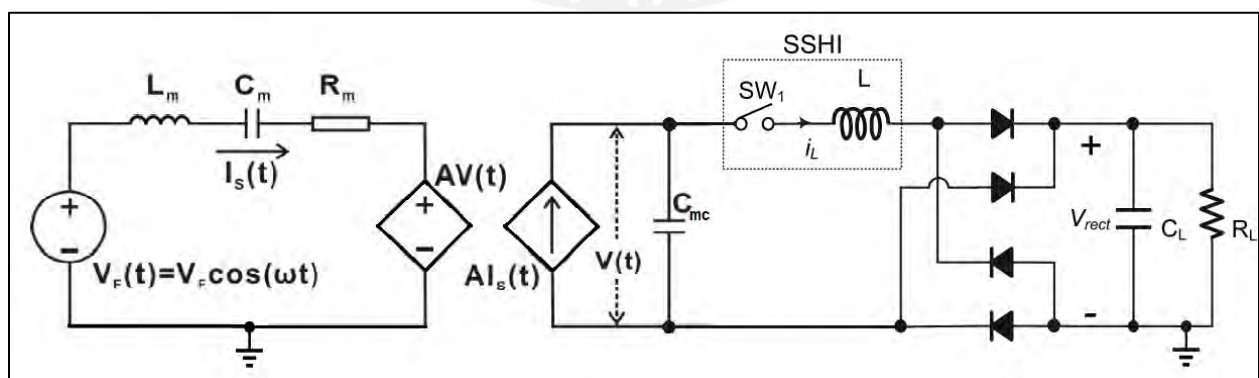


Figura 27. Circuito recolector de energía piezoeléctrica S-SSHI

En la siguiente figura se muestra la gráfica de 10 segundos de simulación del circuito S-SSHI donde $V_{\text{rect}} \approx 500 \mu\text{V}$, que es un resultado mayor que en la figura 18 y figura 25.

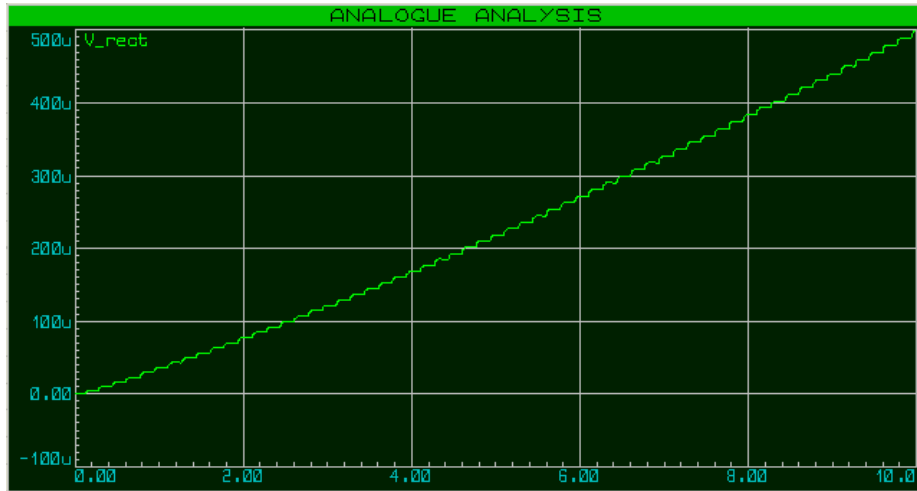


Figura 28. Gráfica del circuito recolector de energía S-SSHI.

3.4.3. Integración de P-SSHI y S-SSHI

Esta integración de ambas arquitecturas consiste en que el interruptor SW cambia de estado cuando comienza la carga (C_{mc}) de esta manera consigue el circuito tanque entre L y C_{mc} que acelera el proceso, circuito recolector P-SSHI. Luego, cuando el interruptor vuelve al estado normal, la corriente del circuito pasa a través del puente de diodos, circuito recolector S-SSHI

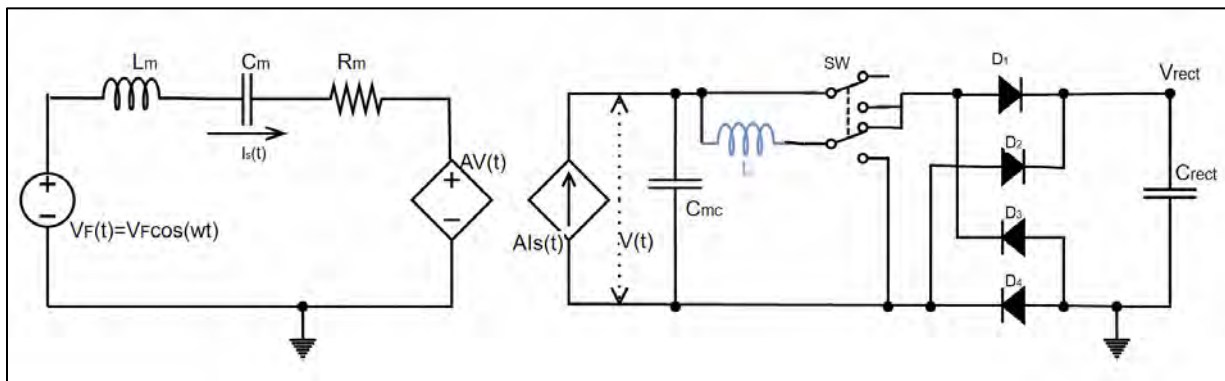


Figura 29. Circuito recolector de energía piezoeléctrica P/S-SSHI.

El principio de funcionamiento del circuito de la figura 29 se basa, principalmente, en que el inductor L cambia de posición de paralelo a serie según el interruptor SW lo decida. Este SW cambia de posición en el momento de cruce por cero de la corriente, que es el momento donde los diodos dejan de conducir corriente y esperan a que el capacitor C_{mc} se cargue (descargue). De esta forma, también, se aprovecha el bucle resonante entre C_{mc} y L. Asimismo, en el instante que SW vuelva al estado normal, la energía adquirida por el inductor también se transfiere a C_{rect} .

El circuito opera en dos modos diferentes que se denominan modo P-SSHI y modo S-SSHI.

Los resultados alcanzados se pueden observar en la siguiente gráfica. El voltaje medido en V_{rect} supera los 220 mV que se planteó como punto de partida. En este caso, V_{rect} alcanza aproximadamente 700 mV.

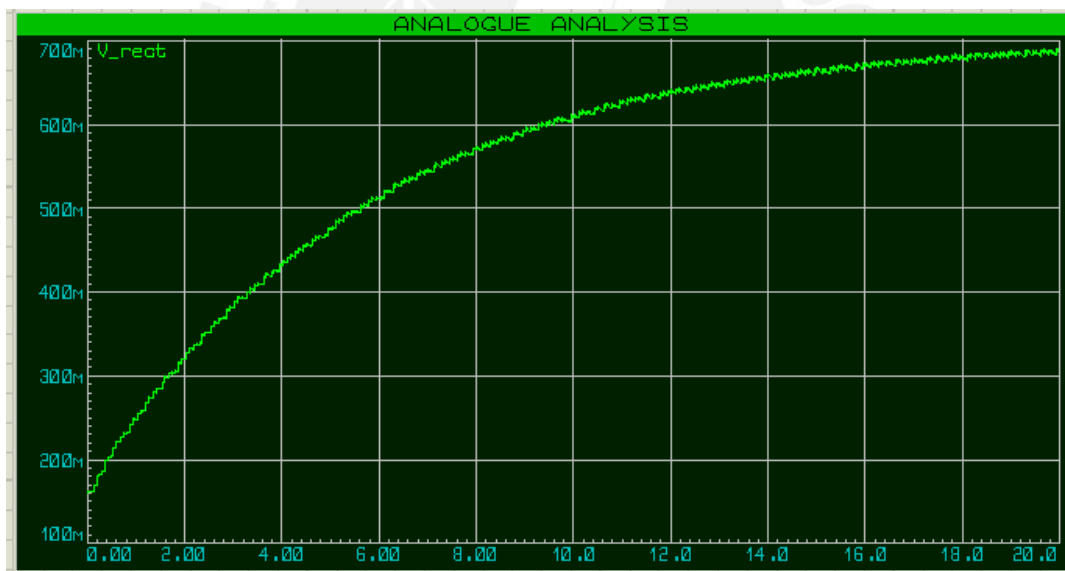


Figura 30. Gráfica de circuito recolector de energía piezoeléctrica P/S-SSHI.

Cabe resaltar que, para obtener esta integración de circuitos es necesario emplear los componentes ADG417 y ADG419 (ver en ANEXOS) para cumplir la función del interruptor SW que se describe en la página anterior.

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Teniendo en cuenta que en este documento se tiene como objetivo proporcionar un circuito que brinde mejores prestaciones en la cosecha de energía piezoeléctrica, se trabaja principalmente en la exploración e integración de las arquitecturas P-SSHI y S-SSHI. Este trabajo no se enfoca en el circuito de administración de energía, como el convertidor DC-DC que proporciona energía DC al circuito de cosecha de energía y el circuito de seguimiento del punto de máxima potencia que proporciona un voltaje de carga óptimo V_{RECT} . Esto debido a que la energía recolectada depende de la carga y el valor óptimo que alcanza V_{RECT} que, a diferentes frecuencias, se sintoniza manualmente. El consumo de energía constante es de 0.634 mW como se muestra en la figura 31 del circuito de referencia (curva de color rojo). Se puede observar que el circuito es capaz de alimentarse por sí solo desde 96 Hz a 116 Hz (curva de color verde sobrepasa la curva de color rojo).

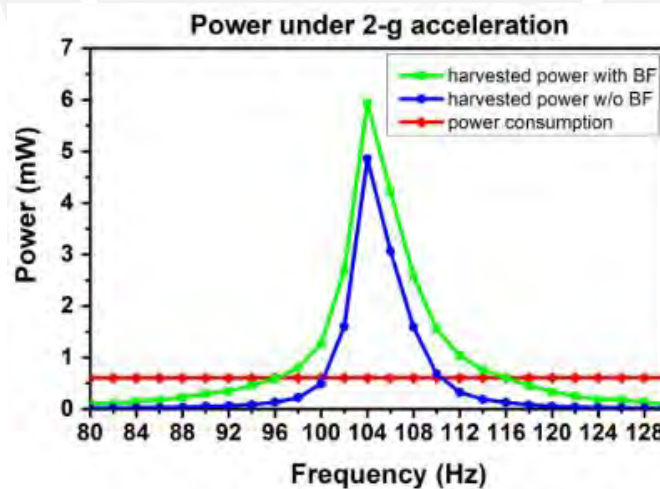


Figura 31. Potencia recolectada medida y consumo de energía del circuito de recolector de energía piezoeléctrica bajo 2 g de aceleración empleando la técnica Bias-Flip [10].

En este capítulo se presentan las simulaciones y resultados que se obtienen del circuito propuesto (figura 32). Para la validación del funcionamiento de este circuito se reemplazó algunos componentes que se mencionó en el capítulo 3 con el fin de simular el circuito en el software Proteus 8 Professional y ver el comportamiento del circuito en cada etapa. Asimismo, se implementó el circuito de referencia reemplazando los mismos componentes mencionados en capítulo 3 para poder simularlo en el software Proteus 8 Professional en bajas frecuencias dado que este software no soporta simulaciones mayores a 40 Hz para este tipo de circuitos. Finalmente, se comparan los resultados entre el circuito de referencia y el circuito propuesto para validar la mejora de eficiencia en la cosecha de energía.

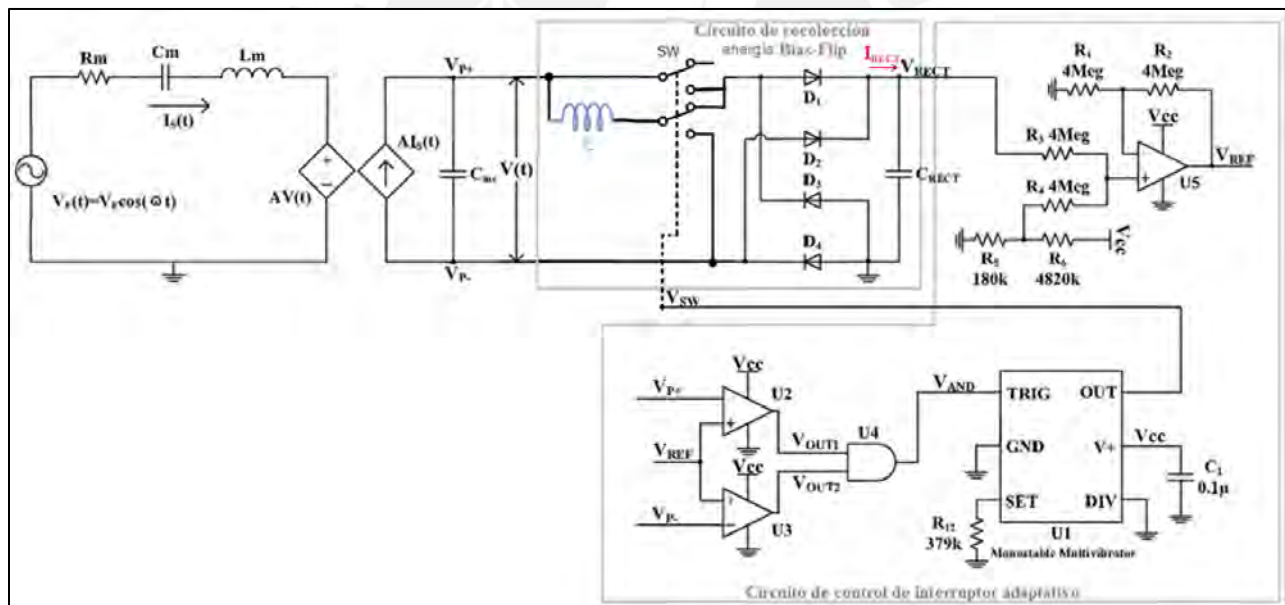


Figura 32. Circuito esquemático de recolector de energía piezoeléctrica que emplea la integración de las arquitecturas P-SSHI y S-SSHI

4.1. Simulaciones

En primer lugar, para mejorar la eficiencia en la cosecha de energía se ha empleado la arquitectura de interruptor sincronizado en inductores (SSHI). Por ello, de acuerdo con la figura 33, el tiempo de conexión del inductor L en paralelo con el capacitor C_{mc} debe de ser desde el instante de cruce por cero de la corriente I_s hasta que el voltaje $V(t)$ alcance $+V_{RECT}$ ($-V_{RECT}$). Para lograr esto, se debe modificar los valores de resistencia R_{12} y capacitor C_1 que acompañan al monoestable multivibrador para que el pulso enviado al interruptor V_{SW} perdure el tiempo necesario. Se puede observar en la figura 33 que este tiempo necesario es medio periodo aproximadamente.

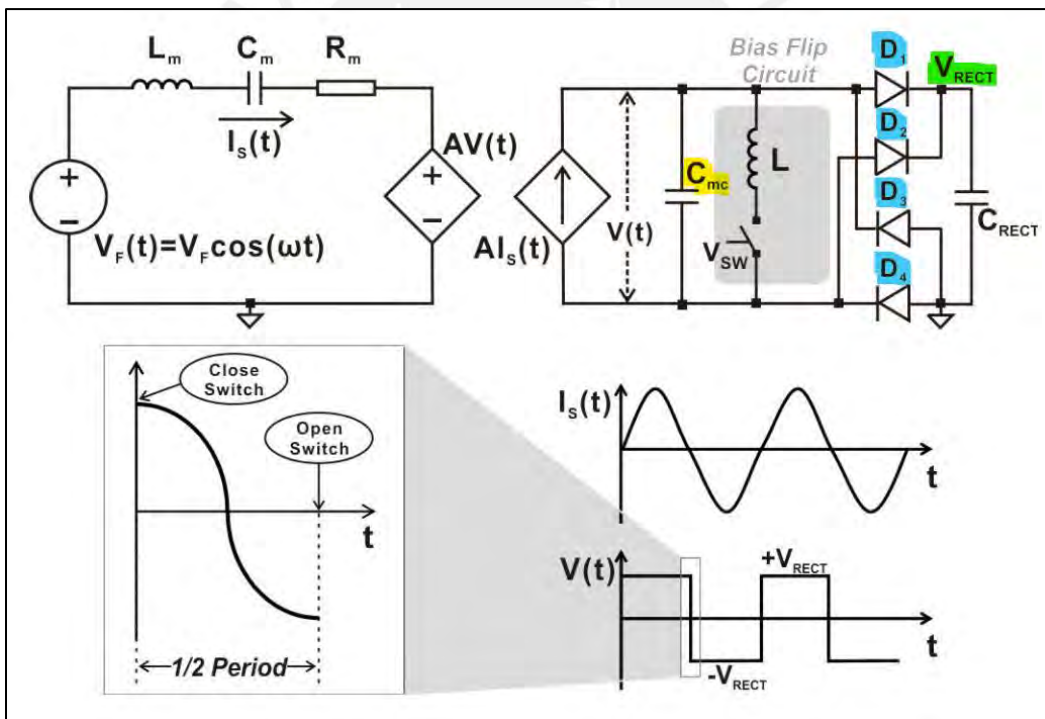


Figura 33. Operación en el circuito de voltaje de operación [10].

4.1.1. Frecuencia del transductor piezoeléctrico a 10Hz

El tiempo necesario que debe permanecer L en paralelo con C_{mc} en una frecuencia de 10 Hz del transductor piezoeléctrico se logra con R_{12} y C_1 calculados en las siguientes líneas.

$$Periodo = 0.1s \quad (3)$$

$$\frac{Periodo}{2} = 0.05s \quad (4)$$

De acuerdo con la fórmula (2) que se mencionó en el capítulo 3 en la página 29 se tiene:

$$0.05 = 1.1 * R_{12} * C_1 \quad (5)$$

Se elije:

$$C_1 = 10\mu F \quad (6)$$

$$R_{12} \approx 4.5 k\Omega \quad (7)$$

Con R_{12} y C_1 obtenidos, se simula el circuito y se obtiene la gráfica de la medición del voltaje en V_{RECT} y la corriente que circula I_{RECT} . Esta gráfica se muestra en la figura 34 y se puede observar que el voltaje en el V_{RECT} varía, aproximadamente, desde 160 mV hasta 775 mV en 10 segundos y la corriente máxima I_{RECT} alcanza aproximadamente 4.5 mA.

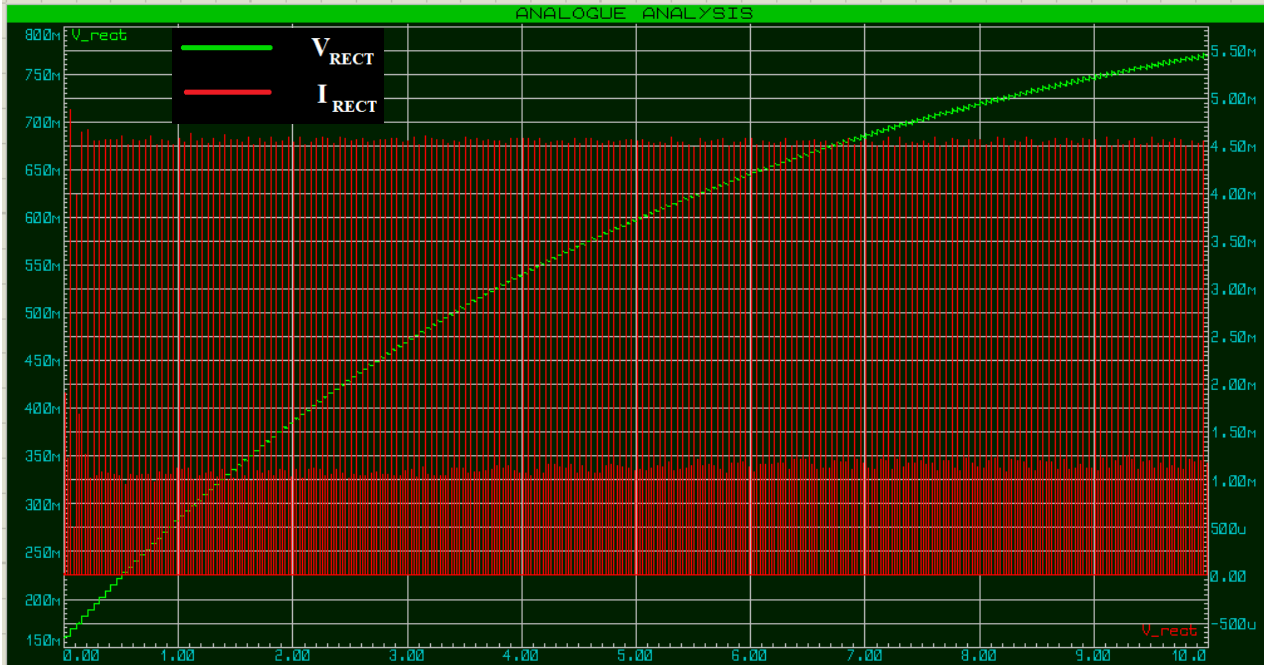


Figura 34. Gráfica de voltaje V_{RECT} vs tiempo (curva verde) y corriente I_{RECT} vs tiempo (curva roja) a 10 Hz.

4.1.2. Frecuencia del transductor piezoeléctrico a 20 Hz

De la misma forma que la simulación anterior, tiempo necesario que debe permanecer L en paralelo con C_{mc} en una frecuencia de 20 Hz del transductor piezoeléctrico se logra con R_{12} y C_1 calculados en las siguientes líneas.

$$Periodo = 0.05s \quad (8)$$

$$\frac{Periodo}{2} = 0.025s \quad (9)$$

De acuerdo con la fórmula (2) que se mencionó en el capítulo 3 en la página 29 se tiene:

$$0.025 = 1.1 * R_{12} * C_1 \quad (10)$$

Se elije:

$$C_1 = 10\mu F \quad (11)$$

$$R_{12} \approx 2.3 k\Omega \quad (12)$$

Con R_{12} y C_1 obtenidos, se simula el circuito y se obtiene la gráfica de la medición del voltaje en V_{RECT} y la corriente que circula I_{RECT} . Esta gráfica se muestra en la figura 35 y se puede observar que el voltaje en el condensador V_{RECT} varía, aproximadamente desde 160 mV hasta 1120 mV en 10 segundos y la corriente máxima I_{RECT} alcanza aproximadamente 3.75 mA.

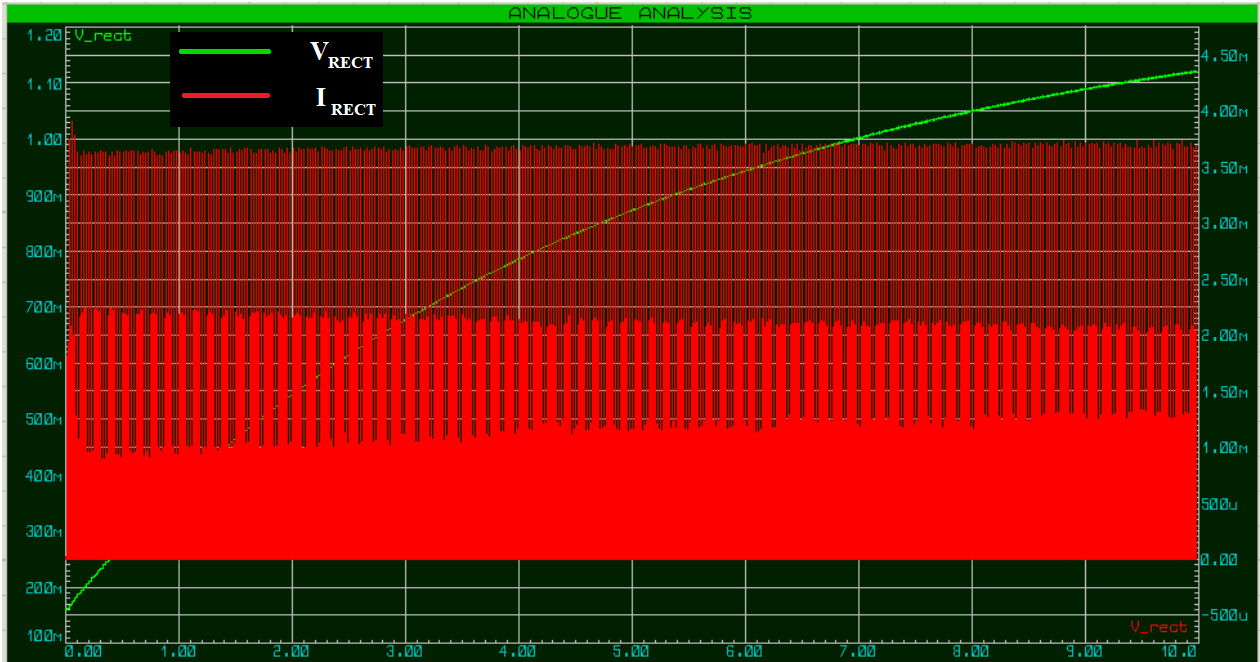


Figura 35. Gráfica de voltaje V_{RECT} vs tiempo (curva verde) y corriente I_{RECT} vs tiempo (curva roja) a 20 Hz con R_{12} igual a 2.3 k Ω .

Sin embargo, al variar $R_{12} = 1.7 \text{ k}\Omega$ se pudo observar que se obtiene mejores resultados. Estos resultados se muestran en la figura 36 donde el voltaje en V_{RECT} varía, aproximadamente, desde 160 mV hasta 1220 mV en 10 segundos y la corriente máxima I_{RECT} alcanza aproximadamente 4.25 mA.

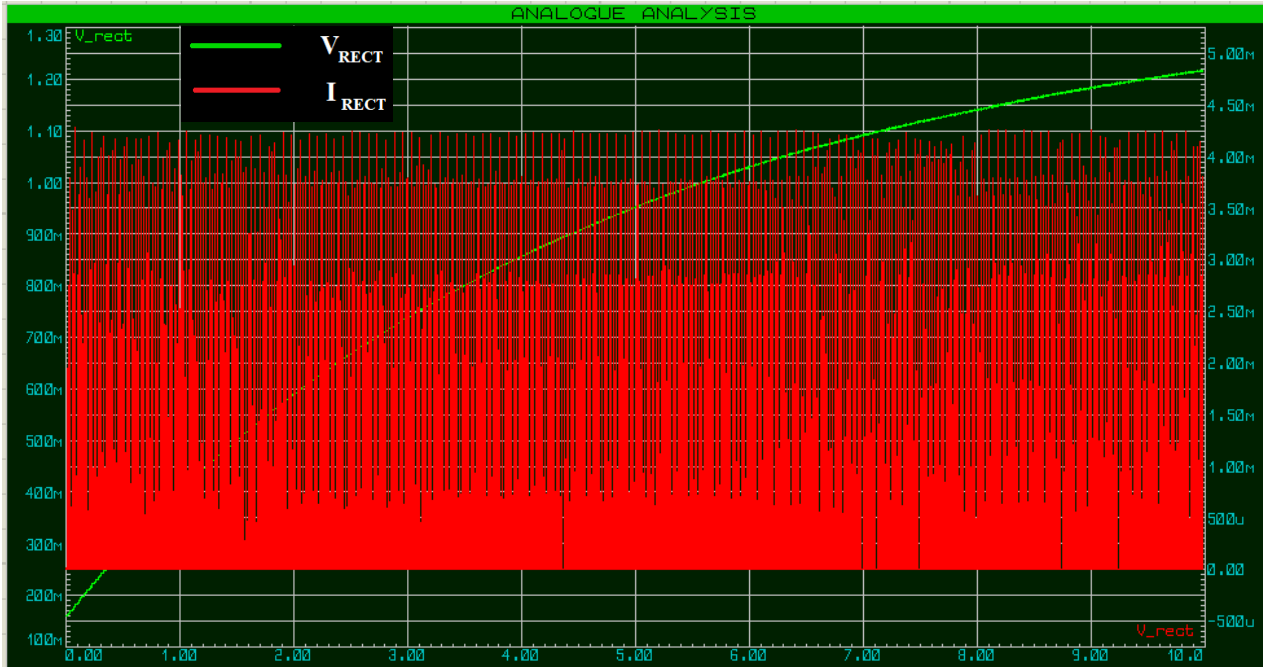


Figura 36. Gráfica de voltaje V_{RECT} vs tiempo (curva verde) y corriente I_{RECT} vs tiempo (curva roja) a 20 Hz con R_{12} igual a 1.7 k Ω .

4.1.3. Frecuencia del transductor piezoeléctrico a 30 Hz

De la misma forma que la simulación anterior, tiempo necesario que debe permanecer L en paralelo con C_{mc} en una frecuencia de 30 Hz del transductor piezoeléctrico se logra con R_{12} y C_1 calculados en las siguientes líneas.

$$Periodo = 0.033s \quad (12)$$

$$\frac{Periodo}{2} = 0.0167s \quad (13)$$

De acuerdo con la fórmula (2) que se mencionó en el capítulo 3 en la página 29 se tiene:

$$0.0167 = 1.1 * R_{12} * C_1 \quad (14)$$

Se elije: $C_1 = 10\mu F \quad (15)$

$$R_{12} \approx 1.5 k\Omega \quad (16)$$

Con R_{12} y C_1 obtenidos, se simula el circuito y se obtiene una gráfica menor a 2 segundos de la medición del voltaje en V_{RECT} y la corriente que circula I_{RECT} . Sin embargo, al variar $R_{12} = 1k\Omega$ se obtuvo una mejor gráfica de medición y se muestra en la figura 37 donde se puede observar que V_{RECT} alcanza un voltaje cercano a 1500mV y la corriente máxima I_{RECT} logra llegar a, aproximadamente, 4mA. Cabe resaltar que esta simulación se detuvo a los 7 segundos debido a que el software de simulación no es capaz de simular mayores frecuencias para este circuito.

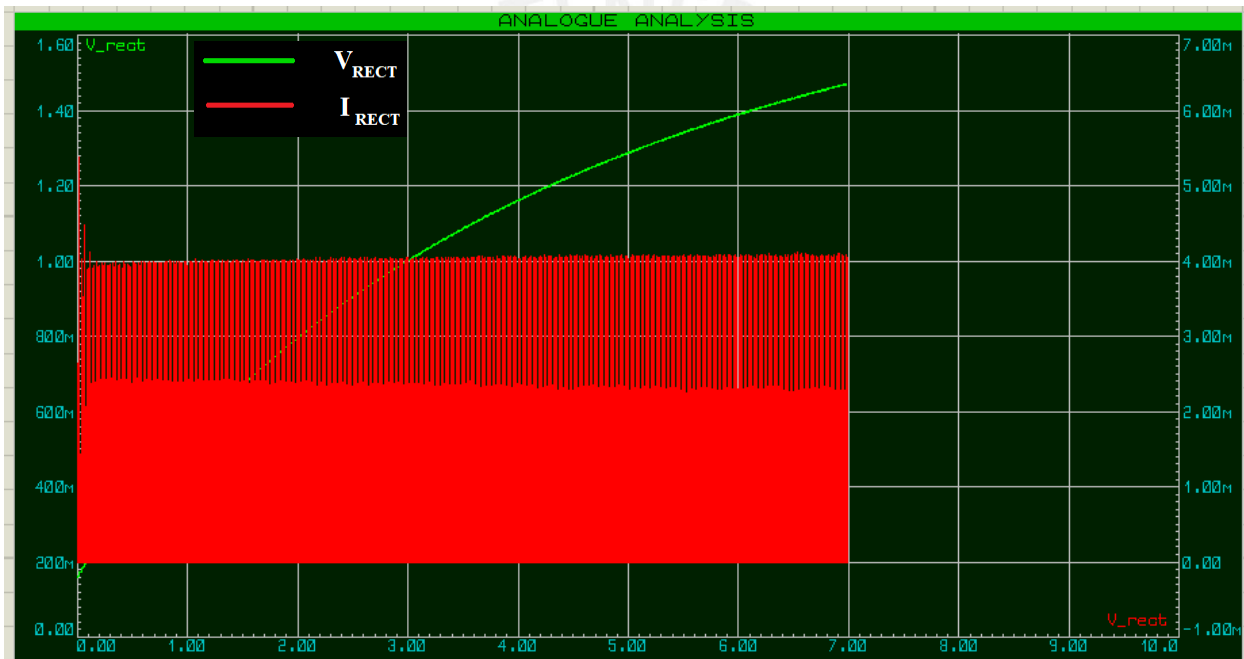


Figura 37. Gráfica de voltaje V_{RECT} vs tiempo (curva verde) y corriente I_{RECT} vs tiempo (curva roja) a 30 Hz con R_{12} igual a 1 k Ω .

4.2. Comparación con el circuito de referencia

El circuito de referencia se implementó tal como se muestra en la figura 22 en la página 30 y se realizó las pruebas variando la frecuencia desde 5 Hz hasta 30 Hz en el modelo circuito equivalente del transductor piezoeléctrico.

En la figura 38 se muestra la potencia recolectada que se obtiene de la simulación del circuito de referencia. La potencia recolectada se obtiene del valor óptimo de V_{RECT} y la corriente promedio (I_{RECT}) medida que fluye por la fuente de alimentación V_{RECT} .

El valor óptimo de V_{RECT} es el valor que alcanza el voltaje en C_{RECT} menos 160 mV, debido a que 160 mV es lo que proporciona el sumador de voltaje que enclava V_{REF} .

Para la corriente promedio se usa la siguiente aproximación:

$$I_{RECT} = 0.636 * I_{max} \quad (17)$$

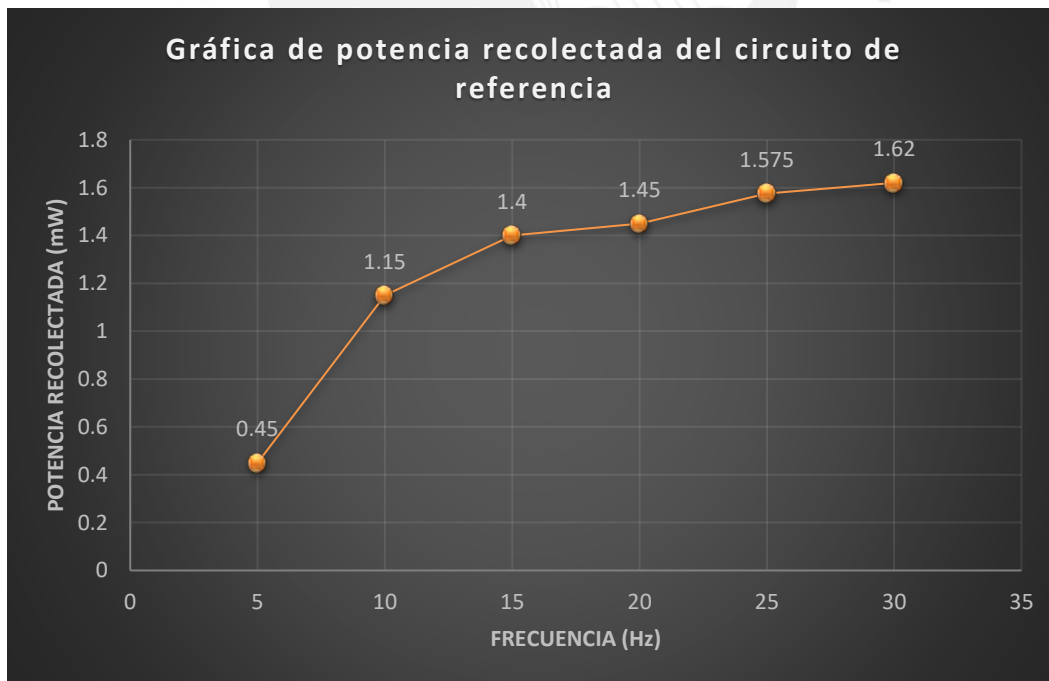


Figura 38. Gráfica de potencia recolectada vs frecuencia del circuito de referencia.

Asimismo, para obtener una gráfica de potencia recolectada similar del circuito propuesto, se realizó las pruebas variando la frecuencia desde 5 Hz hasta 30 Hz en el modelo circuito equivalente del transductor piezoeléctrico. V_{RECT} e I_{RECT} se hallan de manera similar que el párrafo anterior. En la figura 39 se muestra la potencia recolectada del circuito propuesto a diferentes frecuencias.

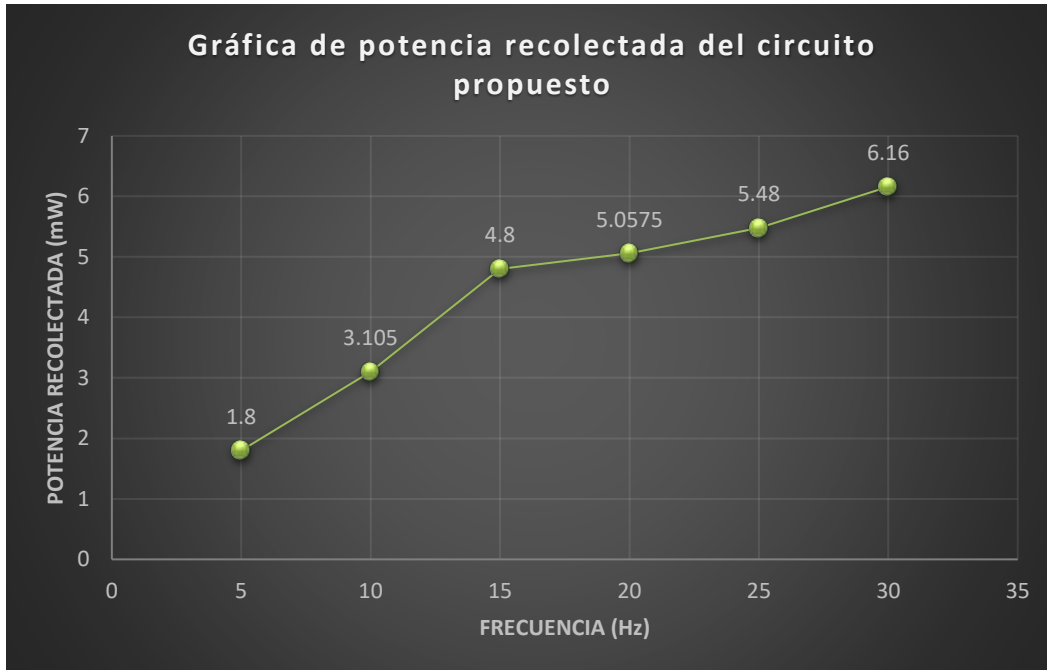


Figura 39. Gráfica de potencia recolectada vs frecuencia del circuito propuesto.

Se puede observar que la potencia recolectada del circuito propuesto es mayor que la del circuito de referencia en cada punto de frecuencia simulada. Esto se debe, principalmente, a que la energía transferida al inductor L cuando se posiciona en paralelo (circuito P-SSHI), se aprovecha cuando se posiciona en serie con el circuito (circuito S-SSHI).

4.3. Comparación con otros circuitos de cosecha de energía piezoeléctrica recientes

Para la comparación de otros circuitos de cosecha de energía piezoeléctrica se elaboró la siguiente tabla comparativa.

Tabla 1.

Comparativa de otras arquitecturas de cosecha de energía piezoeléctrica eficiente [19].

Publicaciones	JSSC 2015	TPE 2015	TPE 2015	BiasFlip2018	Este trabajo
Proceso tecnológico	0.35 μm CMOS	Componentes discretos	Componentes discretos	Componentes discretos	Componentes discretos
Transductor piezoeléctrico	Mide V21BL	Mide V22B	personalizado	Mide PPA1012	Mide PPA1014
C_{mc} (nF)	11	18	28.42	191	191
f (Hz)	200	225	24.9	219	40
Numero de componentes	-	24	19	≈ 10	≈ 10
Esquema de extracción	Modo dual	SSHI	Triple Bias-Flip	Bias-Flip	P/S-SSHI
Se alimentan por sí mismas	sí	sí	sí	sí	-
Eficiencia de conversión de energía	<80%	-	-	74%	>74%

En la tabla 1 se hace un resumen y una comparativa de los circuitos con esquemas similares de extracción de energía piezoeléctrica. El circuito propuesto no se ha validado la alimentación por si misma debido a que el software Proteus no permite simular a frecuencia mayores a 40 Hz y un

par de componentes, como los interruptores que se emplearon para la simulación, no son de baja potencia como se requiere en este tipo de circuitos.

Sin embargo, se pudo verificar, con los resultados de la figura 39, que el circuito propuesto obtiene una mejor eficiencia en la cosecha de energía que el circuito de referencia.

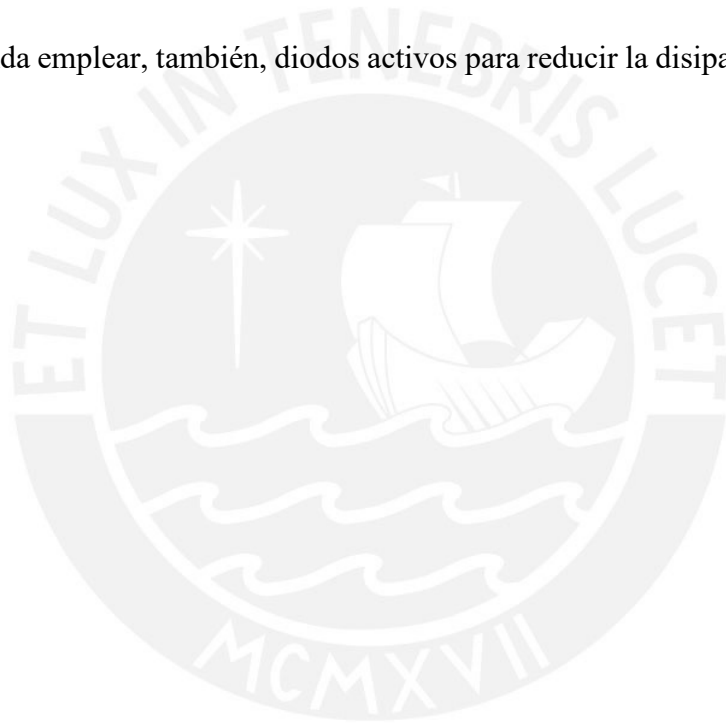


CONCLUSIONES

- En esta tesis, se presenta un modelo optimizado de circuito recolector de energía a partir de energía cinética con mayores porcentajes en la cosecha de energía respecto al estado del arte.
- En esta tesis, se ha obtenido una potencia máxima de recolección de 6.16 mW a 30 Hz de operación del transductor piezoeléctrico que es 3.8 veces mayor que el circuito de referencia.
- El circuito propuesto ha sido implementado en el software Proteus 8 Profesional que, principalmente, parte del circuito con la técnica Bias-Flip [10] (basada en la arquitectura SSHI) y se modifica para obtener un esquema de rectificación que emplea dos circuitos resonantes que aprovechan cada cambio el voltaje del capacitor intrínseco del transductor piezoeléctrico. De esta manera, se logra disminuir las pérdidas en la cosecha de energía. El par de circuitos resonantes son llamados P-SSHI y S-SSHI que operan aproximadamente cada medio período.
- La eficiencia del circuito propuesto radica en el instante que el circuito S-SSHI comienza a operar debido a que la energía transferida al inductor L también es recolectada en el nodo de V_{RECT} después de pasar por el puente de diodos.
- A medida que se incrementa la frecuencia de la fuente (transductor piezoeléctrico) se observa que se recolecta mayor energía, pero se tiene que modificar R12 y C1 para mejorar la eficiencia en la cosecha de energía.
- Las simulaciones que se hicieron en el software se encuentran dentro de un rango de frecuencias que va desde los 5 Hz hasta 30 Hz, las cuales han permitido demostrar una mejora de eficiencia en la cosecha de energía piezoeléctrica.

RECOMENDACIONES

- Tomar en consideración que para la implementación de este circuito es necesario emplear circuitos integrados de baja potencia. Con ayuda del avance y desarrollo del diseño de circuitos integrados de baja potencia es posible que el consumo de energía de los circuitos de administración de energía y los circuitos de seguimiento del punto de máxima potencia que proporciona un voltaje de carga óptimo V_{RECT} pueden variar en un rango del nivel de cientos de μW a varios mW.
- Se recomienda emplear, también, diodos activos para reducir la disipación de energía en el circuito.



TRABAJOS FUTUROS

Para una implementación física del circuito propuesto de esta tesis se sugiere algunos componentes de baja potencia similares a los se mencionan en la tabla 2, que no fueron considerados en el desarrollo de esta tesis debido a que los softwares que se empleó para el estudio y simulación de esta tesis (Proteus y LTspice) no cuenta con componentes específicos en sus librerías, solo se empleó componentes genéricos que consumen mayor potencia.

Tabla 2.
Componentes y parámetros eléctricos [10].

Componente	Número de pieza de fabricante	Parámetros
Transductor piezoeléctrico	PPA-1014 PPA-1012	N/A
Inductor	18105C	$L = 1 \text{ mH}$
Switch 1	Max4645 (SPST)	$R_{ON} = 3 \Omega$
Switch 2	ADG787 (SPDT)	$R_{ON} = 2.5 \Omega$
Diodo	BAT54	$V_D = 240\text{mV}@0.1\text{mA}; 320\text{mV}@1\text{mA}$
Comparador de voltaje	TLV3492	$I_Q = 1 \mu\text{A}$
Multivibrador monoestable	LTC6993-1	$I_Q = 1 \mu\text{A}$
Amplificador operacional	LT6003, OPA333	$I_Q = 1 \mu\text{A}, 17 \mu\text{A}$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Energy efficiency – World Energy Outlook 2018 – Analysis - IEA”. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018/energy-efficiency#abstract> (consultado may 02, 2021).
- [2] “Tipos de Energía: Renovables y no Renovables”. <https://remicaserviciosenergeticos.es/blog/tipos-de-energia/> (consultado may 15, 2021).
- [3] “Data & Statistics - IEA”. [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy supply&indicator=TPESbySource](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource) (consultado may 03, 2021).
- [4] N. Golovanov y A. Marinescu, “Electromobility and Climate Change”, en *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, may 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/MPS.2019.8759786.
- [5] H. Zhu, T. Tang, H. Yang, J. Wang, J. Song, y G. Peng, “The State-of-the-Art Brief Review on Piezoelectric Energy Harvesting from Flow-Induced Vibration”, 2021, doi: 10.1155/2021/8861821.
- [6] J. Lee *et al.*, “Energy Harvesting using Piezoelectric Element for Human Daily Life”, ago. 2019, doi: 10.1109/iCCECE46942.2019.8941926.
- [7] C. R. Bowen, V. Y. Topolov, y H. A. Kim, *Modern Piezoelectric Energy-Harvesting Materials*, vol. 238. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [8] N. Sezer y M. Koç, “A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting”, *Nano Energy*, vol. 80. Elsevier Ltd, p. 105567, feb. 01, 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105567.
- [9] R. Saini, Sanjana, S. Gairola, V. Vinayak, y K. Singh, “Energy Harvesting through Piezoelectric Tile”, jul. 2020, doi: 10.1109/ICSCAN49426.2020.9262301.
- [10] S. Zhao, H. Fu, K. Ma, y J. Ma, “A Novel Sensor for Vibration Frequency Measurement With Piezoelectric Kinetic Energy Harvesting”, *IEEE Sens. J.*, vol. 18, núm. 22, pp. 9286–9296, nov. 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2856082.
- [11] S. Balgavhar y S. Bhalla, “Green Energy Harvesting Using Piezoelectric Materials from Bridge Vibrations”, en *2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, mar. 2018, pp. 134–137, doi: 10.1109/ICGEA.2018.8356282.
- [12] S. Suresh Kumar, R. Kaviyaraj, L. A. Jeni Narayanan, y Saleekha, “Energy Harvesting by Piezoelectric Sensor Array in Road Using Internet of Things”, mar. 2019, doi: 10.1109/ICACCS.2019.8728367.
- [13] L. Mamouri, L. Wassouf, V. Frick, T. Mesbahi, y E. Jamshidpour, *Optimised Model for Piezoelectric Energy Harvesting Circuits Design*. .
- [14] “Electricity – World Energy Outlook 2018 – Analysis - IEA”. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018/electricity#highlights> (consultado may 18, 2021).
- [15] P. Dineva, D. Gross, R. Müller, y T. Rangelov, *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials*, vol. 212. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [16] Á. Gómez Molina, “Trabajo Fin de Grado Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos”. Consultado: jun. 12, 2021. [En línea]. Disponible en:



https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1.

- [17] “Piezoelectricity & Piezo Applicat[1] ‘Piezoelectricity & Piezo Applications’”. <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html> (consultado jun. 12, 2021).ions”. <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html> (consultado jun. 12, 2021).
- [18] K. Chino, “Piezoelectric Energy Harvesting Systems-Essentials to Successful Developments”, doi: 10.1002/ente.201700785.
- [19] L. Wu, P. Zhu, y M. Xie, “A Self-Powered Hybrid SSHI Circuit with a Wide Operation Range for Piezoelectric Energy Harvesting”, 2021, doi: 10.3390/s21020615.



ANEXOS

Para ingresar al documento de las especificaciones técnicas debe darle click en la imagen de pdf.

Información técnica del monoestable NE555	
Información técnica del switch DG417	
Información técnica del switch DG419	