

# DISEÑO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO DE 5W

Alberto Cabuya Preciado

Universidad Santo Tomás  
Facultad de Ingeniería Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2023



# **DISEÑO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO DE 5W**

**Alberto Cabuya Preciado**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Director: Dr. Carlos Andrés Torres Pinzón**

**Codirector: MSc. Edwin Francisco Forero García**

Grupo de Investigación MEM (Modelado-Electrónica-Monitoreo)  
Universidad Santo Tomás  
Facultad de Ingeniería Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2023

# Autoridades de la Universidad

## **RECTOR GENERAL**

R.P. FRAY ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O.P.

## **VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL**

R.P. FRAY MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

## **VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL**

R.P. FRAY, HERNÁN YESID RIVERA ROBERTO, O.P.

## **SECRETARIO GENERAL**

Dra. INGRID LORENA CAMPOS VARGAS

## **DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

R.P. FRAY JAVIER ANTONIO HINCAPIÉ ÁRDILA, O.P.

## **SECRETARIA DE DIVISIÓN**

E.C. LUZ PATRICIA ROCHA CAICEDO

## **DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

ING. CARLOS ANDRÉS TORRES PINZÓN, PHD

# Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del autor

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

# Advertencia

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

**Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.**

## **Dedicatoria**

A mi familia, por su apoyo incondicional, y compañía.  
También se la dedico a mi abuelo quien fue mi mayor inspiración.

# Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mis padres, que siempre me estuvieron acompañando y apoyando durante todo mi proceso académico, ayudándome siempre que lo necesitara y siendo mi mayor inspiración para seguir adelante.

Por otro lado agradezco a todos los docentes que fueron parte de formación académica y profesional, que además de enseñarme conceptos teóricos, y técnicos, me aportaron valiosas lecciones de vida, tanto en lo profesional como en lo personal.

Por ultimo quiero agradecer a mis compañeros y amigos, que me impulsaron y ayudaron durante esta etapa.





# Índice general

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Resumen</b>                                                                    | <b>XI</b>  |
| <b>Abstract</b>                                                                   | <b>XII</b> |
| <b>Índice de figuras</b>                                                          | <b>XIV</b> |
| <b>Índice de tablas</b>                                                           | <b>XV</b>  |
| <b>Glosario</b>                                                                   | <b>XVI</b> |
| <b>1. Introducción</b>                                                            | <b>1</b>   |
| 1.1. Planteamiento del Problema . . . . .                                         | 1          |
| 1.2. Objetivos . . . . .                                                          | 1          |
| 1.2.1. Objetivo General . . . . .                                                 | 1          |
| 1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .                                            | 1          |
| 1.3. Justificación . . . . .                                                      | 2          |
| 1.4. Impacto Social . . . . .                                                     | 2          |
| <b>2. Estado del Arte</b>                                                         | <b>4</b>   |
| <b>3. Marco teórico</b>                                                           | <b>8</b>   |
| 3.1. Modelado del piezoeléctrico . . . . .                                        | 8          |
| 3.1.1. Efecto del punto de fuerza . . . . .                                       | 9          |
| 3.2. Rectificador bias-flip . . . . .                                             | 10         |
| 3.3. Convertidor boost . . . . .                                                  | 11         |
| 3.3.1. Modo CCM . . . . .                                                         | 12         |
| 3.3.2. Modo DCM . . . . .                                                         | 12         |
| 3.3.3. Análisis de eficiencia . . . . .                                           | 12         |
| 3.3.4. Funcionamiento ideal del boost en modo de conducción discontinua . . . . . | 13         |
| 3.3.5. Inclusión de un capacitor a la entrada del circuito . . . . .              | 14         |
| <b>4. Diseño Metodológico</b>                                                     | <b>15</b>  |
| 4.1. Caracterización y conexión de los piezoeléctricos . . . . .                  | 15         |
| 4.1.1. Caracterización de los piezoeléctricos . . . . .                           | 15         |
| 4.1.2. Determinación de la conexión entre piezoeléctricos . . . . .               | 16         |
| 4.2. Diseño electrónico del piezogenerador . . . . .                              | 16         |
| 4.2.1. Diseño del sistema electrónico de captación . . . . .                      | 16         |
| 4.2.2. Comparación del sistema diseñado con otros ya existentes . . . . .         | 16         |
| 4.2.3. Diseño de un sistema para la carga de una batería . . . . .                | 16         |
| 4.3. Comprobación experimental de funcionamiento . . . . .                        | 16         |
| 4.3.1. Comprobación experimental de funcionamiento del sistema . . . . .          | 16         |

|                                                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. Desarrollo Conceptual</b>                                                                                             | <b>18</b> |
| 5.1. Modelado del piezoeléctrico . . . . .                                                                                  | 18        |
| 5.2. Rectificador basado en transistores . . . . .                                                                          | 19        |
| 5.3. Rectificador bias-flip . . . . .                                                                                       | 19        |
| 5.4. Rectificador de puente completo . . . . .                                                                              | 20        |
| 5.5. Diseño del convertidor Boost . . . . .                                                                                 | 21        |
| 5.5.1. Cálculos Teóricos diseño conversor Boost . . . . .                                                                   | 21        |
| 5.6. Teorema de máxima transferencia de potencia . . . . .                                                                  | 23        |
| <b>6. Resultados y Discusión</b>                                                                                            | <b>25</b> |
| 6.1. Selección del piezoeléctrico . . . . .                                                                                 | 25        |
| 6.2. Selección del rectificador . . . . .                                                                                   | 26        |
| 6.2.1. Rectificador propuesto . . . . .                                                                                     | 26        |
| 6.2.2. Rectificador bias-flip . . . . .                                                                                     | 27        |
| 6.2.3. Rectificador de puente completo . . . . .                                                                            | 28        |
| 6.2.4. Selección final . . . . .                                                                                            | 29        |
| 6.3. Obtención de la tensión máxima . . . . .                                                                               | 32        |
| 6.4. Selección del capacitor de entrada . . . . .                                                                           | 33        |
| 6.5. Prototipo . . . . .                                                                                                    | 33        |
| <b>7. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>                                                                                   | <b>37</b> |
| 7.1. Conclusiones . . . . .                                                                                                 | 37        |
| 7.2. Trabajos futuros . . . . .                                                                                             | 37        |
| <b>Bibliografía</b>                                                                                                         | <b>38</b> |
| <b>8. ANEXOS</b>                                                                                                            | <b>40</b> |
| <b>Anexos</b>                                                                                                               | <b>40</b> |
| 8.1. Anexo A: . . . . .                                                                                                     | 40        |
| 8.2. Anexo B: . . . . .                                                                                                     | 44        |
| 8.2.1. Resultados todos los piezoeléctricos en paralelo . . . . .                                                           | 45        |
| 8.2.2. Resultados todos los piezoeléctricos en serie . . . . .                                                              | 46        |
| 8.2.3. Resultados 7 piezoeléctricos conectados en paralelo, en serie con 6 piezoeléctricos conectados en paralelo . . . . . | 47        |
| 8.3. Anexo C: . . . . .                                                                                                     | 48        |
| 8.3.1. Resultados todos los piezoeléctricos en serie . . . . .                                                              | 48        |
| 8.3.2. Resultados todos los piezoeléctricos en paralelo . . . . .                                                           | 49        |
| 8.3.3. Resultados 7 piezoeléctricos conectados en paralelo, en serie con 6 piezoeléctricos conectados en paralelo . . . . . | 50        |
| 8.3.4. Resultados conexión en serie de parejas en paralelo . . . . .                                                        | 51        |
| 8.4. Anexo D: Simulación del rectificador bias-flip . . . . .                                                               | 52        |
| 8.5. Anexo E: . . . . .                                                                                                     | 54        |
| 8.5.1. Carga del condensador de 4.7 uF . . . . .                                                                            | 54        |
| 8.5.2. Carga del condensador de 100 uF . . . . .                                                                            | 54        |
| 8.5.3. Carga del condensador de 220 uF . . . . .                                                                            | 55        |
| 8.6. Anexo F: . . . . .                                                                                                     | 56        |

# Resumen

## Contexto

En la actualidad a pesar de el avance del campo de energías renovables, se sigue manteniendo una dependencia de las condiciones climáticas actuales, lo que genera cierta incertidumbre a la hora de asegurar la continuidad en el suministro de energía, por tanto se han buscado otras fuentes de energía renovables independientes a las condiciones climáticas, entre estas se encuentra la generación por medio de la piezoelectricidad.

Si bien es un método que tiene mucho potencial, actualmente no se usa debido a su bajo nivel de producción energética, eso también ocasiona que los métodos de recolección tampoco sean los más eficientes, por lo que en este documento se estudian 3 tipos de rectificadores, seleccionando el más eficiente, para posteriormente realizar un circuito para el almacenamiento de esta energía recolectada, en una batería.

## Método

Lo primero que se realizó fue la comparación de fuerza aplicada frente a la tensión generada, de tres tipos de sensores piezoeléctricos diferentes, seleccionando el que presentara una mejor relación. Posteriormente se modeló circuitalmente el piezoeléctrico seleccionado. Para realizar con base en este un análisis teórico de eficiencia energética de los tres rectificadores, escogiendo el más eficiente, y así diseñar un sistema para cargar una batería.

Finalmente se realizó un prototipo, utilizando como base mecánica una baldosa diseñada en la universidad, para validar el montaje, y se realizaron medidas de tensión generado frente a la fuerza aplicada encima de la baldosa.

## Resultados

De los piezoeléctricos analizados se eligió el piezoeléctrico más grande debido a que era el que mejor relación de fuerza frente a tensión generada.

Para el prototipo inicialmente se planeaba conectar todos los piezoeléctricos en serie, para aumentar la tensión generada, disminuir la capacitancia parásita y así aumentar la eficiencia, pero con las pruebas realizadas se determinó que era mejor implementar un rectificador para cada piezoeléctrico debido a su distribución en la baldosa.

Dentro del estudio realizado de eficiencia, se encontró que el rectificador de puente completo, fue el más eficiente a la hora de recolectar energía generada por el piezoeléctrico, además de ser el más sencillo de implementar.

Se observó que a la salida del rectificador se logra entregar a la batería una corriente media de 20mA con varias fluctuaciones.

## Conclusiones

Si bien el generador diseñado no puede generar con una pizada 5W, con el flujo constante de peatones puede llegar a generar dicha cantidad de energía, siendo necesario para esto 725 pasos, o lo equivalente a 725 peatones que caminen sobre la baldosa.

**Palabras clave:** Piezoelectricidad, piezoeléctrico, eficiencia de rectificación.

# Abstract

## Context

Currently, despite the advancement in the field of renewable energies, a dependency on current weather conditions still exists, leading to some uncertainty when ensuring the continuity of energy supply. Therefore, other sources of renewable energy independent of weather conditions have been sought, and among these the generation through piezoelectricity have been of great interest. While it is a method that has great potential, it is not being used because of the low amount of energy production, resulting at the same a low efficiency of harvesting with the conventional methods. Therefore in this study it is considered three different types of rectifiers, choosing the most efficient to recollect and store the energy generated by the piezoelectric in a battery.

## Method

The first step on this project was the selection of the piezoelectric. For this purpose there was a force Vs voltage test, where the piezoelectric, which had a better voltage generated vs force applied ratio, was selected and modeled. Then a theoretical efficiency analysis was done for the three rectifiers, where the most efficient was selected. Afterwards a battery charger system was designed and simulated.

Finally a prototype was made, using as a mechanical base the tile designed by the university. After the prototype was tested, measures of voltage generated vs force were done.

## Results

Of the piezoelectrics analyzed, the biggest piezoelectric was chosen because it had the best ratio of power to voltage generated.

Initially, it was planned to connect all the piezoelectrics in series, to increase the voltage, decrease the parasitic capacitance thus increasing the efficiency, but with the tests performed it was determined that it was better to implement a rectifier for each piezoelectric due to its distribution in the tile.

Within the efficiency study performed, it was found that the full bridge rectifier was the most efficient and simplest, when collecting energy generated by the piezoelectric tile.

It was observed that at the output of the rectifier, an average current of 20mA is delivered to the battery with several fluctuations.

## Conclusions

Although the designed generator cannot generate 5W with a single footfall, with the constant flow of pedestrians it can generate that amount of energy, which requires 725 steps, or the equivalent of 725 pedestrians walking on the tile.

**Keywords:** Piezoelectricity, piezoelectric, rectification efficiency.

# Índice de figuras

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Prototipo de generador piezoeléctrico de golpe talón [14]. . . . .                                                               | 4  |
| 2.2. Patentes registradas por país [18]. . . . .                                                                                      | 6  |
| 2.3. Patentes registradas por compañías [18]. . . . .                                                                                 | 6  |
| 2.4. Patentes registradas por año [18]. . . . .                                                                                       | 7  |
| 3.1. Modelo eléctrico equivalente de un transductor piezoeléctrico [19]. . . . .                                                      | 8  |
| 3.2. Piezoeléctrico modelado como fuente [19]. . . . .                                                                                | 9  |
| 3.3. Rectificador bias-flip [22]. . . . .                                                                                             | 10 |
| 3.4. Formas de onda para un rectificador bias-flip al rectificar una onda sinusoidal[22]. . . . .                                     | 10 |
| 3.5. modelo simplificado de un boost inductivo [23]. . . . .                                                                          | 11 |
| 3.6. Corriente en el inductor para los diferentes modos de operación (a)CCM y (b)DCM [23]. . . . .                                    | 11 |
| 3.7. Circuito equivalente cuando el convertidor se encuentra en modo encendido [23]. . . . .                                          | 12 |
| 3.8. Circuito equivalente cuando el convertidor se encuentra en modo apagado [23]. . . . .                                            | 12 |
| 3.9. Circuito equivalente cuando el convertidor se encuentra en modo $t_D$ [23]. . . . .                                              | 12 |
| 3.10. Circuito analizado para obtener la eficiencia de carga del circuito [23]. . . . .                                               | 13 |
| 3.11. Gráfica de la eficiencia de carga de la inductancia [23]. . . . .                                                               | 13 |
| 3.12. Boost con una capacitancia a la entrada [23]. . . . .                                                                           | 14 |
| 4.1. Piezoeléctricos a caracterizar . . . . .                                                                                         | 15 |
| 4.2. Etapas del piezogenerador . . . . .                                                                                              | 16 |
| 5.1. Esquema del circuito utilizado para el barrido de frecuencia . . . . .                                                           | 18 |
| 5.2. Barrido de frecuencia del piezoeléctrico en dB . . . . .                                                                         | 18 |
| 5.3. Rectificador propuesto . . . . .                                                                                                 | 19 |
| 5.4. Circuito implementado en Simulink para simular un rectificador bias-flip en conjunto con un piezo-<br>eléctrico . . . . .        | 20 |
| 5.5. Circuito implementado en Simulink para simular un rectificador de puente completo en conjunto con<br>un piezoeléctrico . . . . . | 20 |
| 5.6. Simulación del boost diseñado junto con el modelo del piezoeléctrico a la entrada . . . . .                                      | 23 |
| 5.7. Simulación del boost con tensión de entrada inconstante . . . . .                                                                | 23 |
| 5.8. Gráfico para la componente real de la impedancia equivalente . . . . .                                                           | 24 |
| 5.9. Gráfico para la componente compleja de la impedancia equivalente . . . . .                                                       | 24 |
| 5.10. Modelo eléctrico simplificado del piezoeléctrico [26]. . . . .                                                                  | 24 |
| 6.1. Montaje completo para las pruebas . . . . .                                                                                      | 25 |
| 6.2. Gráfico de fuerza aplicada Vs potencia generada . . . . .                                                                        | 25 |
| 6.3. Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador basado en Mosfets . . . . .                                                    | 26 |
| 6.4. Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador basado en Mosfets . . . . .                                                    | 26 |
| 6.5. Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador bias-flip . . . . .                                                            | 27 |
| 6.6. Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador bias-flip . . . . .                                                            | 27 |
| 6.7. Activación del temporizador(azul) vs detección de cruce por 0 (rojo) . . . . .                                                   | 27 |
| 6.8. Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador bias-flip . . . . .                                                            | 28 |
| 6.9. Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador bias-flip . . . . .                                                            | 28 |
| 6.10. Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador de puente completo . . . . .                                                  | 28 |
| 6.11. Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador de puente completo . . . . .                                                  | 29 |
| 6.12. Tensión de entrada vs potencia generada vs eficiencia a la salida de cada rectificador . . . . .                                | 29 |

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.13. Esquemático del circuito real propuesto . . . . .                                                                                                               | 30 |
| 6.14. Salida del rectificador propuesto (Rojo) vs entrada del rectificador (Verde) . . . . .                                                                          | 30 |
| 6.15. Esquemático del circuito real propuesto con una etapa previa de amplificación . . . . .                                                                         | 31 |
| 6.16. Salida del rectificador con etapa de amplificación propuesto (Rojo) vs entrada del rectificador (Verde) . . . . .                                               | 31 |
| 6.17. Esquemático del rectificador de onda completa con diodos Schotcky . . . . .                                                                                     | 32 |
| 6.18. Tensión de salida del rectificador (Rojo), vs tensión de entrada (verde) . . . . .                                                                              | 32 |
| 6.19. Diagrama del prototipo propuesto . . . . .                                                                                                                      | 34 |
| 6.20. Corriente de la batería cuando no hay perturbaciones en la baldosa . . . . .                                                                                    | 34 |
| 6.21. Corriente de la batería cuando una persona de 60kg camina sobre la baldosa . . . . .                                                                            | 35 |
| 6.22. Corriente de la batería cuando una persona de 60kg camina sobre la baldosa . . . . .                                                                            | 35 |
| 6.23. Caminado constante sobre la baldosa con diferentes valores de resistencia (ch2 tensión en el capacitor de entrada, ch1 tensión a la salida del boost) . . . . . | 36 |
| 8.1. Circuito implementado para control del solenoide . . . . .                                                                                                       | 40 |
| 8.2. Soporte del solenoide y celda de carga . . . . .                                                                                                                 | 40 |
| 8.3. Montaje realizado para el piezoeléctrico mediano . . . . .                                                                                                       | 41 |
| 8.4. Montaje realizado para el piezoeléctrico pequeño . . . . .                                                                                                       | 41 |
| 8.5. Conexión del los piezoeléctricos dentro de la baldosa . . . . .                                                                                                  | 44 |
| 8.6. Baldosa puesta sobre celdas de carga para realizar las pruebas . . . . .                                                                                         | 44 |
| 8.7. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto . . . . .                                                                                 | 45 |
| 8.8. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm . . . . .                                                                           | 45 |
| 8.9. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 1k Ohm . . . . .                                                                             | 45 |
| 8.10. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto . . . . .                                                                                | 46 |
| 8.11. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm . . . . .                                                                          | 46 |
| 8.12. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 1k Ohm . . . . .                                                                            | 46 |
| 8.13. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto . . . . .                                                                                | 47 |
| 8.14. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm . . . . .                                                                          | 47 |
| 8.15. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 1k Ohm . . . . .                                                                            | 47 |
| 8.16. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto . . . . .                                                                                | 48 |
| 8.17. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm . . . . .                                                                          | 48 |
| 8.18. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 10k Ohm . . . . .                                                                           | 48 |
| 8.19. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto . . . . .                                                                                | 49 |
| 8.20. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm . . . . .                                                                          | 49 |
| 8.21. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 10k Ohm . . . . .                                                                           | 49 |
| 8.22. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto . . . . .                                                                                | 50 |
| 8.23. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm . . . . .                                                                          | 50 |
| 8.24. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 10k Ohm . . . . .                                                                           | 50 |
| 8.25. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm . . . . .                                                                          | 51 |
| 8.26. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 10k Ohm . . . . .                                                                           | 51 |
| 8.27. Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 1k Ohm . . . . .                                                                            | 51 |
| 8.28. Rectificador bias-flip ver 2 . . . . .                                                                                                                          | 52 |
| 8.29. Tiempo de de carga del condensador . . . . .                                                                                                                    | 54 |
| 8.30. Tiempo de de carga del condensador . . . . .                                                                                                                    | 54 |
| 8.31. Tiempo de de carga del condensador . . . . .                                                                                                                    | 55 |
| 8.32. Pruebas de fuerza caminado 60kg . . . . .                                                                                                                       | 56 |
| 8.33. Pruebas de fuerza pisoton 60kg . . . . .                                                                                                                        | 56 |
| 8.34. Pruebas de fuerza caminado 30kg . . . . .                                                                                                                       | 57 |
| 8.35. Pruebas de fuerza caminado 30kg 2 . . . . .                                                                                                                     | 57 |
| 8.36. Pruebas de fuerza pisoton 30kg con batería . . . . .                                                                                                            | 58 |

# Índice de tablas

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Constante de voltaje piezoeléctrico para los materiales piezoeléctricos más usados en la industria <a href="#">[21]</a> | 9  |
| 6.1. Tiempo de carga Vs tensión cargada . . . . .                                                                            | 33 |
| 6.2. Respuesta del circuito con diferente carga . . . . .                                                                    | 35 |
| 8.1. Medidas Fuerza Vs Potencia generada para cada piezoeléctrico . . . . .                                                  | 41 |

# Glosario

**Celda de carga:** es un transductor que convierte fuerza en una salida eléctrica medible.

**Circuito de potencia:** parte del circuito controlador que necesita mayor corriente.

**Condensador:** componente eléctrico que es capaz de almacenar energía eléctrica como campo eléctrico.

**Convertidor AC/DC:** circuito electrónico que permite convertir corriente alterna a corriente continua, también se les conoce como circuitos rectificadores.

**Energía renovable:** son fuentes de energía que se regeneran naturalmente con el tiempo y no se agotan.

**Energía cinética:** representa el esfuerzo que permite que un objeto pase del estado de reposo al de movimiento a una velocidad específica.

**EPM:** empresas públicas de Medellín.

**Inductor:** componente eléctrico que es capaz de almacenar energía eléctrica como campo electromagnético.

**Microcontrolador:** circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.

**Permitividad:** es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.

**Piezoeléctrico:** son un tipo de cristales que al ser sometidos a una presión, se polarizan eléctricamente.

**PWM:** Es la abreviatura de modulado por ancho de pulso, lo cual se utiliza por lo general como señal de control, para regular la potencia o velocidad a la cual un dispositivo tiene que funcionar.



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Planteamiento del Problema

Colombia hoy en día depende aproximadamente en un 70 % de diversas energías renovables [1]. Al tratarse de energías renovables dependientes de condiciones climáticas como el viento, radiación solar y el caudal de los ríos o volumen hídrico en las represas, estas se ven afectadas en gran medida por los fenómenos del niño y la niña [2], como se pudo observar en los años 2015 y 2016 durante un alargado fenómeno del niño, el cuál obligó al estado a crear varios incentivos y medidas para la reducción del gasto energético del país, llegando incluso a generar recortes en algunas zonas, causando además una pérdida de \$800.000 millones a la empresa EPM [3].

Lo anteriormente mencionado generó interés en investigar otras fuentes eléctricas, independientes del estado climático. Dentro de estas fuentes alternativas, se encuentra la piezoelectricidad, que al aprovechar la energía mecánica provocada por vibraciones o impactos, son ideales para su implementación dentro de zonas de mucha congestión urbana, como lo son las grandes urbes. En especial dentro de zonas en donde se presenta una elevada densidad y frecuencia peatonal, como es el caso de Bogotá dentro de las estaciones del Transmilenio en donde se movilizan aproximadamente 2 millones de personas diariamente [4], o las entradas a las universidades, centros comerciales o culturales. La energía cinética generada por los peatones puede llegar a ser utilizada para aminorar los costos energéticos generados por los sistemas de control de entrada como lo son los torniquetes, y las terminales de reconocimiento de las tarjetas.

Si bien ya se han realizado múltiples estudios acerca de generadores piezoeléctricos que pueden llegar a resolver el problema, en muchos casos la etapa rectificadora de estos está basada en diodos. Los cuales presentan una pérdida, que con respecto a lo que genera un piezoeléctrico (mV), son pérdidas considerables. Lo que genera la incógnita de ¿Cómo mediante el uso de un sistema electromecánico se puede captar la energía entregada por una baldosa piezoeléctrica?

### 1.2. Objetivos

A continuación se plantea el objetivo general y específicos para el desarrollo del proyecto.

#### 1.2.1. Objetivo General

Diseñar un recolector de energía eléctrica generada en un arreglo piezoeléctrico (baldosa) mediante un sistema electromagnético que aproveche la energía mecánica generada por transeúntes.

#### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar tres diferentes tipos de piezoeléctricos mediante estímulo mecánico obteniendo curvas de potencia generada.
- Seleccionar el piezoeléctrico con mejor relación de conversión de energía mecánica a eléctrica.

- Proponer un sistema electrónico de captación de energía, desde un piezogenerador hasta una batería, comparando su eficiencia frente a otros tres sistemas de captación por medio de simulaciones, seleccionando el que presente menos pérdidas de voltaje para el prototipo.
- Validar el funcionamiento del prototipo propuesto, aplicando diferentes pesos al piezogenerador, y empleando cargas eléctricas de prueba (Resistencias).

### 1.3. Justificación

Las energías renovables actuales a pesar de presentar un bajo nivel de emisión de gases de efecto invernadero en su funcionamiento, muchas veces no generan de manera continua la suficiente cantidad de energía demandada por la sociedad, debiéndose esto principalmente, a que sus fuentes dependen mayormente de elementos naturales que no siempre se pueden controlar o predecir [2]. Como una solución a este problema, se han realizado diversos estudios orientados a transformar la energía cinética generada por impactos o vibraciones en energía eléctrica. Este enfoque es especialmente relevante ya que este tipo de energía puede generarse en lugares densamente poblados al aprovechar la energía cinética generada por el caminar de las personas o el tráfico de vehículos. Con el aumento de la densidad de población y el crecimiento de grandes áreas urbanas, como se destaca en el informe de CAF [5], la generación de energía eléctrica a partir de vibraciones e impactos está ganando fuerza y viabilidad en ciudades densamente pobladas, como Bogotá, que con más de 7 millones de habitantes es la ciudad más grande de Colombia y una de las más pobladas de América Latina [6]. Esto resalta la importancia de esta tecnología como una fuente potencial de energía sostenible en entornos urbanos.

Dentro de los materiales que pueden realizar la transformación de energía mecánica a eléctrica, los piezoelectricos han sido los predilectos, a causa de varios factores entre los cuales se encuentra:

- Alta eficiencia de transformación [7].
- Fácil procesamiento de la señal generada [7].
- Puede ser representado mediante un modelo relativamente sencillo de analizar [7].
- Integración fácil dentro de sistemas micro controlados de baja potencia [7].

El bajo rendimiento en términos de densidad de potencia es uno de los desafíos en la tecnología piezoelectrica, lo que subraya la importancia de minimizar las pérdidas en cada etapa del sistema. A pesar de que existen sistemas que aprovechan el efecto piezoelectrico directo, varios estudios han evidenciado que a menudo estos sistemas experimentan pérdidas debido a las arquitecturas de circuitos utilizadas, tanto en la etapa de rectificación como en la regulación de la tensión de salida. Además, en muchos casos, estos sistemas carecen de un control eficiente para el almacenamiento de energía o dependen en su mayoría de supercapacitores, lo que resulta en una falta de continuidad en términos de la tensión de salida. Abordar estas limitaciones es fundamental para mejorar la eficiencia y la confiabilidad de los sistemas piezoelectricos. [7],[8],[9],[10].

Por lo anteriormente mencionado, este proyecto se encargará de diseñar un generador piezoelectrico con una menor cantidad de pérdidas con respecto a los recolectores actuales, y que además sea capaz de alimentar sistemas que consuman al menos 5W.

### 1.4. Impacto Social

El proyecto tiene un impacto significativo tanto en el ámbito ambiental como en el académico. En términos académicos, busca contribuir al grupo MEM de la universidad, al avance del conocimiento en métodos de recolección de energía mediante la tecnología piezoelectrica. Además, los piezogeneradores ofrecen múltiples oportunidades para reducir la contaminación asociada a la producción de energía eléctrica, como se menciona en el informe de la UPME [11]. Esto se debe a que su implementación en entornos urbanos no comprometería ecosistemas naturales, permitiendo aprovechar el proceso de urbanización como una oportunidad para generar energía de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Entre las entidades que podrían beneficiarse se incluyen las empresas de transporte público, grandes corporaciones y la población en general. En un futuro, este tipo de generador podría ser implementado para alimentar una

variedad de sistemas, como las pantallas en el transporte público, los sistemas de lectura de tarjetas para el acceso y las luces en instalaciones, lo que resultaría en la reducción de los costos operativos y la carga en la red eléctrica. Esto representa una oportunidad significativa para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en diversos sectores y, al mismo tiempo, beneficiar a la comunidad en general.

## Capítulo 2

# Estado del Arte

Los dispositivos piezoeléctricos se han utilizado como sensores desde hace bastante tiempo, comenzando en 1917 cuando el matemático y físico francés Paul Langevin propuso su uso como sensores ultrasónicos para la detección de objetos bajo el agua. La eficacia de estos dispositivos en la generación y detección de ondas ultrasónicas llevó a su adopción como componentes clave en sonares para submarinos y como sensores en diversas aplicaciones, incluyendo la captura y generación de ondas sonoras. [12].

En 1944, se lograron avances significativos en el campo de la piezoelectricidad en el Instituto de Física de Lebedev en la Unión Soviética. Fue allí donde se desarrolló un método para sintetizar el piezocerámico conocido como titanio de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ). A raíz de este avance, en Estados Unidos se desarrolló un compuesto piezoeléctrico conocido como Circonato-titanato de plomo, abreviado como PZT por sus símbolos químicos  $\text{Pb}(\text{ZrTi})$ . Estos avances marcaron hitos importantes en la investigación y desarrollo de materiales piezoeléctricos. [13].

A partir de los desarrollos relacionados con los materiales PZT, se han llevado a cabo numerosos proyectos centrados en la recolección de energía. En Estados Unidos, se creó un prototipo destinado a alimentar dispositivos GPS y sensores al convertir la energía mecánica generada al caminar en energía eléctrica. Este prototipo, ilustrado en la figura 2.1, se acoplaba al tacón de una bota y fue diseñado para generar una potencia máxima de 0.5 W, considerando una frecuencia de caminado de 1 Hz. [14]. Este generador de talón estaba conectado a un circuito que tenía la función de rectificar y almacenar la energía generada en un capacitor. Este capacitor acumulaba carga hasta alcanzar un voltaje de 12 V. Cuando el capacitor alcanzaba este nivel, se descargaba al conectarse a un circuito Buck que proporcionaba alimentación de forma periódica a los sensores. [14].

Finalmente, se llegó a la conclusión de que el prototipo desarrollado no lograba generar la potencia esperada. Esto se debió a diversos problemas mecánicos presentes en su diseño, los cuales ocasionaban que las fuerzas generadas por la oscilación del cristal no se cancelaran por completo, lo que a su vez reducía la eficiencia en la conversión de energía. [14].

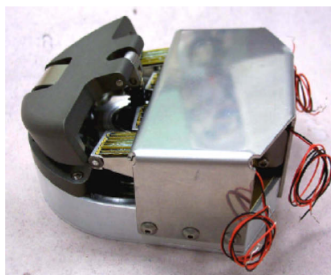


Figura 2.1: Prototipo de generador piezoeléctrico de golpe talón [14].

En el año 2010, Rincón-Mora, en el Instituto de Tecnología de Georgia, propuso un enfoque de modelado de circuitos para analizar cuatro tipos diferentes de rectificadores que podrían ser empleados en una instalación destinada a cargar una batería con una potencia máxima de 10 W. Al final del estudio, se optó por utilizar un rectificador

basado en una inductancia conmutada, ya que esta técnica permitió rectificar completamente la energía generada por el piezoeléctrico. Además, como continuación de la investigación, se desarrolló un sistema de control analógico y un prototipo capaz de almacenar señales periódicas de baja potencia. [10].

El 2013 en Abu Dhabi, se llevó a cabo una investigación que comparó la eficiencia de la rectificación de cuatro variedades de rectificadores. Los resultados de este estudio indicaron que el rectificador "bias-flip" mostraba una mayor eficiencia y una mejor transferencia de potencia en comparación con los otros rectificadores evaluados [8].

En 2016, un equipo de investigación de la Universidad Tun Hussein Onn en Malasia llevó a cabo un estudio sobre el potencial de recolección de energía al incorporar materiales piezoeléctricos en el asfalto de una carretera. El modelo propuesto en este estudio tenía la capacidad de prever la cantidad de energía generada tanto en carreteras de un solo sentido como en carreteras de dos sentidos. Estas predicciones se basaron en condiciones de tráfico no congestionado y sin colisiones, además de asumir que todos los vehículos en el sistema tenían una masa similar. Para estimar el número de vehículos que transitarían por el área de interés, se empleó un modelo estadístico que se ajustaba a una distribución de Poisson. [15].

En el estudio, se eligió el sensor piezoeléctrico APC855 fabricado por APC Internacional como el sensor de referencia. Esta elección se basó en las notables propiedades del sensor, que incluyen una alta constante piezoeléctrica, una elevada permitividad y constante dieléctrica, una constante de carga piezoeléctrica significativa, un alto factor de acoplamiento mecánico, una baja pérdida de calidad mecánica y una facilidad para su despolarización. Estas características lo hicieron destacar en comparación con otros sensores piezoeléctricos, como el APC840 y el APC880. [15].

Al concluir el estudio, se observó que en el modelo de un solo carril, el piezoeléctrico tenía la capacidad de generar una potencia de aproximadamente 35 mW, mientras que en el modelo de doble carril, este valor aumentaba a alrededor de 51 mW. Además, se determinó que al implementar varios arreglos de piezoeléctricos a lo largo de un kilómetro de carretera, considerando un flujo de tráfico de 600 vehículos por hora, era factible generar hasta 170 kW de energía. Esta cantidad resultaba suficiente para alimentar la iluminación de la carretera, sistemas de comunicación y diversos anuncios publicitarios. [15].

Posteriormente En 2017, Yanhuin Han y sus colegas publicaron un artículo que detallaba el funcionamiento de un sistema de medición de temperatura que se alimentaba exclusivamente mediante la energía piezoeléctrica, aprovechando las vibraciones naturales del entorno. Con el prototipo desarrollado, lograron alcanzar una eficiencia de transferencia de potencia del 42 %, incluso en presencia de perturbaciones ambientales de 0.15 g a 40 Hz. Además de su capacidad para generar energía, el prototipo tenía la habilidad de transmitir con éxito datos de 12 bits de información de manera inalámbrica en intervalos de un minuto. [9].

En Colombia, es importante resaltar dos estudios realizados en el año 2014. Uno de ellos tuvo lugar en Antioquia y se centró en el diseño de una baldosa piezoeléctrica. El segundo estudio se llevó a cabo en la Universidad Nacional de Medellín y se enfocó en la creación y desarrollo de un prototipo de zapatos generadores de energía utilizando tecnología piezoeléctrica. Estos proyectos demuestran el interés y el avance en la investigación de la generación de energía a través de la piezoeléctrica en Colombia [13].

Rojas Luna en el 2018, desarrolló un sistema de generación de energía eléctrica utilizando el fenómeno piezoeléctrico aplicado en una baldosa para transeúntes. En su estudio, se llevó a cabo un proceso de modelado que involucró diferentes tipos de piezoeléctricos. Se realizaron pruebas con tres variedades de piezoeléctricos, y al final se determinó que el piezoeléctrico SKU392264 era el más adecuado para el propósito. Esto se debió a que este piezoeléctrico mostró un pico de voltaje más alto con una fuerza menor en comparación con los otros dos tipos de piezoeléctricos estudiados [13].

Además, se investigaron diversas formas de conectar los piezoeléctricos entre sí, y se concluyó que era más eficiente utilizar un solo piezoeléctrico en el modelo. Esto se debió a que permitía concentrar mejor la fuerza, lo que a su vez resultaba en picos de voltaje más elevados.[13].

Así mismo en el prototipo realizado por Rojas, se optó por utilizar una solución comercial para la rectificación y control del voltaje generado, usando un circuito LTC3588, obteniendo un voltaje regulado de 3.3V intermitente [13].

En 2019, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la conversión de energía mecánica a eléctrica, el grupo MEM de la Universidad Santo Tomás llevó a cabo un estudio en el que se compararon diversas formas y materiales de piezoeléctricos. Como resultado de este estudio, se determinó que el piezoeléctrico más eficiente era el de forma cilíndrica fabricado con el material PMN-PT.[16].

En 2021, se llevó a cabo el diseño de un módulo piezogenerador con el propósito de alimentar una celda electrolítica utilizada para la producción de hidrógeno. Este módulo tenía la capacidad de almacenar la energía generada en un capacitor, que posteriormente servía como fuente de energía para la celda cuando el voltaje alcanzaba el nivel adecuado. Durante el estudio, se observó que el proceso de carga del capacitor utilizando un solo módulo piezoeléctrico era bastante lento, pero este tiempo se podía reducir utilizando varios módulos en conjunto. Además, se determinó que el sistema diseñado solo era capaz de generar corrientes eléctricas de baja potencia. [17].

A nivel industrial, se condujo una investigación exhaustiva de patentes relacionadas con piezogeneradores, específicamente en el ámbito de recolectores de energía piezoeléctrica, utilizando un servidor web como se detalla en el recurso citado como [18]. Durante este proceso, se llevó a cabo una búsqueda de patentes que contenían el término "piezoelectric energy harvester. Los resultados de la búsqueda pueden ser revisados en las figuras 2.2, 2.3 y 2.4.

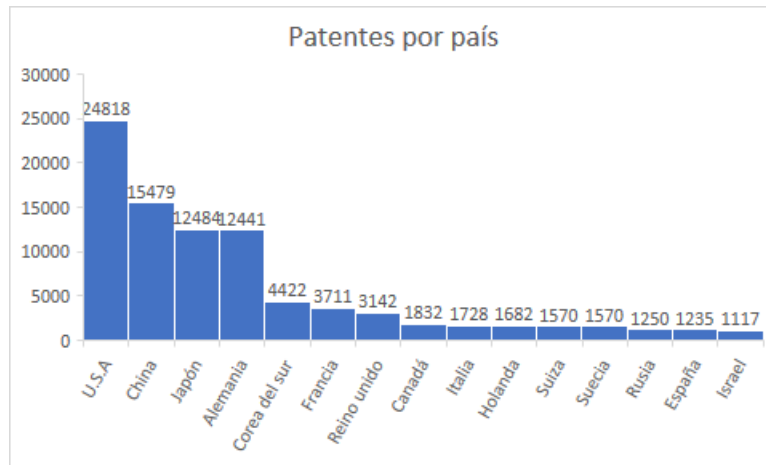


Figura 2.2: Patentes registradas por país [18].

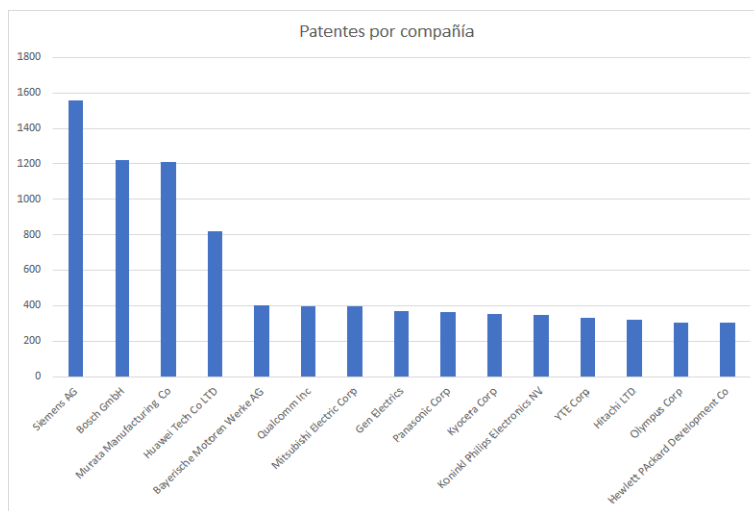


Figura 2.3: Patentes registradas por compañías [18].

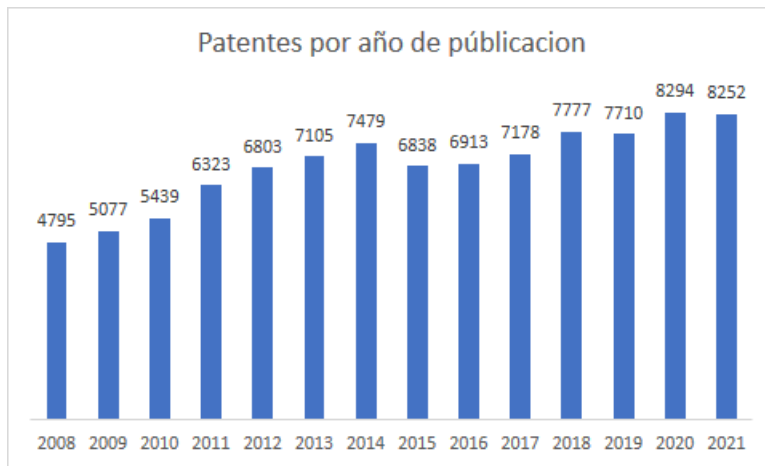


Figura 2.4: Patentes registradas por año [18].

En la *figura 2.2* se observa que la mayoría de las patentes se encuentran registradas en países como Estados Unidos, China, Japón y Alemania. En la *figura 2.3* se aprecia que en su mayoría, las patentes realizadas por compañías, provienen de empresas del campo de la automatización como es el caso de Siemens y Bosch. Además, en la *figura 2.4*, se nota un incremento en la cantidad de patentes generadas anualmente, lo que sugiere que el tema es de creciente interés en la actualidad. [18].

## Capítulo 3

# Marco teórico

### 3.1. Modelado del piezoeléctrico

Este tipo de sensores puede ser modelado tanto por un modelo mecánico, como por un modelo eléctrico. Para efectos prácticos del estudio realizado se empleó el modelo eléctrico el cuál se puede apreciar en la *Figura 3.1*.

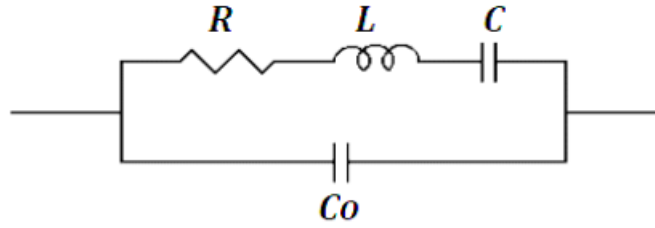


Figura 3.1: Modelo eléctrico equivalente de un transductor piezoeléctrico [19].

Dicho modelo ya fue validado por varios estudios anteriores [19]. Inicialmente se analiza el circuito en serie RLC, el cual define el comportamiento eléctrico del cristal, y en paralelo se encuentra la capacitancia  $C_0$ , la cual representa la suma de varias capacitancias parásitas, causadas por el recubrimiento del cristal. En la *ecuación 3.1* se observa la función de transferencia del circuito RLC.

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Visto como un circuito resonante pasivo el factor de calidad del circuito es descrito mediante las *ecuaciones 3.2 y 3.3*

$$Q = w_s \frac{L}{R_{eq}} \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{w_s}{w_+ - w_-} \quad (3.3)$$

Donde  $w_s$  es la frecuencia de resonancia,  $w_+$  y  $w_-$  son las frecuencias para las cuales la potencia transferida por el piezoeléctrico, decrece a la mitad de la potencia transferida en la frecuencia de resonancia, y  $R_{eq}$  corresponde a la resistencia interna del piezoeléctrico, sumada a la resistencia que se coloque de carga [20]. Así como el piezoeléctrico cuenta con una frecuencia de resonancia, la cual se puede obtener experimentalmente, o mediante la *ecuación 3.4*, esta también posee una frecuencia de antiresonancia ( $w_a$ ).

$$w_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$



Donde la componente reactiva del circuito es mucho mayor que la activa y por ende esta puede ser despreciada, permitiendo hallar la *ecuación 3.5* con la que se calcula un aproximado, al igual que la frecuencia de resonancia esta puede ser hallada experimentalmente [19].

$$w_a = \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{C_0} \right)} \quad (3.5)$$

A la hora de modelar el piezoeléctrico como fuente el modelo que más se ha acomodado al comportamiento real es observado en la *figura 3.2*.

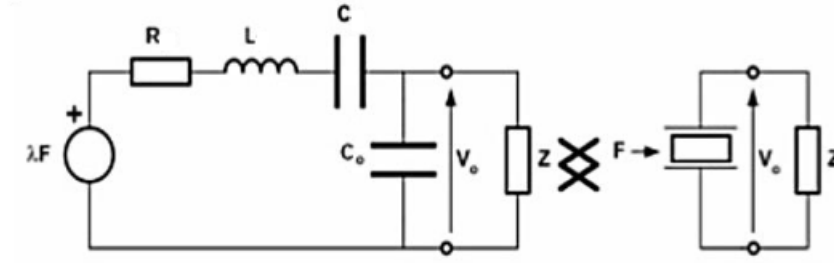


Figura 3.2: Piezoeléctrico modelado como fuente [19].

Como se puede observar en la *figura 3.2*, la fuente de voltaje depende directamente de un coeficiente  $\lambda F$ , el cual representa la fuerza aplicada ( $F$ ) y un coeficiente  $\lambda$  como factor de conversión dimensional. La voltaje de salida está descrita por la *ecuación 3.6*.

$$V_0 = \lambda F \frac{C}{C_0} \frac{1}{\sqrt{(1 - w^2 LC)^2 + w^2 RC}} \quad (3.6)$$

Dicho factor  $\lambda$  va a estar definido por la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{g_{33} h}{A} \quad (3.7)$$

Dónde  $A$  corresponde al área del piezoeléctrico donde se realiza la presión,  $h$  la altura del disco que se esté empleando y  $g_{33}$  corresponde a la constante de voltaje piezoeléctrica. Esta ultima va a depender del tipo de piezoeléctrico empleado. En la *tabla 3.1* se puede observar el valor de esta constante para los materiales piezoeléctricos más comunes dentro de la industria.

| Material  | $g_{33}(10^{-3}Vm/N)$ |
|-----------|-----------------------|
| $BaTiO_3$ | 12.6                  |
| Quartz    | 50.0                  |
| PVDF      | -339.0                |
| PZT-4     | 25.1                  |
| PZT-8     | 25                    |

Tabla 3.1: Constante de voltaje piezoeléctrico para los materiales piezoeléctricos más usados en la industria [21]

### 3.1.1. Efecto del punto de fuerza

Aparte de lo anteriormente mencionado, en varios estudios realizados, se logró determinar que la constante de un material piezoeléctrico puede variar, y esta variación depende de la geometría y ubicación de la fuerza aplicada como se indica en los estudios realizados por Forero y compañía en el 2018 [16].

### 3.2. Rectificador bias-flip

Dentro de la bibliografía consultada uno de los sistemas de rectificación que mas es utilizado para la recolección de energía producida por los piezoeléctricos, fue el rectificador bias-flip, observado en la *figura 3.3*.

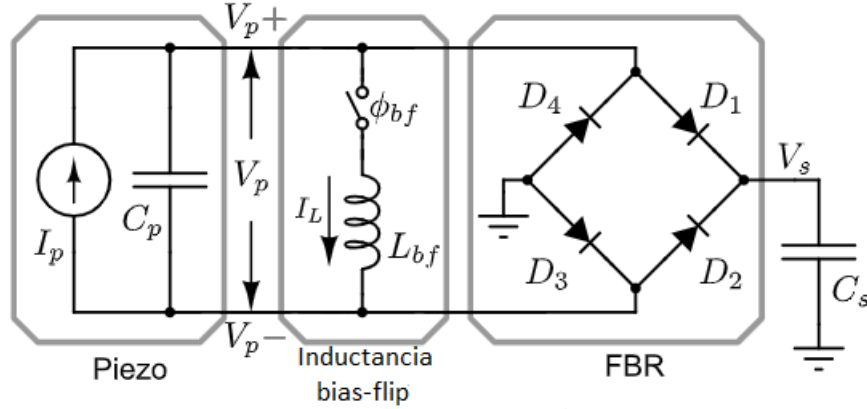


Figura 3.3: Rectificador bias-flip [22]

Como se indica en la *figura 3.3*, la fuente de corriente  $I_p$  y la capacitancia  $C_p$  son una representación más simplificada del piezoeléctrico.

La inductancia externa  $L_{bf}$  es usada para extraer energía de  $C_p$ .  $D_1...D_4$  son diodos de un puente rectificador, y  $C_s$  representa la capacitancia la cual va a almacenar el voltaje rectificado, la única condición para el valor de esta capacitancia es que sea mucho mayor que la capacitancia parásita  $C_p$ .

El principio básico del funcionamiento de este rectificador se encuentra ilustrado en la *figura 3.4*,  $V_s$  representa la tensión entre las terminales de  $C_s$ .

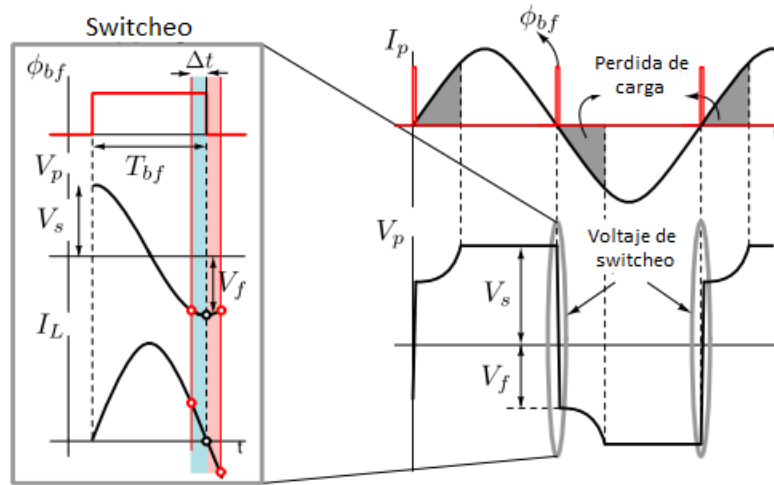


Figura 3.4: Formas de onda para un rectificador bias-flip al rectificar una onda sinusoidal[22]

Considerando que funcionen de manera ideal los diodos usados, en el semi ciclo positivo de  $I_p$ ,  $V_p = V_s$ , cuando  $I_p$  cruza cero, la bobina  $L_{bf}$  es conectada en paralelo al piezoeléctrico, con un tiempo determinado por la *ecuación 3.8*.

$$T_{bf} = \pi \sqrt{L_{bf} C_p} \quad (3.8)$$

Como factor a tener en cuenta,  $T_{bf}$  debe ser mucho menor que el período de  $I_p$ . Cuando la inductancia  $L_{bf}$  se encuentra activa, esta se halla en serie con la capacitancia  $C_p$ , debido a que la capacitancia de almacenamiento  $C_s$  se encuentra aislada, gracias al puente rectificador, que en ese momento se encuentra en un estado desactivado, provocando que bajo circunstancias ideales, al final del tiempo  $T_{bf}$ , el voltaje en  $C_p$  sea igual a  $-V_s$ .

En el ciclo negativo de  $I_p$ , toda la corriente fluye a través del rectificador debido a que  $C_p$  ya está cargado con un voltaje de  $-V_s$ . En la práctica, a causa de resistencias parásitas, el voltaje del inductor ( $V_f$ ) va a tener una menor magnitud que  $V_s$  como se observa en la *ecuación 3.8*.

Como consecuencia de este efecto, en parte del ciclo negativo de  $I_p$  la capacitancia  $C_p$  se debe cargar desde  $-V_f$  hasta  $-V_s$ . Tiempo en el cual, la corriente en  $C_s$  va a ser cero, limitando la cantidad de energía que puede ser extraída del piezoeléctrico. Cabe denotar que durante el semiciclo positivo también se produce este efecto [22].

Otro efecto práctico importante a considerar, es la precisión de  $T_{bf}$ . Si el ancho de pulso de  $\phi_{bf}$  es  $\pi\sqrt{L_{bf}C_p} \pm \Delta t$ , la corriente a través del inductor no va a ser cero, como se muestra en la *figura 3.4*, lo que provoca que la corriente sobrante sea disipada en el circuito de protección, esto origina que la magnitud de  $V_f$  se reduzca aun más [22].

Por consiguiente, para obtener la eficiencia total del circuito, hay que tener en cuenta las pérdidas causadas por la inexactitud de  $T_{bf}$ , y por el factor de calidad de la red  $L_{bf} - C_p$ , asumiendo que se tenga un factor de calidad  $Q$  alto, y un  $\Delta T_{bf}$  no muy alto, la eficiencia del convertidor se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\eta_{flip} = \frac{V_s + |V_f|}{2V_s} \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\pi}{2Q}\right) \left(1 - \frac{\Delta T_{bf}^2}{2L_{bf}C_p}\right) \quad (3.9)$$

### 3.3. Convertidor boost

Dentro de los convertidores DC-DC existentes, uno de los que se utilizan en gran medida para la recolección de pequeñas cantidades de tensión, es el convertidor boost inductivo, ya que puede extraer y amplificar de manera eficiente pequeñas cantidades de tensión, sin embargo, tiene el inconveniente de necesitar chips externos para su funcionamiento [23].

En la *figura 3.5*, se puede observar un modelo simplificado de un convertidor boost, compuesto por un inductor ( $L$ ), una capacitancia de salida ( $C_{out}$ ) y dos interruptores denominados de lado bajo (LSS), y de lado alto (HSS), utilizados para realizar el control de las fases de carga y descarga del inductor. Cabe destacar que este tipo de convertidor puede operar de dos modos diferentes. Siendo el primero el de conducción continua, o por sus siglas en inglés CCM (continuous conduction mode), ocurre cuando la corriente del inductor siempre es mayor a 0 justo como se muestra en la *figura 3.6 (a)*. El otro modo, es el de conducción discontinua o por sus siglas en inglés DCM (discontinuous conduction mode), se produce cuando hay un tiempo dentro del período de la señal de corriente de la inductancia, en el que ninguno de los interruptores está activo, lo que ocasiona que en ese tiempo  $I_{LP}$  sea 0 como se muestra en la *figura 3.6 (b)* [23].

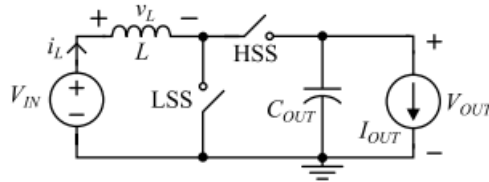


Figura 3.5: modelo simplificado de un boost inductivo [23].

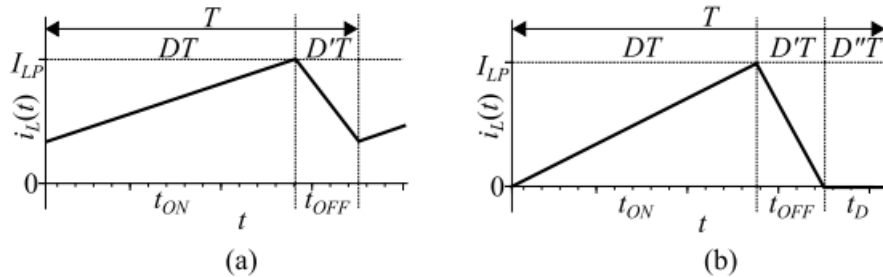


Figura 3.6: Corriente en el inductor para los diferentes modos de operación (a)CCM y (b)DCM [23].

### 3.3.1. Modo CCM

Como se mencionó anteriormente, en este modo de operación, la corriente del inductor siempre va a ser mayor a 0 en estado estable. En dicho estado, cada período del convertidor es dividido en dos fases, como se muestra en la *figura 3.6 (a)*, donde  $T_{ON} = DT$  y  $T_{OFF} = D'T$ .

Durante el período de carga, el interruptor LLS se encuentra cerrado y el HSS abierto, como se muestra en la *figura 3.7*, en este instante se carga la bobina, mientras que el condensador suministra energía a la carga de salida.

Durante el período de descarga, se activa el interruptor HSS y se desactiva el LSS, como se muestra en la *figura 3.8*, lo que ocasiona que una fracción de energía almacenada en el inductor sea transferida en parte a la carga y en otra proporción al condensador [23].

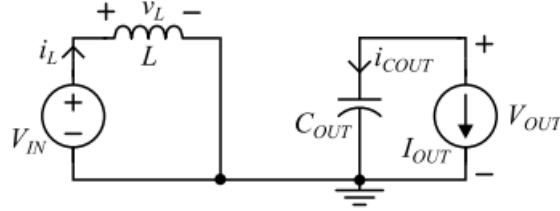


Figura 3.7: Circuito equivalente cuando el convertidor se encuentra en modo encendido [23].

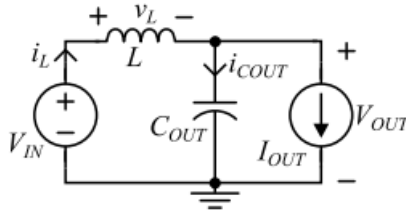


Figura 3.8: Circuito equivalente cuando el convertidor se encuentra en modo apagado [23].

### 3.3.2. Modo DCM

Al igual que el modo CCM, en este se presenta un período de carga y descarga, explicados con anterioridad, pero además posee un período en el que ninguno de los interruptores se encuentra activo, como se muestra en la *figura 3.9*, debido a esta discontinuidad, en este período de tiempo la corriente en el inductor va a ser 0 [23].

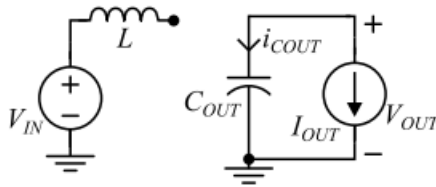


Figura 3.9: Circuito equivalente cuando el convertidor se encuentra en modo  $t_D$  [23].

### 3.3.3. Análisis de eficiencia

Para analizar la eficiencia del boost, se debe tener en cuenta es la eficiencia de carga de la inductancia, dicho análisis se realiza con la ayuda del circuito mostrado en la *figura 3.10*, donde  $V_s$  es la tensión de la fuente,  $L$  la inductancia del boost y  $R$  la resistencia total del cableado sumado a la resistencia parásita de la bobina. Con esta configuración la tensión y corriente de la inductancia se dan por las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$v_L(t) = (V_s - Ri_L(0))e^{-t\frac{R}{L}} \quad (3.10)$$

$$i_L(t) = \frac{V_s}{R} + \left( i_L(0) - \frac{V_s}{R} \right) e^{-t\frac{R}{L}} \quad (3.11)$$

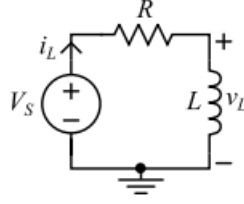


Figura 3.10: Circuito analizado para obtener la eficiencia de carga del circuito [23].

La eficiencia de carga de la inductancia puede verse como la razón entre la energía transferida a la inductancia ( $E_L$ ) y la energía entregada por la fuente de alimentación ( $E_s$ ):

$$\eta_L(t) = \frac{E_L(t)}{E_s(t)} \quad (3.12)$$

Donde la energía proporcionada por la fuente es

$$E_s(t) = \int_0^t V_s i_L(t) dt = \int_0^t V_s \left[ \frac{V_s}{R} + \left( i_L(0) - \frac{V_s}{R} \right) e^{-t\frac{R}{L}} \right] dt \quad (3.13)$$

y la energía transferida a la bobina es:

$$E_L(t) = \int_0^t \left[ (V_s - Ri_L(0)) e^{-t\frac{R}{L}} \right] \left[ \frac{V_s}{R} - \frac{1}{R} (V_s - Ri_L(0)) e^{-t\frac{R}{L}} \right] dt \quad (3.14)$$

Usando la ecuación 3.12 la eficiencia de carga del inductor es graficada como una función normalizada  $i_L(0)$  para diferentes tiempos de carga normalizados ( $tR/L$ ), observado en la figura 3.11 [23].

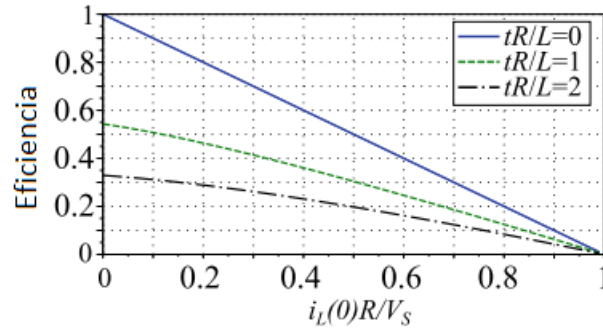


Figura 3.11: Gráfica de la eficiencia de carga de la inductancia [23].

Como se puede observar en la figura 3.11, con valores fijos en los parámetros del circuito, se observa que la eficiencia aumenta a medida que el valor de  $i_L(0)$  tiende a 0, siendo su mayor eficiencia, cuando esta es igual a 0. Lo que significa que intrínsecamente, un boost en DCM va a tener una ventaja en cuanto a la eficiencia, en comparación con un boost en CCM[23]. Por lo que para este tipo de aplicaciones un boost en DCM siempre va a ser la opción predilecta.

### 3.3.4. Funcionamiento ideal del boost en modo de conducción discontinua

Para un análisis inicial se supone que la fuente de tensión es ideal y que la inductancia no presenta pérdidas. Durante el período de carga el circuito se comporta como se observa en la figura 3.7. Durante este período de tiempo el

inductor es cargado por la fuente y el condensador entrega corriente a la carga. La corriente del inductor en esta fase esta dada por la siguiente expresión:

$$i_L(t) = \frac{V_{IN}}{L}t \quad (3.15)$$

Siendo la corriente máxima:

$$I_{LP} = \frac{V_{IN}}{L}t_{ON} = \frac{V_{IN}}{L}DT \quad (3.16)$$

Durante el período de descarga el circuito se comporta como se observa en la *figura 3.8*, la energía del inductor es transferida al capacitor y a su vez a la carga, siendo la corriente de la inductancia:

$$i_L(t) = \frac{V_{IN}}{L}t_{ON} + \left( \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{L} \right) (t_{ON} - t) \quad (3.17)$$

Durante el período de discontinuidad, la corriente de la inductancia va a ser 0, siendo la corriente promedio de la inductancia dada por:

$$\bar{i}_L = \frac{I_{LP}(t_{ON} + t_{OFF})}{2T} = \frac{V_{IN}DT(D + D')}{2L} \quad (3.18)$$

Al suponer un capacitor ideal a la salida del boost, la carga entregada por la inductancia, será consumida únicamente por la carga, durante el período T, por lo tanto:

$$I_{OUT} = \frac{I_{LP}t_{OFF}}{2T} = \frac{V_{IN}DD'T}{2L} \quad (3.19)$$

### 3.3.5. Inclusión de un capacitor a la entrada del circuito

Con la adición de una capacitancia a la entrada del convertidor, como se muestra en la *figura 3.12* la eficiencia de este se puede mejorar, ya que se puede desprestigiar el efecto de rizado de  $R_s$ . Por lo general el valor de  $C_{IN}$  va a ser un valor elevado, debido a los requerimientos de rizado y frecuencia.

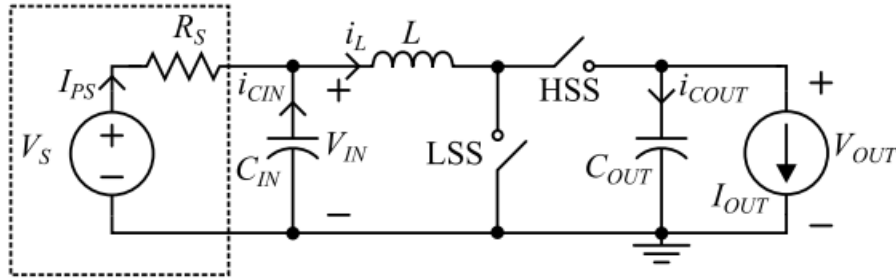


Figura 3.12: Boost con una capacitancia a la entrada [23].

En esta configuración, la corriente de alimentación puede ser considerada constante ( $I_{PS}$ ) e igual a la corriente promedio de la inductancia. Por lo tanto la eficiencia de extracción es dada por:

$$\eta_{EXTR} = \frac{\frac{V_s I_{LP}(t_{ON} + t_{OFF})}{2T} - R_s \frac{I_{LP}^2(t_{ON} + t_{OFF})^2}{4T^2}}{\frac{V_s^2}{4R_s}} \quad (3.20)$$

Y la corriente máxima de la inductancia que produce una eficiencia máxima es:

$$I_{LPMAX} = \frac{V_s T}{R_s(t_{ON} + t_{OFF})} \quad (3.21)$$

Substituyendo Eq 3.21 en Eq 3.21, se obtiene una eficiencia máxima del 100 %.

## Capítulo 4

# Diseño Metodológico

La ejecución completa del proyecto se dividirá en tres etapas, cada una de las cuales constará de subprocesos específicos. Estas etapas son:

- Caracterización y conexión de los piezoeléctricos.
- Diseño electrónico del piezogenerador.
- Comprobación experimental de funcionamiento.

### 4.1. Caracterización y conexión de los piezoeléctricos

#### 4.1.1. Caracterización de los piezoeléctricos

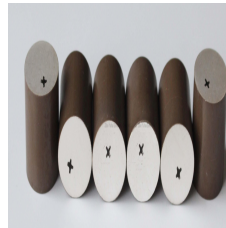
Se llevará a cabo la caracterización de tres tipos diferentes de piezoeléctricos, los cuales se pueden encontrar en la *figura 4.1* y fueron elegidos de acuerdo a su geometría [16], y su uso en proyectos anteriores [13].



(a) Piezoeléctrico AL36731359622  
imagen tomada de [19]



(b) Piezoeléctrico CH-S42-50x2.6  
imagen tomada de [19]



(c) Piezoeléctrico columna imagen tomada de [24]

Figura 4.1: Piezoeléctricos a caracterizar

La caracterización se enfocará en la generación de tensión de cada tipo de piezoeléctrico en respuesta a la fuerza mecánica aplicada sobre ellos. El procedimiento se llevará a cabo utilizando un solenoide de 12V controlado mediante un Arduino nano. Además, se utilizarán celdas de carga y un osciloscopio para medir tanto la tensión generada

como la fuerza aplicada. El objetivo es determinar cuál de los piezoeléctricos muestra la mejor relación entre la tensión generada y la fuerza mecánica aplicada, finalmente este será el tipo de piezoeléctrico que se empleará en la construcción del generador.

#### 4.1.2. Determinación de la conexión entre piezoeléctricos

Utilizando la baldosa diseñada en la Universidad, que tiene dimensiones de 41,5x41,5 cm de ancho y largo, con una altura de 10 cm, hecha de láminas de acrílico, se llevarán a cabo pruebas de generación de tensión y corriente máxima. Estas pruebas se realizarán con tres configuraciones diferentes de conexiones entre los piezoeléctricos. Durante las pruebas, una persona con un peso de 60Kg caminará sobre la baldosa, y se considerará un rango de tensión entre 2.7 y 20V. Este rango de tensión está dentro de los límites permitidos por la opción comercial de captación de tensión LTC3588.

### 4.2. Diseño electrónico del piezogenerador

Para el sistema electrónico del piezogenerador se consideraron las etapas observadas en la *figura 4.2*

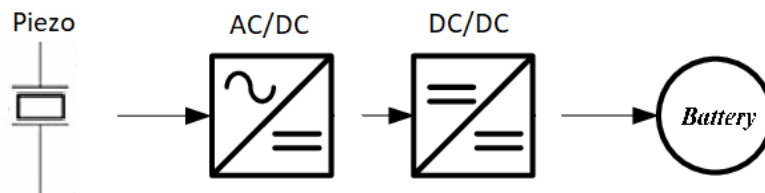


Figura 4.2: Etapas del piezogenerador

#### 4.2.1. Diseño del sistema electrónico de captación

Se desarrollará un sistema de captación de energía que no requerirá el uso de diodos para rectificar la señal generada por el piezoeléctrico. En su lugar, se implementará un rectificador basado en un condensador electrolítico conmutado que almacenará la energía generada. Para llevar a cabo este proyecto, se realizarán simulaciones utilizando herramientas como Malab y Simulink. Además, se llevará a cabo un análisis matemático detallado y se ampliará el marco teórico correspondiente. El modelo del piezoeléctrico utilizado se basará en el trabajo de grado previamente realizado por Oscar J. Borda Garcia y Laura C. Mendoza Valero [19].

#### 4.2.2. Comparación del sistema diseñado con otros ya existentes

Se comparará de manera analítica, y por medio de simulaciones en Matlab y Simulink, las pérdidas de tensión en la etapa de captación energética del sistema diseñado, con otros sistemas de captación basados en diodos, como lo son el rectificador de puente completo, y el rectificador bias-flip.

Basado en los resultados se procederá a realizar una análisis de eficiencia, con el fin de escoger el rectificador más adecuado para desarrollar el proyecto.

#### 4.2.3. Diseño de un sistema para la carga de una batería

Se realizará una consulta acerca del modelo aproximado de una batería Ion-Litio con el fin de elaborar el diseño y simulación de un convertidor DC-DC para la carga de esta, teniendo además en cuenta el modelo piezoeléctrico propuesto, y el rectificador seleccionado.

### 4.3. Comprobación experimental de funcionamiento

#### 4.3.1. Comprobación experimental de funcionamiento del sistema

Se llevará a cabo la implementación experimental del sistema diseñado, utilizando una baldosa propuesta por la Universidad como base mecánica.



Con el prototipo en funcionamiento, se realizarán pruebas de carga eléctrica máxima utilizando resistencias de potencia. Además, se utilizará un osciloscopio, para determinar con precisión la potencia máxima entregada por el sistema diseñado. Este montaje experimental permitirá evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema en condiciones reales

## Capítulo 5

# Desarrollo Conceptual

### 5.1. Modelado del piezoeléctrico

Para hallar los valores correspondientes al modelo de la *figura 3.1*, lo primero que se realizó fue un barrido experimental de frecuencia empleando el montaje observado en la *figura 5.1*, los resultados se pueden observar en la *figura 5.2*.

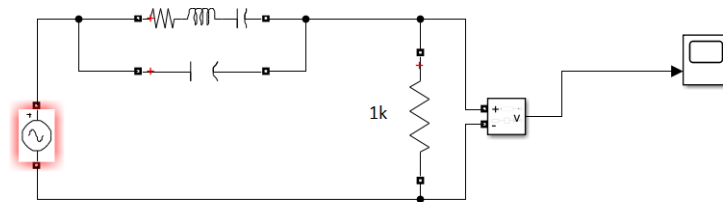


Figura 5.1: Esquema del circuito utilizado para el barrido de frecuencia

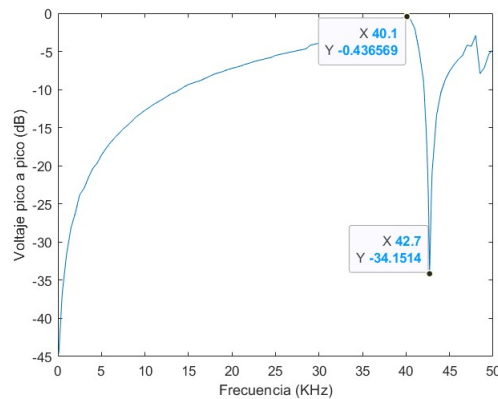


Figura 5.2: Barrido de frecuencia del piezoeléctrico en dB

Con base en lo observado en la *figura 5.2*, se obtuvieron los siguientes valores necesarios para calcular la magnitud de los componentes del modelo piezoeléctrico:

- Frecuencia de resonancia ( $F_r$ ) = 40.1kHz
- Frecuencia de antiresonancia ( $F_a$ ) = 42.7kHz
- Frecuencia de corte alta ( $F_{mas}$ ) = 41.3kHz
- Frecuencia de corte baja ( $F_{menos}$ ) = 31.9kHz

- Tensión de la fuente ( $V_s$ ) = 20.4 V
- Tensión entre los terminales de la resistencia, cuando se excita el sistema con su frecuencia de resonancia ( $V_{Fr}$ ) = 19.4 V

Lo primero que se halló fue la resistencia, esto utilizando los valores de  $V_s$  y  $V_{Fr}$ , debido a que cuando se excita el circuito a su frecuencia de resonancia este se comporta casi en su totalidad como una carga resistiva, permitiendo determinar  $R$ .

Luego utilizando la *ecuación 3.3* se calcula el factor de calidad  $Q$ , con el que despejando de la *ecuación 3.2* se determina el valor de  $L$ , siendo  $R_{eq}$  la suma entre  $R$  y  $R_l(1k\Omega)$ .

Ya para calcular los valores de las capacitancias lo primero que se realizó fue despejar  $C$  de la *ecuación 3.4*, y reemplazar los valores de  $L$  y  $W_s$ , ya con el valor de  $C$ , se procede a despejar  $C_o$  de la *ecuación 3.5*, obteniendo los siguientes valores:

- $R = 51.54 \Omega$
- $L = 17.8mH$
- $C = 884.77pF$
- $C_o = 6.6nF$

Luego realizando medidas de diámetro y altura del piezoeléctrico, se empleó la *ecuación 3.7*, teniendo en cuenta que el material de los piezoeléctricos utilizados es el PZT-8 como lo indica el fabricante [25], se halló una constante  $\lambda$  de 0.0034. Cabe resaltar que esta constante  $\lambda$  es suponiendo que la fuerza va a ser aplicada de manera uniforme por toda el área del piezoeléctrico.

## 5.2. Rectificador basado en transistores

En la *figura 5.3* se observa el rectificador propuesto basado en Mosfets, el cual teóricamente no va a presentar pérdidas de tensión aparte de la tensión entre drenador y surtidor del transistor. Este rectificador presentaría pérdidas a causa de la capacitancia parásita del piezoeléctrico, la cual puede ser extraída si se implementa un convertidor boost a la salida del rectificador.

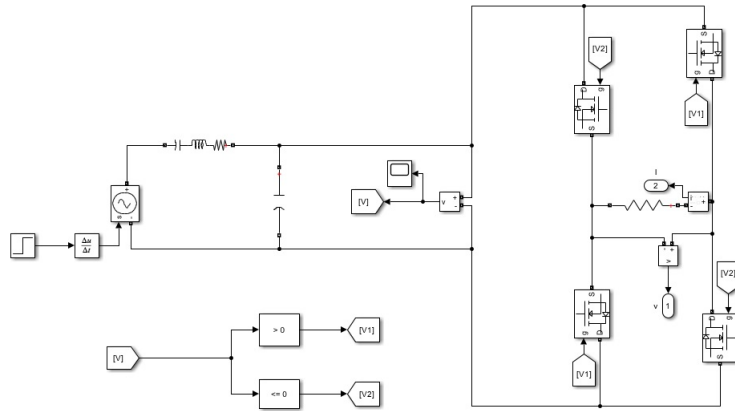


Figura 5.3: Rectificador propuesto

## 5.3. Rectificador bias-flip

Ya con el valor de la capacitancia  $C_o$  y un valor comercial de la inductancia  $L_{bf}$  (100uH) se puede calcular el tiempo de activación de la inductancia  $L_{bf}$  utilizando la *ecuación 3.8*, teniendo en cuenta que  $C_p$  va a ser la suma en paralelo de 13 veces  $C_o$ , se calculó un tiempo de activación de 2.55 us.

Por último, para hallar la eficiencia del rectificador se procede a utilizar la *ecuación 3.9*, suponiendo un  $\Delta T_{bf}$  de 0, y

empleando la resistencia parásita del piezoeléctrico para calcular el factor de calidad de la red  $L_{bf} - C_p$ , obteniendo una eficiencia aproximada del 67 %.

Para la simulación de este rectificador, se implementó el circuito observado en la *figura 5.4*.

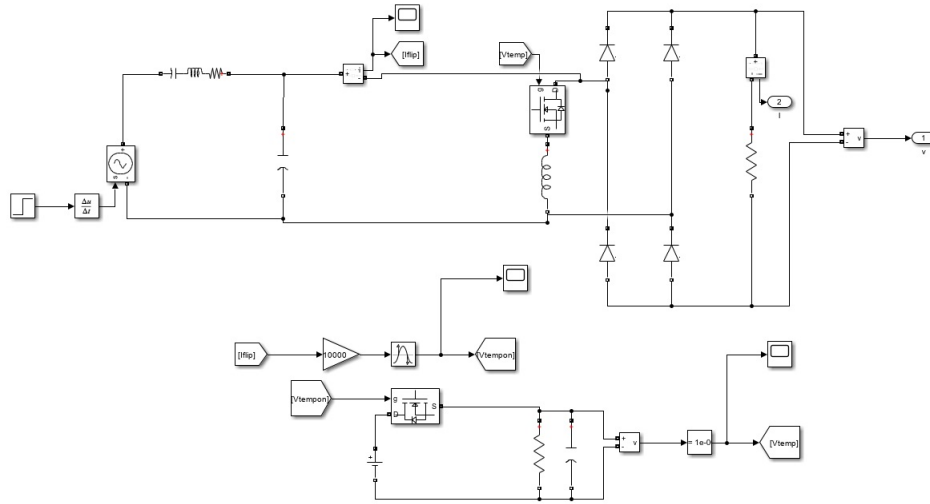


Figura 5.4: Circuito implementado en Simulink para simular un rectificador bias-flip en conjunto con un piezoeléctrico

## 5.4. Rectificador de puente completo

Para la simulación del rectificador de puente completo, se implementó el circuito observado en la *figura 5.5*, teniendo en cuenta que en caso de usar este rectificador se utilizarán diodos schotky, se estableció para cada diodo un  $V_f$  de 0.2V.

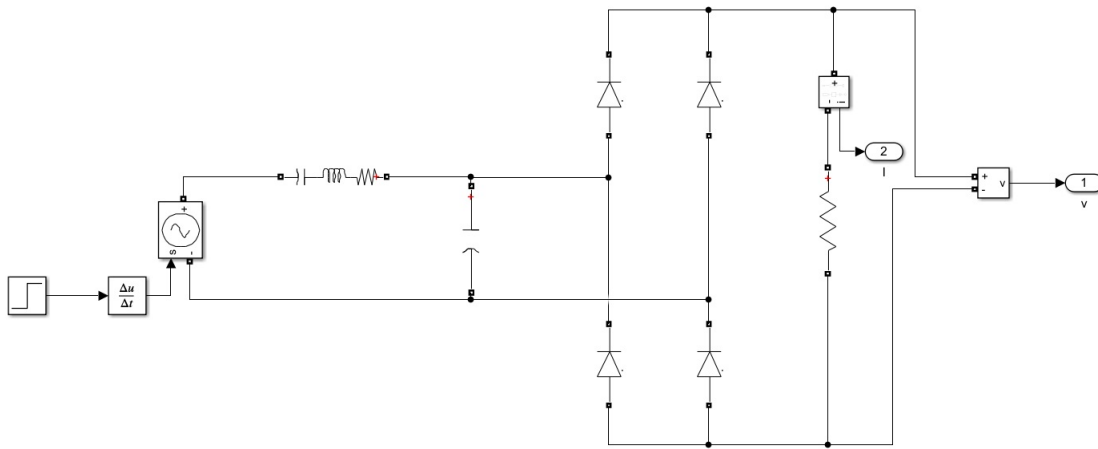


Figura 5.5: Circuito implementado en Simulink para simular un rectificador de puente completo en conjunto con un piezoeléctrico

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, y el circuito implementado, las pérdidas teóricas de este rectifi-

cador, siempre van a ser de 0.4V [10].

## 5.5. Diseño del convertidor Boost

### 5.5.1. Cálculos Teóricos diseño conversor Boost

Para iniciar se realizaron los siguientes cálculos, con el fin de determinar el ciclo útil de la señal cuadrada, su frecuencia y el valor de inductancia y capacitancia.

De la *figura 3.5*, para simplificar los cálculos, se supuso que el interruptor de lado alto es un diodo, por lo que solo se analizarán los estados del interruptor de lado bajo el cual va a ser un transistor controlado por PWM, con esa suposición, se pueden obtener las siguientes ecuaciones generales.

Para cuando el transistor está conduciendo:

$$V_s = V_L \quad (5.1)$$

$$I_c = \frac{-V_o}{R} \quad (5.2)$$

Para cuando el transistor se encuentra en corte:

$$V_s = V_L + V_o \quad (5.3)$$

$$I_c = I_L - \frac{V_o}{R} \quad (5.4)$$

Como primer paso para el desarrollo de los cálculos se halla la expresión de la tensión media de la inductancia, con el objetivo de calcular el valor de ciclo útil, que va a permitir que este valor de tensión media sea 0, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$\langle V_L \rangle = \frac{1}{T_s} \left[ \int_0^{DT_s} V_s dt + \int_{DT_s}^{T_s} (V_s - V_o) dt \right] \quad (5.5)$$

Suponiendo que el valor medio de tensión en la inductancia, y despejando D se llega a la siguiente expresión, que sirve para determinar su valor:

$$D = \frac{V_o - V_s}{V_o} \quad (5.6)$$

Con esto en mente se emplea la *ecuación 5.1*, teniendo en cuenta un valor de tensión promedio de entrada, un valor de inductancia que se posea en el momento, una frecuencia de oscilación, y el ciclo útil previamente encontrado, se llega a la siguiente expresión para determinar el valor de la variación de corriente en el circuito:

$$\Delta_i = \frac{V_s * D}{2 * L * F_s} \quad (5.7)$$

Con estos parámetros ya calculados, el único elemento que queda por obtener, es el valor de la capacitancia, y la corriente que tiene que soportar la bobina. Como primer paso lo primero que se realiza es el calculo de la corriente media del capacitor (*ecuación 5.8*) que por lo que en un período de tiempo se desacopla de la inductancia, se puede suponer 0.

$$\langle i_o \rangle = \frac{1}{T_s} \left[ \int_0^{DT_s} \frac{-V_o}{R} dt + \int_{DT_s}^{T_s} \left( i_L - \frac{V_o}{R} \right) dt \right] \quad (5.8)$$

Resolviendo las integrales y despejando el valor de la corriente a través de la inductancia, se obtiene la siguiente expresión:

$$i_L = \frac{V_o}{R(1 - D)} \quad (5.9)$$

Para hallar el valor del condensador, se emplea la *ecuación 5.2*, evaluando la variación de la tensión, cuando el transistor está conduciendo, es decir cuando el condensador se está descargando, y por lo tanto su variación va a ser negativa. (*Nota: ver ecuación 5.10*)

$$\frac{C * dv}{dt} = \frac{-Vo}{R} = \frac{-2\Delta V_o}{D * T_s} \quad (5.10)$$

Despejando el valor del condensador, se obtiene la siguiente expresión para su cálculo:

$$C = \frac{V_o * D}{2 * \Delta V_o * R * F_s} \quad (5.11)$$

Para simplificar el proceso de los cálculos, se realizó el siguiente script en MATLAB:

```

1  Vo = 5;
2  Vs = 0.2;
3  Rob = 10e3;
4  Iob= Vo/Rob;
5  Fsb = 7794;
6  Lb = 1e-3;
7  Deltavb = 0.015;
8  Db = (Vo-Vs)/Vo;
9  Deltaib = (Vs*Db)/(2*Lb*Fsb);
10 Cb = (Vo*Db)/(2*Deltavb*Rob*Fsb);
11 ILb = Vo/(Rob*(1-Db));
12 Pob = Vo*Iob;
```

Donde:

- Vo = Tensión media de salida.
- Vs = Tensión de entrada.
- Rob = Resistencia de salida.
- Iob= Corriente media de salida ( $I_{out}$ ).
- Fsb = Frecuencia del PWM.
- Lb = Valor de la inductancia.
- Deltavb = variacion del voltaje de salida.
- Db = Ancho de pulso del PWM (D).
- Deltaib = Variación de la corriente de salida ( $\Delta I$ )
- Cb = Condensador de salida (Co)
- ILb = Corriente media en la inductancia ( $i_L$ ).
- Pob = Potencia media entregada ( $P_{out}$ );

Obteniendo los siguientes valores:

- Co = 2 uF
- D = 96 %
- $\Delta I$  = 12.3mA
- $i_L$  = 12.5mA
- $I_{out}$  = 50 uA
- $P_{out}$  = 2.5mA

Y se realizó su respectiva simulación, siendo la fuente de tensión de entrada el modelo del piezoeléctrico, como se puede observar en la *figura 5.6*.

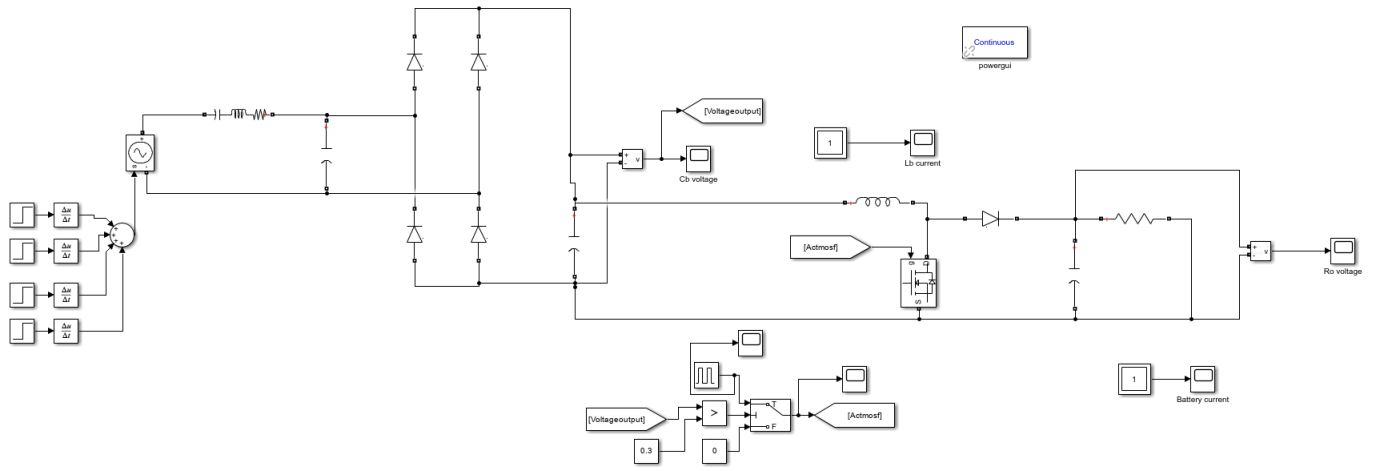
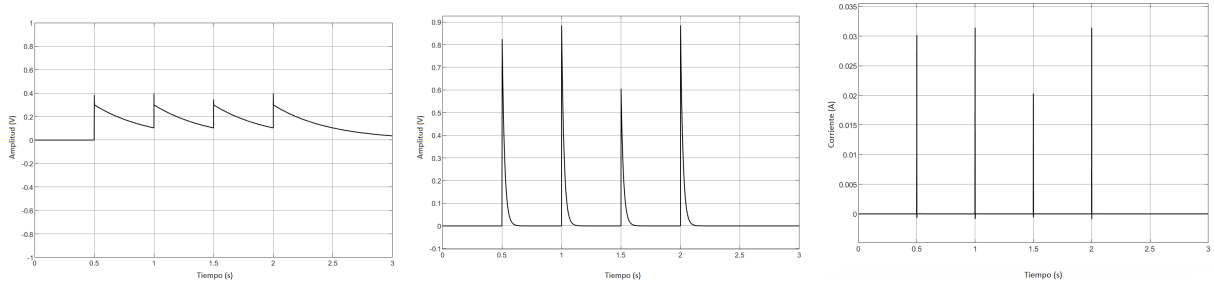


Figura 5.6: Simulación del boost diseñado junto con el modelo del piezoeléctrico a la entrada

También se observa la presencia de una capacitancia a la entrada del boost, que asegura que el voltaje que llegue al boost sea lo más parecido a una fuente continua. La capacitancia fue obtenida empíricamente, según el tiempo de carga y retención de carga de varios capacitores (ver resultados sección 6.4). En la *figura 5.7* se observa la tensión de salida, la corriente de la inductancia y la tensión de entrada del boost.



(a) Tensión de entrada del boost (b) Boost simulado tensión de salida (c) Boost simulado corriente de salida

Figura 5.7: Simulación del boost con tensión de entrada inconstante

Cabe resaltar que la capacitancia también se puede calcular de manera teórica, al igual la impedancia de la fuente a la carga, como se analizará en la siguiente sección.

## 5.6. Teorema de máxima transferencia de potencia

Para obtener el valor de la impedancia para la cual el piezoeléctrico transfiere su máxima potencia, se procede a realizar un análisis de impedancia de Thevenin, utilizando como modelo el circuito observado en la *figura 3.2*, para lo que se obtiene la siguiente ecuación de impedancia equivalente:

$$Z_{thv} = \frac{w^2 LC + wRC - 1}{w^2 RCCo + j(w^3 LCCo - w(Co + C))} \quad (5.12)$$

Para simplificar los cálculos se define que:

$$x = w^2 RCCo \quad (5.13)$$

$$y = w^3 LCCo - w(Co + C) \quad (5.14)$$

Reemplazando las ecuaciones 5.13 y 5.14 en la ecuación 5.12 y realizando la racionalización correspondiente se obtiene la siguiente ecuación para la impedancia de Thevenin:

$$\frac{w^2 LCx + wRCx - x - j(w^2 LCy + wRCy - y)}{x^2 + y^2} \quad (5.15)$$

Luego para simplicidad de cálculos se implementó un script en matlab, dónde se obtienen las siguientes gráficas para la parte real y la parte compleja de la impedancia, suponiendo que se trata de un circuito en serie, para simplificar el análisis:

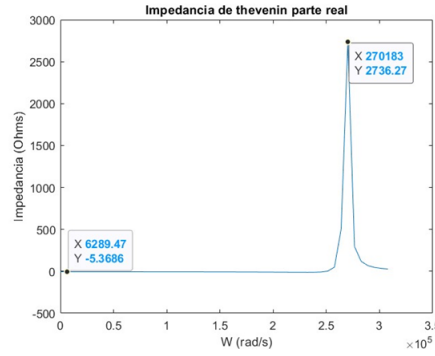


Figura 5.8: Gráfico para la componente real de la impedancia equivalente

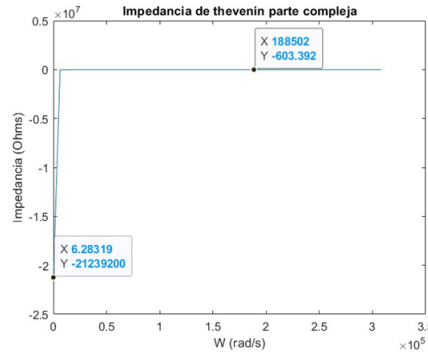


Figura 5.9: Gráfico para la componente compleja de la impedancia equivalente

Se observa que para la configuración en serie de resistencia, mas capacitancia, a bajas frecuencias no existe una carga resistiva posible, siendo mayormente una carga capacitiva de un valor elevado, la que logra una máxima transferencia de potencia, mientras que en la frecuencia de resonancia, se encuentra que la carga con la que se transfiere una máxima potencia, va a ser una carga resistiva con un componente pequeño capacitivo. Cabe resaltar que al estar excitado el piezoeléctrico, con el paso de peatonales, estos mayormente van a trabajar con una frecuencia baja, siendo una carga capacitiva la mejor opción para recolectar energía de manera eficiente.

Así mismo en la literatura convencionalmente para simplificar los cálculos el circuito equivalente de un piezoeléctrico consta de una fuente de tensión conectada en serie a un capacitor, o como una fuente de corriente conectada en paralelo conectada en paralelo a un capacitor equivalente como se muestra en la figura 5.10.

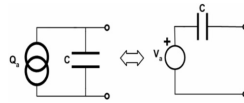


Figura 5.10: Modelo eléctrico simplificado del piezoeléctrico [26].

Para pasar de un modelo a otro se debe hacer un proceso similar al realizado para pasar de un equivalente de Thevenin a uno de Northon y viceversa [26].



## Capítulo 6

# Resultados y Discusión

### 6.1. Selección del piezoeléctrico

Para realizar las medidas de golpe del piezoeléctrico, se realizó el montaje observado en la *figura 6.1*.

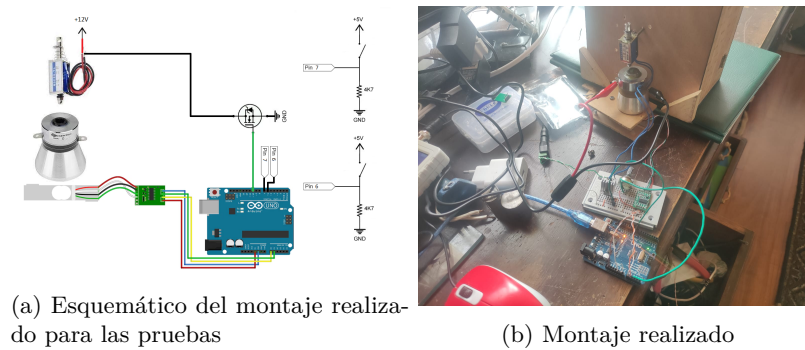


Figura 6.1: Montaje completo para las pruebas

En donde se tiene un solenoide controlado por PWM, para obtener diferentes magnitudes de fuerza, a la hora de impactar el piezoeléctrico. También se tiene una celda de carga para medir la magnitud de dichos impactos todo controlado por medio de un arduino (Ver Anexo A).

Luego de realizadas varias pruebas de impacto, con una carga resistiva de  $240k\Omega$  conectada a las terminales del piezoeléctrico, se obtuvo la gráfica observada en la *figura 8.1*, donde se observa que el piezoeléctrico con mejor relación de fuerza vs potencia generada, es el piezoeléctrico grande, y por lo tanto el que se va a implementar, además también se logra apreciar que el piezoeléctrico mediano y el pequeño tienen un rendimiento similar, siendo el comportamiento del piezoeléctrico pequeño más lineal.

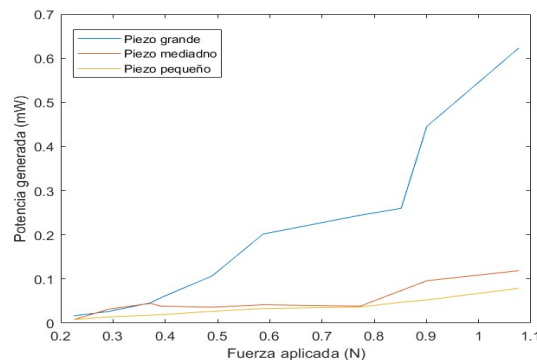


Figura 6.2: Gráfico de fuerza aplicada Vs potencia generada

## 6.2. Selección del rectificador

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de cada rectificador, cuando estos tienen una carga resistiva de  $1k\Omega$ .

### 6.2.1. Rectificador propuesto

En las *figuras 6.3 y 6.4*, se observan las formas de onda resultantes luego de simular el circuito presentado en la *figura 5.3*:

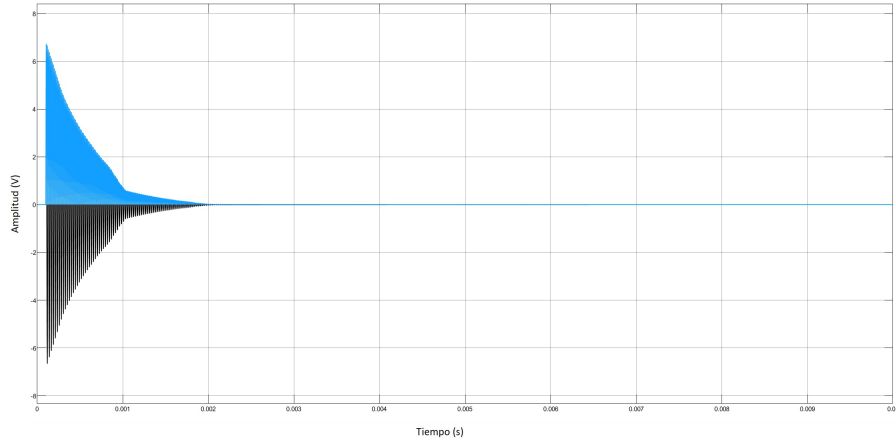


Figura 6.3: Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador basado en Mosfets

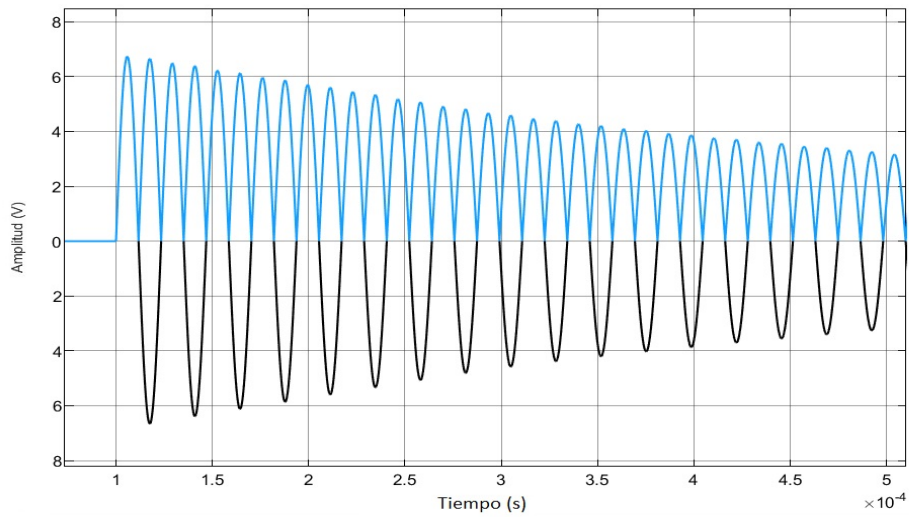


Figura 6.4: Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador basado en Mosfets

Se observa que a la hora de rectificar en la simulación no hay pérdidas de tensión.

### 6.2.2. Rectificador bias-flip

En las *figuras 6.5 y 6.6* se observa las formas de onda presentadas al simular el circuito presentado en la *figura 5.4*:

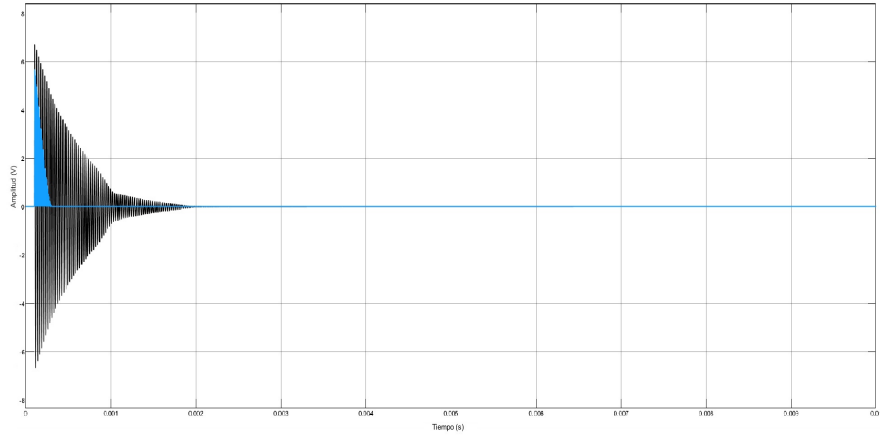


Figura 6.5: Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador bias-flip

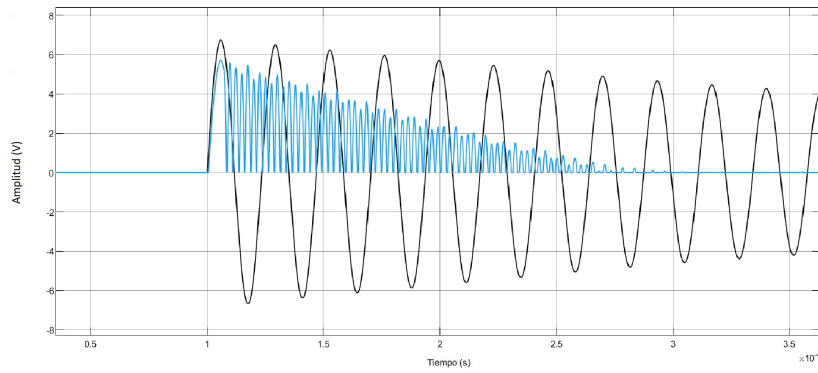


Figura 6.6: Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador bias-flip

Se observa que a comparación de los otros rectificadores este es el que presenta mayores pérdidas de tensión, principalmente debido a su complejidad para simular. Como se muestra en la *figura 6.7*, al no ser una conmutación ideal del Mosfet, este no alcanza a activar el temporizador cada vez que detecta un cruce por cero, lo que ocasiona un mal funcionamiento del rectificador.

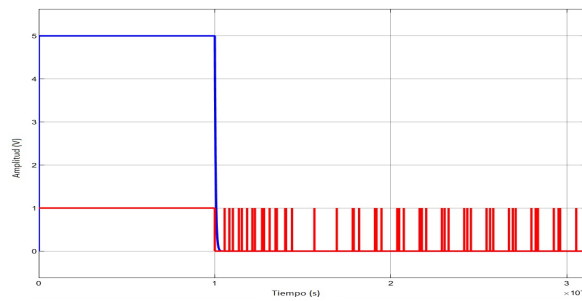


Figura 6.7: Activación del temporizador(azul) vs detección de cruce por 0 (rojo)

Luego de realizar unos ajustes (ver anexo D) a la simulación y se obtuvieron las respuestas observadas en las *figuras 6.8 y 6.9*.

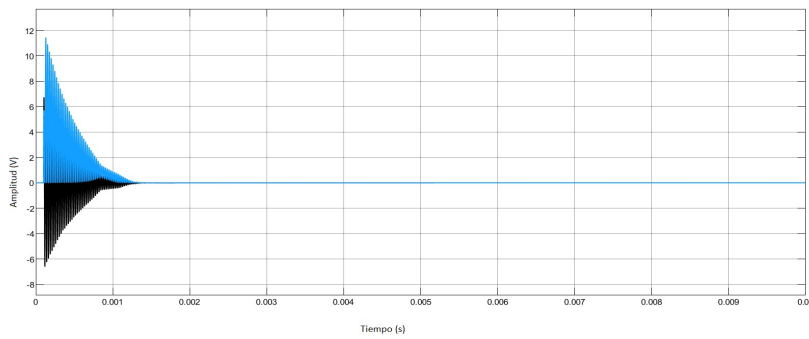


Figura 6.8: Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador bias-flip

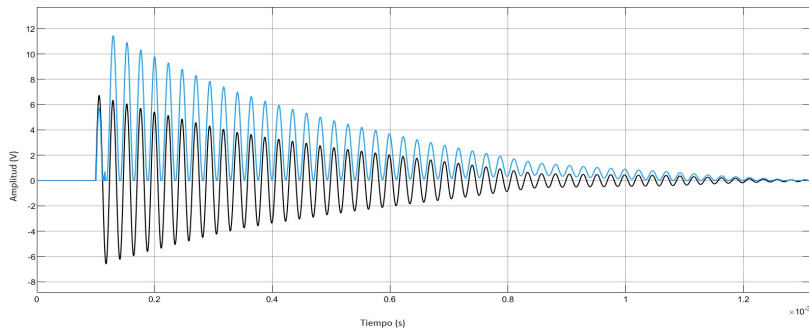


Figura 6.9: Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador bias-flip

Se observa que al poderse realizar de manera correcta la conmutación de la inductancia, esta induce un nivel DC a la salida, permitiendo que un mayor aprovechamiento de la carga generada. Ya para la implementación de este circuito, como se observó con el proyecto de Gabriel Alfonso Rincón-Mora, es necesario un circuito muy complejo, el cual está constituido por elementos no comerciales si no más bien especializados [10].

### 6.2.3. Rectificador de puente completo

En las *figuras 6.10 y 6.11* se observa las formas de onda presentadas al simular el circuito observado en la *figura 5.5*:

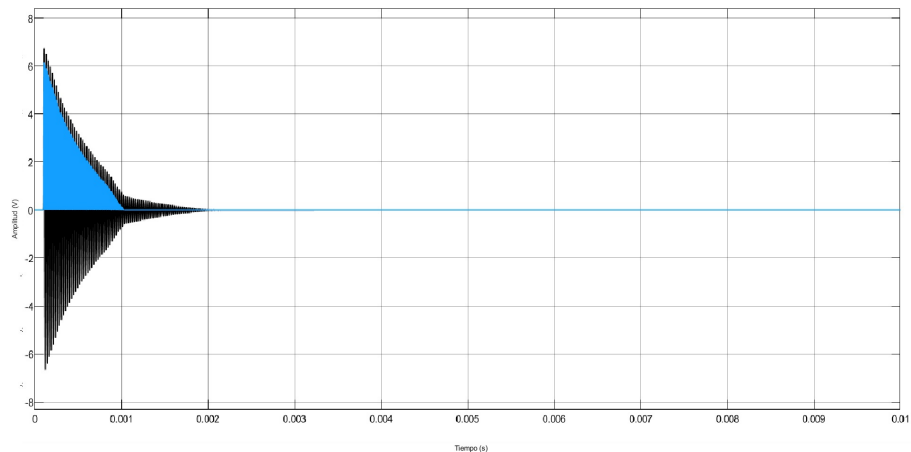


Figura 6.10: Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador de puente completo

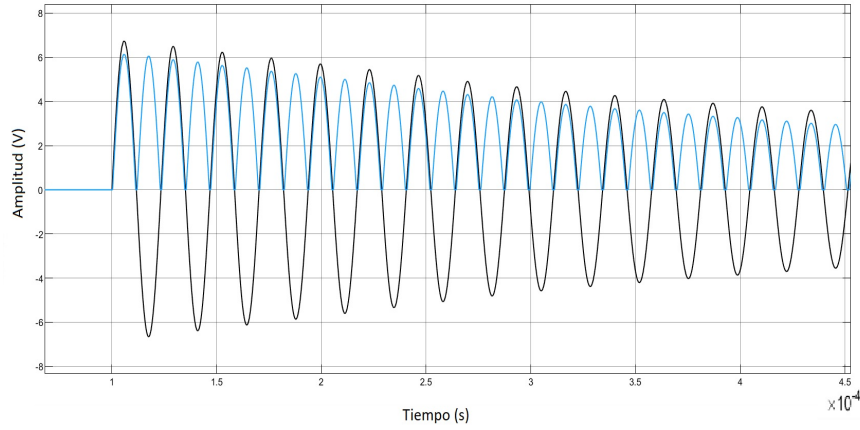


Figura 6.11: Salida (azul) vs entrada (negro) del rectificador de puente completo

Se observa que a comparación de los otros rectificadores, este es el que más pérdidas de tensión a la salida presenta, pero con la ventaja que no necesita ningún tipo de circuito externo para su funcionamiento, además de ser más sencilla su conexión entre diferentes piezoeléctricos, lo que significa además que a su salida solo es necesario implementar un único convertidor para todos los piezoeléctricos.

#### 6.2.4. Selección final

Luego para seleccionar el rectificador a usar, se realizó un análisis de eficiencia frente a la tensión de entrada y la potencia generada, como se observa en la *figura 6.12*.

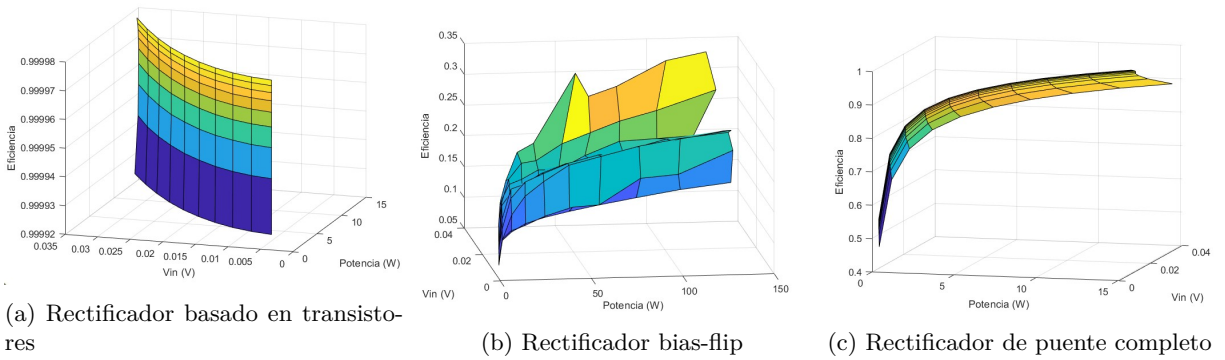


Figura 6.12: Tensión de entrada vs potencia generada vs eficiencia a la salida de cada rectificador

Se observa que el rectificador planteado basado en transistores posee una eficiencia mayor en comparación a los otros dos rectificadores analizados, con la ventaja de no tener una variación muy significativa a la hora de cambiar la tensión de entrada, en su simulación de simulink.

Para comprobar su funcionamiento más real, se implementó el circuito con su respectivo control, en un simulador Pspice como lo es Orcad, para tener una mejor aproximación de su funcionamiento. El circuito implementado se puede observar en la *figura 6.13* y sus formas de onda en la *figura 6.14*.



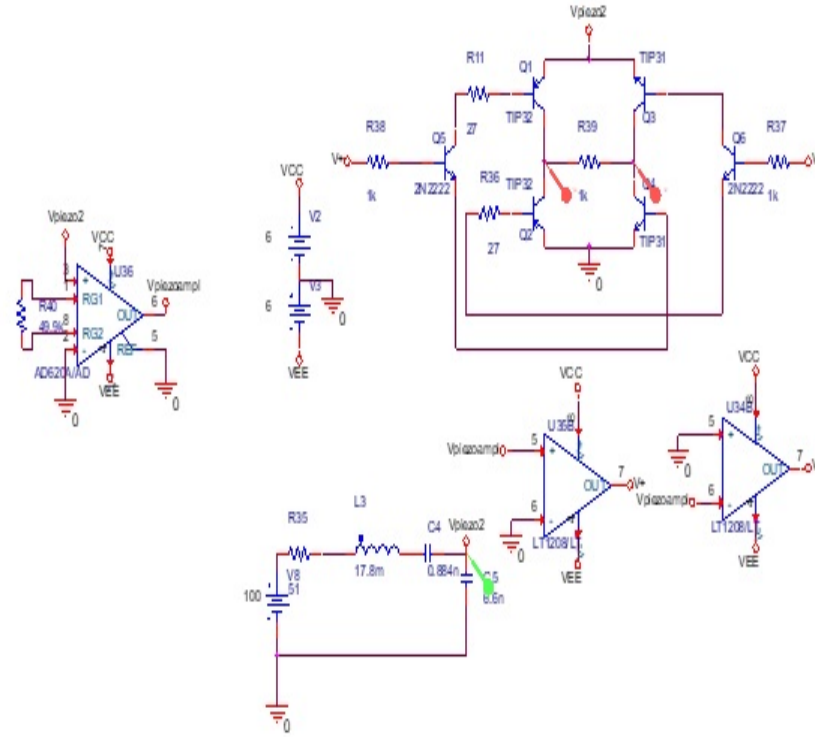


Figura 6.15: Esquemático del circuito real propuesto con una etapa previa de amplificación

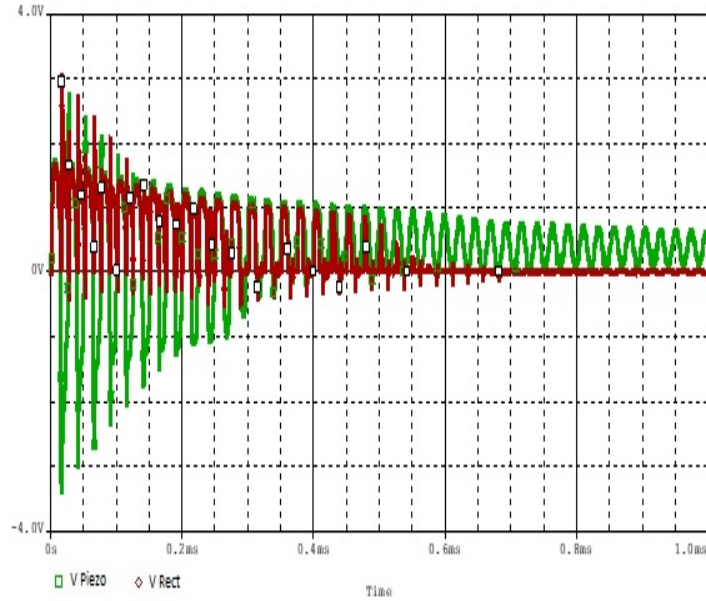


Figura 6.16: Salida del rectificador con etapa de amplificación propuesto (Rojo) vs entrada del rectificador (Verde)

Luego para tener una comparación con el rectificador de puente completo, se implemento el circuito observado en la *figura 6.17*, en Orcad, y en la *figura 6.18* se encuentra la tensión de salida del circuito. Cabe resaltar que los diodos utilizados son diodos schotcky de rápida respuesta, debido a su baja tensión de activación, siendo este aproximadamente de 0,2 V. en la mayoría de casos.

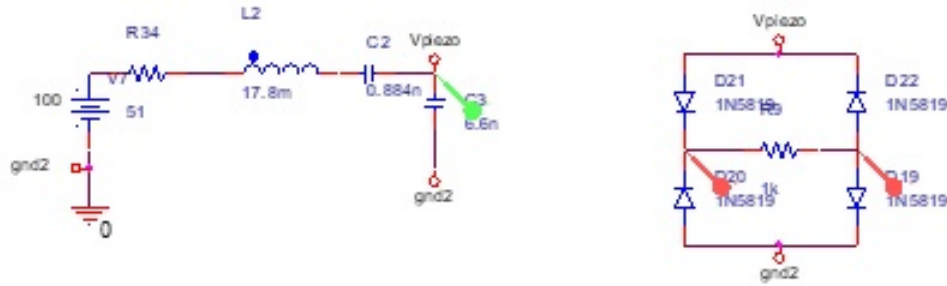


Figura 6.17: Esquemático del rectificador de onda completa con diodos Schotcky

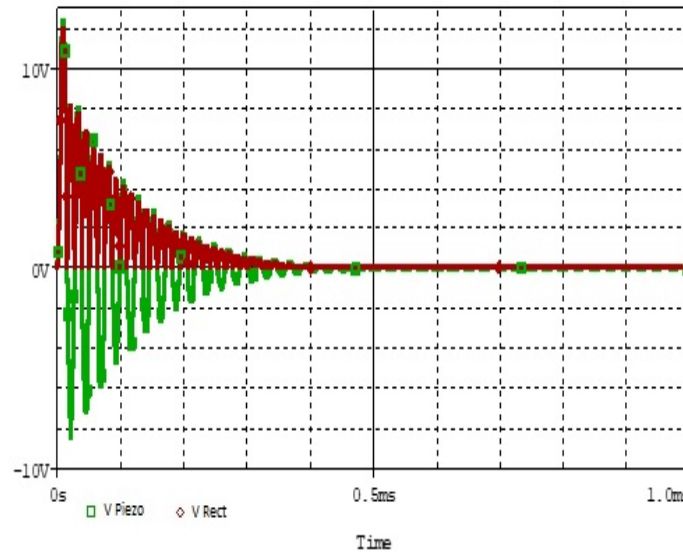


Figura 6.18: Tensión de salida del rectificador (Rojo), vs tensión de entrada (verde)

En la simulación de Orcad, se observa que a comparación con el rectificador basado en transistores, no hay una caída en la tensión de entrada, además de que se nota un comportamiento más similar al presentado en la simulación de simulink. Por lo que se decidió usar para el proyecto el rectificador de puente completo.

### 6.3. Obtención de la tensión máxima

Para la estimación de la tensión máximo generado por los piezoeléctricos, estos se conectaron s de las siguientes maneras:

- Todos los piezoeléctricos en serie.
- Todos piezoeléctricos en paralelo.
- 7 piezoeléctricos en paralelo conectados en serie con 6 piezoeléctricos en paralelo.

En todos los casos se procedió a pisar la baldosa de la misma manera, obteniendo los resultados que se pueden observar en el anexo B.

Durante estas pruebas se encontró, que dependiendo del punto de presión, los piezoeléctricos presentaron una polaridad distinta, causando que la carga total, no se sumará, sino que se restara entre algunos de ellos, debido a esto se decidió que cada piezoeléctrico contara con un sistema de rectificación propio, que se conectará al de los otros piezoeléctricos, para evitar el problema de polarización diferente de cada piezoeléctrico.



Luego de seleccionar el tipo de rectificador como se discutió en la sección anterior, se realizaron las pruebas previamente mencionadas, observando una mejora en los picos generados (ver anexo C), escogiendo al final la conexión de todos los piezoeléctricos en paralelo debido a que con esta distribución se presentan los resultados más consistentes, por otro lado se determinó que si alguno de los piezoeléctricos llega a fallar, no hay una pérdida de carga a causa del diodo inactivo, mientras que si se conectan en serie, si se presenta este tipo de pérdidas.

## 6.4. Selección del capacitor de entrada

Para la selección de la capacitancia de entrada, se golpeo constantemente la baldosa como si se estuviera caminando encima de esta. La prueba fué ejecutada por una persona pesaba 60kg (medidos con una balanza comercial). Cabe resaltar que esta prueba se realizó con los piezoeléctricos conectados a sus respectivos rectificadores, utilizando el modelo de conexión en paralelo que fue el más efectivo según las pruebas realizadas con anterioridad.

También se hicieron varias mediciones del tiempo de carga y de tensión al que se llegó, usando 4 capacitancias comerciales diferentes, para escoger el que mejor rendimiento proporcionara, los resultados se observan en la *tabla 6.1*. (ver pruebas mas detalladas en el anexo E)

| Tiempo de carga(S) | Capacitor(uF) | Tensión (V) |
|--------------------|---------------|-------------|
| 266                | 3300          | 0,041       |
| 108                | 220           | 1,56        |
| 74                 | 100           | 1,7         |
| 5,6                | 4,7           | 1,7         |

Tabla 6.1: Tiempo de carga Vs tensión cargada

Según lo encontrado en la *tabla 6.1* se observa que el capacitor que se carga a una mayor velocidad, y una tensión mayor es el de 4,7 uF, por lo que se seleccionó para desarrollar el prototipo. Por otra parte, teniendo en cuenta que al final se va a almacenar todo en la capacitancia del boost, no es muy importante considerar el tiempo de descarga.

## 6.5. Prototipo

Por último se implementó el circuito observado en la *figura 6.19*, con ayuda de un arduino con el fin realizar el control del boost para la carga de una batería ion-litio.

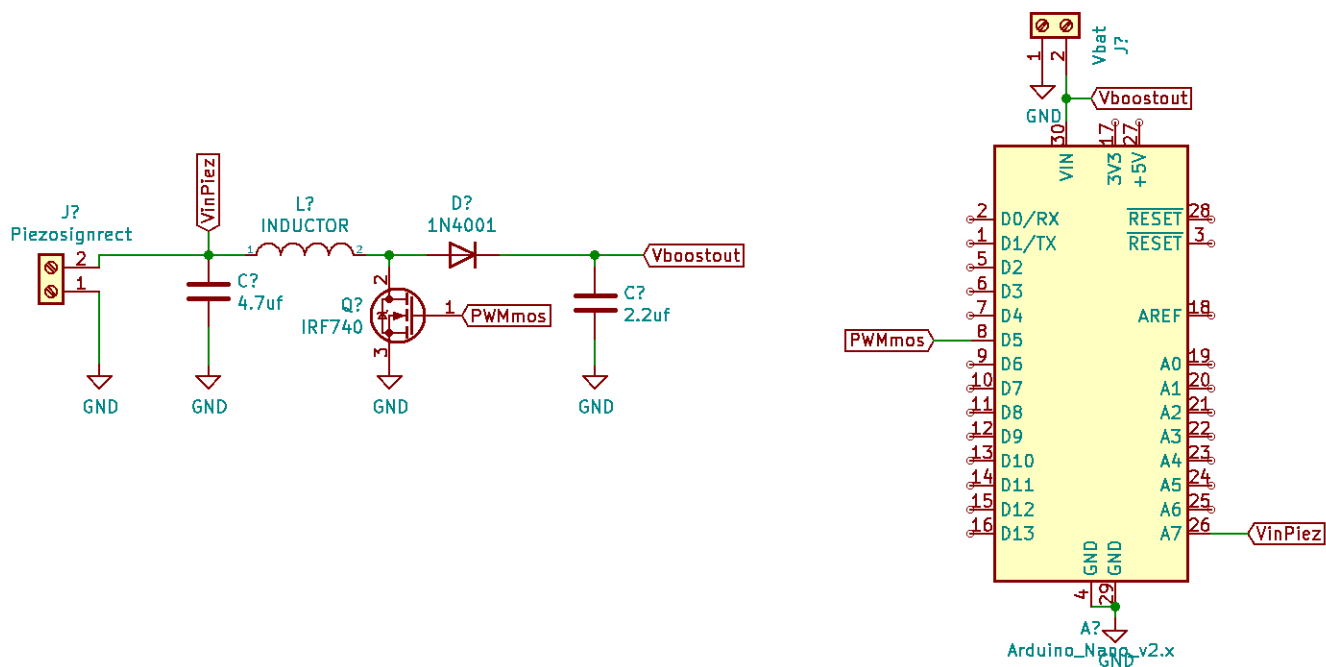


Figura 6.19: Diagrama del prototipo propuesto

Luego de realizar las conexiones de la baldosa con el circuito, se procedió a medir la corriente de la batería, y la tensión que genera la baldosa, primero, cuando la baldosa no tiene ningún tipo de fuerza aplicada, y luego cuando una persona de 60 kg caminaba por encima de esta. Obteniendo las respuestas observadas en la *figura 6.20 y 6.21*

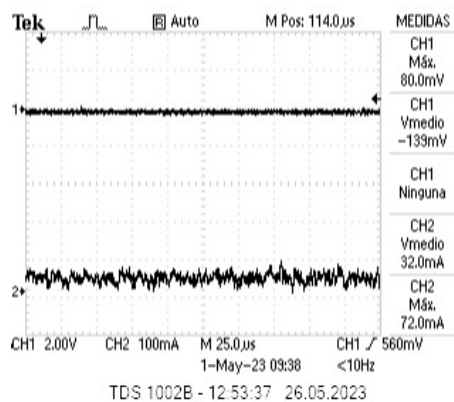


Figura 6.20: Corriente de la batería cuando no hay perturbaciones en la baldosa

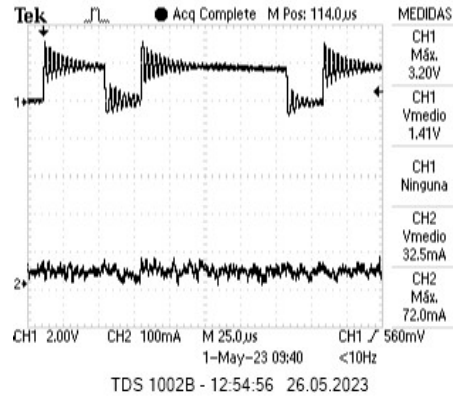


Figura 6.21: Corriente de la batería cuando una persona de 60kg camina sobre la baldosa

Se observa que al haber perturbaciones, se presentan pequeños picos de corriente negativos, lo que indica que el convertidor está cumpliendo con su papel de cargar la batería, aunque sea a pequeña escala, esto se puede determinar un poco mejor si se aumenta la escala de la medida de la corriente como se puede notar en la *figura 6.22*, donde se observa que la corriente media disminuye a 1,92 mA, mientras que cuando no hay perturbación alguna, la corriente media es de 32mA.

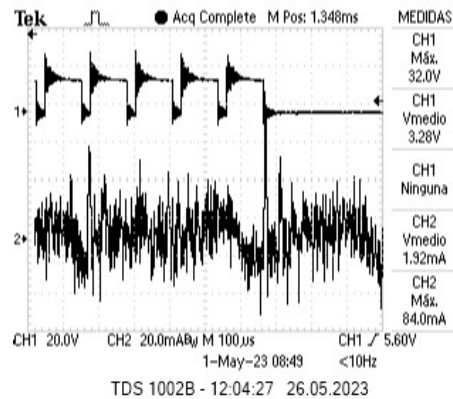


Figura 6.22: Corriente de la batería cuando una persona de 60kg camina sobre la baldosa

Aparte de esta prueba, también se realizaron dos pruebas más, la primera consistió en aplicar una mayor fuerza saltando sobre la baldosa, utilizando diferentes valores de resistencias, para verificar la tensión de salida y la carga que puede llegar a soportar el circuito diseñado, dichos resultados se observan en la *tabla 6.2*.

| Resistencia (Ohms) | Corriente (mA) | Tensión de salida (V) | Potencia (mW) |
|--------------------|----------------|-----------------------|---------------|
| 1                  | 0              | 0,00                  | 0,00          |
| 100                | 46             | 0,15                  | 6,90          |
| 1000               | 48             | 0,33                  | 15,94         |
| 10000              | 56             | 0,56                  | 31,36         |
| 100000             | 72             | 0,76                  | 54,72         |
| 1000000            | 64             | 1,20                  | 76,80         |

Tabla 6.2: Respuesta del circuito con diferente carga

Con estos resultados se logró determinar que una persona de 60kg logra generar  $76,8 \text{ mW}$  por pisada con una carga

muy pequeña, lo cual corresponde con lo analizado en la *sección 5.6*, al transferirse más energía al tener una carga mayormente capacitiva.

La segunda prueba consistió en simular un caminado sobre la baldosa, también utilizando como carga diferentes valores de resistencia, para verificar el comportamiento del circuito en una situación mas real. Dichos resultados se pueden observar en la *figura 6.23*.

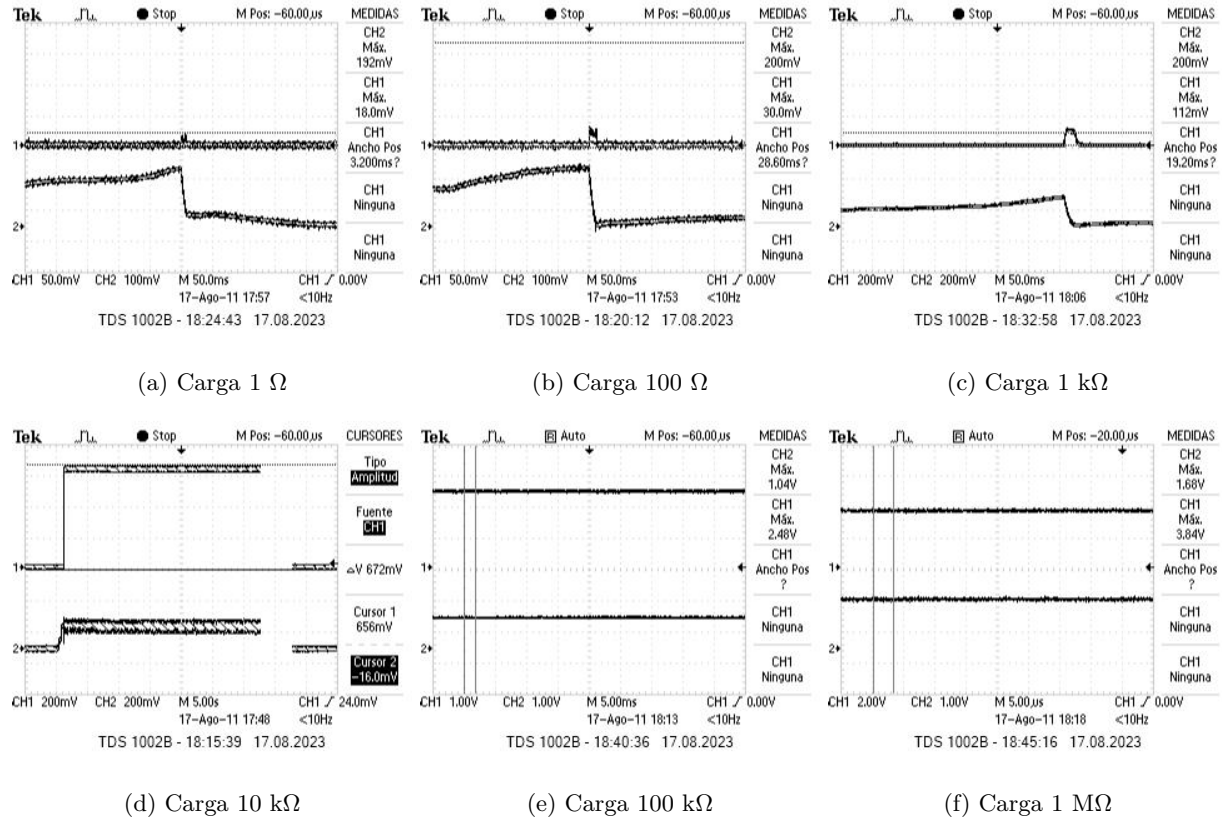


Figura 6.23: Caminado constante sobre la baldosa con diferentes valores de resistencia (ch2 tensi3n en el capacitor de entrada, ch1 tensi3n a la salida del boost)

Al igual que en la simulaci3n de la *figura 5.7*, cuando la carga es muy grande para el piezoel3ctrico, a la salida solo se logran obtener picos de tensi3n aunque el caminado sea constante, mientras que si la carga es peque1a se logra mantener una tensi3n constante con una amplificaci3n de tensi3n variable debido a que el circuito se encuentra a circuito abierto.

## Capítulo 7

# Conclusiones y Trabajos Futuros

### 7.1. Conclusiones

- A pesar de que en estudios previos se había realizado una selección diferente de los piezoeléctricos a usar (ver [13]), en este estudio se obtuvo un resultado diferente principalmente porque anteriormente no se había tenido en cuenta la diferencia geométrica entre los piezoeléctricos estudiados, siendo el piezoeléctrico grande un anillo y no un disco, por lo que la fuerza tiene que ser aplicada en los bordes del sensor para obtener una mejor respuesta. Además de su mejor eficiencia, los piezoeléctricos grandes presentaron mayores ventajas mecánicas al contar estos ya con su recubrimiento, permitiéndoles soportar un estrés mecánico mayor que los demás piezoeléctricos, que al no tener un recubrimiento, estos tendían a romperse con mayor facilidad.
- De los sistemas de recolección analizados, se comprobó, tras varias simulaciones que el rectificador de puente completo, a pesar de ser al más sencillo, fue el sistema de recolección más eficiente, siendo el indicado para el proyecto.
- El rectificador propuesto en un principio, que presentaba una mejor eficiencia teórica, al momento de agregar en la simulación lo otros factores como el sistema de medición y control, se pudo determinar, que su eficiencia empeoró, quedando incluso por debajo de los otros sistemas analizados.
- Se observó que el sistema diseñado logró aportar carga a la batería, viéndose esto reflejado en la variación de la corriente que se observa en la *figura 6.22*, al presentarse picos negativos. Cabe resaltar que este tipo de picos no son ideales para la batería, pudiéndose mejorar el sistema al aplicar un sistema de control de corriente combinado con algoritmo mppt.
- Si bien el generador diseñado solo alcanza a generar 6,9 mW por paso, se pueden alcanzar los 5W, aproximadamente con 725 pasos de una persona de 60 kg, con una carga de 100  $\Omega$ , disminuyendo la cantidad de pasos con una carga de menor consumo, lo que permite determinar que para este tipo de generadores, mas que la fuerza aplicada, lo que tiene mas impacto en la energía generada, es la frecuencia del impacto.

### 7.2. Trabajos futuros

- Diseñar una baldosa más compacta, que permita una aplicación uniforme de la fuerza para todos los piezoeléctricos, y así poder conectar todos los piezoeléctricos a un solo sistema de rectificación, evitando pérdidas, sin mencionar que así mismo se podrían conectar todos los piezoeléctricos en serie para obtener una capacitancia parásita equivalente menor.
- Implementar un sistema de sensado de corriente de la batería para así poder implementar un algoritmo mppt para la carga de la batería.
- Realizar un estudio de para encontrar la frecuencia mecánica de resonancia de los piezoeléctricos, para así poder determinar mejor la ubicación de las baldosas.

# Bibliografía

- [1] Acolgen. *Capacidad instalada en Colombia*. 2019. URL: <https://www.acolgen.org.co/>.
- [2] Santiago Arango Aramburo. *Herramienta para la valoración y priorización de medidas de adaptación al cambio climático en el sector minero energético colombiano Informe de avance Dirección: Presentado a: Abril de 2018*. Inf. téc. minminas, 2018.
- [3] EAFIT. *El Niño, la crisis energética y las lecciones que se aprendieron*. 2017. URL: <https://www.eafit.edu.co/medios/eleafitense/110/Paginas/el-nino-crisis-energetica.aspx>.
- [4] Transmilenio. *Colombia, segundo país en Latinoamérica en movilizar pasajeros en sistemas de transporte BRT*. 2018. URL: [https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150078/publicacionescolombia\\_segundo\\_pais\\_en\\_latinoamerica\\_en\\_movilizar\\_pasajeros\\_en\\_sistemas\\_de\\_transporte\\_brt/](https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150078/publicacionescolombia_segundo_pais_en_latinoamerica_en_movilizar_pasajeros_en_sistemas_de_transporte_brt/).
- [5] Banco de Desarrollo de América Latina. *Crecimiento urbano y acceso a oportunidades: un desafío para América Latina RESUMEN EJECUTIVO*. Inf. téc. Banco de Desarrollo de América Latina, 2017.
- [6] DANE. *Viviendas, Hogares y Personas (VIHOPE)*. 2018. URL: <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=e53e1178fb1f497cac9b241dbafb1690>.
- [7] Liu Na et al. «A review on vibration energy harvesting». En: *E3S Web of Conferences*. Vol. 245. EDP Sciences, mar. de 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202124501041.
- [8] Institute of Electrical et al. «Piezo Electric Energy Harvester and its Interface Circuit: Opportunities and Challenges». En: (2013).
- [9] Yanhui Han et al. «A Study on Piezoelectric Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks Deployed in a Weak Vibration Environment». En: *IEEE Sensors Journal* 17 (20 oct. de 2017), págs. 6770-6777. ISSN: 1530437X. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2747122.
- [10] Gabriel Alfonso Rincón-Mora. «Miniaturized Energy-Harvesting Piezoelectric Chargers Miniaturized Energy-Harvesting Piezoelectric Chargers Miniaturized Energy-Harvesting Piezoelectric Chargers». En: (2010). URL: [www.Rincon-Mora.com](http://www.Rincon-Mora.com).
- [11] UPME. *Informe 2021 Subdirección de demanda*. Inf. téc. UPME, 2021.
- [12] Valeriy Sharapov. *Piezoceramic Sensors*. Ed. por Fujita Hiroyuki y Liepmann Dorian. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, págs. 1-2.
- [13] Milton Ricardo Rojas Luna. «Desarrollo de un sistema de generacion de energia a partir de la piezoelectricidad 29 de mayo». Tesis doct. 2018.
- [14] Christopher A. Howells. «Piezoelectric energy harvesting». En: *Energy Conversion and Management* 50 (7 jul. de 2009), págs. 1847-1850. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.02.020.
- [15] Saleh Gareh et al. «Evaluation of piezoelectric energy harvester outcomes in road traffic applications». En: (2016).
- [16] Edwin Forero-García, Oscar Gelvez-Lizarazo y Carlos Torres-Pinzón. «Piezoelectric transducer design for electric power generation». En: *Revista UIS Ingenierías* 18 (1 ene. de 2019), págs. 119-126. ISSN: 16574583. DOI: 10.18273/revuin.v18n1-2019010. URL: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/8327/8344>.
- [17] Sergio Rincón-Murcia et al. «Electronic unit for the management of energy harvesting of different piezo generators». En: *Crystals* 11 (6 jun. de 2021). ISSN: 20734352. DOI: 10.3390/cryst11060640.
- [18] OEI. *Intelligo patentes*. 2020. URL: <http://patentes.explora-intelligo.info/>.

- [19] Oscar Javier y Borda García. «MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO». Tesis doct. 2019.
- [20] Gabriela Pasquini. *Laboratorio 4 piezoeléctrico*. 2016.
- [21] Álvaro Gómez Molina. «Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos». UNIVERSIDAD DE ALCALÁ, 2018.
- [22] Sundee Javvaji et al. «Analysis and Design of a Multi-Step Bias-Flip Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting». En: *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 54 (9 sep. de 2019), págs. 2590-2600. ISSN: 1558173X. DOI: 10.1109/JSSC.2019.2917158.
- [23] Rafael Luciano Radin Marcio Bender Machado Mohamad Sawan Carlos Galup-Montoro Marcio Cherem Schneider. *Ultra-low Voltage Circuit Techniques for Energy Harvesting*. 2022, págs. 91-111. URL: <https://link.springer.com/bookseries/7381>.
- [24] ZIBO. *Piezoelectric column*. 2021. URL: [http://www.yuhaipiezo.com/product/Piezoelectric-column-%5C%CE%5C%A616.76%5C%C3%5C%9719.69mm-106.html#c\\_portalResMessage\\_form-16009603552989246](http://www.yuhaipiezo.com/product/Piezoelectric-column-%5C%CE%5C%A616.76%5C%C3%5C%9719.69mm-106.html#c_portalResMessage_form-16009603552989246).
- [25] Ltd. Zibo Yuhai Electronic Ceramic Co. *Anillo piezoeléctrico de alta potencia PZT-8*. URL: <https://es.yhpiezo.com/piezoelectric-rings-for-ultrasonic-machining/57230446.html>.
- [26] Daniel Monje Centeno. *Conceptos Electrónicos en la Medida de la Aceleración y la Vibración*, Escuela Politécnica de Sevilla España, 2010, págs. 7-16.

# Capítulo 8

## ANEXOS

### 8.1. Anexo A:

En esta sección se muestra el montaje para la selección del piezoeléctrico en las *figuras 8.1, 8.2 y 6.1*. La tabla de comparación potencia generada Vs fuerza aplicada (*tabla 8.1*). Y el script usado para la medición de la fuerza y el control del solenoide.

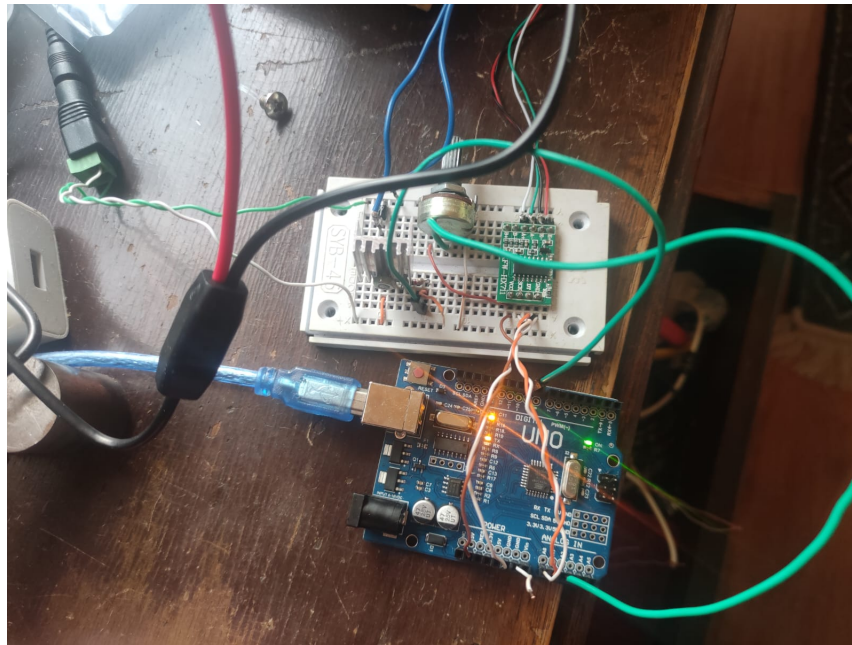


Figura 8.1: Circuito implementado para control del solenoide



Figura 8.2: Soporte del solenoide y celda de carga



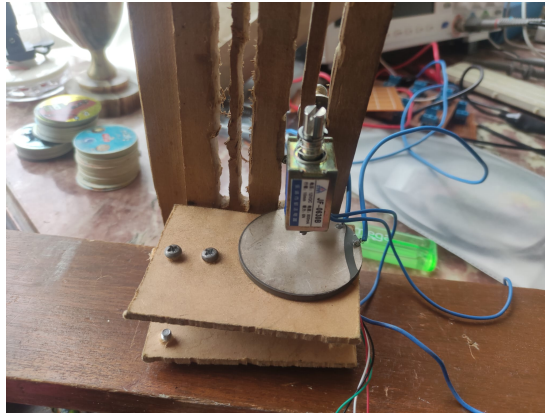


Figura 8.3: Montaje realizado para el piezoeléctrico mediano

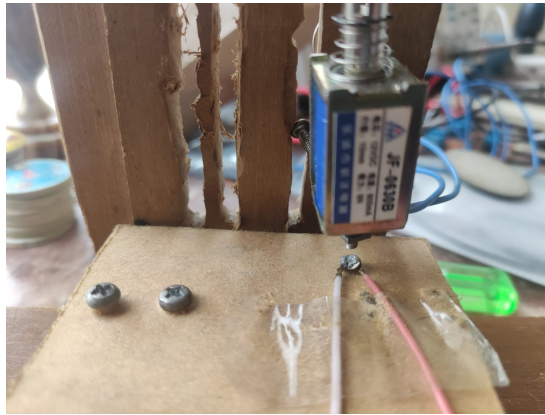


Figura 8.4: Montaje realizado para el piezoeléctrico pequeño

| Fuerza ingresada (N) | Potencia instantanea<br>pico generada<br>piezo grande (mW) | Potencia instantanea<br>pico generada<br>piezo pequeño (mW) | Potencia instantanea<br>pico generada<br>piezo mediano (mW) |
|----------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1,0769               | 0,62322042                                                 | 0,07884375                                                  | 0,118815                                                    |
| 0,90068              | 0,44548167                                                 | 0,05251042                                                  | 0,096                                                       |
| 0,85173              | 0,26004167                                                 | 0,04732042                                                  | 0,07385042                                                  |
| 0,77341              | 0,24448167                                                 | 0,03650667                                                  | 0,03850667                                                  |
| 0,5874               | 0,20184                                                    | 0,0331115                                                   | 0,04160667                                                  |
| 0,4895               | 0,10668167                                                 | 0,0268182                                                   | 0,036015                                                    |
| 0,3916               | 0,05766                                                    | 0,0190104                                                   | 0,03850667                                                  |
| 0,37202              | 0,0460651                                                  | 0,0179747                                                   | 0,04482667                                                  |
| 0,2937               | 0,0268605                                                  | 0,0143376                                                   | 0,03220167                                                  |
| 0,22517              | 0,01643415                                                 | 0,00805042                                                  | 0,00805042                                                  |

Tabla 8.1: Medidas Fuerza Vs Potencia generada para cada piezoeléctrico

```

1      #include "HX711.h"
2
3      const int DOUT=A1;
4      const int CLK=A2;
5      const int PushPullAct = 6;
6      const int addforce = 8;
7      const int subsforce = 4;
8      const int PWM_PIN = 3;

```

```

9      byte starStop;
10     byte prevadd =0;
11     byte prevsubs =0;
12     byte prevState = false;
13     bool start = false;
14     bool add = false;
15     bool subs = false;
16     int PWM_val=0;
17     void setup() {
18         // put your setup code here, to run once:
19         Serial.begin(9600);
20         balanza.begin(DOUT, CLK);
21         Serial.print("Lectura del valor del ADC: ");
22         Serial.println(balanza.read());
23         Serial.println("No ponga ningun objeto sobre la balanza");
24         Serial.println("Destarando...");
25         Serial.println("...");
26         balanza.set_scale(9272); // Establecemos la escala
27
28         balanza.tare(20); //El peso actual es considerado Tara.
29
30         Serial.println("Listo para pesar");
31         pinMode(PWM_PIN,OUTPUT);
32         //TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000001;
33         pinMode(PushPullAct, INPUT_PULLUP);
34         pinMode(addforce, INPUT_PULLUP);
35         pinMode(subsforce, INPUT_PULLUP);
36
37     }
38
39     void loop() {
40         starStop = digitalRead(PushPullAct);
41         add = digitalRead(addforce);
42         subs = digitalRead(subsforce);
43         if(starStop ==0 && !start && prevState != starStop){
44             start =true;
45         }
46         else if(starStop ==0 && start && prevState != starStop){
47             start= false;
48         }
49         if(add==1&&PWM_val<255&&prevadd==0){
50             Serial.print("kks1");
51             PWM_val = PWM_val+5;
52             Serial.print("PWM_val");
53             Serial.println(PWM_val);
54         }
55         else if(subs==1&&PWM_val>0&&prevsubs==0){
56             Serial.print("kks1");
57             PWM_val = PWM_val-5;
58             Serial.print("PWM_val");
59             Serial.println(PWM_val);
60         }
61
62         if(start){
63             analogWrite(PWM_PIN,PWM_val);
64
65         }else{
66             analogWrite(PWM_PIN, 0);
67         }
68         //Serial.print("Peso: ");
69         Serial.println(balanza.get_units(),3);
70         //Serial.println(" kg");

```

```
71
72
73     if(istare == 'A'){
74         istare = 1;
75         balanza.set_scale(9272);
76         balanza.read();
77         balanza.tare(20);
78     }
79     istare = Serial.read();
80     prevState = starStop;
81     prevadd = add;
82     prevsubs = subs;
83 }
```

## 8.2. Anexo B:

En esta sección se muestra el montaje realizado para determinar el voltaje que puede llegar a generar la baldosa conectando los piezoeléctricos de diferentes formas y sus resultados:



Figura 8.5: Conexión de los piezoeléctricos dentro de la baldosa



Figura 8.6: Baldosa puesta sobre celdas de carga para realizar las pruebas

### 8.2.1. Resultados todos los piezoeléctricos en paralelo

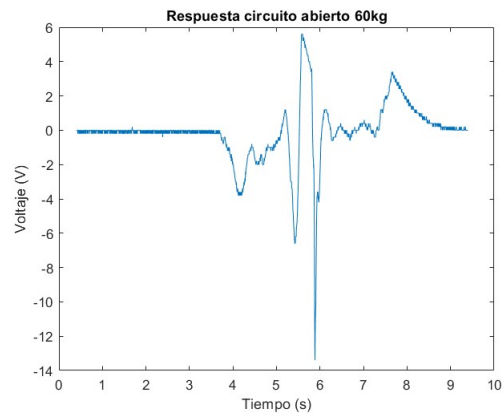


Figura 8.7: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto

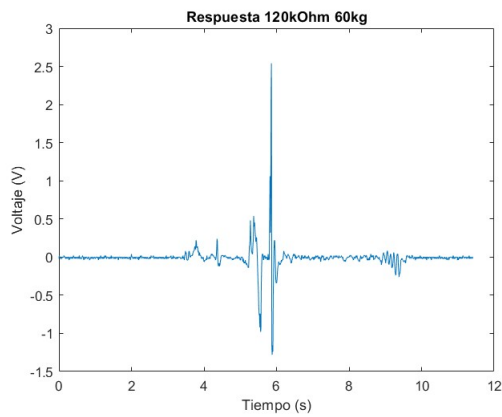


Figura 8.8: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm

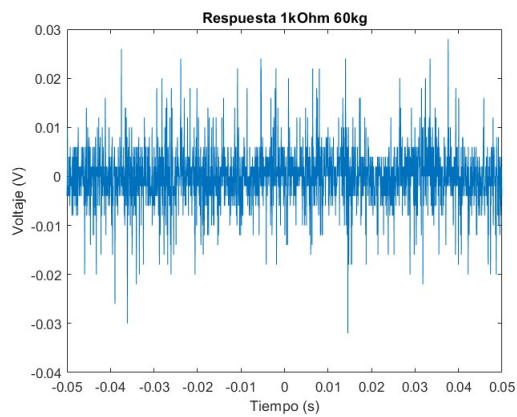


Figura 8.9: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 1k Ohm

### 8.2.2. Resultados todos los piezoeléctricos en serie

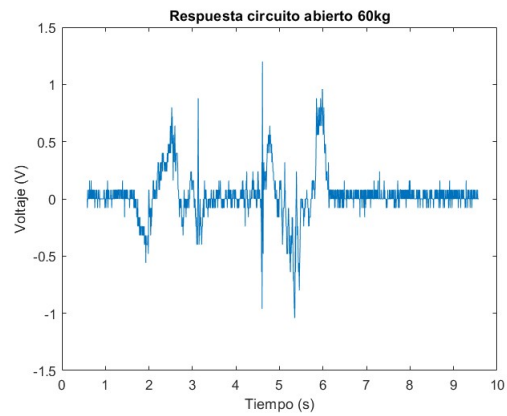


Figura 8.10: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto

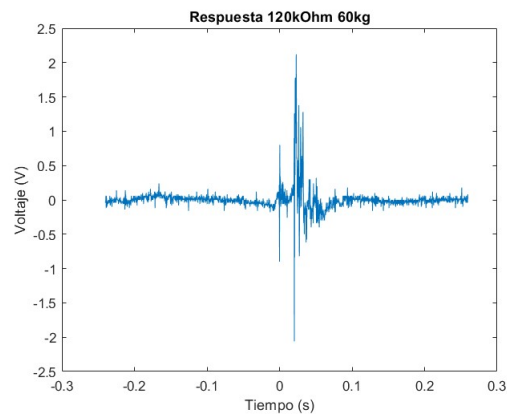


Figura 8.11: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm

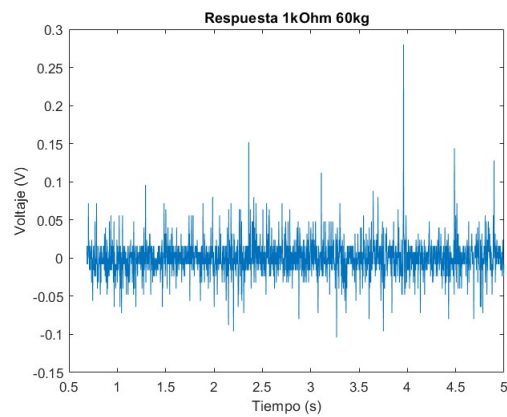


Figura 8.12: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 1k Ohm

### 8.2.3. Resultados 7 piezoeléctricos conectados en paralelo, en serie con 6 piezoeléctricos conectados en paralelo

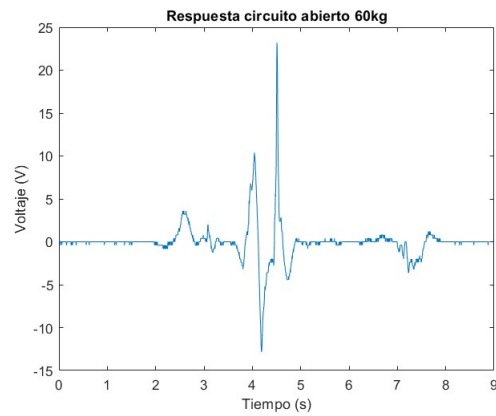


Figura 8.13: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto

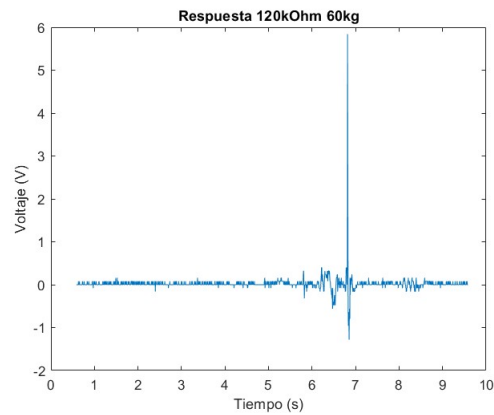


Figura 8.14: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm

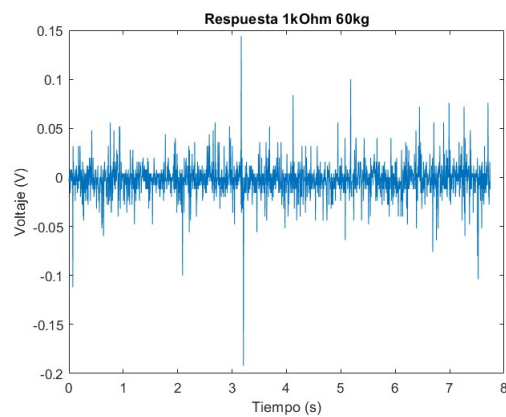


Figura 8.15: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 1k Ohm

## 8.3. Anexo C:

En esta sección se muestran las mismas pruebas realizadas en el anexo B, para cuando cada piezoeléctrico tiene su propio rectificador:

### 8.3.1. Resultados todos los piezoeléctricos en serie

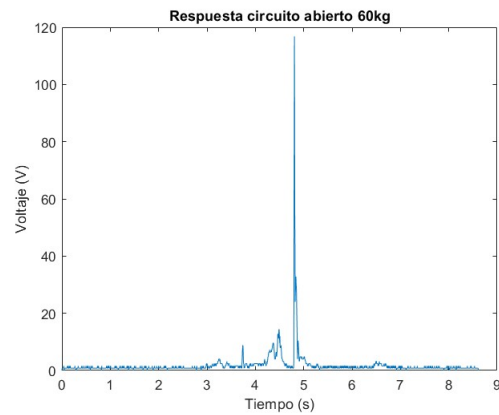


Figura 8.16: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto

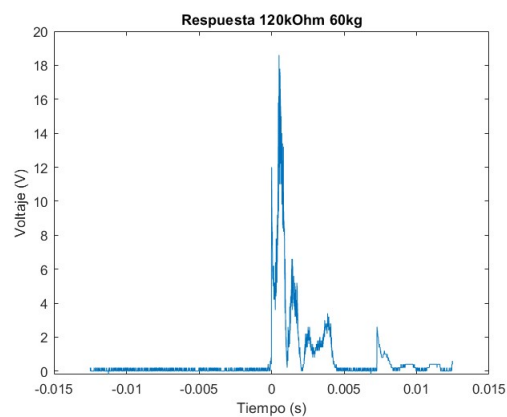


Figura 8.17: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm

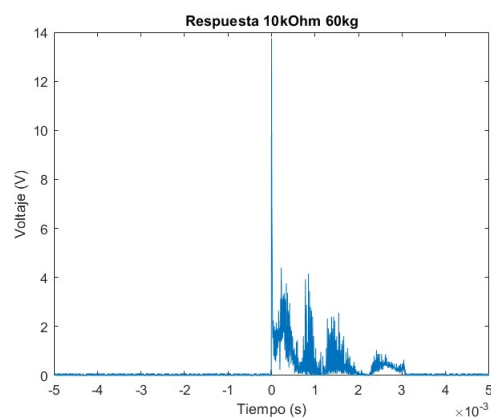


Figura 8.18: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 10k Ohm



### 8.3.2. Resultados todos los piezoeléctricos en paralelo

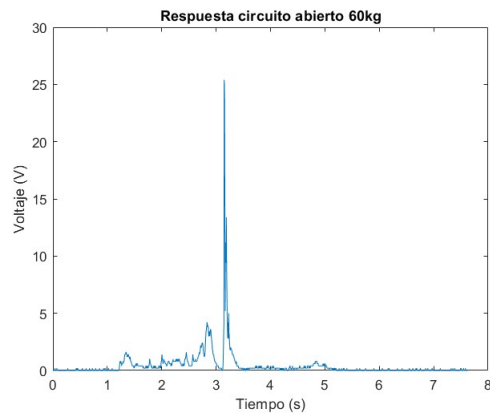


Figura 8.19: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto

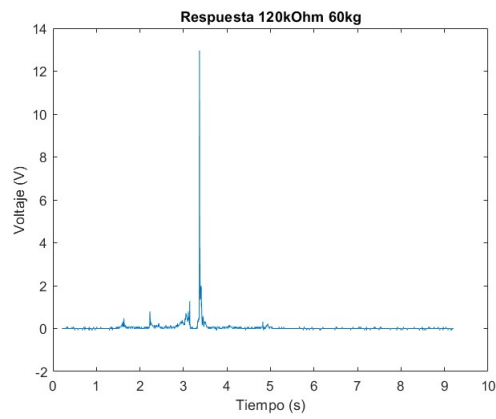


Figura 8.20: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm

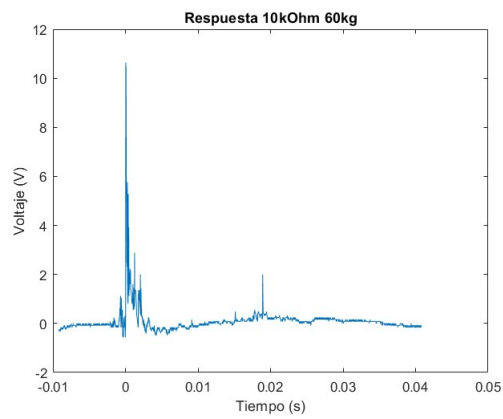


Figura 8.21: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 10k Ohm

### 8.3.3. Resultados 7 piezoeléctricos conectados en paralelo, en serie con 6 piezoeléctricos conectados en paralelo

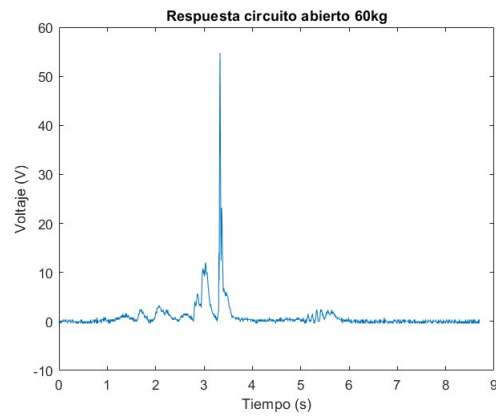


Figura 8.22: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse en circuito abierto

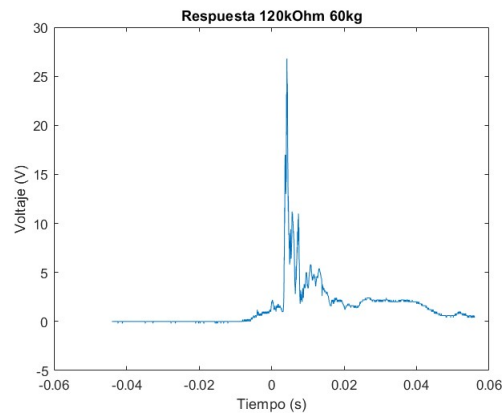


Figura 8.23: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm

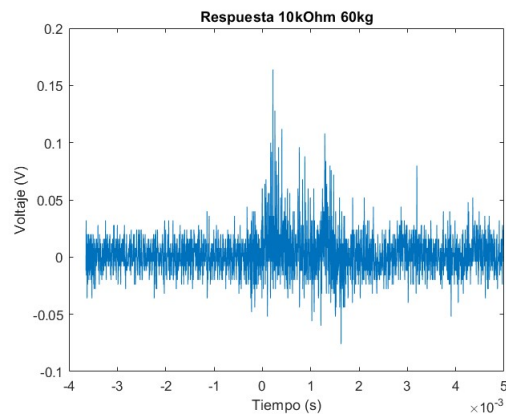


Figura 8.24: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 10k Ohm

### 8.3.4. Resultados conexión en serie de parejas en paralelo

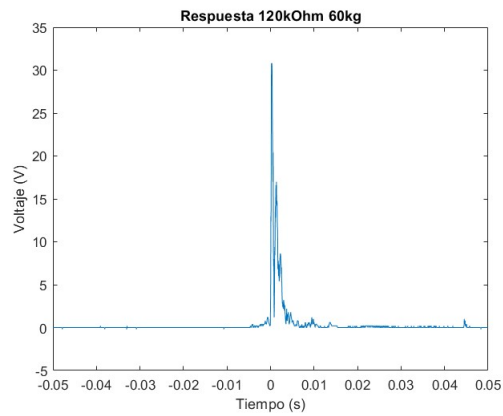


Figura 8.25: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 120k Ohm

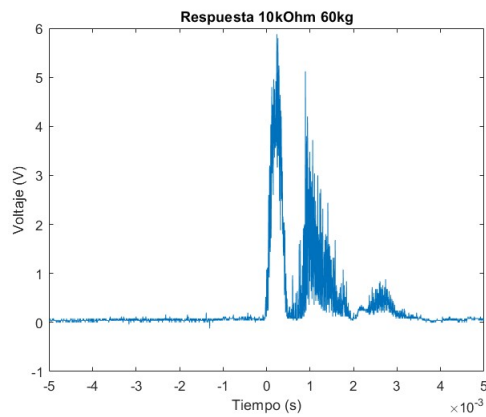


Figura 8.26: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 10k Ohm

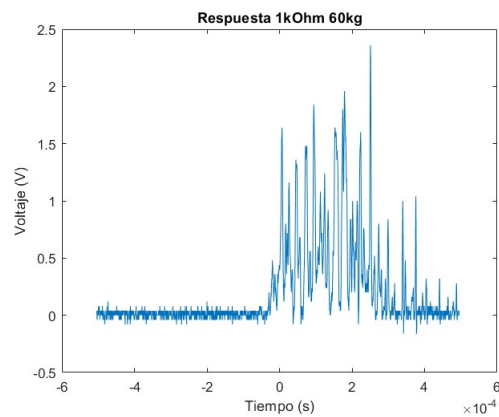


Figura 8.27: Resultados de subir a la baldosa, saltar y bajarse con una carga de 1k Ohm

## 8.4. Anexo D: Simulación del rectificador bias-flip

En este anexo se muestra el esquemático del rectificador bias-flip y el script utilizado para calcular todos los valores utilizados para simular los rectificadores analizados.

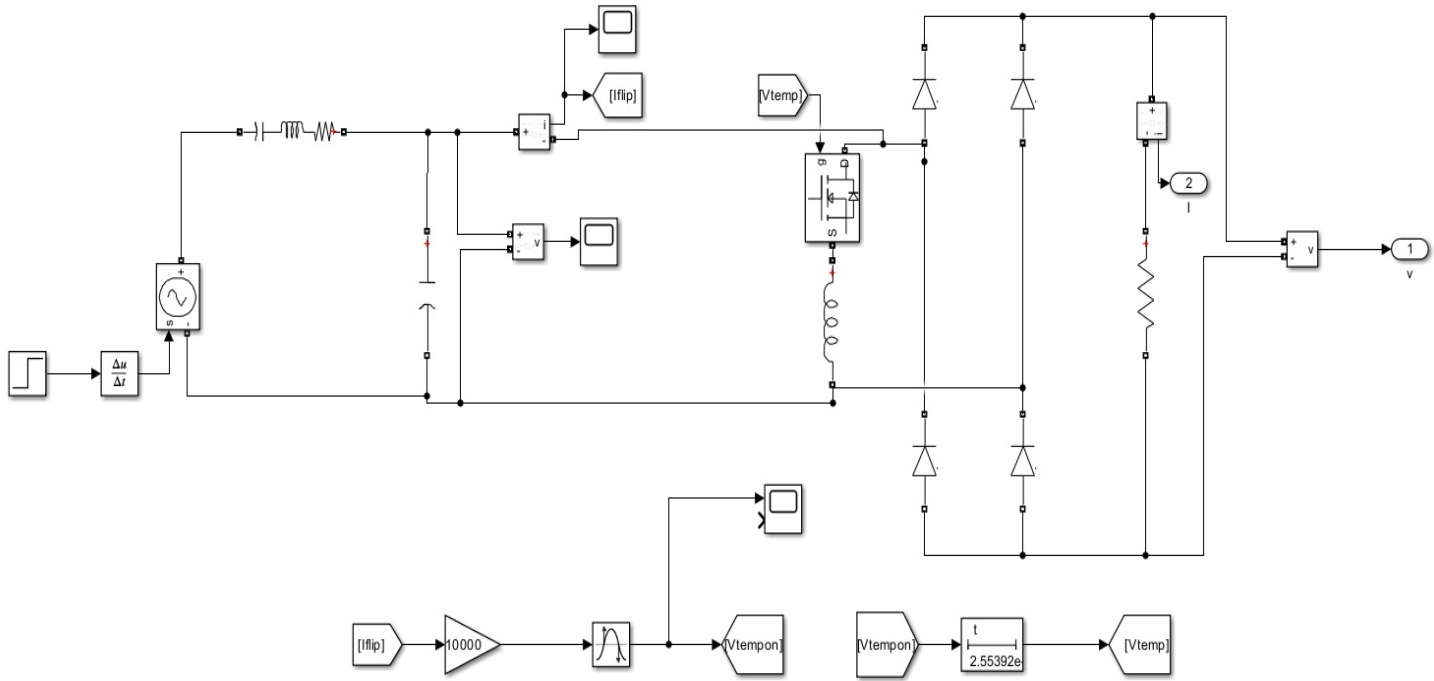


Figura 8.28: Rectificador bias-flip ver 2

```

1      clear all
2      clc
3      %RawMeassure = csvread('D:\Usta\2022-1\Tesis\Avances\Datoscarga240k\F1355g.csv
4      ',0,4,[0,4,2499,4]);
5      t = [0:1e-4:0.25-1e-4].';
6      Fr = 40.1e3;
7      Fs = 42.7e3;
8      Fmas =41.3e3;
9      Fmenos= 31.9e3;
10     %Fmenos2= 48e3;
11     Q = Fr/(Fmas-Fmenos);
12     %Q2 = Fr/(Fmenos2-Fmas);
13     Vsource = 20.4;
14     Vmaxtrans = 19.4;
15     Rref = 1e3;
16     R = ((Vsource-Vmaxtrans)/(Vmaxtrans))*Rref;
17     L = Q*(Rref+R)/(2*pi*Fr);
18     C = 1/(((2*pi*Fr)^2) *L);
19     Co = C/(L*C*(2*pi*Fs)^2-1);
20     %L2 = Q2*(R+Rref)/(2*pi*Fr);
21     %C2 = 1/((2*pi*Fr)^2 *L2);
22     %Co2 = (C2 * Fr^2)/(Fs^2-Fr^2);
23     Fuer = 1;
24     g33 = 25e-5;
25     D = 38.3e-3;
26     Dm = 18.3e-3;

```

```

26     h = 1.2e-2;
27     A = pi*(D/2)^2-pi*(Dm/2)^2;
28     lamb = (g33*h)/A;
29     Ampl = Fuer*lamb;
30     RL = 240e3;
31     %% Parametros bias flip
32     Lbf= 100e-6;
33     Cs= 4.2e-6;
34     Tbf = pi*sqrt(Lbf*Co);
35     Ctemp= 1e-9;
36     Rtem = Tbf/(5*Ctemp);
37
38     %% Eficiencia
39     wo = 1/(sqrt(Lbf*Co));
40     Qlf = wo*Lbf/R;
41     nflip= 1/2+1/2*(1-pi/(2*Qlf));
42
43     %% Parametros boost
44     Vo = 5;
45     Vs = 0.2;
46     Rob = 10e3;
47     Iob= Vo/Rob;
48     Fsb = 7794;
49     Lb = 1e-3;
50     Deltavb = 0.015;
51     Db = (Vo-Vs)/Vo;
52     Deltaib = (Vs*Db)/(2*Lb*Fsb);
53     Cb = (Vo*Db)/(2*Deltavb*Rob*Fsb);
54     ILb = Vo/(Rob*(1-Db));
55     Pob = Vo*Iob;
56     FRb = 0.1;
57     Reqb = Rob*(1-Db)^2;
58     Cfuelle = 4*(1+1/(sqrt(2)*FRb))/(4*60*Reqb);

```

## 8.5. Anexo E:

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas de carga de distintos valores de condensador de entrada para el boost, siendo la entrada medida por el ch1 y la salida del boost por ch2, cuando este se encuentra en circuito abierto.

### 8.5.1. Carga del condensador de 4.7 $\mu\text{F}$

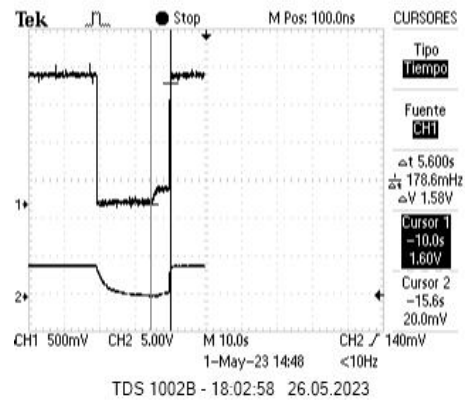


Figura 8.29: Tiempo de de carga del condensador

### 8.5.2. Carga del condensador de 100 $\mu\text{F}$

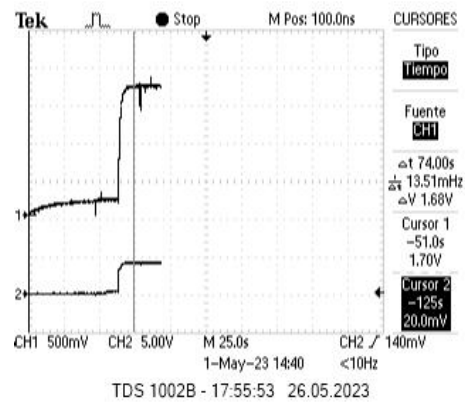


Figura 8.30: Tiempo de de carga del condensador

### 8.5.3. Carga del condensador de 220 uF

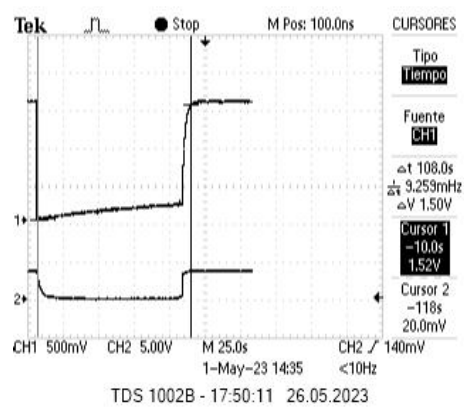


Figura 8.31: Tiempo de de carga del condensador

### 8.6. Anexo F:

En esta sección se muestran otras pruebas aplicando diferente fuerza:

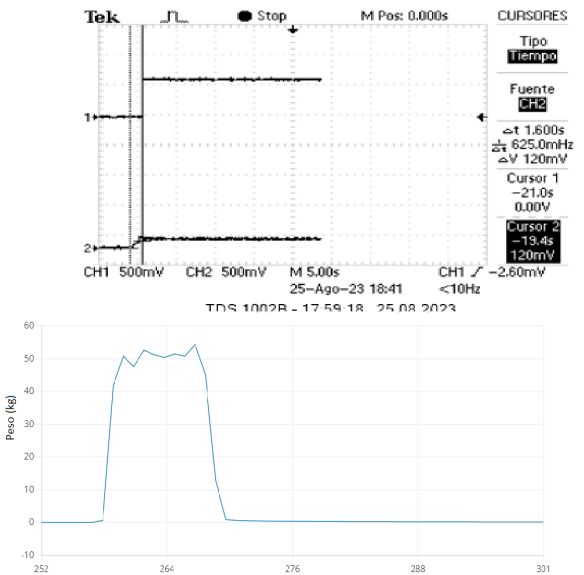


Figura 8.32: Pruebas de fuerza caminado 60kg

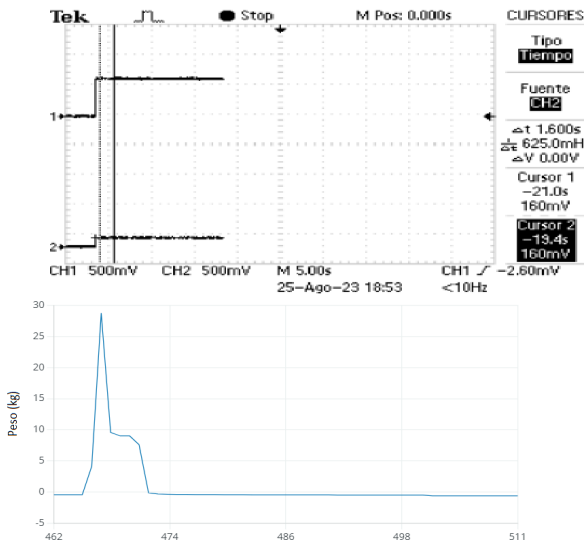


Figura 8.33: Pruebas de fuerza pisoton 60kg



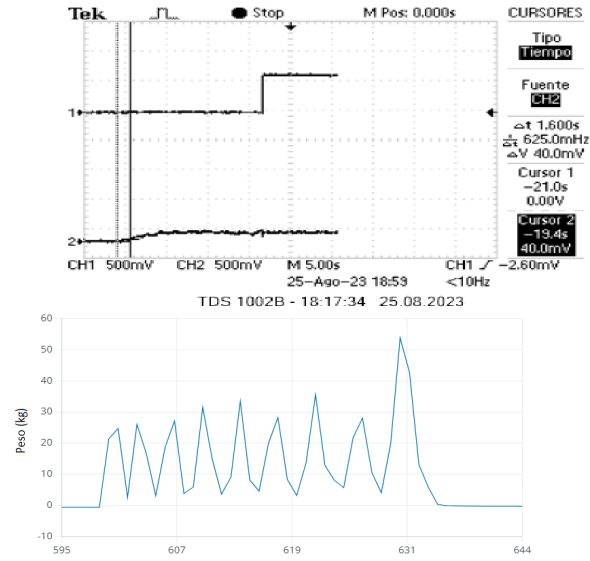


Figura 8.34: Pruebas de fuerza caminado 30kg

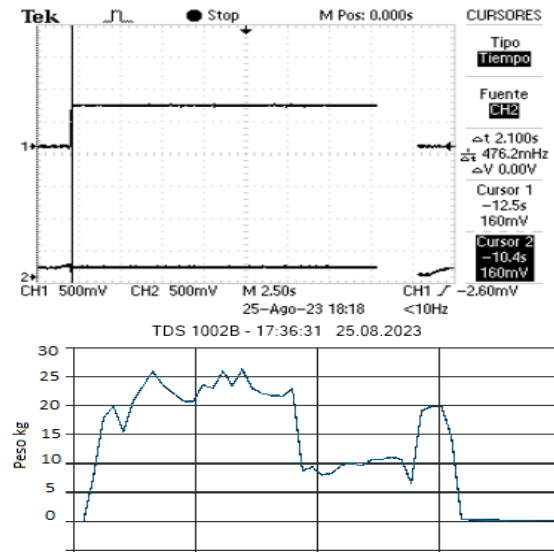


Figura 8.35: Pruebas de fuerza caminado 30kg 2

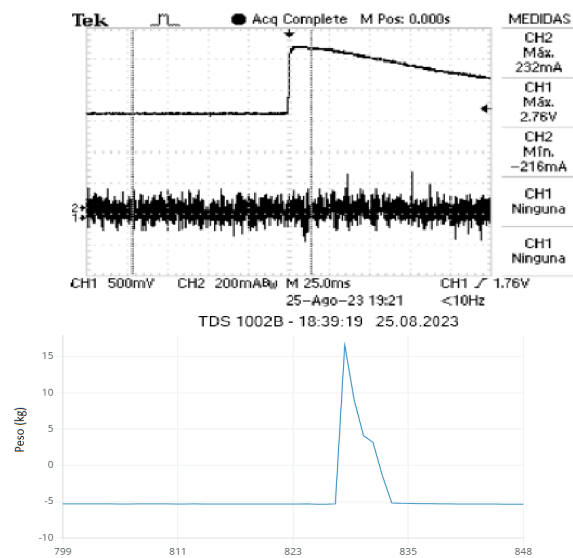


Figura 8.36: Pruebas de fuerza pisoton 30kg con bateria