

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL FENÓMENO DE PIEZOELECTRICIDAD.

PROPONENTE

Milton Ricardo Rojas Luna

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.

2018

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL FENÓMENO DE PIEZOELECTRICIDAD

PROPONENTE

Milton Ricardo Rojas Luna

DIRECTOR

Ing. EDWIN FRANCISCO FORERO GARCIA, MSc.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.

2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, debo dar las gracias a Dios porque gracias a él, hoy es posible culminar con este trabajo de investigación.

A mi esposa ESMERALDA CAROLI VELASTEGUI CORRALES por su apoyo incondicional aún en aquellos momentos en los que se pensó en abandonar el barco.

A JAIRO ALBERTO CUELLAR GUARNIZO, amigo y compañero de trabajo y estudio, con quien se inició este proyecto académico que hoy culmina.

A mi familia quienes siempre han valorado y apoyado el esfuerzo con que se realizó este estudio de Maestría.

A todas aquellas personas que de forma directa e indirecta también hicieron parte y contribuyeron en hacer posible esta investigación, mediante su consejo, ayuda y asesoramiento.

A mi director de tesis, Ing EDWIN FRANCISCO FORERO GARCIA, quien hizo acompañamiento de cada uno de los objetivos y fue facilitador de su conocimiento.

Tabla de contenido

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL FENÓMENO DE PIEZOELECTRICIDAD.....	1
DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL FENÓMENO DE PIEZOELECTRICIDAD.....	2
1 RESUMEN	7
2 INTRODUCCION	8
3 OBJETIVOS	9
3.1 Objetivo general	9
3.2 Objetivos específicos	9
3.3 Resultados frente a objetivos	10
4 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	11
5 ESTADO DEL ARTE	14
6 Analisis y diseño	23
6.1 Selección de modelo	23
6.2 Validación experimental	24
6.3 Efecto del punto de fuerza	26
6.4 Selección de piezoeléctrico	31
6.5 Modelo del PZT a emplear	34
6.6 Arreglo de piezoeléctricos	36
6.7 Conversor AC DC	37
7 PRUEBAS Y RESULTADOS	58
8 CONCLUSIONES	62
9 RECOMENDACIONES FUTURAS	63
10 REFERENCIAS	64

Lista de figuras

Figura 1 Notación numérica de ejes.....	12
Figura 2 Parámetro d_{33} relación entre T_3 y D_3	12
Figura 3 Modelo electromecánico	13
Figura 4 patentes por país.....	14
Figura 5 patentes por solicitante	14
Figura 6 Histórico de patentes.....	15
Figura 7 mapa de cantidad de búsquedas	15
Figura 8 Prototipo del generador de talón [10]	18
Figura 9 . Carretera de Israel con dispositivo Piezoeléctrico.....	19
Figura 10 Circuito equivalente.....	23
Figura 11 Capturador de voltaje y fuerza	24
Figura 12 Captura de Fuerza y voltaje	25
Figura 13 Identificación y validación con parámetros estáticos.....	25
Figura 14 análisis de piezoeléctrico por elementos finitos	26
Figura 15 Capturador de fuerza y voltaje, con actuador.....	26
Figura 16 Capturas ejerciendo fuerza en diferentes puntos del PZT	27
Figura 17 filtrado de la señal de fuerza	28
Figura 18 filtrado de señal de voltaje.....	28
Figura 19 Relación P_t/d_f contra posición de la fuerza	30
Figura 20 Respuesta en potencia dependiente de la ubicación de la fuerza	30
Figura 21 Sensor de fuerza ejercida	32
Figura 22 señales medidas al caminar sobre el sistema de medición.....	33
Figura 23 Obtención del valor absoluto de la derivada	33
Figura 24 Comparación V_{max}/dF_{max}	34
Figura 25 respuestas paso e impulso unitario del modelo obtenido.....	35
Figura 26 Topologías serie, paralelo	36
Figura 27 Detalle de una de las topologías probadas	37
Figura 28 puente de diodos.....	37
Figura 29 diagrama del conversor AC DC.....	38
Figura 30 Comparativa de circuitos de regulación, recuperado de[38]	40
Figura 31 Diagrama interno y circuito del LTC3588	42
Figura 32 Circuito de carga del LTC3588.....	43
Figura 33 Diagrama en Simulink del sistema de carga	43
Figura 34 Excitación y respuesta del modelo en Simulink del circuito de carga. ..	44
Figura 35 Simulación mediante comando Lsim, del sistema rectificador	45
Figura 39 Relación entre pasos, valor de capacitancia en C_{in} y su voltaje.....	46
Figura 36 Esquemático del regulador Buck.....	46
Figura 37 Estados de operación del regulador Buck.....	47

Figura 38 Diagrama con reactancias del conversor DC/DC en estado encendido	48
Figura 39 equivalente con reactancias del conversor DC&DC en estado apagado.	50
Figura 40 Modelo en Simulink del sistema de captura y regulación de voltaje.	53
Figura 41 Simulación del conversor tipo Buck en lazo abierto.	54
Figura 42 Modelo en Simulink del conversor DC/DC con su sistema de control...	55
Figura 43 respuesta del modelo de regulación de voltaje pzt.....	55
Figura 44 respuesta de regulación, ante diferentes combinaciones de capacitancias de entrada y salida.	56
Figura 45 sistema de desarrollo "Solution to go"	58
Figura 46 Carga de condensador intermedio C_i	59
Figura 47 Medición de pasos contra voltaje cargado en el Condensador de entrada C_i	60
Figura 48 Medición de voltaje contra pasos en los condensadores del TLC3588.	60

1 RESUMEN

En este Documento, se muestra el diseño de un sistema generador de energía eléctrica, que basa su funcionamiento en la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, aprovechando para esto, el principio piezoeléctrico, en particular, se plantea convertir la energía de las pisadas de los peatones sobre una baldosa con elementos piezoeléctricos, en energía eléctrica. Como una primera etapa del desarrollo de este proyecto, se realizó el modelamiento de los transductores piezoeléctricos a emplear, así como la identificación de sus parámetros, con miras a futuros estudios estructurales y mecánicos en torno a esta energía alternativa.

También se consideraron diferentes topologías eléctricas, para construir arreglos de transductores piezoeléctricos, aunque en el estudio realizado, se logró comprobar que la mayor eficiencia se obtiene, con un único disco piezoeléctrico.

Finalmente se realizó la implementación de un convertidor CA/CC, empleando para esto una solución comercial, el integrado LTC3588, con el cual se logró obtener un voltaje regulado de 3.3V, útil para una gran cantidad de dispositivos electrónicos.

2 INTRODUCCION

Debido a la necesidad que existe actualmente de adoptar mayores y mejores medidas que permitan disminuir la contaminación ambiental, en la actualidad las energías alternativas son tanto una necesidad como una realidad, por lo que en Colombia se exploran energías alternativas como la solar y eólica, aun existiendo otras poco exploradas como el fenómeno piezoeléctrico, que igualmente pueden ser generadores de energía eléctrica limpia y son el propósito fundamental de este trabajo de investigación, además que con las fuentes de energía limpias se puede ir reduciendo la dependencia con los combustibles fósiles y buscando un impacto positivo en el ya avanzado cambio climático.

Igualmente, las energías alternativas se han venido presentando como un aspecto del desarrollo de las sociedades actuales, especialmente en los centros urbanos en donde se busca reducir el impacto ambiental y todo lo asociado al consumo energético a través de las redes eléctricas metropolitanas, siendo este último el indicador del grado de desarrollo de los grandes centros urbanos.

En Colombia y todo el mundo, existe alta afluencia de personas en diferentes sitios como senderos peatonales, entidades financieras, centros comerciales, universidades, colegios, calles y avenidas con alto tránsito vehicular, estaciones y portales del sistema integrado de transporte (Transmilenio), por lo que la generación de energía a partir del efecto piezoeléctrico en cantidades adecuadas, funcionaria en los sitios mencionados anteriormente ya que para que se produzca energía eléctrica se debe contar con una cierta frecuencia y continuidad en la activación de los mecanismos de presión y descompresión de la cerámica.

Si la presión que se ejerce directamente sobre el piso se transfiere a los mecanismos que contienen los dispositivos piezoeléctricos (celdas), se puede generar energía para su uso en esos mismos espacios urbanos, de tal manera que trabajos de investigación de esta índole en Colombia se tornan fundamentales pues brindan la posibilidad de explorar más a fondo sobre el tema y nos dan una mayor perspectiva sobre la funcionabilidad de este tipo de sistemas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema electrónico de captación de energía eléctrica de baja potencia, a partir del fenómeno de piezoelectricidad.

3.2 Objetivos específicos

Se hace necesario establecer los siguientes objetivos específicos con el fin de alcanzar el objetivo general de este trabajo:

1. Analizar y caracterizar diferentes transductores piezoeléctricos utilizados en la generación de energía eléctrica.
2. Seleccionar y modelar el arreglo de transductores piezoeléctricos a utilizar en el sistema de generación de energía eléctrica.
3. Seleccionar el material para la fabricación física del sistema generador piezoeléctrico.
4. Diseñar y modelar un convertidor CA/CC que permita controlar la captación y el almacenamiento para la energía generada.
5. Realizar pruebas de desempeño de la baldosa piezoeléctrica, mediante la conexión de cargas de bajo consumo, que permita analizar la eficiencia del sistema desarrollado.

3.3 Resultados frente a objetivos

1. Se identifico el tipo de respuesta general de un elemento piezoeléctrico, en su uso para la generación de energía.

Partiendo de las mediciones realizadas, se modelo la respuesta de un disco piezoeléctrico a la aplicación de fuerzas mecánicas en diferentes puntos de su geometría, obteniendo una función equivalente a la variación de su parámetro de conversión de fuerza mecánica en voltaje.

Fueron caracterizados tres tipos de transductores piezoeléctricos, obteniendo su rendimiento en voltaje al aplicarles la fuerza generada por los pasos al caminar, dicha caracterización se realizó bajo diferentes condiciones de operación.

2. Se selecciono el disco PZT de mejor desempeño y con este, se probaron diferentes topologías de conexión eléctrica, a fin de maximizar su respuesta.
3. Durante el desarrollo del proyecto, fueron probados y seleccionados los diferentes elementos y materiales electrónicos para el desarrollo del generador piezoeléctrico.
4. Para el diseño del conversor CA/CC, se consideró el funcionamiento requerido para el sistema y se contempló la alternativa más idónea para su implementación.
5. Sobre el sistema completo, se realizaron pruebas de durabilidad de la energía eléctrica almacenada, rapidez de carga y comportamiento del convertidor CC/AC, modelando su respuesta frente a diferentes señales mecánicas de entrada, obteniendo una relación aproximada entre su excitación (en pasos) y el tiempo durante el cual, el sistema entrega un voltaje estable.

4 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Dentro del trabajo de investigación propuesto, alguno de los conceptos generales para tener en cuenta se relaciona a continuación.

Modelado de sistemas piezoeléctricos.

En general el comportamiento de los elementos piezoeléctricos (como transductores de energía mecánica a energía eléctrica), es descrito mediante las ecuaciones matriciales empleadas en [1], mediante las cuales se muestra la respuesta en forma de campo eléctrico y permitividad eléctrica, ante la aplicación de fuerzas mecánicas externas. la siguiente es dicha representación en torno a sus parámetros fundamentales.

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde los parámetros corresponden a:

D_i Densidad del flujo eléctrico obtenido (carga eléctrica/ área = $\frac{c}{m^2}$ = coulomb por metro cuadrado)

d_{ij} la relación entre tensión mecánica aplicada y polarización eléctrica. ($\frac{c}{N}$ = coulomb sobre Newton)

T_i Tensión mecánica aplicada (fuerza/área = $\frac{N}{m^2}$ = Newton por metro cuadrado)

ε_{ij} es el tensor de permeabilidad eléctrica ($\frac{c^2}{Nm^2}$ = Coulomb al cuadrado sobre Newton por metro cuadrado)

E_i es el vector de campo eléctrico ($\frac{N}{c}$ = newton sobre coulomb)

Los subíndices de dichos parámetros (i,j) dependen del sistema de clasificación numérica de ejes, mostrada en la Figura 1 tal como se sugiere en [2],

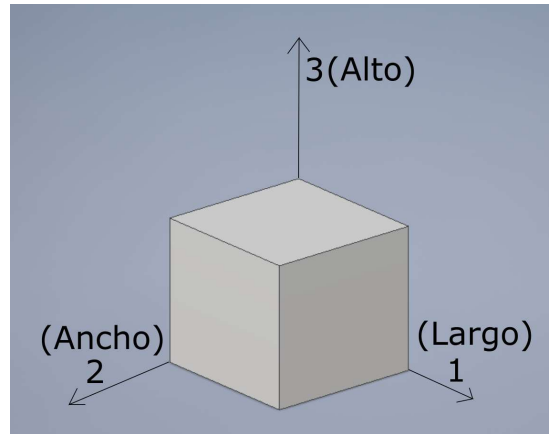


Figura 1 Notación numérica de ejes

Fuente: Autor

Los subíndices compuestos (i,j) se refieren a:

- I eje incidente
- J eje resultante

Por ejemplo, el parámetro d_{33} se refiere a la relación entre la tensión mecánica sobre el eje 3 (T_3) y la densidad de flujo eléctrico obtenido sobre el eje 3 (D_3), como se ilustra en la Figura 2

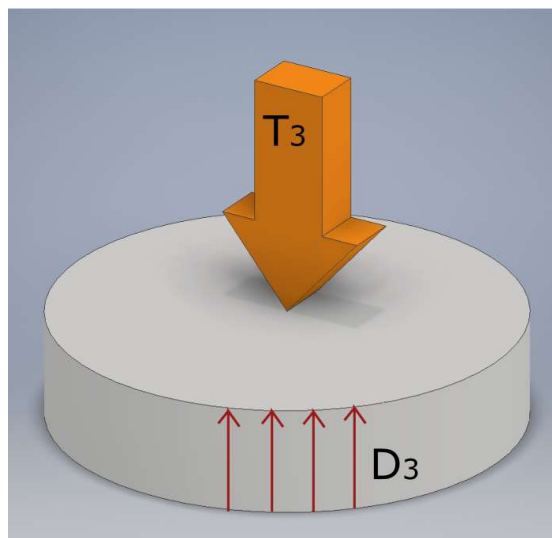


Figura 2 Parámetro d_{33} relación entre T_3 y D_3

Fuente: Autor

Para obtener una aproximación matemática de una capsula piezoeléctrica, se consideran diferentes enfoques como se resume en [3].

- Circuito equivalente
- Modelo masa resorte
- Analogía térmica
- Método de elementos finitos.

Circuito equivalente

En este se pretende, a partir de la interconexión de elementos electrónicos comunes como resistencias, fuentes de voltaje o corriente, condensadores y bobinas, replicar el comportamiento de un material piezoeléctrico, ante la aplicación de fuerzas mecánicas externas,

Incluso, es posible realizar aproximaciones electromecánicas de un elemento piezoeléctrico tal como se describe en [4]

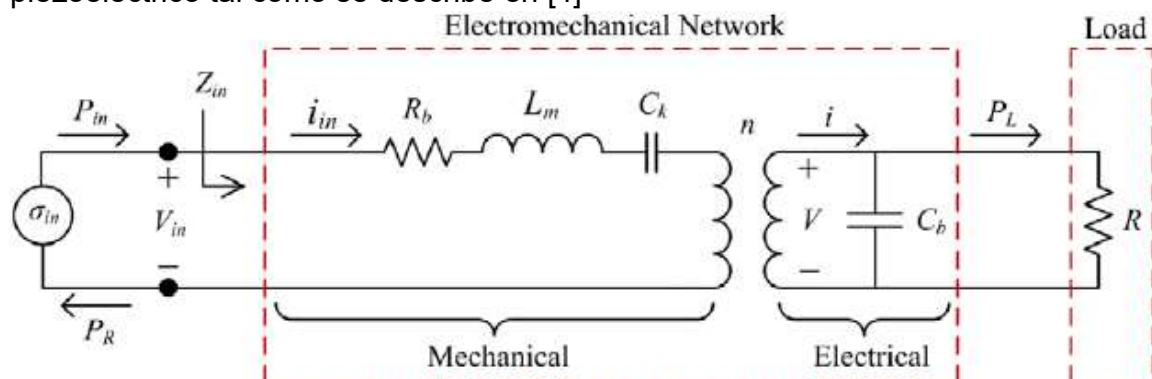


Figura 3 Modelo electromecánico

Fuente: recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/230927832_Modeling_of_MEMS_piezoelectric_energy_harvesters_using_electromagnetic_and_power_system_theories

5 ESTADO DEL ARTE

El registro de patentes a nivel mundial permite llegar a una visión general sobre el estado de desarrollo actual de diferentes países, en torno a una temática en particular, para este caso, se realizó la búsqueda de patentes[5] que contuvieran el término “piezoelectric power”, en las figuras Figura 4, Figura 5 y Figura 6 es posible ver los resultados de dichas búsquedas.

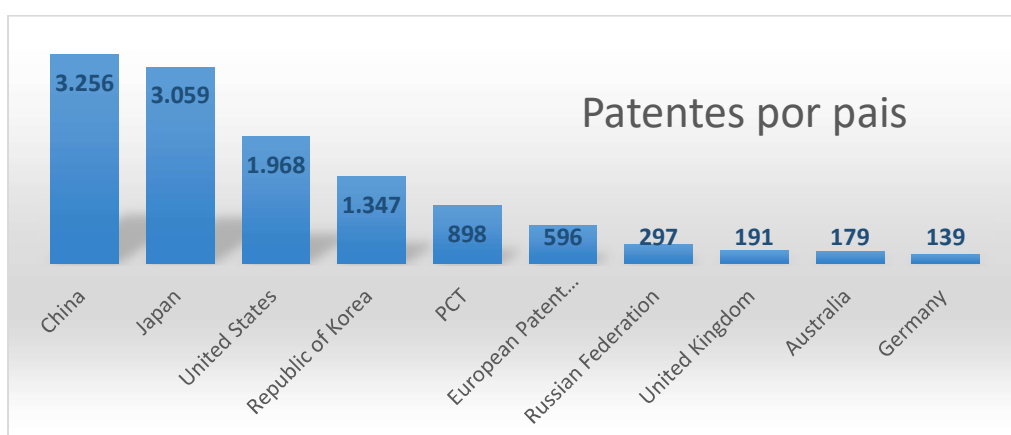


Figura 4 patentes por país

Fuente: adaptado de: <http://patentes.explora-intelligo.info/>

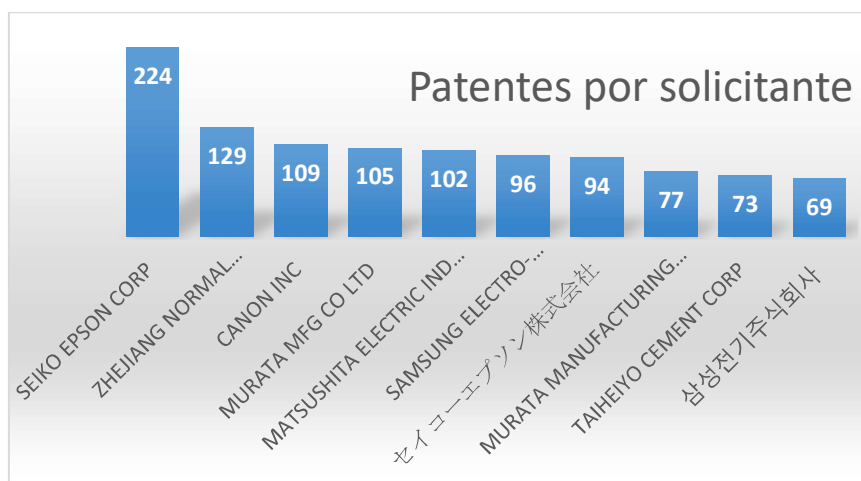


Figura 5 patentes por solicitante

Fuente: adaptado de: <http://patentes.explora-intelligo.info/>



Figura 6 Histórico de patentes

Fuente: adaptado de: <http://patentes.explora-intelligo.info/>

De estas graficas es posible observar, que países con alto nivel tecnológico y alta densidad poblacional como china y Japón, están liderando la producción de patentes en torno a la generación de potencia eléctrica, empleando elementos piezoeléctricos, así mismo y como es de esperar, se observa como las compañías con mayor producción de patentes, tienen sede en países con alta densidad de población, lo que muestra la importancia de este tema como solución alternativa para llevar energía a poblaciones densas, también es posible observar la tendencia al crecimiento de patentes sobre esta tecnología, pasando de 466 a 1038 (más del doble) en menos de diez años.

Así mismo el interés en la comunidad mundial, sobre temas como la piezoelectricidad, se ve reflejado en la Figura 7

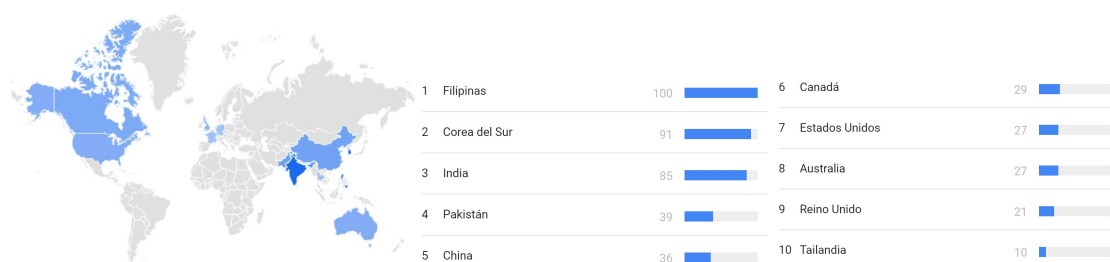


Figura 7 mapa de cantidad de búsquedas

Fuente: <https://trends.google.com/trends/explore?date=all&q=piezoelectricity>

Es claro pues, el interés de países como Corea del Sur e India en la búsqueda de soluciones alternativas al problema energético, siendo la tecnología piezoeléctrica una opción contemplada en dichos países. En contraposición se encuentran casos como el de Filipinas, donde su interés en este tipo de tecnologías es alto, pero su índice de producción investigativa en torno al tema, es bajo, lo que lleva a pensar, que tienen el prospecto de compradores de este tipo de tecnología, más que de productores.

En cuanto al estado del arte con sistemas de generación de energía eléctrica, mediante la utilización del fenómeno de piezoelectricidad se encontró que existen algunas empresas en el mundo, sin embargo, de quienes más información hubo sobre algunas de sus implementaciones son Israel, con la Empresa INNOVATECH en Inglaterra con PAVEGENSYSTEM, quienes se dedican a la generación de energía eléctrica, mediante la utilización del fenómeno de piezoelectricidad.

Igualmente, en la literatura se encuentran diferentes avances tecnológicos e investigaciones que se han llevado a cabo en diferentes partes del mundo, incluyendo Colombia.

Es importante empezar aclarando que la palabra se deriva del griego *piezein* que significa presionar [6]. La historia del desarrollo de la piezoelectricidad suma más de 120 años y desde su descubrimiento el interés por este fenómeno creció rápidamente, convirtiéndose en el último cuarto del siglo XIX en un nuevo campo de investigación [7]. En 1880, los hermanos franceses Pierre y Jacques Curie descubrieron que algunos materiales como el cuarzo, la turmalina, la blenda o esfalerita y el topacio entre otros, sometidos a presiones o esfuerzos mecánicos eran acompañados por una macroscópica polarización y por lo tanto desarrollaban superficies cargadas eléctricamente. Subsecuentemente, este efecto fue llamado efecto piezo, a la electricidad producida se le dio el nombre de piezoelectricidad y a los materiales en los cuales se presentaba el fenómeno se les llamo piezoeléctricos [8], [7].

Un año después del descubrimiento hecho por los hermanos Curie, el físico Gabriel Lippmann partiendo de consideraciones termodinámicas, predijo el efecto contrario en éstos: un piezoeléctrico sometido a una carga eléctrica podría generar deformaciones mecánicas en el material, lo cual fue probado experimentalmente por los hermanos franceses y a este fenómeno se le llamó efecto piezo inverso [9].

1.1. PRIMERAS APLICACIONES

La primera aplicación práctica usando piezoeléctricos apareció en 1917 cuando el matemático y físico francés Paul Langevin propuso el uso del eco ultrasónico para el desarrollo de un dispositivo que detectara objetos bajo el agua (Hidrófono), éste fue construido con una placa de cuarzo puesta entre dos láminas de acero, el cual emitía y recibía ondas de baja frecuencia (KHz). La evolución de dicho dispositivo obligó su inclusión y uso generalizado en submarinos, por lo que fue inminente la invención de nuevos sistemas que se valían del efecto piezoeléctrico para su funcionamiento, ejemplo de esto son los micrófonos, los audífonos, los dispositivos para la grabación de sonido y para la medida de vibraciones, fuerzas y aceleraciones [7].

En 1944 en el Lebedev Physical Institute perteneciente a la USSR (Union of Soviet Socialist Republics), los investigadores B. M. Wool y I.P. Goldman avanzaron en el desarrollo de piezoeléctricos sintéticos, desarrollando así el primer método de sintetización de una piezo cerámica o cerámica piezoeléctrica de titanato de bario (BaTiO_3). Más tarde, en Estados Unidos, se continuó por esta misma línea desarrollando la piezocerámica de titanato de circonato de plomo más conocida como PZT por sus siglas en inglés [7]. A partir de estas invenciones se continuó con la investigación y en 1969 Kawai descubre un fuerte efecto piezoeléctrico en el polímero polifluoruro de vinilideno o fluoruro de polivilideno (PVDF) lo que llevó a muchos otros desarrollos aprovechando la flexibilidad del material.

1.2. Estudios relacionados

Hoy en día los desarrollos con piezoeléctricos incluyen materiales inteligentes para el control de vibraciones, aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales de superficies y estructuras flexibles, sensores robóticos y novedosos prototipos de Energy Harvesting entre muchas otras más.

Durante el año 2008 En Estados Unidos de Norteamérica se realizó otro estudio similar al anterior. Esta vez se produjeron 4 prototipos de prueba que fueron contruidos con materiales piezoeléctricos. La idea era que tuvieran la forma para poder introducirlos dentro de una bota, haciendo que cuando la persona que usa los zapatos camine, genere energía eléctrica por medio de su propia energía mecánica [10].

En la Figura 5 se puede observar la imagen del prototipo generador de talón, cuyo tamaño es acorde para caber dentro de una bota, y además debe cumplir con el objetivo de generar energía eléctrica usando la energía de los pasos del peatón.



Figura 8 Prototipo del generador de talón [10]

Fuente: recuperado de
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890409000697>

Básicamente el dispositivo se divide en 2 partes: Generador de talón y circuito electrónico de potencia [10].

La idea estuvo en que cuando alguien daba un paso, el generador piezoeléctrico enviaba impulsos eléctricos al circuito de potencia los cuales rectifican dichos pulsos, los almacenan en un capacitor y luego convierten dicha energía en una salida de 12 V de corriente directa [10].

Finalmente se concluyó que para una persona promedio de 68 Kg, el dispositivo podía generar mucha menos potencia de la meta que plantearon al principio de 0.5W. Esto pudo ser atribuido a varios problemas que se detectaron posteriormente al diseño del generador del talón, en el cual las fuerzas resultantes de la oscilación del cristal no se cancelaban por completo, haciendo que reduzca la eficiencia en cuanto a transformación de energía se refiere [10].

1.3. EMPRESAS PIEZOELÉCTRICAS

Cabe mencionar que, en ISRAEL, la empresa Israelí **Innowattech**, en colaboración con el Technion – Israel Institute of Technology, desarrollo un dispositivo piezoeléctrico para la generación de energía eléctrica a partir del tránsito de vehículos, aprovechando la presión mecánica sobre el asfalto. El sistema consistió en una serie de generadores colocados bajo el asfalto de las carreteras y generan energía cuando los vehículos circulan por encima. Se dice entonces que el sistema es capaz de producir hasta 2000 Watts-hora que se almacenan en baterías colocadas a lo largo de la calzada. [11]

El sistema fue instalado en una carretera de Israel el 6 de octubre de 2009 en un tramo de solo diez metros.



Figura 9 . Carretera de Israel con dispositivo Piezoeléctrico

Fuente: recuperado de: <https://yadbeyad.wordpress.com/2009/10/08/una-empresa-israeli-logra-generar-electricidad-gracias-al-trafico/>

Estas tecnologías de piezoelectricidad han sido ya usadas en países como Israel en donde ya se tienen piezoeléctricos instalados debajo de las autopistas [6], y en Italia, en donde se firmó un contrato para usar esta tecnología en la autopista que conecta a Venecia con Trieste Autostrada [12].

Por otro lado y no menos importante se encuentra la empresa inglesa **PAVEGENSYSTEMS** lanzada en 2009 por Laurence Kembell-Cook, quien ha llevado a cabo en el Reino Unido y Europa más de 30 proyectos, dentro de los que se destacan algunos como las losas Pavagen que fueron instaladas en las sedes corporativas de Johnnie Walker y WWF. [12]

Es importante resaltar que unos de los proyectos más representativos de Pavegen Systems fue el realizado durante los juegos olímpicos de Londres en 2012 donde las losas fueron usadas en el túnel que conecta la estación del metro West Ham con el Olympic Park [13]

Múltiples de las aplicaciones han sido de suma importancia en diferentes eventos realizados, en donde las baldosas piezoeléctricas instaladas han sido de gran utilidad en festivales de música para cargar teléfonos móviles y encender luces de tecnología led [13].



FIGURA 7: Dispositivo Piezoeléctrico instalado en Londres por Pavegen System [11].
Fuente: recuperado de: <http://www.pavegen.com/mercury-mall>

1.4. EFECTIVIDAD EN OTROS CAMPOS

El mayor avance de esta tecnología tiene que ver con los generadores piezoeléctricos desarrollados por Innowattech y Pavegen Systems, que poseen habilidades únicas para captar energía a partir del peso, movimiento, vibraciones y cambios de temperatura.

Existen generadores específicos para carreteras, vías férreas, pistas de aterrizaje y circulación de peatones instalados en el mundo por las empresas mencionadas anteriormente [8].

Los piezoeléctricos por su capacidad de convertir la deformación mecánica en voltaje eléctrico, y el voltaje eléctrico aplicado en deformación mecánica, encuentran un vasto campo de aplicaciones innovadoras, dentro de las que se resaltan las más importantes:

- DISCOTECA OFF CORSO
- DISCOTECA CLUB4CLIMATE

Estas discotecas se encuentran ubicadas, la primera en Rotterdam (HOLANDA), y la segunda en LONDRES. Juntas han incorporado baldosas piezoeléctricas en la pista de baile para generar energía mientras la gente baila y de esta manera encender luces incrustadas en el piso [9] [10].

1.5. INVESTIGACIONES EN COLOMBIA

Según lo consultado, en Colombia existen ya varios trabajos de grado en investigaciones sobre el fenómeno de la piezoelectricidad, por lo que dentro de los más importantes se encontraron tres:

1. Baldosa piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético. [14]
2. Diseño De Un Colector De Energía Piezoeléctrico (Energy Harvesting) Mediante Optimización Topológica Que Maximice La Transformación De Energía Mecánica En Eléctrica Generada Por Un Ser Humano Al Caminar. [15]
3. Valoración de la capacidad de generación de energía eléctrica por medio de un dispositivo con efecto piezoeléctrico en las entradas vehiculares de la sede central de la UIS. [16]

El primero de ellos fue realizado en Antioquia en el año 2013, el cual consistió en el diseño de una baldosa piezoeléctrica.

El segundo, fue un trabajo de investigación de la Universidad nacional de Colombia, sede Medellín en el año 2013, en donde se diseñó y construyó algunos prototipos para zapatos, de manera que al ejercer presión sobre el talón, se generaba electricidad a través del fenómeno de la piezoelectricidad.

Como tercer trabajo de grado se valoró la capacidad de generación de energía eléctrica de un dispositivo con efecto piezoeléctrico de la Universidad Industrial de Santander con sede en Bucaramanga en el año 2011.

A manera de conclusión se tiene que en Colombia existen algunas tesis de grado y trabajos de investigación al respecto del efecto piezoeléctrico, pero que en la mayoría de los casos han sido diseños sin implementación y en las que se ha hecho, este ha tenido un enfoque diferente al planteado en este trabajo de investigación.

Vale la pena mencionar que de acuerdo con lo investigado, tampoco existen empresas que se dediquen a la fabricación o distribución de generadores piezoeléctricos, pues el mayor enfoque que se tiene en cuanto al uso de energías renovables está en la parte eólica y solar.

Artículos relacionados con piezoelectricidad de la IEEE y El Sevier.

Durante los últimos diez años, los estudios de investigación sobre la recolección de energía piezoeléctrica se han realizado ampliamente. Entre ellos, los estudios sobre colectores de energía piezoeléctrica también se han llevado a cabo activamente.

Algunos de estos estudios son:

Modelado e investigación experimental de un colector de energía piezoeléctrica impulsado por pisadas humanas [13]

Diseño de un nuevo colector de energía piezoeléctrica basada en el impacto secundario, Ferro eléctrico [14].

Estudio de la eficiencia de un sistema de recolección de energía piezoeléctrico usando rectificador y configuración de un arreglo de ferro eléctrico [15].

Diseñando y construyendo una baldosa piezoeléctrica para recolectar energía a partir de pasos [16].

Modelando el potencial de recolección de energía a partir de piezoeléctricos en una construcción educativa [17].

De estos artículos, se pueden observar que las técnicas más empleadas para la obtención de energía eléctrica a partir del principio piezoeléctrico son por vibración y por fuerza, si bien la obtención por vibración (colocando masas que fuercen la oscilación de una platina piezoeléctrica), provee energía por periodos más largos de tiempo, su fragilidad y complejidad de implementación son mayores.

En la literatura se puede apreciar un gran número de artículos relacionados con el fenómeno piezoeléctrico. Sin embargo, muchos de estos, se enfocan en la generación en dispositivos portátiles tales como zapatos o mochilas, estos pueden verse como fuentes de micro electricidad para la potencia auxiliar. A pesar de que los casos anteriormente mencionados no pueden ser considerados como macro fuentes debido a su limitada área de instalación, unidades independientes, tales como baldosas piezoeléctricas pueden ser plantados sobre un área más amplia; por lo tanto, pueden ser utilizados como fuentes de macro potencia.

6 ANALISIS Y DISEÑO

6.1 Selección de modelo

Como primera medida se selecciona el modelo que describe el comportamiento de la capsula piezoeléctrica a emplear, para esto se opta por considerar un modelo de circuito equivalente, como el empleado en [18], mostrado en la Figura 10 (a), pero modificándolo, para considerar los efectos de la resistencia de carga y del parámetro d_{33} (relación entre fuerza y campo eléctrico, como se menciona en [19]), dicho circuito se muestra en la Figura 10(b).

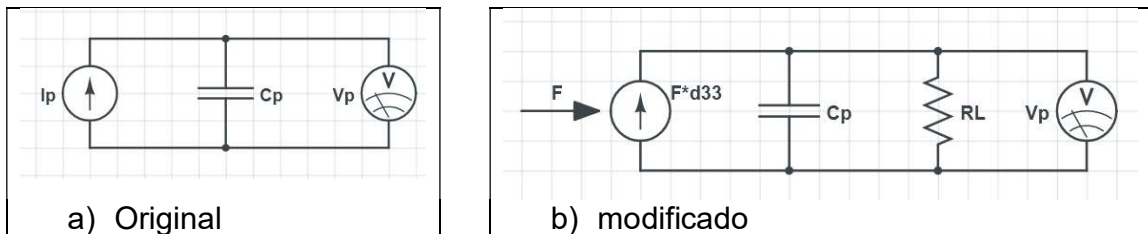


Figura 10 Circuito equivalente

Fuente: Autor

Se puede llegar a la función de transferencia (voltaje contra fuerza) de dicho circuito combinando las siguientes ecuaciones:

$$I = d_{33} \frac{df}{dt} \quad (2)$$

$$I = I_C + I_R \quad (3)$$

$$I_C = C_p \frac{dv_c}{dt} \quad (4)$$

$$v_p = v_c = v_R = R_L \cdot I_R \quad (5)$$

Donde:

I	Corriente del piezoeléctrico
Ic	Corriente del condensador
IR	Corriente de la Resistencia
Cp	Capacitancia del piezoeléctrico
RL	Resistencia de carga
Vc	Voltaje del condensador
VR	Voltaje de la resistencia
Vp	Voltaje de salida.
f	Fuerza aplicada



d33 Relación I/f

Manipulando algebraicamente estas ecuaciones y aplicando transformada de Laplace, se llega a la relación:

$$\frac{v_p}{f} = d_{33} \frac{RS}{RCS + 1} \quad (6)$$

En la sección 6.5 Modelo del PZT a emplear de este documento, es posible observar las respuesta paso unitario e impulso unitario del modelo con sus valores finales.

6.2 Validación experimental

Para validar esta función de transferencia, se empleó un sistema de medición similar al empleado en [20], en el que se capturan sincrónicamente (con periodo de muestreo de 4ms) las magnitudes de fuerza aplicada y voltaje resultante en el disco piezoeléctrico, en la Figura 11 se detalla el sistema de medición empleado.

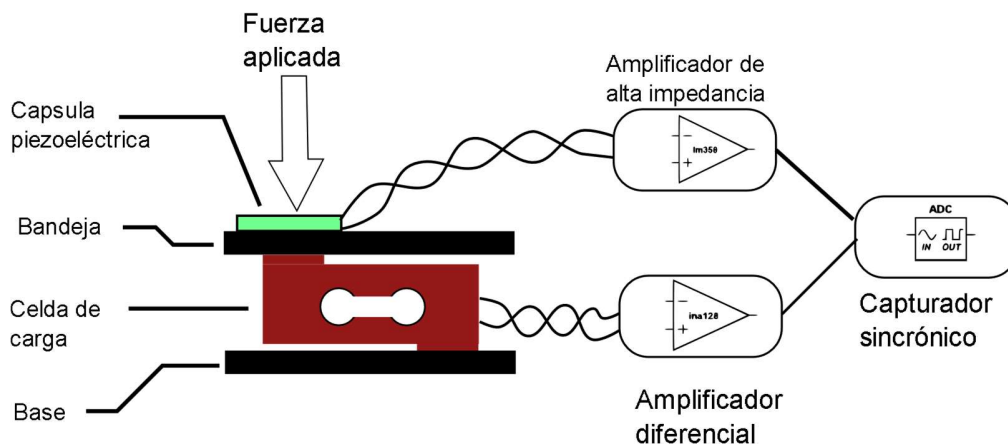


Figura 11 Capturador de voltaje y fuerza

Fuente: Autor

A partir de las capturas realizadas (como la mostrada en la Figura 12), se realiza la identificación del sistema, aproximándolo al tipo de función de transferencia hallada en la ecuación (5).

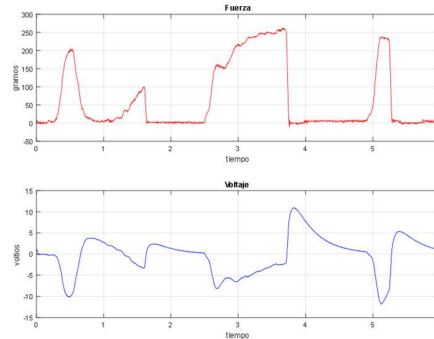


Figura 12 Captura de Fuerza y voltaje

Fuente: Autor

La Figura 13 muestra el proceso de identificación del sistema para diferentes capturas, así como la validación de este.

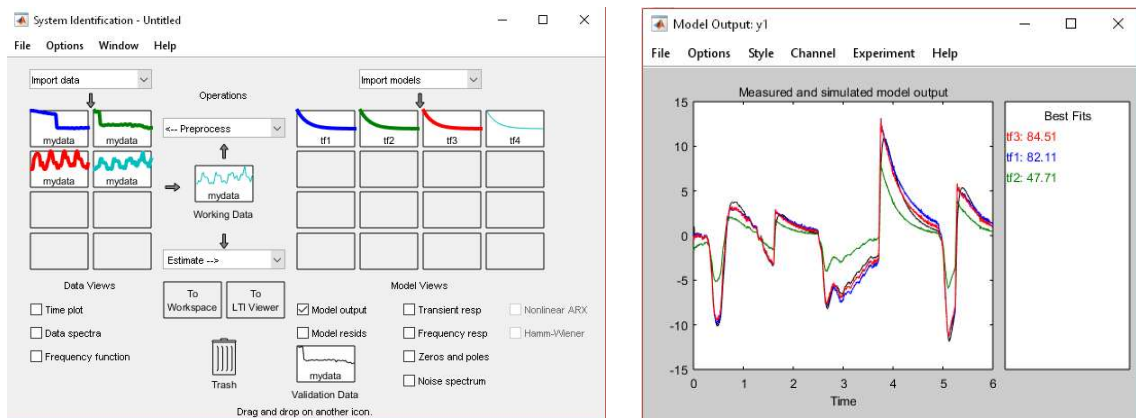


Figura 13 Identificación y validación con parámetros estáticos

Fuente: Autor

Si bien los resultados tras aproximar los datos experimentales al modelo dinámico propuesto son medianamente satisfactorios, en algunas capturas (alrededor del 84% de acierto) dicha aproximación no es consistente en la validación, dado que, se llegó a obtener una similitud de tan solo el 47% con una de las capturas realizadas.

Esta falta de consistencia en las pruebas de validación se debe a que no se ha tomado en cuenta la forma y ubicación del transmisor de fuerza empleado (inicialmente se realizó de forma manual).

6.3 Efecto del punto de fuerza

Es posible apreciar en varios estudios mediante elementos finitos como [1], [21], [22], que las “constantes” de un material piezoeléctrico no son invariables, por el contrario, dependen de la geometría y ubicación de los efectores de fuerza, por ejemplo en la Figura 14 recuperada de [23], se observa como la constante de deflexión de una lámina piezoeléctrica, no es continua en toda su área superficial.

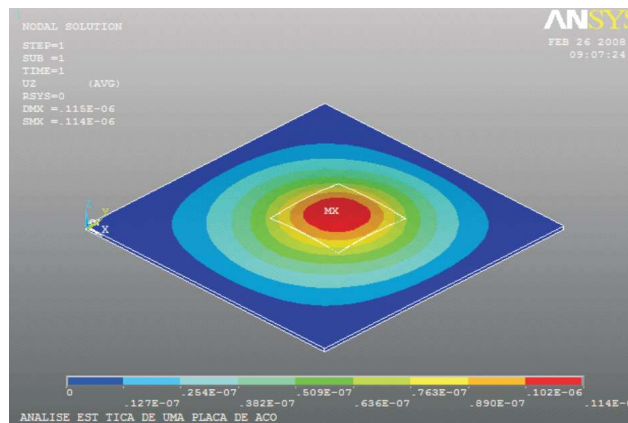


Figura 14 análisis de piezoeléctrico por elementos finitos

Fuente: http://www.kdm.p.lodz.pl/articles/2017/21_2_5.pdf

En esta etapa de la experimentación, se añadió un actuador basado en solenoide, cuyo montaje se expone en la Figura 15.

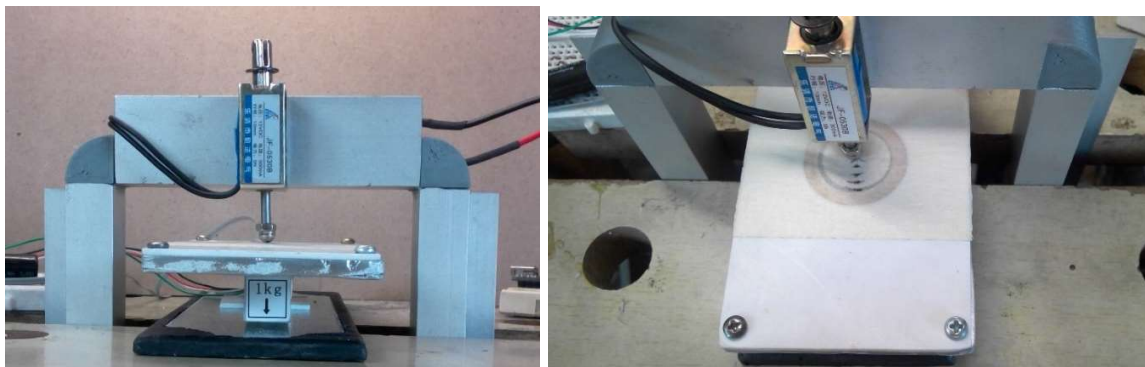


Figura 15 Capturador de fuerza y voltaje, con actuador

Fuente: Autor

Esto con el fin de hacer más consistente y medible el punto y magnitud de la fuerza ejercida, en la Figura 16 se muestran la sobreimpresión de varias capturas realizadas, en la leyenda de cada línea, se especifican las coordenadas donde se aplicó la fuerza al disco piezoeléctrico (se considera el centro como el punto 0x, 0y).

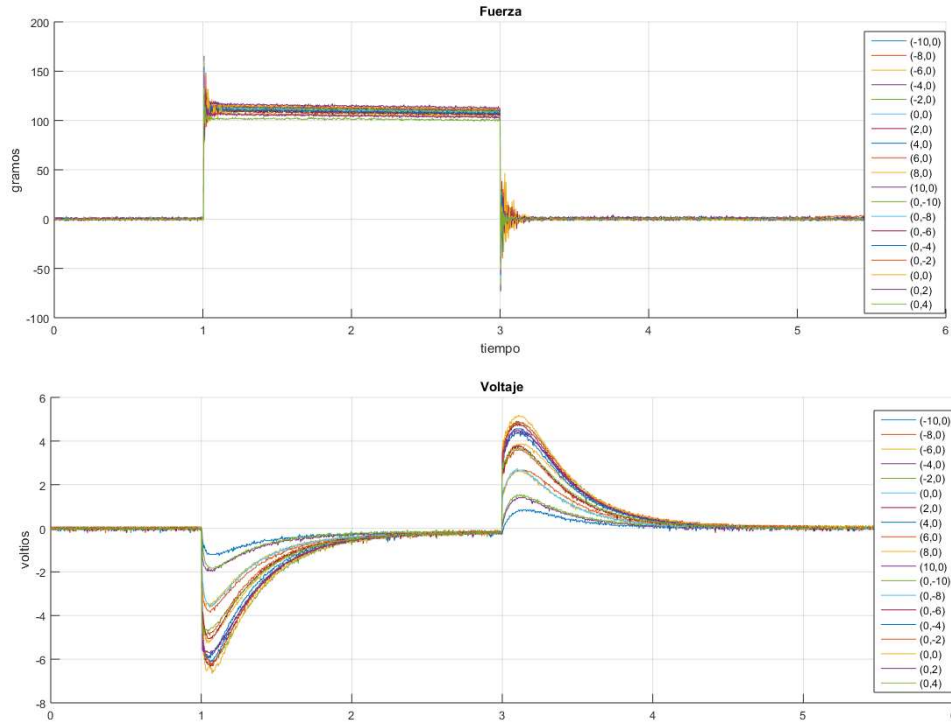


Figura 16 Capturas ejerciendo fuerza en diferentes puntos del PZT

Fuente: Autor

Previo a cualquier manipulación de estos datos, se filtra cada señal como en [24], empleando un filtro promediador por convolución [25], de diez elementos, la ecuación discreta para dicho filtro es:

$$y[n] = x[n] * C[n] = \sum_{k=0}^L x[k] C[n-k] \quad (7)$$

Donde:

y es el vector de la señal filtrada

x es el vector de la señal a filtrar

n es el subíndice de los vectores

L es la longitud del vector de entrada " x "

C es la máscara de convolución de diez elementos, definiendo cada elemento como:

$$C_{[e]} = \frac{1}{e} \quad (8)$$

Siendo " e " la cantidad de elementos del vector.

El resultado de aplicar este filtro se muestra en la Figura 17 y Figura 18, donde se observa en rojo la captura sin filtrar, mientras que la señal azul es su equivalente ya filtrada.

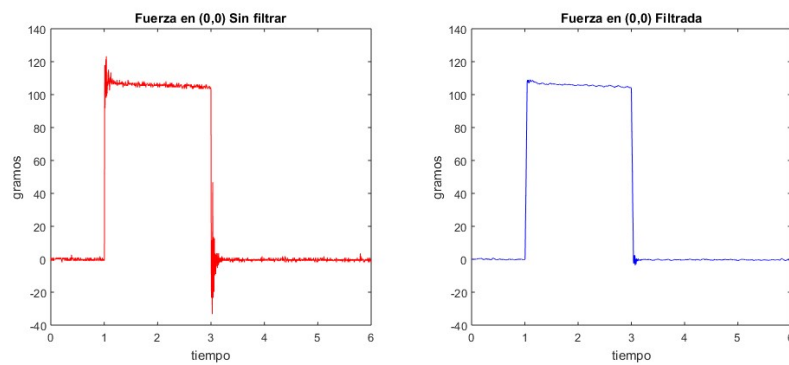


Figura 17 filtrado de la señal de fuerza

Fuente: Autor

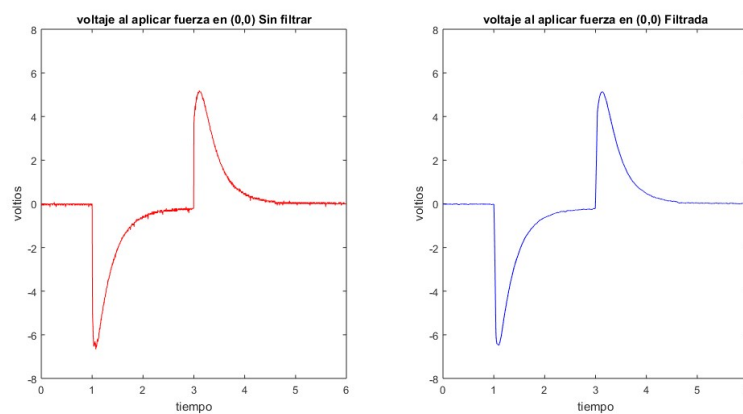


Figura 18 filtrado de señal de voltaje

Fuente: Autor

sin embargo en esta serie de capturas, la comparación se realiza tomando en cuenta la potencia entregada por el piezoeléctrico como se realizó en [26].

Se toman de esta forma, como variable de entrada la derivada de la fuerza aplicada y como variable de salida P_t descrita según [27] como:

$$P_t = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} V_{(t)} \cdot I_{(t)} dt \quad (9)$$

Su equivalente en discreto es:

$$P_T = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^L v_{[k]} \cdot I_{[k]} \quad (10)$$

El valor de corriente I no ha sido medido, por lo que, empleando la ley de ohm, se reemplazara este valor por la relación $I = \frac{v}{R}$.

Teniendo en cuenta que la resistencia de carga del piezoeléctrico es la impedancia del amplificador empleado en la captura, que es de $10M\Omega$, se llega a la siguiente formula:

$$P_T = \frac{1}{LR} \sum_{k=0}^L v_{[k]}^2 \quad (11)$$

Donde:

P_t es potencia total

L es la longitud del vector de voltaje

R es la resistencia de $10M\Omega$ del amplificador diferencial

V es el vector de captura de datos del voltaje.

La relación de esta potencia total contra la derivada de la fuerza aplicada se observa en la Figura 19 parametrizada respecto a la distancia al centro del piezoeléctrico.

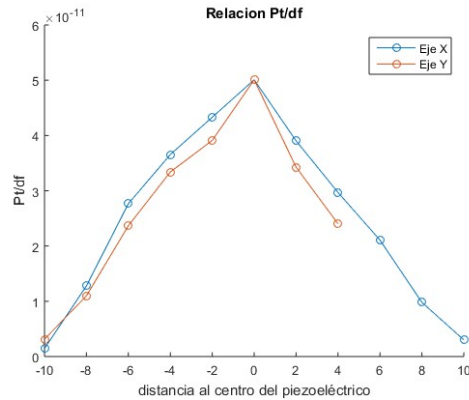


Figura 19 Relación P_t/df contra posición de la fuerza

Fuente: Autor

Esta grafica puede aproximarse a la siguiente función cuadrática:

$$y = -4.3 \cdot 10^{-13}x^2 - 1.9 \cdot 10^{-13}x + 4.2 \cdot 10^{-11} \quad (12)$$

Donde

y es la relación $\frac{P_t}{df}$

x es la distancia al centro del transductor piezoeléctrico.

Dando lugar a la representación de la eficiencia en potencia del piezoeléctrico según el punto donde se ejerce la fuerza, el resultado se puede apreciar en la Figura 20

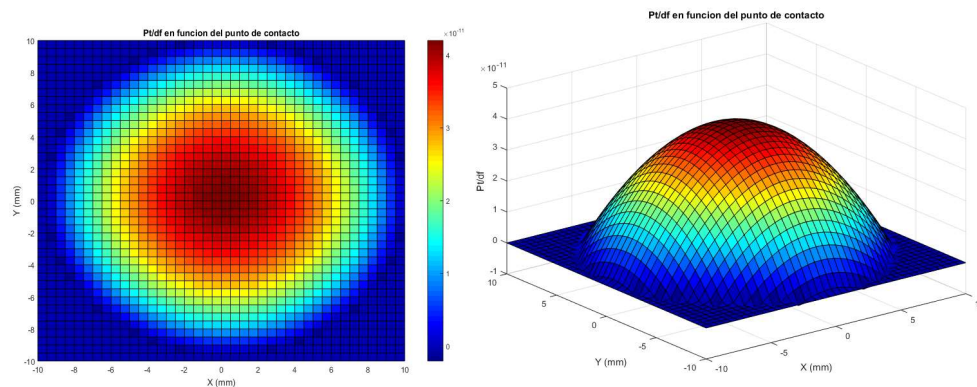


Figura 20 Respuesta en potencia dependiente de la ubicación de la fuerza

Fuente: Autor

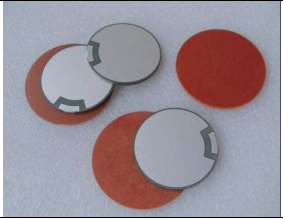
Lo cual muestra que en el diseño del dispositivo final, es necesario que la fuerza aplicada, recaiga en el centro de la capsula y en la menor área posible.

En lo sucesivo en este estudio, se aplicarán todas las fuerzas sobre el centro de la capsula para maximizar su respuesta.

El cual consta de ocho celdas de carga de 50Kg cada una, acopladas en grupos de dos, mediante una platina de sujeción, lo cual permite fuerzas de hasta 400kgF, es decir 3920 N.

6.4 Selección de piezoeléctrico

Para el desarrollo de este proyecto, se consideran tres tamaños diferentes de capsula piezoeléctrica, en la tabla, se enumeran las referencias seleccionadas.

tamaño	Foto	dimensiones	fabricante	referencia
Grande			Murata	TB-27-4
Mediano			Hesentec	SKU 392264
pequeño			Piezo Hannas	SKU 318189

Fuentes:

Tbb-27-4(Murata)

<https://www.arduino.cc/documents/datasheets/PIEZO-PKM22EPPH4001-BO.pdf>

sku392264(hesentec)

<http://www.hesentec.com/ultrasonic-transducer/ultrasonic-cleaning-transducer/40KHz-60W-ultrasonic-transducer-for-ultrasonic-cleaning.html>

sku318189(piezo hannas)

<http://es.piezodisc.com/piezo-ceramic/piezo-disc/40khz-35w-50mm-piezo-ceramic-disc.html>

Para caracterizar estas capsulas y realizar pruebas de su respuesta, se desarrolló el siguiente sistema de medición (Figura 21):



Figura 21 Sensor de fuerza ejercida

Fuente: Autor

cada dispositivo, es probado sobre el sistema de medición descrito anteriormente, obteniendo las señales de fuerza aplicada (entrada del sistema) y voltaje generado (salida del sistema), de tal forma que se repite este experimento para cada uno de las capsulas piezoeléctricas, con resistencias de carga de 10M Ω m, 1M Ω m y 100k Ω m en la Figura 22 se muestran las medidas obtenidas empleando el piezoeléctrico mediano con una resistencia de carga de 10M Ω

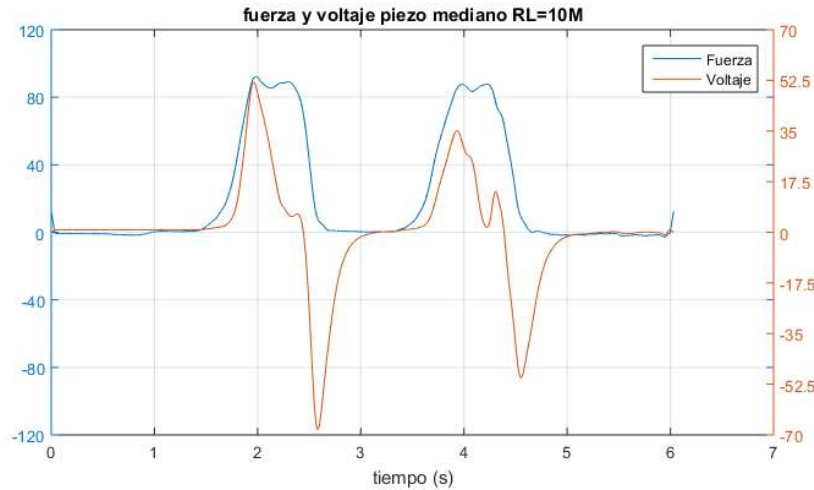


Figura 22 señales medidas al caminar sobre el sistema de medición

Fuente: Autor

Con el fin de facilitar la comparación entre las capsulas piezoeléctricas, se realiza la relación entre el voltaje obtenido y la derivada de la fuerza ejercida, es decir, se halla el valor absoluto de la derivada numérica de la fuerza, tal como se muestra en la secuencia de la Figura 23

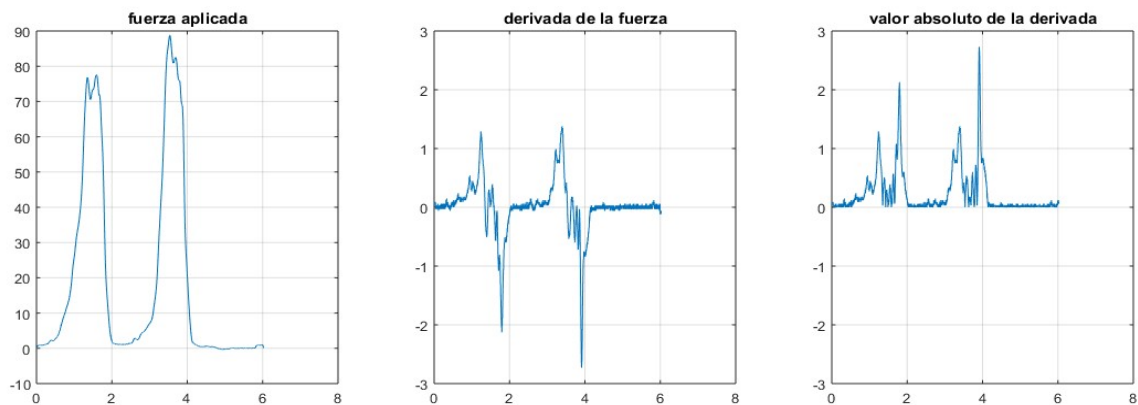


Figura 23 Obtención del valor absoluto de la derivada

Fuente: Autor

De este valor absoluto, se obtiene el valor máximo y este término será nombrado como df_{max} , de igual manera, se obtiene el valor máximo del valor absoluto del

voltaje, que a su vez se llamara v_{max} , tabulando los datos obtenidos con las diferentes resistencias de carga, se obtiene la Figura 24

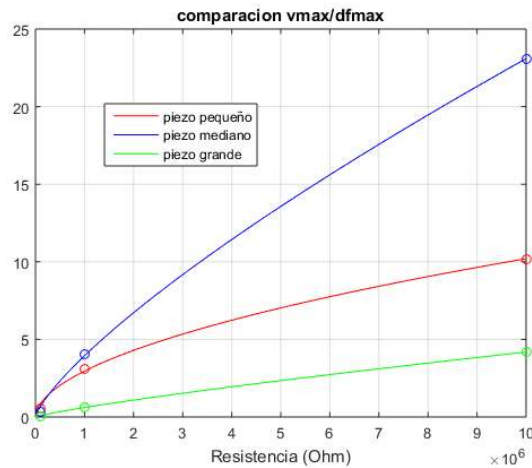


Figura 24 Comparación V_{max}/df_{max}

Fuente: Autor

De esta comparación es posible observar que el piezoeléctrico mediano, es de los tres, el que transforma de manera más eficiente la energía mecánica en voltaje, por lo que será este el empleado en la construcción del generador.

6.5 Modelo del PZT a emplear

Tras emplear las medidas realizadas en la identificación paramétrica de la capsula PZT, se llegó a la siguiente función de transferencia

$$\frac{v}{f} = \frac{0,2301 S}{S + 9,869} \quad (13)$$

Comparándola con la función analítica

$$\frac{v_p}{f} = d_{33} \frac{RS}{RCS + 1} \quad (14)$$

Se llega a las siguientes constantes:

$$R=1M\Omega$$

$$C=3,469e^{-8}f$$

$$d_{33}=1,3E-8$$

En la figura se pueden apreciar las respuestas a escalón unitario e impulso unitario de este modelo.

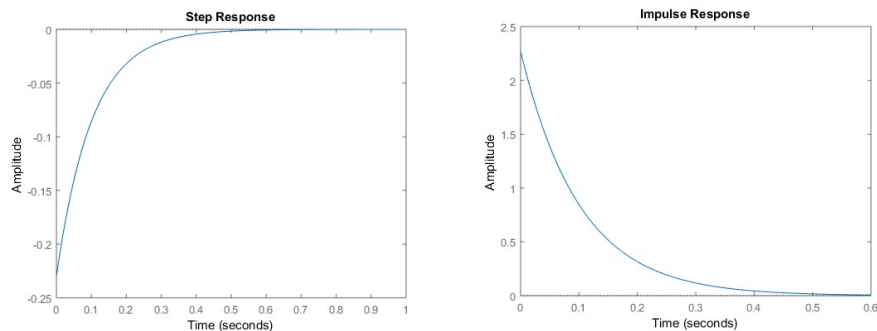
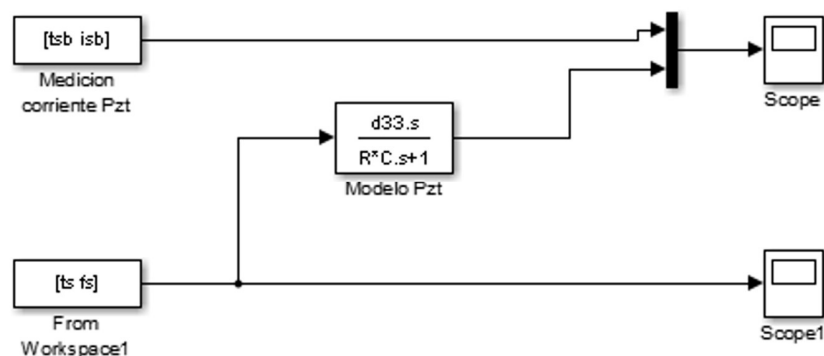


Figura 25 respuestas paso e impulso unitario del modelo obtenido

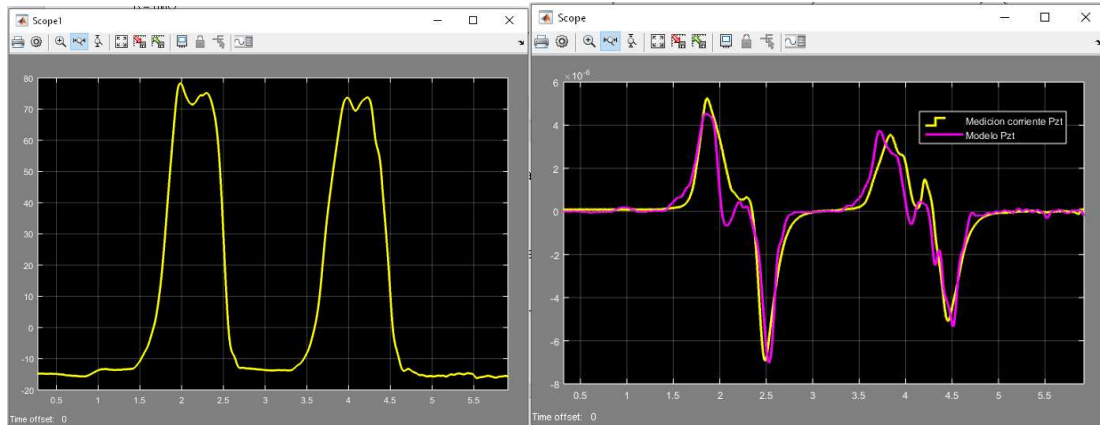
Fuente: Autor

Con el fin de comparar la corriente medida en el PZT, y la estimación de corriente a partir del modelo obtenido, es necesario convertir el modelo de V/f a I/f , para lo cual, se multiplica $V/f \cdot R$, obteniendo así $I/f = d_{33} \frac{S}{RCS+1}$

Dicha comparación entre la medición y la estimación por el modelo, fue implementada en simulink de Matlab, con el diseño mostrado en la figura



El resultado de simular esto, se observa en la figura tal donde



6.6 Arreglo de piezoeléctricos

Sobre esta selección realizada, se comparan diferentes topologías de conexión y cantidad de piezoeléctricos en el sistema.

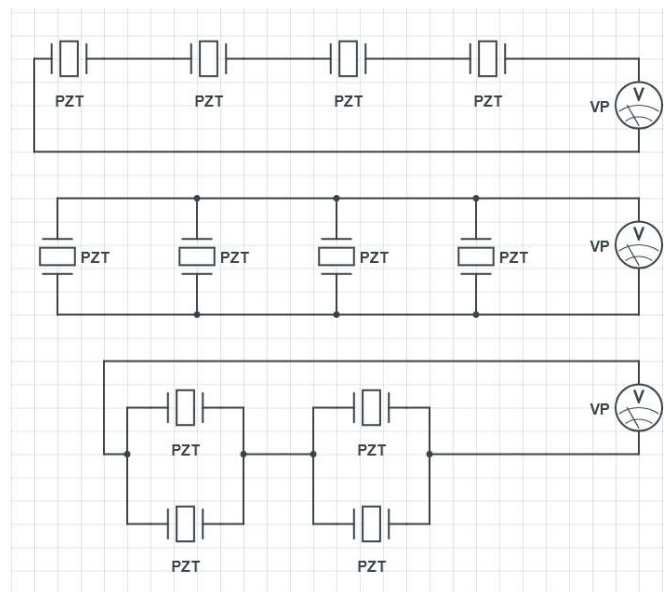


Figura 26 Topologías serie, paralelo

Fuente: Autor

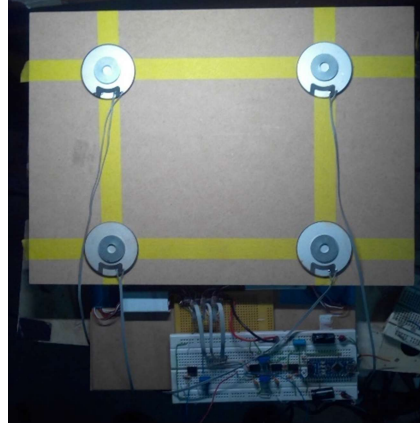


Figura 27 Detalle de una de las topologías probadas

Fuente: Autor

De las pruebas realizadas fue posible determinar, que si todos los discos PZT del sistema reciben la misma fuerza, la opción que genera picos más altos de voltaje, (aun con resistencias de carga pequeñas), es emplear un único disco PZT, esto debido a que al contar con más piezoeléctricos acoplados mecánicamente, la fuerza se reparte entre todos los discos, generando menor energía en cada uno.

6.7 Conversor AC DC

Para aprovechar la energía suministrada por el disco piezoeléctrico, es necesario rectificar la señal, ya que si bien se generan picos positivos al presionar la capsula, también se generan picos de voltaje negativos al dejar de presionarlo, picos que se pueden emplear igualmente al adicionar un rectificador a la salida (Figura 28).

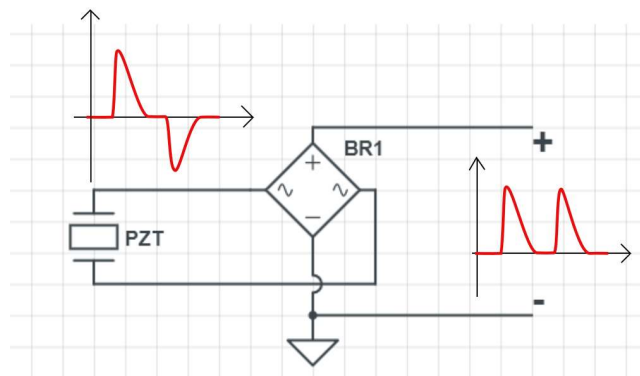


Figura 28 puente de diodos

Fuente: Autor

Esta serie de impulsos obtenidos del rectificador, se emplean para cargar un condensador intermedio, una vez el voltaje en este condensador, supere un umbral de carga, activará un comparador que permitirá el paso de este nivel útil de voltaje, hacia el regulador de salida, el cual tiene por misión, mantener un voltaje estable a la salida del generador.

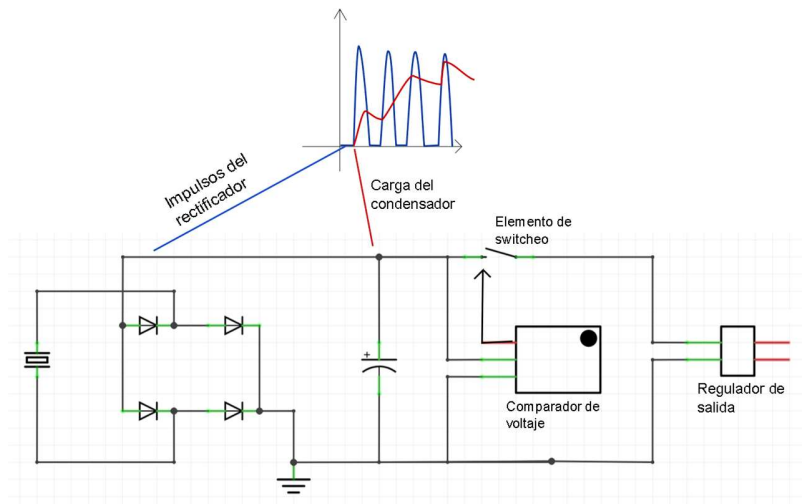


Figura 29 diagrama del conversor AC DC

Fuente: Autor

Tras analizar opciones para la implementación de este proyecto y comparando sistemas funcionales vistos previamente en el estado del arte, se llegó a la conclusión, de que existen tres formas de abordar el diseño del circuito deseado, según el nivel de integración de los elementos a emplear:

Diseño discreto

En este tipo de diseño, se emplean elementos básicos para la construcción de cada bloque funcional del sistema, como ejemplos de este concepto, se encuentran las investigaciones: [28], [29], [30]

Diseño modular

Seleccionar e integrar diferentes módulos que lleven a cabo las funciones de cada bloque del sistema, algunas investigaciones consultadas que parten de este enfoque son: [31], [32], [33].

Diseño de solución integrada

Seleccionar y configurar un sistema diseñado específicamente para la generación de energía piezoeléctrica, algunos ejemplos de este tipo de desarrollo se encuentran en [34], [35], [36].

Tras comparar los resultados obtenidos en los trabajos anteriormente citados, fue posible observar, que si bien investigaciones como [28], generan un mayor aprovechamiento de la energía suministrada por los transductores piezoeléctricos, su implementación robusta, redundante en un mayor tamaño del circuito, de igual manera, una mayor cantidad de componentes implica mayor cantidad de puntos de falla en un sistema de largo funcionamiento, motivos por los cuales se optó finalmente por emplear una solución integrada.

Es posible también, observar en comparaciones de diversas topologías de convertidor para su uso con piezoeléctricos, como la realizada por [37], que las tecnologías de mayor eficiencia, se basan en la rectificación de la corriente piezoeléctrica, bien sea de forma pasiva (con diodos Schottky), o mediante rectificadores síncronos (basados en transistores FET) y la regulación del voltaje, mediante inversores tipo LDO (Low Drop Out, reguladores de baja caída de potencial).

Una comparación más concisa respecto a estas topologías se puede observar en la Figura 30, donde se pueden observar que los mejores resultados, se pueden encontrar con los circuitos LDO con 6.4mW de salida y ACC que es un regulador con conmutación activa de la carga, con 6.5mW de salida.



Literature	Sources	Architecture	V_{IN} (V)	V_{OUT} (V)	P_{OUT} (mW)	η (%)	Technology	Application
Colomer-Farrarons et al., [41] (2011)	PV, PZT, RF	BG circuit, LDO regulator, bridge rectifier	1.89 (PV), 1.2 (PZT), 1 (RF)	1.2 - 3.3	6.4	55 - 85	0.13 μ m ASIC	Low-voltage and low-power loads (e.g.: RFID)
Tan & Panda [39] (2011)	PV, Thermal	DC-DC converter, PWM generation, micro-controller, energy storage	3.6	5.5	0.621	90	Hardware prototype	WSN
Bandyopadhyay & Chandrakasan [11] (2012)	TEG, PV, PZT	Dual path scheme, inductor sharing, ZCS	0.02 - 0.16 (TEG), 0.15 - 0.75 (PV), 1.5 - 5 (PZT)	3.3	1.3 (TEG), 2.5 (PV), 0.2 (PZT)	58 (TEG), 83 (PV), 79 (PZT)	0.35 μ m CMOS	WSN, DSP
Nguyen et al., [42] (2014)	RF, PZT	Hybrid rectifier, CCCR chain, matching network, bias generator	0.3 (RF), 2.0 (PZT)	1	Not stated	40.3	0.09 μ m CMOS	RFID sensor
Lim et al., [38] (2014)	TEG, PV, PZT	DC-DC boost converter with MPPT, VCCS	0.18 - 0.907	0.310 - 27.9	0.014 - 0.187	Not stated	Not stated	WSN, cardiac pace makers, Quartz watches and hearing aids
Chou et al. [44] (2014)	PV, PZT	Full-wave rectification, PFM boost switching regulator	0.2 - 1.7	1.8 - 3.7	2.4	73	0.35 μ m CMOS	Biomedical sensing system
Dini et al., [45] (2015)	PZT, TEG, PV, RF	Buck-boost converter, LDO regulator, UVLO circuit, bias generator, nano power comparators, NVC	0.7 - 5 (PZT), 1 - 5 (HV), 0.1 - 1 (LV)	5	2.124	89.6	0.32 μ m BCD	WSN
Vanhecke et al. [46] (2015)	TEG, PZT	Voltage doubler, LDO, PTAT, BGR	3	2.4	Not stated	66	0.35 μ m CMOS	Aeronautics applications
This work (2016)	RF, PZT, TEG	Rectifier, matching network, DC-DC converter, control loop, ACC, voltage regulator	0.1 - 5	3.3	6.5	90	0.13 μ m CMOS	RFID semi-active tag

Figura 30 Comparativa de circuitos de regulación, recuperado de [38]

De una revisión sobre algunos integrados, que empleen este tipo de tecnologías, se encontraron referencias como:

REFERENCIA	USO RECOMENDADO
MAX 17710	Carga inalámbrica, RFID, Dispositivos médicos
LTC3588	Energía piezoeléctrica
LTC3632	Regulación de voltajes de baja amplitud.

Donde se observa que el LTC3588, se encuentra diseñado específicamente, para su uso con sistemas de energía piezoeléctrica, además, es el más empleado en la literatura consultada.

El diagrama interno del dispositivo, junto al circuito de conexión típico, se observa en la Figura 31.

En esta se observa que el LTC3588 consta de un puente rectificador con bajas pérdidas de voltaje (típicamente 400 mV según [39]), tras ser rectificada, dicha corriente, se almacena en forma de voltaje en un condensador externo, marcado como Cin en la Figura 31.

El voltaje de Cin es censado mediante el bloque identificado como UVLO, el cual mantiene inactivo el integrado, hasta el momento en que el voltaje de Cin supere el voltaje esperado en la salida (Vout).

Este voltaje Vout, se encuentra regulado mediante un conversor DC DC, formado por la bobina L1, el condensador Cout, los mosfets presentes en el integrado y el bloque Buck control. De tal forma, que el integrado contiene los elementos necesarios para “pre almacenar” un voltaje en Cin y regularlo al valor esperado en Vout.

Por último, las entradas D1 y D0, permiten seleccionar el voltaje esperado a la salida de la regulación según la Tabla 1.

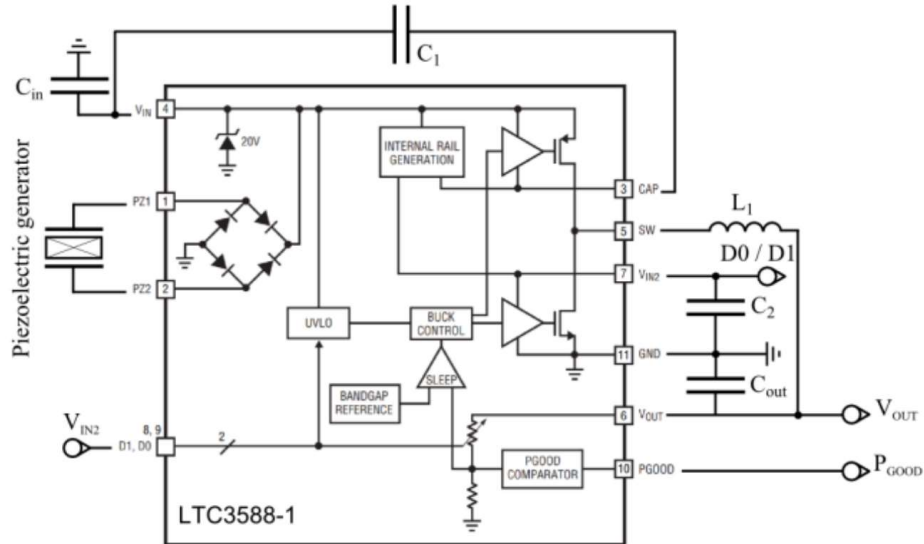


Figura 31 Diagrama interno y circuito del LTC3588

Fuente: recuperado de: [40]

D1	D2	Vout
0	0	1.8V
0	1	2.5V
1	0	3.3V
1	1	3.6V

Tabla 1 Configuración del voltaje de salida

Fuente adaptado de [39]

Como se mencionó anteriormente, el bloque UVLO se encarga de desactivar el integrado, ante un voltaje en C_{in} inferior a lo necesario para la regulación, por lo que el análisis de este, se afronta en dos estados, carga y regulación.

Carga

En el proceso de carga (de C_{in}), previo a alcanzar un valor que permita su regulación, interviene el circuito que se muestra en la figura:

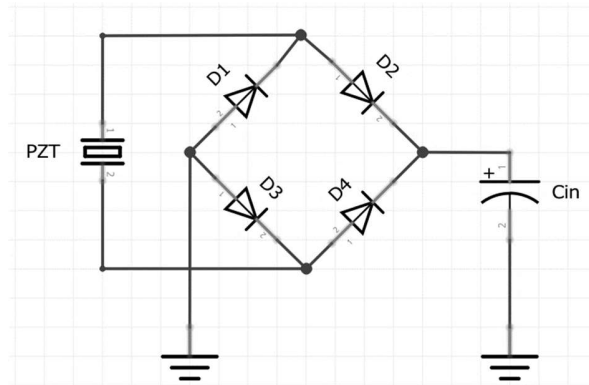


Figura 32 Circuito de carga del LTC3588

Fuente: Autor

Acoplado este sistema al modelo de corriente contra fuerza del PZT y aplicando capturas de la fuerza sobre este, se puede considerar nuevamente al piezoeléctrico, como una fuente de corriente, al puente rectificador, como la función no lineal absoluta y por último al condensador Cin como una reactancia capacitiva $X_C = 1/Cin \cdot S$, obteniendo de esta manera el siguiente modelo en simulink:

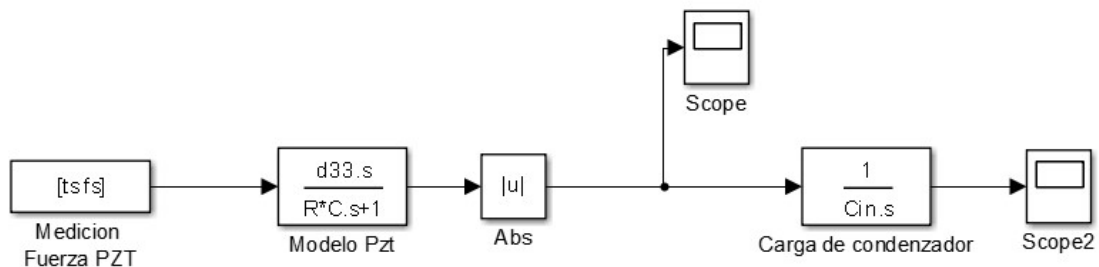
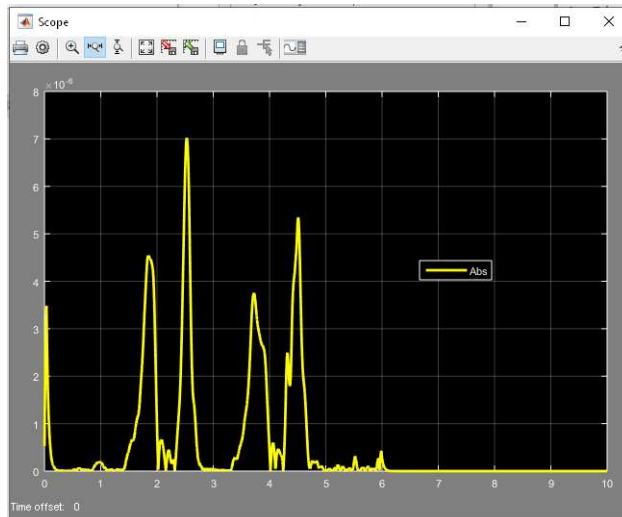


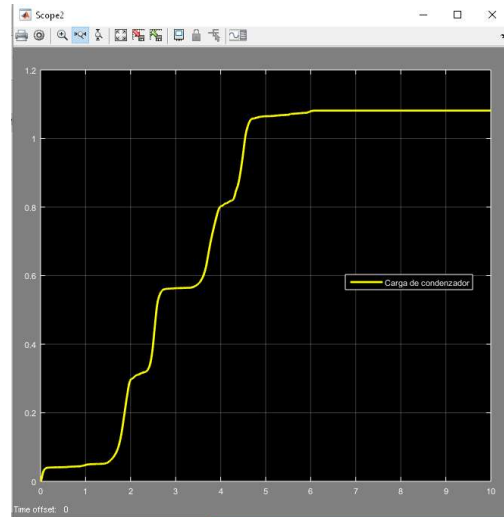
Figura 33 Diagrama en Simulink del sistema de carga

Fuente: Autor

Cuya respuesta a una de las capturas de paso sobre el piezoeléctrico, es la presentada en la Figura 34



(a) Corriente de entrada estimada



(b) Voltaje de salida estimado

Figura 34 Excitación y respuesta del modelo en Simulink del circuito de carga.

Fuente: Autor

Obteniendo que el voltaje sobre el condensador C_{in} es:

$$V_{C_{in}} = \frac{1}{C_{in}} \int I_{PZT} \quad (15)$$

donde I_{PZT} es el vector de respuesta a la simulación del modelo de Pzt, teniendo como entrada una de las capturas de fuerza al realizar un paso sobre el sistema.

dicha simulación se realizó en Matlab, aplicando los siguientes comandos:

```
num=[d33 0];  
den=[R*C 1];  
mpzt=tf(num,den);  
ipzt=lsim(mpzt,f,t);
```

donde f es el vector obtenido en la captura de fuerza al dar un paso sobre el sistema y t su vector de tiempo correspondiente.

El resultado de esta simulación se muestra en la Figura 35

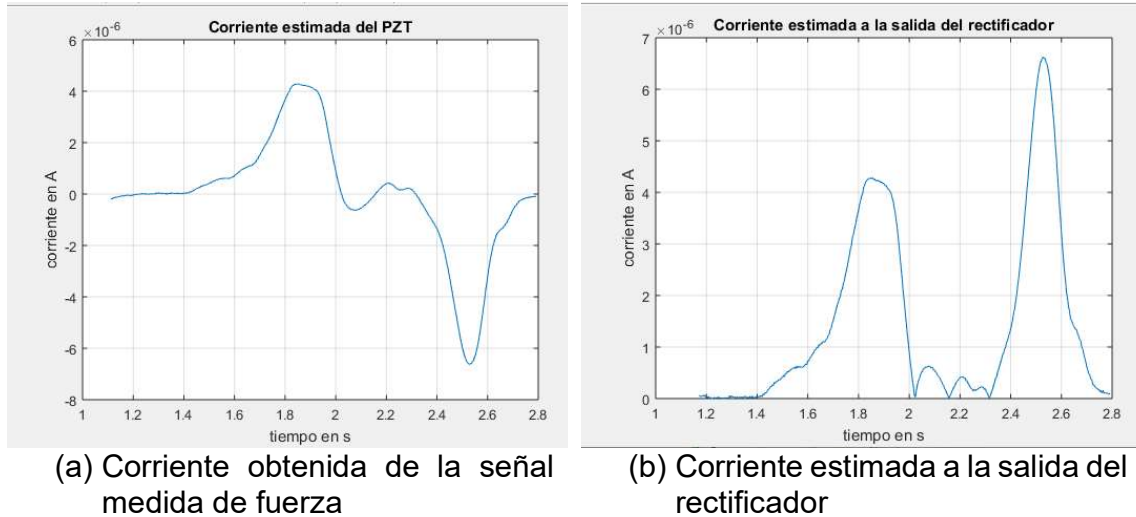


Figura 35 Simulación mediante comando Lsim, del sistema rectificador

Fuente: Autor

Para la integración se empleó el comando trapz de Matlab que es una aproximación numérica de la integral empleando el método trapezoidal.

Dado que $I = dq/dt$, la integral de la corriente respecto al tiempo es la carga eléctrica, por tanto, integral de $I = q$ es decir la carga eléctrica.

Por tanto la carga eléctrica, generada en un paso, es calculada como:

$$Q = \text{trapz}(t, \text{abs}(ipzt))$$

Obteniendo como resultado $Q = 6,013 \times 10^{-6}$ Coulomb

De esta manera, es posible calcular cuantos pasos se necesitan para obtener el voltaje mínimo de regulación.

$$V_{cin} = Q \cdot n_p / C_{in}$$

Aplicando esta fórmula a diversos valores de C_{in} y cantidad de pasos, se obtiene la siguiente gráfica.

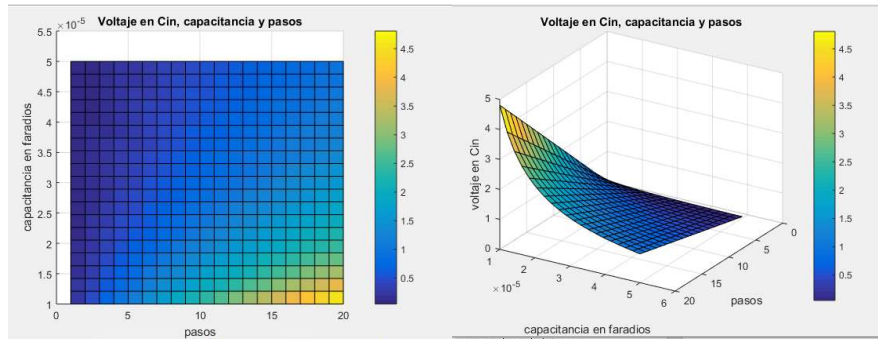


Figura 36 Relación entre pasos, valor de capacitancia en Cin y su voltaje.

Fuente: Autor

La Figura 36 indica que, a menor valor de capacitancia, se obtiene un mayor voltaje, con menor número de pasos, sin embargo, como se verá en el apartado del regulador, un menor valor de capacitancia, repercute en el tiempo de estabilización del voltaje regulado.

REGULACIÓN

El regulador presente en el integrado LTC3588 es del tipo Buck sincrónico, es decir es un convertidor DC DC reductor de voltaje con dos elementos de switcheo, que se encargan de cargar de corriente una bobina, que a su vez alimenta un condensador de salida.

En este sistema la fuente de voltaje para el regulador, es el condensador Cin previamente cargado.

En la figura se muestra el esquemático de dicho circuito.

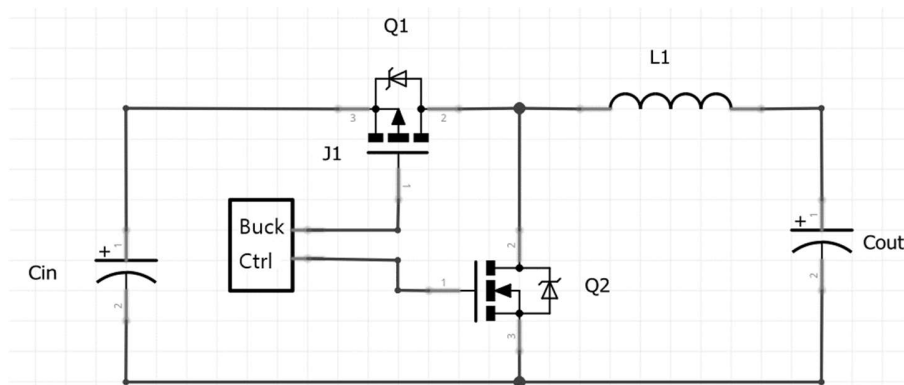


Figura 37 Esquemático del regulador Buck

Fuente: autor



El controlador de este dispositivo obtura en forma inversa los mosfet Q1 y Q2, dando lugar a dos estados de operación:

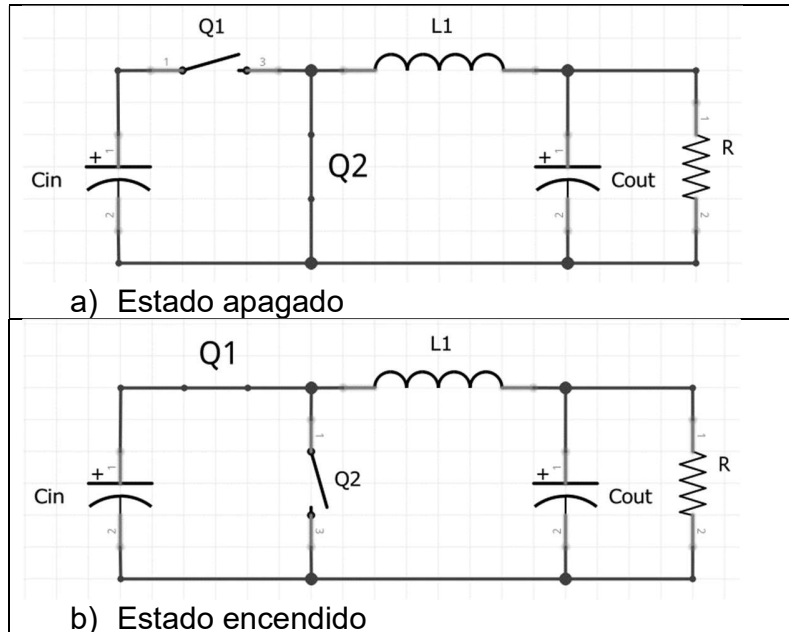


Figura 38 Estados de operación del regulador Buck

Fuente: Autor

Estado encendido:

En este, $Q1$ está activo y $Q2$ inactivo, permitiendo que el voltaje almacenado en C_{in} alimente al resto del circuito.

Las ecuaciones para este circuito son:

$$v_{c_i} = v_L + v_{c_o} \quad (16)$$

$$I_L = I_{c_o} + \frac{v_{c_o}}{R} \quad (17)$$

Reescribiendo estas ecuaciones tomando en cuenta las reactancias capacitiva e inductiva, es posible llegar al siguiente circuito:

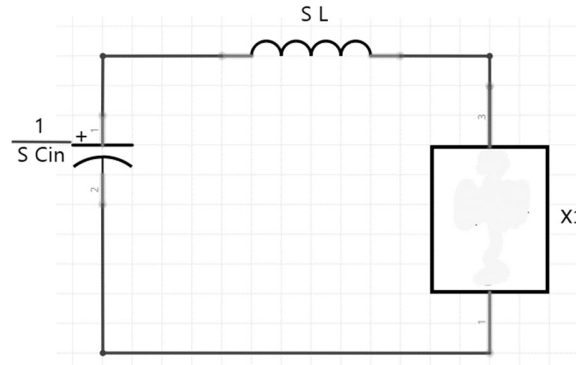


Figura 39 Diagrama con reactancias del conversor DC/DC en estado encendido

Fuente: Autor

Donde X_1 es el paralelo entre la reactancia capacitiva de C_{out} y la resistencia R

$$X_1 = \frac{1}{C_0 S} \parallel R$$

$$X_1 = \frac{R}{1 + R C_0 S}$$

El voltaje de salida se puede expresar como:

$$V_{C_0} = \frac{V_{C_i} \cdot X_1}{L S + X_1}$$

Reemplazando X_1 y simplificando

$$V_{C_0} = \frac{V_{C_i} \cdot R}{R L C_0 S^2 + L S + R}$$

Es posible tras manipular la ecuación, aplicar transformada inversa de Laplace para llegar a una forma que permita construir la ecuación en espacio de estados del sistema:

$$V_{C_0} s^2 = \frac{V_{C_i}}{L C_0} - \frac{V_{C_0} S}{R C_0} - \frac{V_{C_0}}{L C_0}$$

$$\frac{d^2 V_{C_0}}{dt^2} = -\frac{1}{R C_0} \frac{dV_{C_0}}{dt} - \frac{V_{C_0}}{L C_0} + \frac{V_{C_i}}{L C_0}$$



De igual manera, el voltaje sobre C_i se puede calcular como su corriente por su reactancia:

$$V_{C_i} = I_{C_i} \cdot \frac{1}{C_i \cdot S}$$

La corriente sobre el condensador es inversa a la corriente sobre el inductor por lo que:

$$I_{C_i} = -I_L$$

La corriente sobre el inductor, también se puede expresar como el voltaje sobre la inductancia, sobre su reactancia:

$$I_L = \frac{V_{C_i} - V_{C_0}}{LS}$$

Reemplazando en el voltaje de C_i

$$V_{C_i} = \frac{V_{C_0} - V_{C_i}}{LC_i \cdot S^2}$$

$$V_{C_i} S^2 = \frac{V_{C_0}}{LC_i} - \frac{V_{C_i}}{LC_i}$$

Aplicando transformada inversa de Laplace:

$$\frac{d^2 V_{C_i}}{dt^2} = \frac{V_{C_0}}{LC_i} - \frac{V_{C_i}}{LC_i}$$

De esta forma, se llega a la ecuación de espacio de estados del sistema

$$\begin{bmatrix} \ddot{V}_{C_0} \\ \dot{V}_{C_0} \\ \ddot{V}_{C_i} \\ \dot{V}_{C_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_0} & -\frac{1}{LC_0} & 0 & \frac{1}{LC_0} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{LC_i} & 0 & -\frac{1}{LC_i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{C_0} \\ V_{C_0} \\ \dot{V}_{C_i} \\ V_{C_i} \end{bmatrix}$$

Estado apagado

En este estado, la bobina previamente cargada con corriente suministra corriente al condensador y a la resistencia de carga

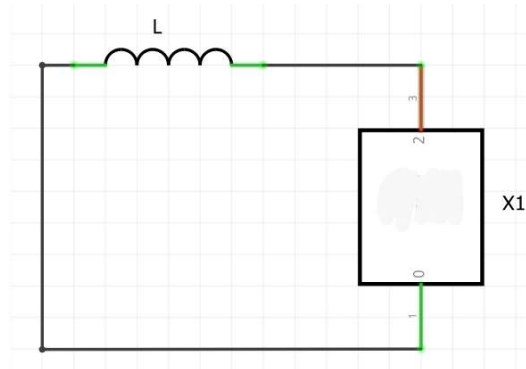


Figura 40 equivalente con reactancias del conversor DC&DC en estado apagado.

Fuente: Autor

Considerando nuevamente a x_1 como el paralelo entre las reactancias de C_{out} y R

$$X_1 = \frac{1}{C_0 S} \parallel R$$

$$X_1 = \frac{R}{1 + RC_0 S}$$

El voltaje de salida se puede expresar como:

$$V_{C_0} = I_L \cdot X_1$$

$$V_{C_0} = I_L \cdot \frac{R}{1 + RC_0 S}$$

I_L se puede expresar mediante su reactancia como:

$$I_L = \frac{V_L}{LS}$$

Dado que $V_L = -V_{C_0}$

$$V_{C_0} = \frac{-V_{C_0}}{LS} \cdot \frac{R}{RC_0 S + 1}$$

$$V_{C_0} RC_0 LS^2 + V_{C_0} LS = -V_{C_0} R$$

$$V_{C_0} S^2 = \frac{-V_{C_0} R - V_{C_0} LS}{RLC_0}$$



Aplicando transformada inversa de Laplace

$$\frac{d^2 V_{C_0}}{dt^2} = -\frac{1}{RC_0} \frac{dV_{C_0}}{dt} - \frac{V_{C_0}}{LC_0}$$

Por último, ya que C_i queda desconectado del sistema de regulación, se puede concluir que:

$$V_{C_i} = \frac{I_{C_i}}{C_i S}$$

$$I_{C_i} = 0$$

$$SV_{C_i} = 0$$

$$S^2 V_{C_i} = 0$$

$$\frac{d^2 V_{C_i}}{dt^2} = 0$$

Lo que en su forma de espacio de estados expresa la dinámica del sistema:

$$\begin{bmatrix} \ddot{V}_{C_0} \\ \dot{V}_{C_0} \\ \ddot{V}_{C_i} \\ \dot{V}_{C_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_0} & -\frac{1}{LC_0} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C_0} \\ \dot{V}_{C_0} \\ V_{C_i} \\ \dot{V}_{C_i} \end{bmatrix}$$

Hasta este punto del cálculo, se han considerado los estados encendido y apagado como circuitos diferentes, para reunir su análisis en una sola respuesta y linealizar dicha mezcla, se considera que la solución completa es:

$$\dot{X} = \dot{X}_{on} \cdot D + \dot{X}_{off} \cdot (1 - D)$$

Donde:

$\dot{X}_{on}$ es la matriz de espacio de estado para el estado encendido

$\dot{X}_{off}$ es la matriz de espacio de estado para el estado apagado

D es un factor proporcional ancho de pulso (entre 1 y 0) de la conmutación de la señal de control de los mosfet.

Por lo que



$$\begin{bmatrix} \ddot{V}_{C_0} \\ \dot{V}_{C_0} \\ \ddot{V}_{C_i} \\ \dot{V}_{C_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_0} & -\frac{1}{LC_0} & 0 & \frac{1}{LC_0} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{LC_i} & 0 & -\frac{1}{LC_i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} D \begin{bmatrix} \dot{V}_{C_0} \\ V_{C_0} \\ \dot{V}_{C_i} \\ V_{C_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_0} & -\frac{1}{LC_0} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} (1-D) \begin{bmatrix} \dot{V}_{C_0} \\ V_{C_0} \\ \dot{V}_{C_i} \\ V_{C_i} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{V}_{C_0} \\ \dot{V}_{C_0} \\ \ddot{V}_{C_i} \\ \dot{V}_{C_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{RC_0} & -\frac{D}{LC_0} & 0 & \frac{D}{LC_0} \\ D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{LC_i} & 0 & -\frac{D}{LC_i} \\ 0 & 0 & D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{C_0} \\ V_{C_0} \\ \dot{V}_{C_i} \\ V_{C_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{(1-D)}{RC_0} & -\frac{(1-D)}{LC_0} & 0 & 0 \\ (1-D) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-D) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{C_0} \\ V_{C_0} \\ \dot{V}_{C_i} \\ V_{C_i} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{V}_{C_0} \\ \dot{V}_{C_0} \\ \ddot{V}_{C_i} \\ \dot{V}_{C_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{RC_0} - \frac{(1-D)}{RC_0} & -\frac{D}{LC_0} - \frac{(1-D)}{LC_0} & 0 & \frac{D}{LC_0} \\ D + (1-D) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{LC_i} & 0 & -\frac{D}{LC_i} \\ 0 & 0 & D + (1-D) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{C_0} \\ V_{C_0} \\ \dot{V}_{C_i} \\ V_{C_i} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{V}_{C_0} \\ \dot{V}_{C_0} \\ \ddot{V}_{C_i} \\ \dot{V}_{C_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC_0} & -\frac{1}{LC_0} & 0 & \frac{D}{LC_0} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{LC_i} & 0 & -\frac{D}{LC_i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{C_0} \\ V_{C_0} \\ \dot{V}_{C_i} \\ V_{C_i} \end{bmatrix}$$

La implementación en Simulink de este sistema es:

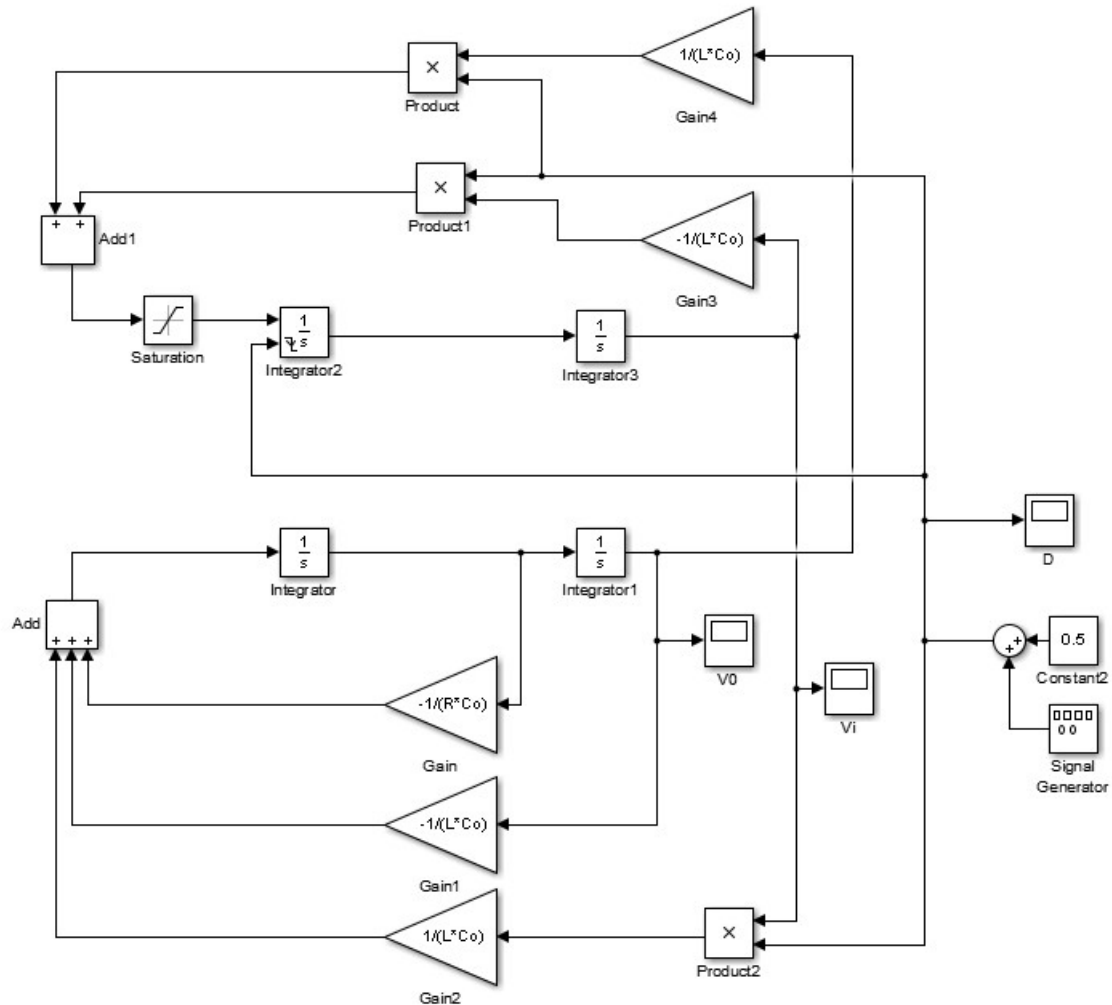


Figura 41 Modelo en Simulink del sistema de captura y regulación de voltaje.

Fuente: Autor

La respuesta natural empleada para el sistema se seleccionó en torno a los 400kHz, que es un valor empleado en varias soluciones comerciales, dado que permite reducir significativamente el tamaño de las bobinas empleadas, reduce el efecto de interferencia electromagnética con otros elementos cercanos y se encuentra en el rango de operación de la mayoría de los elementos como Mosfets y comparadores empleados en sistemas de regulación switchada.

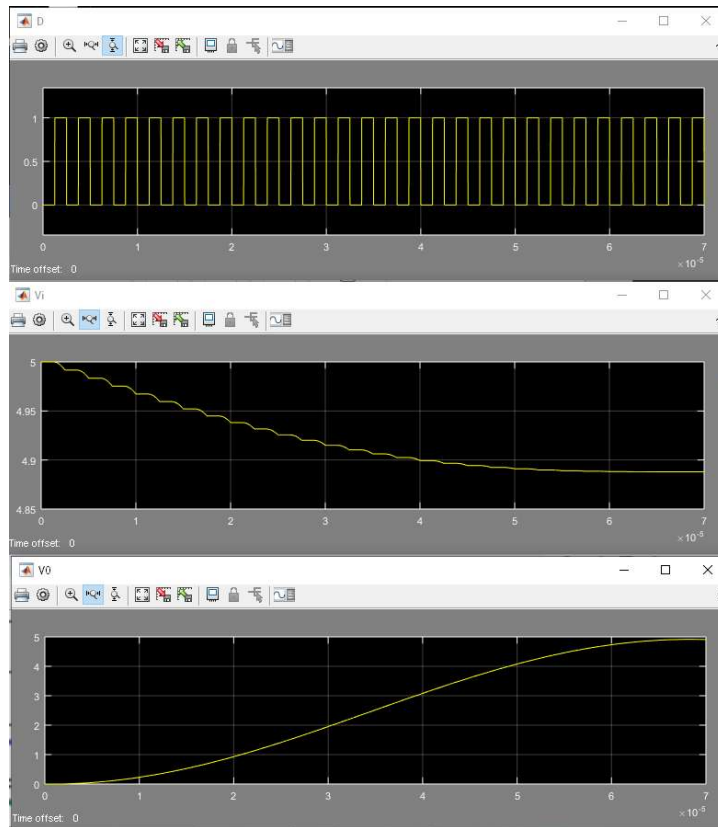


Figura 42 Simulación del conversor tipo Buck en lazo abierto.

Fuente: Autor

Este modelo se emplea como el submodelo RLC alrededor del cual se construye el modelo equivalente a la regulación completa del TLC3588 (incluyendo su controlador).

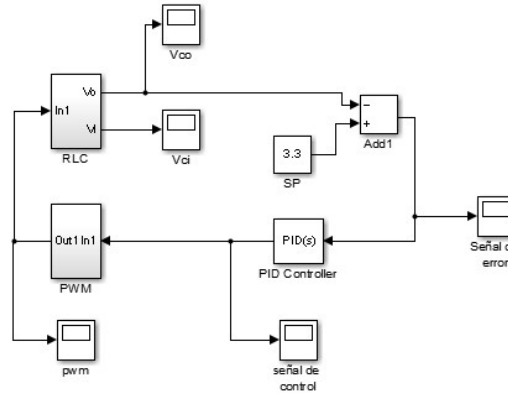


Figura 43 Modelo en Simulink del conversor DC/DC con su sistema de control.

Fuente: Autor

La respuesta regulada del sistema se puede apreciar en la Figura 44:

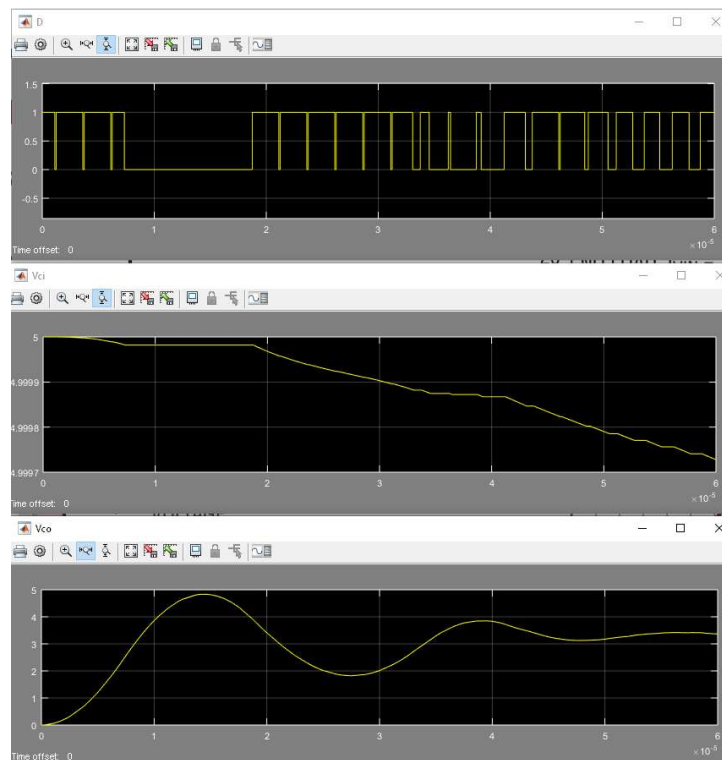


Figura 44 respuesta del modelo de regulación de voltaje pzt.

Fuente: el autor.

Si bien la simulación muestra una respuesta coherente con el modelo propuesto, el comportamiento del sistema depende fundamentalmente de las tasas de carga y descarga de los capacitores de entrada y salida, en la figura se aprecia la comparación entre diferentes relaciones de estos valores, con una carga de consumo fija de 1M Ohm.

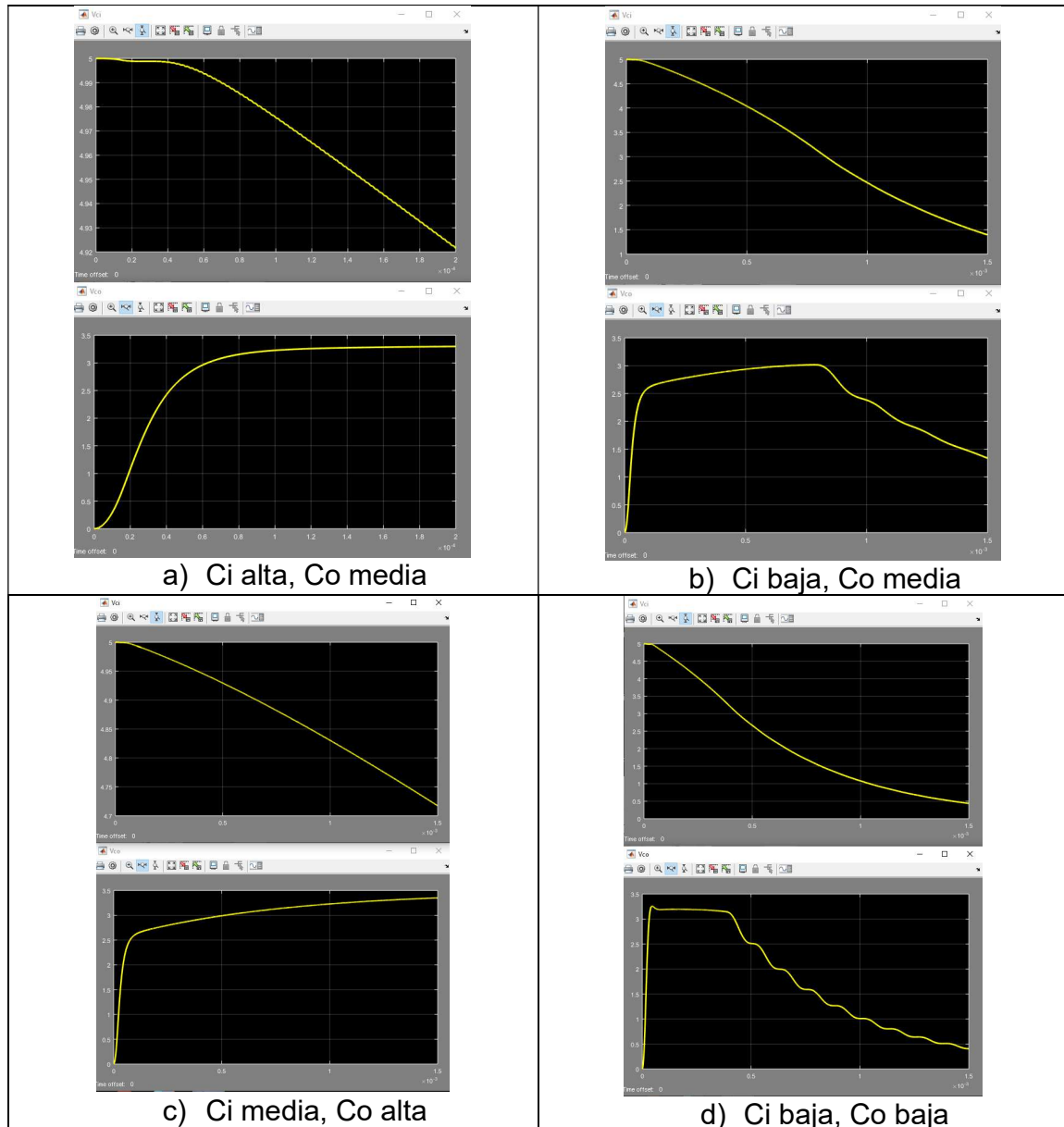


Figura 45 respuesta de regulación, ante diferentes combinaciones de capacitancias de entrada y salida.

Fuente: el autor.

Partiendo de la Figura 45 es posible apreciar que capacitancias de salida (C_o) bajas, entregan voltajes de salida que se descenden muy rápidamente, haciéndolo difícil de regular. por otra parte, para valores medios de C_o , el voltaje de salida es regulable y se carga este condensador en un tiempo razonable, mientras que valores de C_o altos, tienen periodos de estabilización mayores en el voltaje de salida, pero la duración de este voltaje estable es mucho mayor, por lo que se contemplara emplear un valor de capacitancia alta en la salida para extender la duración del voltaje regulado.

Para la capacitancia de entrada, se observa que C_{in} bajas, no consiguen una regulación estable, mientras que valores medios y altos consiguen un voltaje de salida regulable, por lo cual se descartaran valores bajos en la capacitancia de entrada, sin embargo, con Valores de C_{out} altos, un valor medio de C_{in} no alcanza rápidamente su valor deseado (3.3V), aunque es una salida relativamente estable.

Cabe resaltar que el valor de C_{in} también repercute en la cantidad de pasos necesarias para alcanzar el voltaje de regulación a la entrada del sistema (5V), así pues, mientras una C_{in} de 500uf requiere cerca de 600 pasos, un C_{in} de 20uf, requiere tan solo 30 pasos para entregar el voltaje de operación.

Por otra parte se considerará un valor de C_{out} mayor al de C_{in} , seleccionando una relación C_o/C_i de 5 a 1, es decir

$$C_{out}=5 \cdot C_{in}$$

$$C_{out}=5 \cdot 20\text{uf}=100\text{uf}$$

Obteniendo así en la simulación, cerca de 5 segundos de voltaje regulado.

7 PRUEBAS Y RESULTADOS

Para las pruebas con este integrado, se empleó el sistema conocido como “ENERGY HARVESTING SOLUTION TO GO” de la empresa Würth Elektronik.



Figura 46 sistema de desarrollo "Solution to go"

Fuente: Autor

Dicho sistema, está compuesto por dos partes fundamentales:

Tarjeta de captura energética: la cual contiene cuatro convertidores de Linear technology, optimizados para diferentes fuentes de energía alternativa, entre ellas la piezoeléctrica.

Kit Giant Gecko: el cual posee un microcontrolador EFM32 de muy bajo consumo, acompañado de una pantalla LCD, programado para la medición de energía generada

En general el sistema está pensado para su uso en diseño y prueba, de soluciones en torno a generadores alternativos de energía.

Empleando este sistema de desarrollo y configuró un sistema generador piezoeléctrico, con regulación de voltaje DC 3.3V, coherente con las simulaciones realizadas.

Para las pruebas realizadas, se usó una carga de 1MΩ.

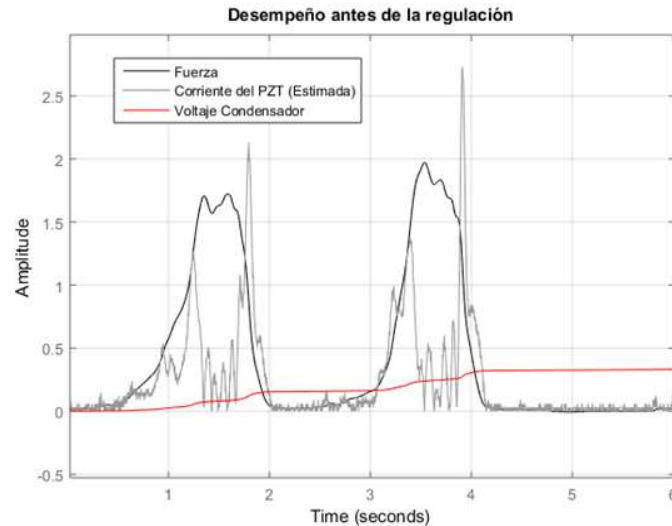


Figura 47 Carga de condensador intermedio C_i

Fuente: Autor

De la Figura 47 se puede observar que, por cada paso dado sobre el sistema, se incrementa el voltaje, aproximadamente en 0.3 voltios, lo que es coherente con los cálculos realizados previamente, donde se estimaban 30 pasos para una carga completa.

La prueba de carga completa arroja una leve diferencia, como se muestra en la Figura 48, fueron necesarios cerca de 35 pasos para alcanzar el voltaje de operación, esta diferencia se debe en gran parte a las no linealidades del sistema que no fueron consideradas en el modelamiento del sistema, tales como:

- Voltaje de operación de los diodos del rectificador de entrada.
- Consumo de los circuitos de sensado y regulación de voltaje.
- Capacitancias parasitas y fugas

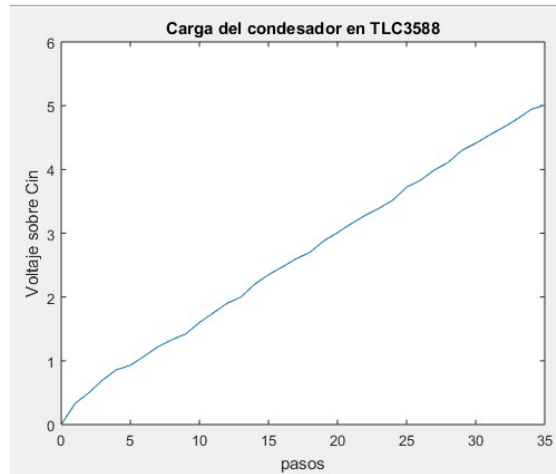


Figura 48 Medición de pasos contra voltaje cargado en el Condensador de entrada C_i

Fuente: Autor.

Observando el voltaje de salida del sistema, respecto a la cantidad de pasos dados, se encontró que el sistema de autoapagado del regulador TLC3588 empleado, si bien protege el circuito de salida de su operación con voltajes inestables o con picos indeseables, hace necesario que para alcanzar el voltaje programado de (3.3V) se requiera de varias cargas en el condensador de entrada, es decir partiendo del sistema totalmente descargado, se requieren varios ciclos de carga lo que implica una mayor cantidad de pasos, esta relación de pasos dados contra los voltajes en C_i y C_o se ilustra en la Figura 49

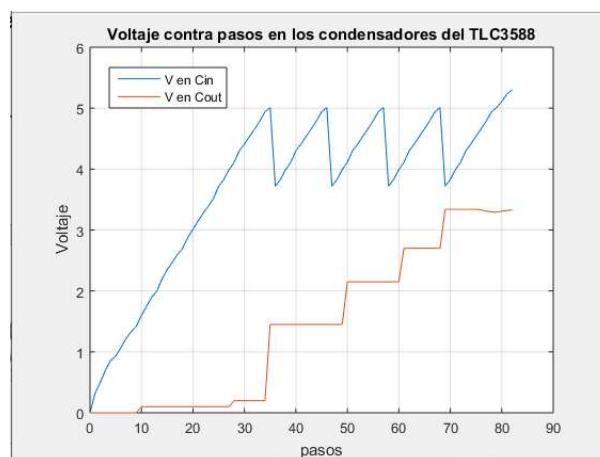


Figura 49 Medición de voltaje contra pasos en los condensadores del TLC3588

Fuente: Autor

Cabe resaltar que una vez obtenido el voltaje de operación, se requieren (según las medidas realizadas) alrededor de once pasos para alcanzar nuevamente el voltaje regulado de 3.3V

Dicho voltaje con una carga de 1M Ohm permanecerá estable alrededor de 4 segundos, Manteniendo un voltaje estable entre 3.4 y 2.95V, es decir un rizado cercano al 10%.



8 CONCLUSIONES

Del estudio y diseño realizados en el transcurso de este proyecto, fue posible llegar a las siguientes conclusiones:

Los elementos piezoeléctricos son sistemas livianos, sólidos y sin piezas mecánicas que permitan su desgaste, lo cual los hace ideales para entornos con baja posibilidad de mantenimiento.

Posiblemente dentro de las energías limpias, la piezoelectricidad, sea una de las más simples de implementar, sin embargo, la potencia entregada por este tipo de sistemas es también de las más limitadas entre las energías no convencionales. Por lo que su aplicación se recomienda para cargas de bajo consumo y que soporten alimentación por breves periodos de tiempo, como sensores y transmisores de datos en el campo IOT, entre otras aplicaciones.

A pesar de que su simplicidad y robustez por no poseer partes móviles, hacen que los discos PZT sean una solución excelente para espacios reducidos y ambientes complejos, es necesario considerar los límites de esfuerzo mecánico de estos elementos, ya que al ser cristales (generalmente cerámicas compuestas), son relativamente frágiles y requieren por ello de protecciones mecánicas que los protejan de golpes o sobre esfuerzos.

La carga eléctrica aplicada a los generadores piezoeléctricos tiene un impacto significativo en su desempeño, durante el estudio realizado fue posible obtener voltajes pico cercanos a los setenta voltios, sin embargo, esto solo fue posible con resistencias de $10M\Omega$, al ir reduciendo el valor de esta resistencia, las amplitudes máximas obtenidas decrecieron considerablemente.

Si bien los arreglos de múltiples discos piezoeléctricos en serie y paralelo mejoran el desempeño eléctrico (mayor voltaje o mayor corriente, respectivamente), el hecho de distribuir la fuerza aplicada entre varios elementos, reduce su eficiencia, por lo cual en estructuras monobloque, es más eficiente emplear un solo disco generador.

9 RECOMENDACIONES FUTURAS

El presente proyecto, sirve como una primera aproximación a la apropiación del conocimiento a nivel institucional en el campo de la generación de energía a partir del efecto piezoeléctrico, aprovechando la energía del desplazamiento de personas, mediante la conversión de pisadas en energía.

Durante el desarrollo de este proyecto, se encontraron aspectos mejorables a tener en cuenta en futuras revisiones sobre este mismo tema como:

Emplear celdas piezoeléctricas flexibles, si bien el sistema cumple su cometido, su aprovechamiento está seriamente limitado por la cantidad de pasos dados sobre las celdas piezoeléctricas de captura de energía mecánica, en particular, solo se “recolecta” una cantidad limitada de energía por cada paso dado, soluciones como las empleadas por masas oscilantes en los PZT flexibles, permiten que cada perturbación mecánica (en este caso, cada paso dado), genere una oscilación que dura más tiempo que el de la excitación recibida, es decir cada paso entrega varios pulsos de energía.

En tanto al diseño de la estructura física, se recomienda contar con el acompañamiento de un ingeniero mecánico, que permita llegar a un diseño estructural, que aproveche al máximo el sistema piezoeléctrico, minimice el tamaño y peso de la estructura y maximice la vida útil y la facilidad de su construcción e instalación.

Incluir un sistema de batería que permita su carga y aprovechamiento de energía por tiempos mayores para el sistema.

Aprovechar la energía captada por el sistema en una aplicación real de bajo consumo, por ejemplo este tipo de tecnología es viable para la alimentación de sistema de censado y transmisión orientados a internet de las cosas, ya que permite que la operación intermitente de circuitos no conectados a alguna fuente externa de alimentación.

Estudiar el desempeño de la configuración propuesta en un ambiente de alto tráfico, dado que 35 pasos que son necesario para el inicio de operación del sistema, pueden parecer una cifra alta, pero sería provechoso contrastar estas cifras con un entorno real y su verdadera utilidad como alimentación de pequeños sistemas de iluminación o censado de variables físicas.

10 REFERENCIAS

- [1] P. Ordoñez, “Estudio del comportamiento de una cerámica piezoelectrica mediante elementos finitos,” Universidad politecnica de Valencia, 2011.
- [2] I. Measurement specialties, “Piezo Film Sensors Technical Manual,” Norristown, 1999.
- [3] M. Staworko and T. Uhl, “MODELING AND SIMULATION OF PIEZOELECTRIC ELEMENTS – COMPARISON OF AVAILABLE METHODS AND TOOLS,” 2008.
- [4] M. Al Ahmad, A. M. Elshurafa, K. N. Salama, and H. N. Alshareef, “Modeling of MEMS piezoelectric energy harvesters using electromagnetic and power system theories,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 8, p. 085001, Aug. 2011.
- [5] “OMPI – Búsqueda en las colecciones de patentes nacionales e internacionales.” [Online]. Available: <https://patentscope.wipo.int/search/es/search.jsf>. [Accessed: 18-Dec-2018].
- [6] A. Martín, “Sensores piezoeléctricos - Twenergy,” 2014. [Online]. Available: <https://twenergy.com/a/sensores-piezoelectricos-una-nueva-forma-de-energia-renovable-1545>. [Accessed: 18-Dec-2018].
- [7] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [8] R. S. Dahiya and M. Valle, *Robotic tactile sensing : technologies and system*. Springer, 2013.
- [9] R. C. Tjiptoprodjo, “On a Finite Element Approach to Modeling of Piezoelectric Element Driven Compliant Mechanisms,” University of Saskatchewan, 2005.
- [10] C. A. Howells, “Piezoelectric energy harvesting,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 7, pp. 1847–1850, Jul. 2009.
- [11] Libertad Digital, “Una empresa israelí logra generar electricidad gracias al tráfico - Libertad Digital,” 2009. [Online]. Available: <https://www.libertaddigital.com/ciencia/una-empresa-israeli-logra-generar-electricidad-gracias-al-trafico-1276372565/>. [Accessed: 18-Dec-2018].
- [12] Off grid energy independence, “Piezoelectric roads for California | Off Grid Energy Independence,” 2011. [Online]. Available: <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/3128/piezoelectric-roads-for-california>. [Accessed: 18-Dec-2018].

- [13] S. Wei, H. Hu, and S. He, "Modeling and experimental investigation of an impact-driven piezoelectric energy harvester from human motion," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 10, p. 105020, Oct. 2013.
- [14] H. J. Jung, K. H. Baek, S. Hidaka, D. Song, S. Bin Kim, and T. H. Sung, "Design of a New Piezoelectric Energy Harvester Based on Secondary Impact," *Ferroelectrics*, vol. 449, no. 1, pp. 83–93, Jan. 2013.
- [15] K. H. Baek, S. K. Hong, S. Bin Kim, J. H. Kim, and T. H. Sung, "Study of Charging Efficiency of a Piezoelectric Energy Harvesting System Using Rectifier and Array Configuration," *Ferroelectrics*, vol. 449, no. 1, pp. 42–51, Jan. 2013.
- [16] S. J. Hwang *et al.*, "Designing and manufacturing a piezoelectric tile for harvesting energy from footsteps," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 15, no. 6, pp. 669–674, Jun. 2015.
- [17] X. Li and V. Strezov, "Modelling piezoelectric energy harvesting potential in an educational building," *Energy Convers. Manag.*, vol. 85, pp. 435–442, Sep. 2014.
- [18] E. Lefeuvre, D. Audigier, C. Richard, and D. Guyomar, "Buck-Boost Converter for Sensorless Power Optimization of Piezoelectric Energy Harvester," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 5, pp. 2018–2025, Sep. 2007.
- [19] P. M. Mayrhofer, E. Wistrela, M. Schneider, A. Bittner, and U. Schmid, "Precise Determination of d33 and d31 from Piezoelectric Deflection Measurements and 2D FEM Simulations Applied to ScxAl1-xN," *Procedia Eng.*, vol. 168, pp. 876–879, Jan. 2016.
- [20] Z. H. Zhang, J. W. Kan, X. C. Yu, S. Y. Wang, J. J. Ma, and Z. X. Cao, "Sensitivity enhancement of piezoelectric force sensors by using multiple piezoelectric effects," *AIP Adv.*, vol. 6, no. 7, p. 075320, Jul. 2016.
- [21] A. E. Guennam, "Modelo para compuestos piezoeléctricos utilizados en control activo," Universidad nacional de Tucumán, 2005.
- [22] Z. Lašová and R. Zemčík, "Comparison of Finite Element Models for Piezoelectric Materials," *Procedia Eng.*, vol. 48, pp. 375–380, Jan. 2012.
- [23] A. Lebled, B. Necib, and M. Sahli, "Finite Element Analysis of the Local Effect of a Piezoelectric Patch on an Aluminum Plate," 2017.
- [24] M. Mora *et al.*, "Reducción de ruido digital en señales ECG utilizando filtraje por convolución," *Investig. y Cienc. (Universidad Autónoma Aguascalientes)*, vol. 40, pp. 26–32, 2008.

- [25] A. Ambardar, *Procesamiento de señales analógicas y digitales*, Segunda. Mexico D.F.: Thomson Learning, 2014.
- [26] J. Luo, "Energy Harvesting Using Flexible Piezoelectric Materials," 2016.
- [27] IEEE, *IEEE standard for transitions, pulses, and related waveforms*, 181/2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [28] M. J. Hasan, M. H. Islam, and Q. Tareq, "High Efficiency Boost Rectifier (Bridgeless) For Energy Harvesting," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Energy*, vol. 3, no. 10, Jan. 1970.
- [29] S. Carreon-Bautista, L. Huang, and E. Sanchez-Sinencio, "An Autonomous Energy Harvesting Power Management Unit With Digital Regulation for IoT Applications," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 6, pp. 1457–1474, Jun. 2016.
- [30] Y.-K. Teh and P. K. T. Mok, "A piezoelectric energy harvesting interface circuit using one-shot pulse transformer boost converter based on water bucket fountain strategy," in *2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2014, pp. 1993–1996.
- [31] Y. M. B and K. Shanmukha Sundar, "Design of Piezoelectric Energy Harvesting and Storage Devices," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng. (An ISO)*, vol. 3297, 2007.
- [32] H. Yu, J. Zhou, L. Deng, and Z. Wen, "A Vibration-Based MEMS Piezoelectric Energy Harvester and Power Conditioning Circuit," *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 3323–3341, Feb. 2014.
- [33] K. Uchino, "Piezoelectric Energy Harvesting Systems-Essentials to Successful Developments," *Energy Technol.*, vol. 6, no. 5, pp. 829–848, May 2018.
- [34] F. Bernet Piquet, E. G. del Carpio Chávez, and A. Fuertes del Pozo, "Estudio de generación eléctrica mediante materiales piezoeléctricos y su aplicación al diseño de un sistema electrónico generador incorporado al calzado," May 2016.
- [35] Y. Jiang, S. Shiono, H. Hamada, T. Fujita, K. Higuchi, and K. Maenaka, "LOW-FREQUENCY ENERGY HARVESTING USING A LAMINATED PVDF CANTILEVER WITH A MAGNETIC MASS."
- [36] G. H. Barbehenn, "True Grid Independence: Robust Energy Harvesting System for Wireless Sensors Uses Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply and Li-Poly Batteries with Shunt Charger," 2010.
- [37] J. Qiu, H. Jiang, H. Ji, and K. Zhu, "Comparison between four piezoelectric

energy harvesting circuits,” *Front. Mech. Eng. China*, vol. 4, no. 2, pp. 153–159, Jun. 2009.

- [38] T. N. Tengku Mohamad, J. Sampe, and D. D. Berhanuddin, “Architecture of Micro Energy Harvesting Using Hybrid Input of RF, Thermal and Vibration for Semi-Active RFID Tag,” *Eng. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 183–197, Mar. 2017.
- [39] L. Technology Corporation, “LTC3588-1 - Nanopower Energy Harvesting Power Supply.”
- [40] F. Huet, V. Boitier, F. Huet, and V. Boitier, “Design Strategy of Conventional Electronic for Wireless Sensor Node Powered by Vibration Energy Harvester,” 2019.