

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la generación de energía mediante
tecnología piezoeléctrica para alimentar dispositivos
de baja potencia

Study of energy generation using piezoelectric
technology to power low-power devices

Autor

Mohamed Rahmouni

Directores

Raúl Igual Catalán y María Abián Vicén

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel
2021

Resumen

Hoy en día las energías renovables son tanto una necesidad como una realidad, ya que se entienden como un recurso alternativo a la generación de energía a partir de los combustibles fósiles, reduciendo su dependencia y buscando un impacto positivo en el ya avanzado cambio climático.

En la actualidad los sensores piezoeléctricos están siendo considerados una nueva forma de energía renovable por las diversas ventajas que presentan tanto desde el punto de vista energético como económico.

En este trabajo, se ha procedido al estudio de los materiales piezoeléctricos como fuente alternativa para la generación de energía eléctrica renovable, especialmente para dispositivos de bajo consumo. Los transductores piezoeléctricos usados proporcionan alimentación de corriente alterna, la cual mediante un circuito rectificador se obtiene una alimentación en corriente continua para la alimentación de diferentes cargas electrónicas conectadas a la salida de este. Además, se realiza el diseño de una estructura para el material piezoeléctrico que, mediante diferentes pruebas experimentales, ha demostrado su eficiencia para aumentar el voltaje generado por el propio material.

Abstract

Nowadays, renewable energies are both a necessity and reality, since they are understood as an alternative resource to the generation of energy from fossil fuels, reducing their dependence and seeking a positive impact on the already advanced climate change.

Currently, piezoelectric sensors are considered as a promising new form of renewable energy due to the various advantages they present both from an energy and economic point of view.

In this work, we have proceeded to study the piezoelectric materials as an alternative source for the generation of renewable electrical energy, especially for low-consumption devices. The piezoelectric transducers used provide alternating current power, which supply direct current by means of a rectifier circuit to power different electronic loads connected. In addition, a structure for the piezoelectric material is designed. As a result of different experimental tests, it has shown its efficiency in increasing the voltage generated by the material itself.

Índice de contenidos

1. Objetivos del proyecto	1
2. Introducción a la piezoelectricidad	1
2.1. Historia	1
2.2. El efecto piezoeléctrico. Concepto de generador piezoeléctrico	1
2.3. Formulación matemática del efecto piezoeléctrico.....	3
3. Tecnología piezoeléctrica para la generación de energía	5
3.1. Transductores mecánicos para la recolección de energía	5
3.2. Materiales piezoeléctricos	8
3.3. Transductores piezoeléctricos, Circonato-titanato de plomo.....	9
3.4. Cálculo analítico del voltaje generado por los transductores piezoeléctricos.....	10
3.5. Cálculo experimental del voltaje generado por los transductores piezoeléctricos	12
- Señal del transductor PZT	12
4. Baldosa piezoeléctrica como aplicación	14
4.1. Esquema eléctrico baldosa piezoeléctrica; Planteamiento del problema	14
- Etapa de rectificación.....	15
- Convertidor elevador ("STEP UP" O "BOOST")	16
- Etapa de almacenamiento (Batería o Supercondensador)	16
4.2. Simulación del problema.....	17
- Simulación de la carga y descarga del condensador sobre el led	17
- Simulación del circuito convertidor-elevador	19
4.3 Ensayos realizados (Tratamiento de la señal)	20
- Transductor y Led en serie	20
- Rectificación de la señal de entrada	21
- Filtrado de la señal	21
- Convertidor dc-dc para la elevación del voltaje.....	22
5. Conclusiones previas; replanteamiento del problema y mejoras	23
5.1. Multiplicador de tensión para la elevación del voltaje	23
5.2. Simulación del multiplicador de tensión.....	23
5.3. Simulación del circuito completo	24
5.4. Ensayo multiplicador de tensión; Resultados	24
5.5. Mejoras	25
5.5.1. Esfuerzo mecánico al que es sometido el transductor piezoeléctrico	25
5.5.2. Ventajas de la estructura piezoeléctrica	26
5.6. Diseño e impresión de la estructura piezoeléctrica	29

6. Resultados.....	30
6.1. Curva V-I y Potencia	31
6.1.1. Aprovechamiento de la energía mecánica peatonal.....	32
7. Conclusiones y líneas futuras	33
7.1. Conclusiones.....	33
7.2. Trabajo futuro	34
8. Referencias	35

ANEXOS

ANEXO I: Ficheros de los circuitos simulados con LTSpice (anexo digital)

ANEXO II: Fichero de la estructura diseñada en FreeCAD (anexo digital)

ANEXO III: Ficheros del programa de impresión Ultimaker Cura (anexo digital)

ANEXO IV: Video explicativo del prototipo de la baldosa piezoeléctrica (anexo digital)

Índice de tablas

Tabla 1. Voltaje analítico de un transductor PZT en función de la masa aplicada.	11
Tabla 1. Voltaje analítico de un transductor PZT en función de la masa aplicada.	11
Tabla 2. Voltaje analítico de 16 transductores PZTs en función de la masa aplicada.....	12
Tabla 3. Comparativa entre Batería y Supercondensador.	17
Tabla 4. Voltaje, Intensidad y Potencia en función de la Resistencia de carga.....	31

Índice de figuras

Figura 1 Modelo molecular simple para explicar el efecto piezoeléctrico: (a) molécula no perturbada; (b) molécula sometida a una fuerza externa, y (c) efecto de polarización sobre las superficies del material [2].	2
Figura 2. Fenómeno piezoeléctrico: (a) corriente de neutralización que fluye a través del cortocircuito establecido sobre un material piezoeléctrico sometido a una fuerza externa; (b) ausencia de corriente a través del material en cortocircuito en un estado no perturbado [2].	3
Figura 3. Transductor electromagnético.	5
Figura 4. (a) Prototipo del dispositivo de recolección de energía de material magnetostrictivo, (b) Capa y lamina del material magnetostrictivos [10].	6
Figura 5. Estructura de condensador variable [11].	6
Figura 6. Material piezoeléctrico sometido a una deformación externa que produce una tensión eléctrica [12].	7
Figura 7. Gráfico de la densidad de potencia frente a la tensión para estrategias comunes de suministro de energía regenerativa [13].	7
Figura 8. Estructura cristalina de cerámica piezoeléctrica tradicional [14].	8
Figura 9. Transductor piezoeléctrico [18].	9
Figura 10. Señal del transductor PZT.	12
Figura 11. Señal del material PZT: Izq. Señal negativa al comprimir; Drcha. Señal positiva al cese de la compresión.	13
Figura 12. Efecto piezoeléctrico directo [14].	13
Figura 13. Diagrama de bloque del circuito electrónico para el tratamiento de la señal piezoeléctrica [21].	14
Figura 14. Rectificador de media onda [22].	15
Figura 15. Salida del rectificador de media onda [22].	15
Figura 16. Rectificado de doble onda con puente de diodos [22].	15
Figura 17. Salida del rectificador de doble onda [22].	16
Figura 18. Diagrama del circuito convertidor elevador DC-DC	16
Figura 19. Circuito carga y descarga del condensador en paralelo a un led [LTspice XVII].	18
Figura 20. Voltajes del circuito carga y descarga del condensador en paralelo a un led: Verde(V1); Azul (Vc1) [LTspice XVII].	18
Figura 21. Circuito carga y descarga de un condensador en paralelo a un led y una resistencia en serie con el led. [LTspice XVII]	19
Figura 22. Voltajes del circuito carga y descarga de un condensador en paralelo a un led y una resistencia en serie con el led: Verde(V1); Azul (Vc1). [LTspice XVII]	19
Figura 23. Circuito convertidor elevador. [LTspice XVII]	20
Figura 24. Voltajes del circuito convertidor elevador: Verde(V1); Azul (Vc1); Roja (VR2). [LTspice XVII]	20
Figura 25. Transductor conectado aun led.	21
Figura 26. Señal de transductor rectificada.	21
Figura 27. Señal filtrada mediante un condensador.	21

Figura 28. Circuito convertidor elevador DC-DC.....	22
Figura 29. Circuito Triplicador de voltaje en LTspice XVII.....	23
Figura 30. Voltajes del circuito Triplicador de voltaje: Verde (Señal de entrada V1); Azul (señal de salida “out”). [LTspice XVII].....	23
Figura 31. Circuito Triplicador conectado a la etapa de rectificación y filtrado.....	24
Figura 32. Voltajes: Verde (Señal a la salida del Triplicador de voltaje); Azul (Señal a la salida de la etapa de filtrado en C4). [LTspice XVII]	24
Figura 33. Voltaje experimental a la salida del Triplicador de voltaje. [Osciloscopio]	24
Figura 34. Primera estructura piezoeléctrica.....	25
Figura 35. Señal completa a la salida del transductor sin estructura.....	26
Figura 36. Semiciclo positivo de la señal a la salida del transductor piezoeléctrico sin estructura.....	27
Figura 37. Señal completa a la salida del transductor piezoeléctrico en la estructura.	27
Figura 38. Semiciclo positivo de la señal a la salida del transductor piezoeléctrico con estructura.....	27
Figura 39. Señal completa a la salida de dos transductores piezoeléctricos en paralelo con la estructura.....	28
Figura 40. Semiciclo positivo de la señal a la salida de dos transductores piezoeléctricos en paralelo con estructura.	28
Figura 41. Estructura piezoeléctrica definitiva.....	29
Figura 42. Tapa de la estructura piezoeléctrica.....	29
Figura 43. Metodología de impresión de la estructura piezoeléctrica en el programa Cura de impresión 3D.....	29
Figura 44. Transductores piezoeléctricos instalados en la estructura piezoeléctrica diseñada....	30
Figura 45. Estructura de la baldosa.	30
Figura 46. Gráfica V-I y Potencia	31

1. Objetivos del proyecto

Este trabajo tiene como objetivo principal el estudio y adquisición de conocimiento en el campo de la producción de energía piezoeléctrica, analizando la situación actual de las energías convencionales, y la viabilidad de usar este tipo de dispositivos en zonas transitadas para poder alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia.

En principio, se abordará el marco teórico sobre el fenómeno de la piezoelectricidad. Posteriormente, como caso práctico, se realizará el diseño y construcción de una baldosa piezoeléctrica para la generación de energía mediante el uso de materiales piezoeléctricos. El sistema se basará en el uso de sensores piezoeléctricos para convertir la energía mecánica de las pisadas humanas en energía eléctrica.

Uno de los puntos esenciales en el cual se centra el trabajo es en el diseño de un circuito electrónico capaz de aprovechar esta energía, lo que se conoce como "*energy harvesting*"[1]. También se diseñará una estructura para potenciar el aprovechamiento de la pisada humana. De esta forma, aportaré mi granito de arena en buscar una solución innovadora a uno de los problemas energéticos que la humanidad está afrontando en la actualidad, que es la búsqueda de tecnologías que favorezcan el desarrollo sostenible de nuestro planeta.

2. Introducción a la piezoelectricidad

2.1. Historia

La palabra piezoelectricidad viene del griego y significa “electricidad por presión” (del griego *piezein*, “estrujar o apretar”). Este nombre fue propuesto por el matemático alemán Hankel en 1881 para dar nombre al fenómeno descubierto en el año 1880 por los hermanos Pierre y Jacques Curie. Habían observado que ciertos materiales, como el cuarzo, turmalina y la sal Rochelle, entre otros, al ser sometidos a tensiones mecánicas, adquieren una polarización eléctrica en su masa originando una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie (una deformación mecánica en el material generaba un voltaje). El efecto piezoeléctrico inverso también existe (la aplicación de un voltaje eléctrico genera una deformación mecánica del material). Esto fue predicho por Lippmann en 1881 y verificado por los hermanos Curie [2][3][4].

2.2. El efecto piezoeléctrico. Concepto de generador piezoeléctrico

La piezoelectricidad es una propiedad que presentan aquellos materiales cuya estructura cristalina carece de centro de simetría [2][3]. En ellos, además de la polarización inducida por un campo eléctrico exterior, se produce también la polarización bajo la influencia de una tensión mecánica. Este efecto se conoce como **efecto piezoeléctrico directo**. Al deformar el material piezoeléctrico se produce un desplazamiento de las partículas cargadas, dando lugar a un momento dipolar en el material y, por influencia, cargas de signo opuesto en las superficies enfrentadas del mismo (Figura 1).

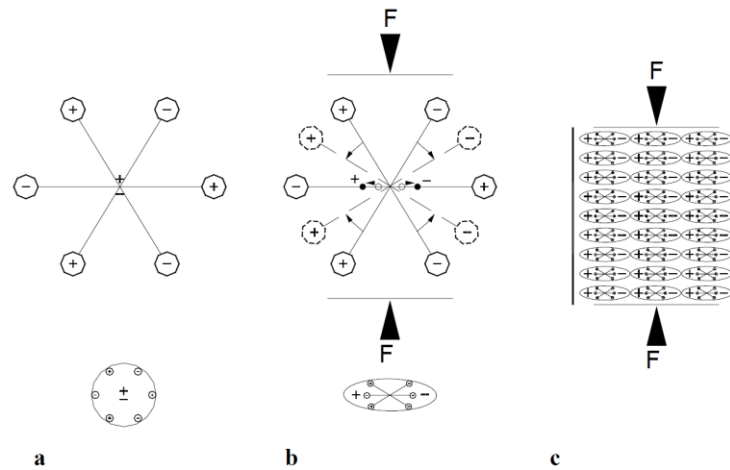


Figura 1 Modelo molecular simple para explicar el efecto piezoeléctrico: (a) molécula no perturbada; (b) molécula sometida a una fuerza externa, y (c) efecto de polarización sobre las superficies del material [2].

Además, en los mismos cristales se da el **efecto piezoeléctrico inverso** que da lugar a la deformación del material al aplicarle una tensión eléctrica. Cuando el material está sometido a un campo eléctrico aparecen fuerzas internas sobre las cargas que constituyen el cristal, y que hacen que dichas cargas modifiquen su posición, produciéndose una deformación mecánica del cristal.

El principio de funcionamiento del **generador piezoeléctrico** es el efecto piezoeléctrico directo, a partir de una fuerza mecánica aplicada, F , obtenemos una señal eléctrica, V , que es cosechada entre dos electrodos depositados en el material piezoeléctrico (Figura 2).

La Figura 2a representa el principio de funcionamiento de un generador piezoeléctrico, donde muestra el material piezoeléctrico sobre el que se aplica presión. Dos placas metálicas utilizadas como electrodos se depositan sobre las superficies donde aparecen las cargas de signo opuesto. Supongamos que esos electrodos tienen un cortocircuito externo a través de un cable al que se ha conectado un galvanómetro. Al ejercer algo de presión sobre el material piezoeléctrico, aparece una densidad de carga vinculada en las superficies del cristal en contacto con los electrodos. Esta polarización genera un campo eléctrico que provoca el flujo de cargas libres existentes en el conductor. Dependiendo de su signo, las cargas libres se moverán hacia los extremos donde la carga ligada generada por la polarización del cristal es de signo opuesto. Este flujo de cargas permanecerá hasta que la carga neutralice el efecto de polarización (Figura 2a) [2].

Cuando la presión sobre el cristal se detiene, la polarización desaparecerá y el flujo de cargas libres se invertirá, volviendo a la condición inicial de reposo (Figura 2b). Este proceso se mostraría en el galvanómetro, que habría marcado dos picos de corriente de signo opuesto. Si se conecta una resistencia en lugar de un cortocircuito y se aplica una presión variable, una corriente fluirá a través de la resistencia y la energía mecánica se transformará en energía eléctrica [2].

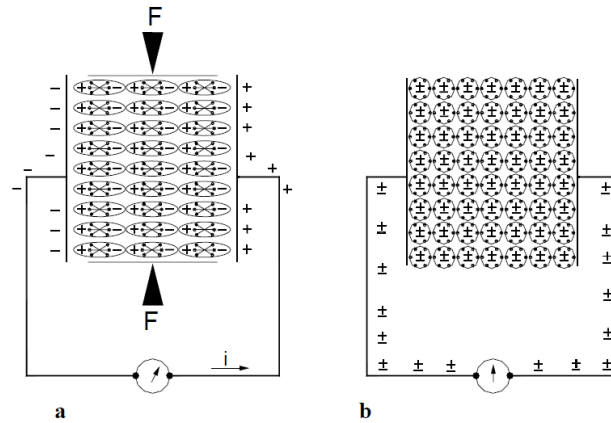


Figura 2. Fenómeno piezoeléctrico: (a) corriente de neutralización que fluye a través del cortocircuito establecido sobre un material piezoeléctrico sometido a una fuerza externa; (b) ausencia de corriente a través del material en cortocircuito en un estado no perturbado [2].

2.3. Formulación matemática del efecto piezoeléctrico

Los experimentos realizados por los hermanos Curie han demostrado que, a la hora de aplicar un esfuerzo (compresión, torsión, esfuerzo cortante...), la densidad de carga superficial que se genera es directamente proporcional al esfuerzo ejercido, y desaparecería cuando el esfuerzo cese [2]. Esta relación se puede formular de manera simple de la siguiente forma:

$$P_p = d T \quad (1.1)$$

Donde P_p es el vector de polarización piezoeléctrico, d (m/V o C/N) es la constante de carga piezoeléctrica, y T (N/m²) es la tensión a la que se ve sometido el material piezoeléctrico.

Todo efecto piezoeléctrico en un material está contenido en la constante de carga piezoeléctrica d . Si $d=0$, el material no sería piezoeléctrico y no existiría ningún acoplamiento entre el campo eléctrico y mecánico [5]. Un valor mayor de la constante de carga piezoeléctrica d , indica un acoplamiento electromecánico más fuerte.

Los hermanos Curie verificaron el efecto piezoeléctrico inverso, y demostraron, que la relación entre la deformación producida y la magnitud del campo eléctrico aplicado en el efecto inverso era igual a la relación entre la polarización producida y la magnitud de la tensión aplicada en el efecto directo. De manera consistente, el efecto piezoeléctrico inverso se puede formular de una manera simple, como primer enfoque, de la siguiente manera [2]:

$$S_p = d E \quad (1.2)$$

Donde S_p es la deformación sufrida por el material piezoeléctrico y E (V/m) el campo eléctrico al que se ve sometido dicho material.

Los efectos piezoeléctricos directos e inversos se pueden formular alternativamente, considerando las propiedades elásticas del material, de la siguiente manera [2]:

$$P_p = d T = d c S = e S \quad (1.3)$$

$$T_p = c S_p = c d E = e E \quad (1.4)$$

El tensor que describe el esfuerzo aplicado, T (N/m²), y el que describe la deformación relativa que experimenta el material, S , se relacionan mediante la constante elástica, c [2]:

$$T = c S \quad (1.5)$$

Esta relación también puede representarse de la siguiente forma:

$$S = s T \quad (1.6)$$

donde, $s = c^{-1}$ (tensor de esfuerzo de elasticidad), e es la constante de tensión piezoeléctrica.

Si el material piezoeléctrico está sujeto a una deformación (S), esta deformación tendrá dos efectos. Por un lado, generara una tensión elástica ($T_e = c S$), por otro lado, generara polarización piezoeléctrica ($P_p = e S$). Esta polarización creara un campo eléctrico interno en el material (el subíndice p indica la causa del campo eléctrico es el efecto piezoeléctrico, el subíndice e indica que la causa de la tensión es de origen elástico) [2]:

$$E_p = \frac{P_p}{\varepsilon} = \frac{eS}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

donde, ε es la constante dieléctrica del material.

Este campo eléctrico de origen piezoeléctrico produce a su vez una deformación [2]:

$$T_p = e E_p \quad (1.8)$$

De modo que tenemos:

$$T = T_p + T_e \quad (1.9)$$

$$S = S_p + S_e \quad (1.10)$$

Si el material piezoeléctrico está sujeto a un campo eléctrico (E) entre los dos electrodos que contienen el material piezoeléctrico, se crea un desplazamiento eléctrico entre ellos, generando una densidad de carga superficial (σ) cuya magnitud es:

$$D = \varepsilon E \quad (1.11)$$

Al ser el material además de dieléctrico, piezoeléctrico, este campo eléctrico produce una deformación $S_p = dE$. Esta deformación hace que aumente la densidad superficial de carga ($P_p = eS = dT$). Por lo tanto, el desplazamiento eléctrico total será [2]:

$$D = dT + \varepsilon E \quad (1.12)$$

La ecuación previa representa el desplazamiento eléctrico producido cuando un campo eléctrico E es aplicado a un material piezoeléctrico y dieléctrico [2].

3. Tecnología piezoeléctrica para la generación de energía

3.1. Transductores mecánicos para la recolección de energía

Un transductor se define como un dispositivo para convertir energía de una forma a otra [6]. Hay muchos tipos de transductores, los más aptos para la conversión de energía vibratoria mecánica en energía eléctrica se dividen en cuatro grupos dependiendo de su principio físico de funcionamiento. Estos son: Electromagnéticos, Magnetostrictivos, Electrostáticos y Electromecánicos [7]. De importancia en el contexto del presente trabajo es el transductor electromecánico para convertir energía eléctrica en mecánica y viceversa.

- Transductores electromagnéticos

El principio de funcionamiento de los transductores electromagnéticos se basa en el fenómeno de inducción electromagnética descubierto por Faraday en el 1831. Este consiste en la generación de una fuerza electromotriz como respuesta a la variación del flujo del campo magnético. En las últimas décadas ha habido un crecimiento en el número de dispositivos físicos que usan este principio [8]. En la Figura 3 se muestra un transductor electromagnético usado como zumbador.



Figura 3. Transductor electromagnético.

- Transductores magnetostrictivos

Los transductores magnetostrictivos se basan en la propiedad que tienen los materiales ferromagnéticos para producir un campo magnético en función de la deformación del material [9]. A continuación, en la Figura 4a se muestra un prototipo del dispositivo de recolección de energía de material magnetostrictivo. El principio de funcionamiento se basa en un impulso externo el cual deforma una lámina o varilla de material ferromagnético (Figura 4b) que se encuentra en el interior del bobinado. Como respuesta a la deformación, el material genera un campo magnético variable en el tiempo que induce una corriente eléctrica en dicho bobinado [10].

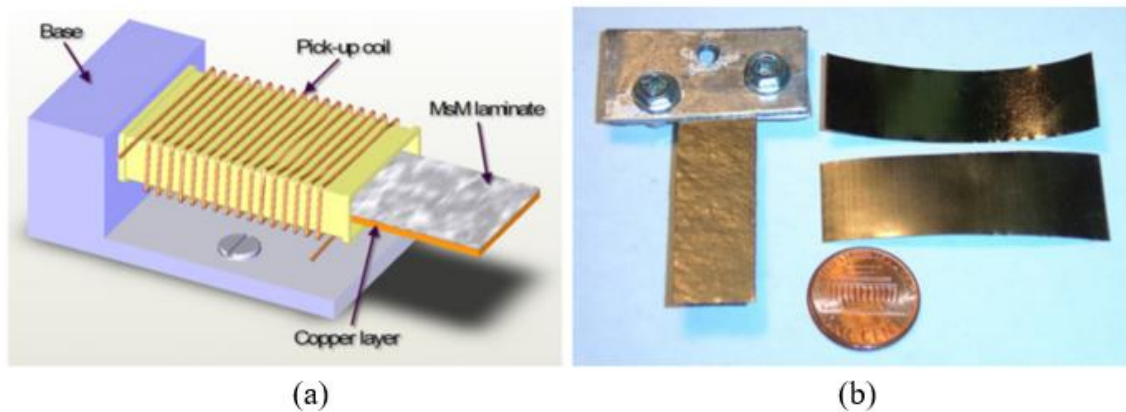


Figura 4. (a) Prototipo del dispositivo de recolección de energía de material magnetostrictivo, (b) Capa y lamina del material magnetostrictivos [10].

- Transductores electrostáticos

Los transductores electrostáticos son estructuras capacitivas formadas por dos placas separadas por aire, vacío o cualquier material dieléctrico. Estos tienen la capacidad de generar una carga variable a partir del movimiento entre los electrodos. Estos son estimulados mecánicamente desde el exterior para hacer variar la distancia entre los electrodos generando así una variación de carga. La Figura 5 muestra la estructura de condensador variable.

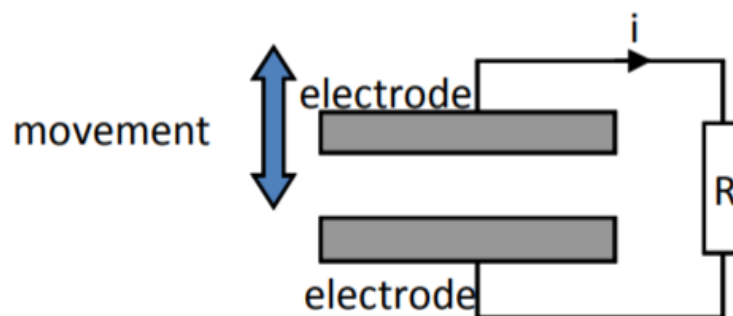


Figura 5. Estructura de condensador variable [11].

- Transductores electromecánicos

El principio de funcionamiento de los transductores electromecánicos se basa en el efecto piezoeléctrico, mediante el cual es posible convertir energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Este fenómeno descubierto en 1890 por los hermanos Curie, está presente en materiales que carecen de centro de simetría. Estos materiales generan cargas eléctricas al ser sometidos a deformaciones mecánicas externas (Figura 6).

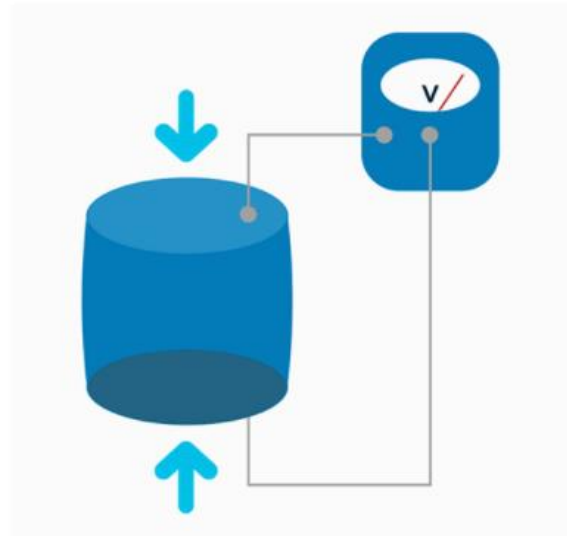


Figura 6. Material piezoeléctrico que al ser sometido a un esfuerzo externo produce una tensión eléctrica [12].

- Diferenciación entre los transductores

De estos cuatro tipos de transductores, los transductores piezoeléctricos resultan ser los que más atención han recibido debido al amplio rango de tensión de salida y densidad de potencia que son capaces de producir. La Figura 7 muestra una comparación gráfica de la densidad de diferentes fuentes de energía tales como: celdas solares, baterías o transductores utilizados en cosecha de energía (*Energy Harvesting*). Claramente se observa la relativamente alta densidad de potencia en un amplio rango de tensión que son capaces de generar los transductores electromecánicos.

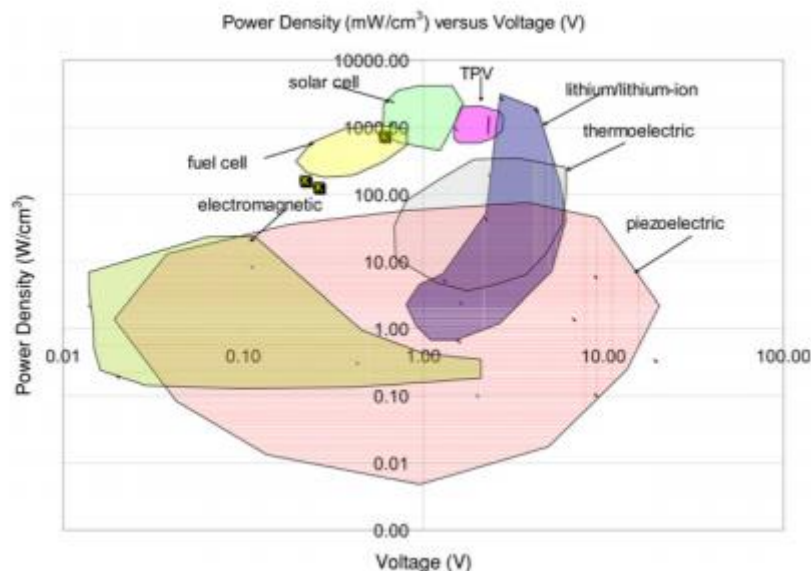


Figura 7. Gráfico de la densidad de potencia frente a la tensión para estrategias comunes de suministro de energía regenerativa [13].

3.2. Materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos están normalmente agrupados en tres categorías [6]:

- 1- Sustratos cristalinos (simples) naturales.
- 2- Cerámica con estructura de perovskita.
- 3- Películas poliméricas.

Algunos de los materiales que muestran un efecto piezoeléctrico más pronunciado son [5]:

- Cristales (Cuarzo, niobato de potasio y sodio...).
- Ciertas cerámicas (Circonato-titanato de plomo o PZT, titanato de bario...).
- Material biológico (huesos...).
- ADN y varias proteínas.

Lo que es realmente interesante es que el efecto piezoeléctrico es mayoritariamente lineal y reversible. Para este trabajo, se va a escoger uno de los materiales cerámicos piezoeléctricos más utilizados en la actualidad el circonato-titanato de plomo o PZT. Este tipo de cerámica está presente en los transductores piezoeléctricos y es capaz de generar piezoelectricidad medible cuando su estructura es sometida a un esfuerzo. La Figura 8 muestra la estructura cristalina de una cerámica piezoeléctrica tradicional.

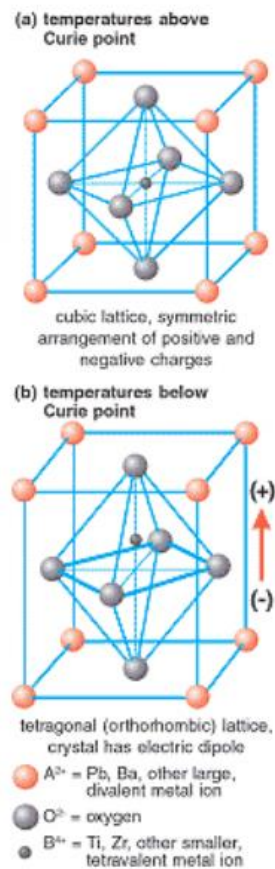


Figura 8. Estructura cristalina de cerámica piezoeléctrica tradicional [14].

3.3. Transductores piezoeléctricos, Circonato-titanato de plomo.

El objetivo del presente trabajo es estudiar la posibilidad de generación de energía mediante tecnología piezoeléctrica para la alimentación de dispositivos de baja potencia. Los transductores piezoeléctricos son ideales para llevar a cabo este estudio, pues al estar compuestos por cerámicas piezoeléctricas, el efecto piezoeléctrico se manifiesta fuertemente en ellos.

Los transductores piezoeléctricos se utilizan ampliamente para enviar y detectar señales en muchas áreas, como ensayos no destructivos, acústica subacuática, imagen médica y en muchas otras aplicaciones ultrasónicas [15]. Entre esas aplicaciones, la acústica ha progresado considerablemente durante la última década, y las cerámicas piezoeléctricas son comúnmente utilizadas como fuente impulsora para producir ondas [16].

El transductor usado en este proyecto es electroacústico (resonador), es decir, su principal función es transformar la electricidad en sonido cuando recibe una señal de una determinada frecuencia y amplitud. Sin embargo, al ser un material piezoeléctrico, también es capaz de transformar las vibraciones o esfuerzos mecánicos en señales eléctricas. El material por el que está formado se denomina circonato-titanato de plomo o PZT. Se trata de un material cerámico de perovskita que muestra un marcado efecto piezoeléctrico [17]. Este tipo de cerámica es una de las más usadas ya que tiene una sensibilidad aún mayor y una temperatura de funcionamiento más alta que otras cerámicas piezoeléctricas [17].

La Figura 9 muestra el transductor piezoeléctrico escogido.

ABT-441-RC

Elemento Piezo, Sirena, 4200 Hz, 0.02 μ F, Diámetro 27 mm, Altura 0.52 mm, Hilos Terminales



multicomp PRO

Fabricante:	MULTICOMP PRO
Referencia del fabricante:	ABT-441-RC
Código Farnell:	1675548
Gama de productos ⓘ	ABT Series
Hoja de datos técnicos:	 ABT-441-RC Datasheet

[Vea todos los documentos técnicos](#)

Figura 9. Transductor piezoeléctrico [18].

Para la adquisición de este material, se han tenido en consideración algunas de sus propiedades y características tales como el grosor y el diámetro, pero lo que más ha influido ha sido el precio. Se ha optado por un material piezoeléctrico económico y que pueda servir de uso para llevar a cabo el propósito principal del trabajo.

Las características de este material vienen detalladas por el fabricante, las cuales serán de uso a la hora de calcular analíticamente el voltaje que es capaz de generar cada transductor piezoeléctrico.

3.4. Cálculo analítico del voltaje generado por los transductores piezoeléctricos

En base a la formulación matemática del efecto piezoeléctrico directo, sabemos que la densidad de carga superficial que genera es directamente proporcional al esfuerzo mecánico ejercido:

$$P_p = d T \quad (1.1)$$

Donde, como ya se ha indicado en el apartado 2.3, P_p es el vector de polarización piezoeléctrico, d (m/V o C/N) es la constante de carga piezoeléctrica, y T (N/m²) es la tensión a la que se ve sometido el material piezoeléctrico.

Para la deducción del voltaje generado por un PZT, sabemos que:

$$Q = C V \quad (3.1)$$

Donde Q es la carga, C (Faradios) es la capacidad, y V (voltios) es el voltaje.

La tensión aplicada tendrá como consecuencia una determinada carga y por lo tanto un voltaje:

$$\frac{Q}{A} = d \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

$$Q = d F \quad (3.3)$$

Donde F es la fuerza y A es el área.

Entonces, si igualamos las ecuaciones 3.3 y 3.1 y despejamos:

$$d F = C V \quad (3.4)$$

$$V = \frac{d F}{C} \quad (3.5)$$

La capacidad es posible determinarla a partir de la permitividad del material (ϵ_r : permitividad relativa, ϵ_0 : permitividad del vacío):

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{t} \quad (3.6)$$

Donde A es el área del material y t es el grosor.

Si sustituimos en la ecuación 3.5, se tiene:

$$V = \frac{d F}{C} = \frac{d F}{\frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{t}} = \frac{d F t}{\epsilon_r \epsilon_0 A} \quad (3.7)$$

Mediante la ecuación 3.7 podemos hacernos una idea de cómo afecta cada parámetro al voltaje que genera el material. Tal y como se aprecia, el voltaje es directamente proporcional a la fuerza y al grosor del material e inversamente proporcional al área. Esto

viene a decir que, no vamos a tener más voltaje por el hecho de tener mayor área en el material, pero sí que aumentaría el voltaje en caso de tener mayor grosor y aplicar mayor fuerza dentro de los límites que existan para cada material.

Anteriormente se ha obtenido la ecuación del voltaje; ahora con los parámetros que el fabricante aporta, podemos calcular el voltaje en función de la fuerza aplicada:

$$C=0.02\mu F$$

$$d=500pC/N$$

La fuerza es masa por aceleración, de modo que, suponiendo 1kg de masa, se obtendría una fuerza de:

$$F = ma = 1kg \cdot \frac{9.81m}{s^2} = 9.81N$$

$$V = \frac{dF}{C} = \frac{d(ma)}{C} = \frac{(500 \times 10^{-12}C/N) \cdot 9.81N}{0.02 \times 10^{-6}F} = 0.245V$$

En el caso anterior, se ha obtenido la diferencia de potencial (analítica) que se obtendría en el borne del material si aplicamos 9.81N de fuerza (1kg de masa) sobre éste. A continuación, en la Tabla 1 se muestra el voltaje (analítico) en función de la masa aplicada sobre 1 piezoeléctrico:

Tabla 1. Voltaje analítico de un transductor PZT en función de la masa aplicada.

1 PZT	Analíticamente
Masa (kg)	Voltaje (V)
1	0.245
2	0.490
3	0.735
4	0.981
5	1.226
10	2.452
15	3.677
20	4.903
30	7.355
40	9.807
50	12.258
60	14.710
70	17.162

En el caso del presente trabajo, se va a usar más de un transductor piezoeléctrico a la vez. Así, en caso de utilizar 16 transductores piezoeléctricos, en la siguiente tabla (Tabla 2), se muestran los picos de voltaje teórico que se obtendrían. Cabe resaltar que para estos materiales existe un límite de fuerza que es posible aplicar sobre los mismos, en caso de sobrepasarse, es posible que se produzca la rotura del material. El propio fabricante menciona que el componente puede resultar dañado si se aplica un esfuerzo mecánico que exceda las especificaciones [19].

Tabla 2. Voltaje analítico de 16 transductores PZTs en función de la masa aplicada.

16 PZT	Analíticamente
Masa (kg)	Voltaje (V)
1	3.923
2	7.845
3	11.768
4	15.691
5	19.613
10	39.227
15	58.840
20	78.453
30	117.680
40	156.906
50	196.133
60	235.360
70	274.586

3.5. Cálculo experimental del voltaje generado por los transductores piezoeléctricos

En este apartado se muestra el resultado de medir experimentalmente el voltaje generado por los transductores piezoeléctricos.

- Señal del transductor PZT

Conectando los bornes del transductor piezoeléctrico a la sonda del osciloscopio, es posible visualizar la señal que se genera en los bornes cuando el material es sometido a una determinada presión. En la siguiente figura (Figura 10) se puede apreciar en detalle:

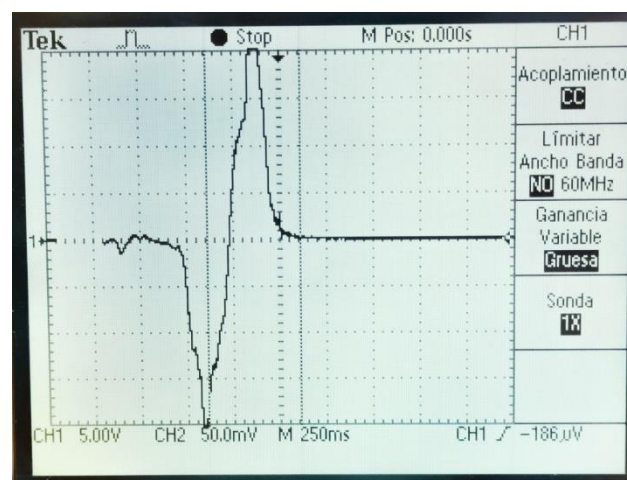


Figura 10. Señal del transductor PZT.

Esta curva es característica de una fuerza mecánica tipo cuasi-estática y se atribuye a la carga y descarga de la capacitancia del piezoeléctrico [20].

En este caso, se ha procedido básicamente a presionar el material usando la mano. Como consecuencia, la señal resultante en los bornes del material es un pulso alterno que tiene una tensión de pico a pico aproximadamente de 40 voltios. Tal y como se aprecia en la Figura 10, existe un pico negativo y otro positivo. El pulso negativo se produce cuando pulsamos el material. En cambio, cuando se deja de pulsar, se produce el pulso positivo. En la siguiente figura (Figura 11) se aprecia mejor este hecho:

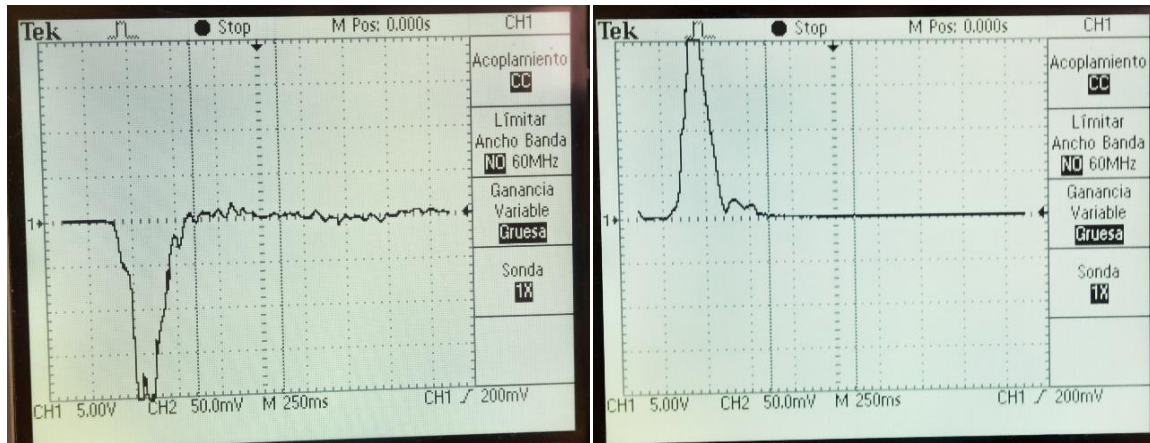


Figura 11. Señal del material PZT: Izq. Señal negativa al comprimir; Drcha. Señal positiva al cese de la compresión.

En la Figura 11, la imagen de la izquierda representa la señal negativa que se genera en los bornes cuando el material es comprimido. En la imagen derecha, se representa el pulso positivo que se genera cuando se deja de pulsar el material (cese de compresión). Esto ocurre debido a que cuando sometemos la materia a compresión, aparecen cargas negativas y positivas en la cara superior e inferior respectivamente. Sin embargo, cuando dejamos de comprimir el material (descarga) ocurre totalmente lo contrario, las cargas positivas aparecen en la cara superior y las negativas en la cara inferior de este; esto se conoce como el efecto piezoeléctrico directo. La Figura 12 que se muestra a continuación representa de forma más visual la explicación previa:

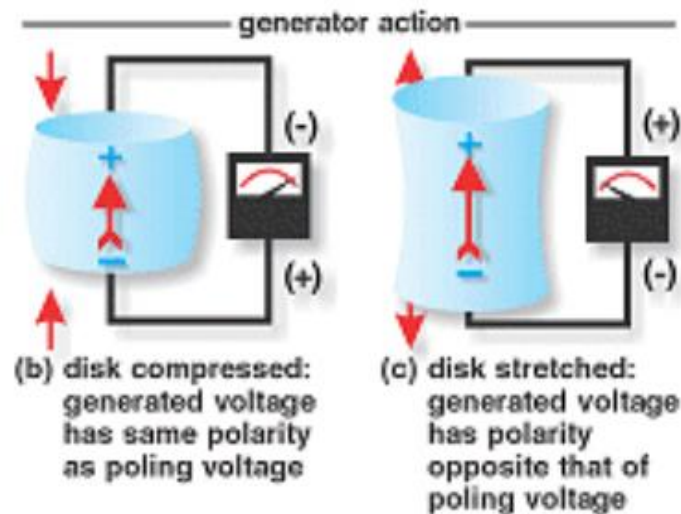


Figura 12. Efecto piezoeléctrico directo [14].

Experimentalmente se concluye que mediante la carga-descarga del material obtenemos:

- Voltaje pico-pico de 40V aproximadamente.
- El voltaje que se obtiene depende de varios parámetros tales como la fuerza de compresión y también la velocidad a la que se aplica. Pues se ha notado que cuanto más veloz sea la compresión mayor es el pico de voltaje que se obtiene.
- La corriente generada es mínima del orden de microamperios.

4. Baldosa piezoeléctrica como aplicación

Este material piezoeléctrico se pretende integrar en una baldosa para el aprovechamiento de la energía de la pisada. Se pretende aprovechar la energía generada para alimentar elementos electrónicos de baja potencia. Para ello, se ha diseñado un circuito de electrónica de potencia que posibilite este aprovechamiento de la energía.

4.1. Esquema eléctrico baldosa piezoeléctrica; Planteamiento del problema

En la Figura 13 se representa el diagrama de bloques del circuito electrónico para el tratamiento de las señales de entrada que obtendremos al someter la baldosa piezoeléctrica a un esfuerzo mecánico. Básicamente, la primera etapa sería la baldosa piezoeléctrica, seguidamente en la segunda etapa tenemos la parte del circuito encargada de rectificar y filtrar la señal alterna (V_{in}) que tenemos a la entrada del rectificador. A continuación, se elevará la tensión continua que obtenemos de la etapa de rectificación (V_{rect}) mediante un convertidor DC-DC (si bien esto no es imprescindible por la magnitud de las tensiones generadas, pero sí sería necesario si se deseara volcar la energía a una batería química tipo LiPo (Litio y polímero) que tiene una tensión de funcionamiento definida) y finalmente almacenaremos la energía en el dispositivo de almacenamiento adecuado (Batería o Supercondensador).

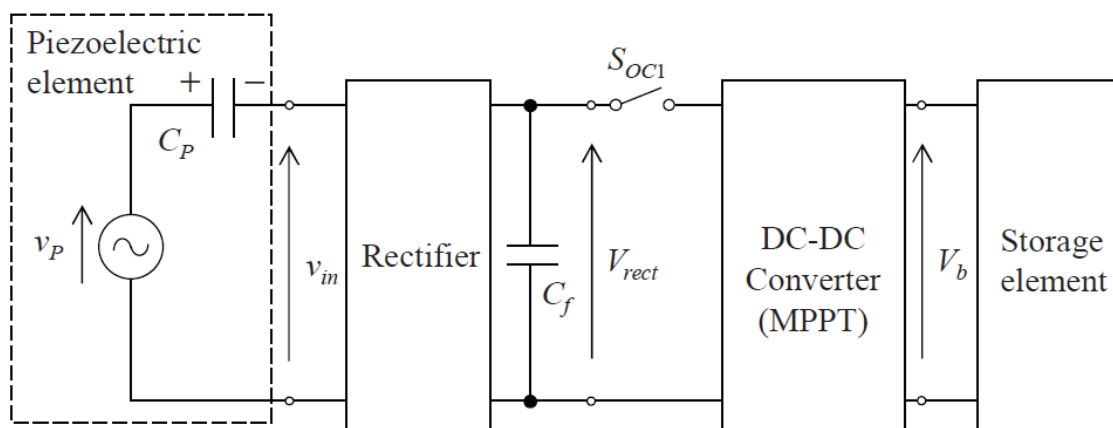


Figura 13. Diagrama de bloques del circuito electrónico para el tratamiento de la señal piezoeléctrica [21].

El diagrama de bloques consta de 4 partes esenciales:

- 1- La estructura de la baldosa.
 - 2- Etapa de rectificación (puente de diodos y condensador).
 - 3- Convertidor DC-DC para elevar el voltaje de entrada.
 - 4- Etapa de almacenamiento (batería o supercondensador).
- Etapa de rectificación

La rectificación es el proceso mediante el cual la corriente alterna se transforma en corriente unidireccional (o pulsante). La rectificación puede ser de media onda o de onda completa. Un rectificador de media onda tiene la estructura que se muestra en la Figura 14. En la Figura 15 se puede ver la salida del rectificador de media onda [22].

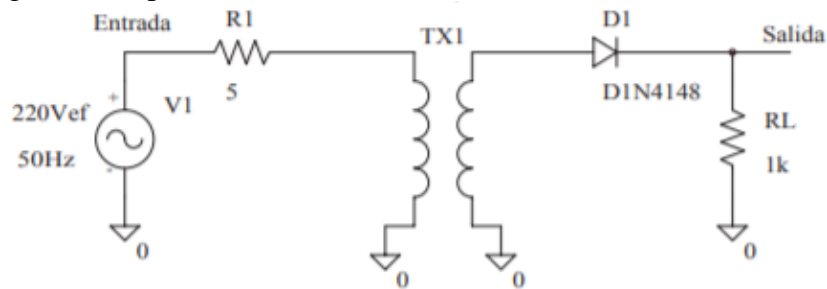


Figura 14. Rectificador de media onda [22].

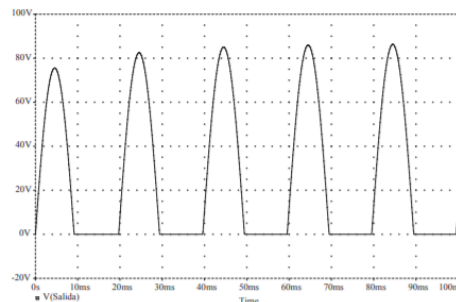


Figura 15. Salida del rectificador de media onda [22].

Un rectificador de onda completa está formado por cuatro diodos, como muestra la Figura 16, donde, de forma alternativa conducen los diodos D1-D3 y D2-D4. La corriente por la carga R_L siempre circula en el mismo sentido y no hay intervalos de conducción nula como en el rectificador de media onda. En la Figura 17 se puede ver la salida del rectificador de onda completa [21].

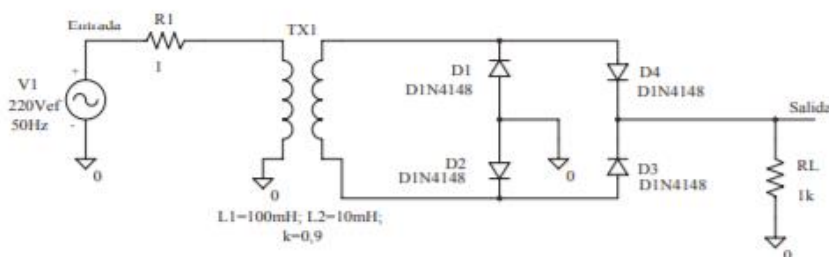


Figura 16. Rectificado de doble onda con puente de diodos [22].

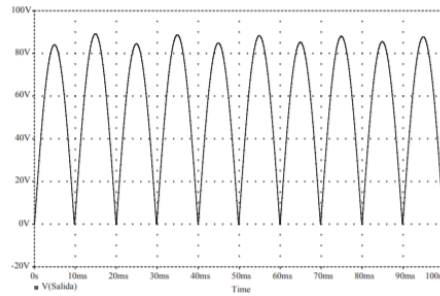


Figura 17. Salida del rectificador de doble onda [22].

Para el presente trabajo, tal y como se ve en el esquema, se usará el rectificador de onda completa formado por cuatro diodos para aprovechar también la parte negativa de la señal de entrada que genera el piezoeléctrico.

- Convertidor elevador ("STEP UP" O "BOOST")

Este tipo de circuito (Figura 18. Diagrama del circuito convertidor elevador DC-DC Figura 18), su principal aplicación se encuentra en las fuentes de alimentación continua reguladas y en el frenado regenerativo de motores de continua. Como su propio nombre indica, la tensión de salida es siempre mayor que la tensión de entrada. La entrada suministra energía a la bobina. Cuando el interruptor está cortado ("off"), la etapa de salida recibe energía de la bobina y de la entrada. En el análisis del régimen permanente que aquí se presenta se asume que el condensador del filtro de salida presenta una capacidad muy grande, de forma que se asegura una tensión de salida constante $V_0(t)=V_0$ [23].

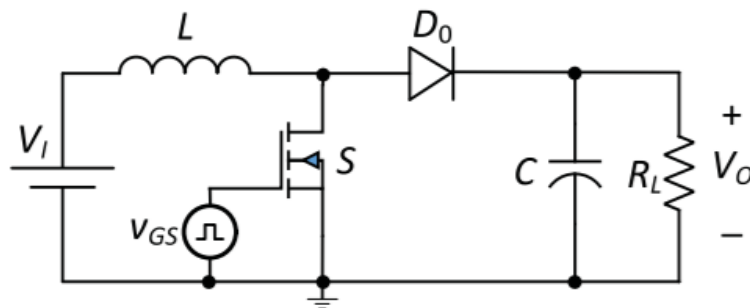


Figura 18. Diagrama del circuito convertidor elevador DC-DC [24].

- Etapa de almacenamiento (Batería o Supercondensador)

En la Tabla 3 se muestra una breve comparación entre un supercondensador y una batería. Para el presente trabajo, he decidido optar por un supercondensador o directamente un condensador de una alta capacidad para almacenar la energía debido al tiempo de carga, pues este resulta ser mucho menor para el caso del supercondensador debido a que su resistencia interna es mucho menor en comparación con una batería.

Tabla 3. Comparativa entre Batería y Supercondensador.

	Supercondensador	Batería
Tiempo de carga (resistencia interna)	Varios segundos (Baja resistencia)	10min-varias horas (Alta resistencia)
Densidad de energía (Wh/kg)	0.5 a 5	30 a 270
Temperatura de operación (°C)	-40 a +85	-20 a +60
Necesidad de mantenimiento	Sí	No tanto

4.2. Simulación del problema

Una vez planteado el problema y el diagrama del circuito electrónico que se quiere llevar a cabo, lo siguiente sería realizar la simulación del circuito y de las distintas partes que lo forman. Así, mediante la simulación podríamos tener un enfoque más cercano de cómo se comportarían los diferentes componentes electrónicos. Además, también nos permite realizar las pruebas sin correr el riesgo de dañar ningún componente del circuito.

- Simulación de la carga y descarga del condensador sobre el led

Uno de los aspectos importantes a tratar en el tema de la alimentación de un dispositivo de baja potencia (en mi caso, un led o un reloj) es el tiempo que podemos mantener el dispositivo encendido. Mediante un ensayo realizado, dado que la energía que produce el material piezoeléctrico es inferior a lo que se considera necesaria, suponiendo que se tiene un condensador de 470 microfaradios (es el que vamos a usar) es posible cargar el condensador, pero, se ha notado que la energía almacenada en el condensador se disipa rápidamente en el proceso de descarga. Así pues, para evitar que esto suceda, se juega con el valor de la resistencia colocada en serie con el dispositivo a alimentar (led o reloj) para así disminuir el tiempo de disipación de la energía e intentar mantener el máximo tiempo posible el led o reloj encendido. De este modo también se garantiza que el dispositivo de baja potencia no sufre daños al recibir la alimentación dentro de su rango de valores nominales.

A continuación, en el circuito de la Figura 19 se representa la fuente de alimentación que equivale al material piezoeléctrico, la cual estaría en serie con el puente de diodos y en paralelo al condensador y el propio led. Mediante esta simulación vemos que primero se realiza el proceso de carga del condensador y posteriormente el proceso de descarga. El problema aquí sería que el condensador se descarga rápidamente tal y como es posible visualizar en la Figura 20. También hay que tomar en consideración que, el led debería tener una resistencia en serie para limitar la corriente. Si no se coloca se puede dañar irreparablemente el led. El circuito de la Figura 19 debe verse en su contexto (simulación); no se pretende en ningún caso implementar físicamente con el led dispuesto como se muestra.

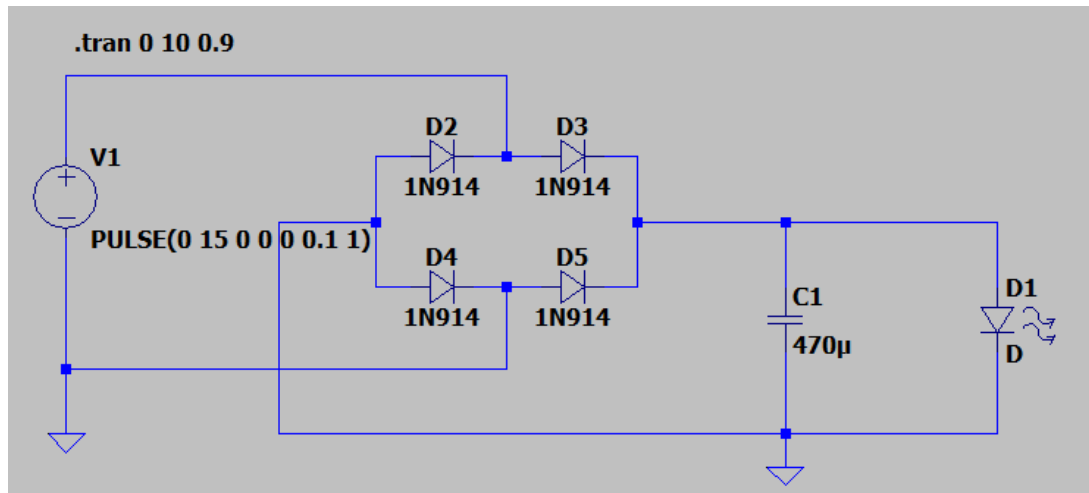


Figura 19. Circuito carga y descarga del condensador en paralelo a un led (LTspice XVII).

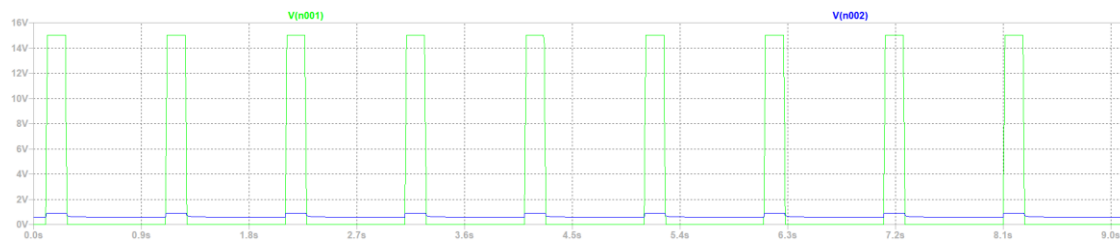


Figura 20. Voltajes del circuito carga y descarga del condensador en paralelo a un led: Verde (V1); Azul (Vc1) (LTspice XVII).

En la Figura 20 vemos que el condensador se descarga rápidamente debido a la presencia de un led en paralelo. Además, hay que añadir que en la realidad el voltaje del led puede ser diferente, por lo tanto, hasta que no se alcance a este voltaje el led no va a iluminarse ya que usando un led rojo mínimo necesitamos un voltaje entre bornes de 1.7V si el led es de bajo brillo y 1.9V si es de alto brillo. A esto hay que añadir que como el condensador puede llegar a almacenar más de 1.9 voltios existe el peligro de fundir el Led, de ahí que es imprescindible el uso de una resistencia para proteger el led.

Entonces, para ralentizar el proceso de descarga es posible incluir una resistencia en serie con el led para evitar que la energía acumulada en el condensador se disipe rápidamente:

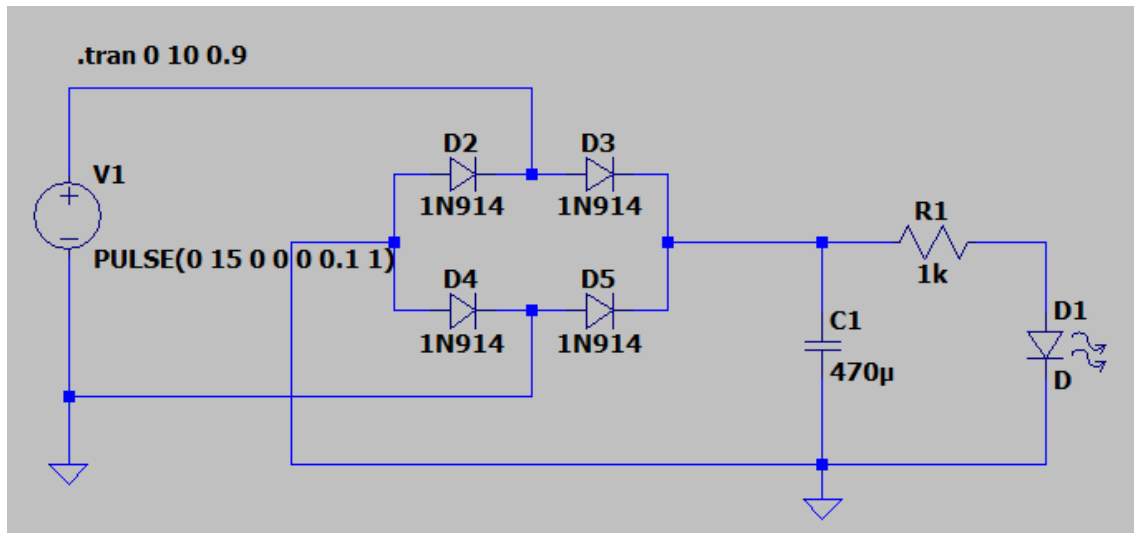


Figura 21. Circuito carga y descarga de un condensador en paralelo a un led y una resistencia en serie con el led (LTspice XVII).

Efectivamente, tal y como se aprecia en los resultados de la simulación (Figura 22), es posible conseguir que la energía almacenada en el condensador se disipe en un tiempo mayor añadiendo una resistencia en serie con el led.

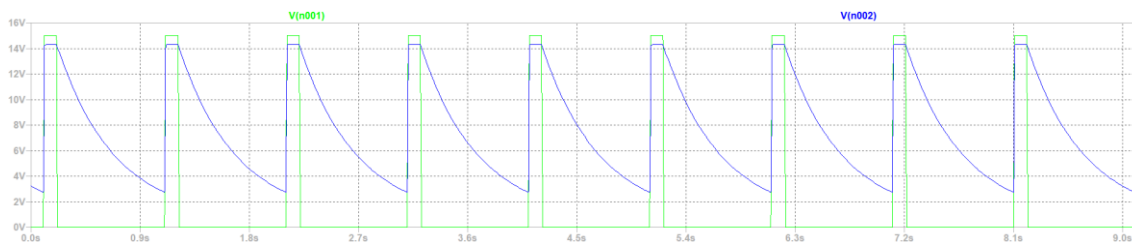


Figura 22. Voltajes del circuito carga y descarga de un condensador en paralelo a un led y una resistencia en serie con el led: Verde (V1); Azul (Vc1) (LTspice XVII).

No obstante, la energía acumulada en el condensador no es constante como para mantener alumbrado el led durante mucho tiempo. Hay que tener en consideración que, en la realidad, aunque se obtienen aproximadamente 40 voltios de pico-pico no es una señal constante.

En este apartado como conclusión, tenemos que en serie con el led sería ideal conectar una resistencia para evitar que la energía se disipe en un periodo de tiempo pequeño. Además, dicha resistencia no es aleatoria, sino que hay que poner aquella que necesite en función de la tensión de entrada esperada.

- Simulación del circuito convertidor-elevador

El propósito de incluir un convertidor elevador DC-DC es incrementar el voltaje a la salida del circuito. Según la simulación, es posible obtener un voltaje superior a la salida mediante el circuito diseñado en la Figura 23. Tal y como se ve en la Figura 24, la señal verde es supuestamente la señal del piezoeléctrico al ser presionado. Esta señal suponiendo que tiene una amplitud de 15 voltios y un periodo de 1 segundo (se han escogido estos datos parecidos a la señal real que se obtiene al presionar el material). En la misma Figura 24, tenemos la señal azul que representa la señal que tenemos a la salida

del diodo (el diodo también consume). La señal roja representa la señal en R2, es decir, la señal que tendríamos a la salida del circuito. Esta última es mayor debido a que es la señal que se tendría a la salida del convertidor elevador. Como el propósito de este circuito es la elevación del voltaje de entrada, se puede dar por concluido que según la simulación realizada el circuito en un principio sería capaz de elevar la tensión y por lo tanto cumple con su propósito. Este convertidor sería necesario si la energía del piezoeléctrico se almacenara en una batería que tiene una tensión nominal de carga.

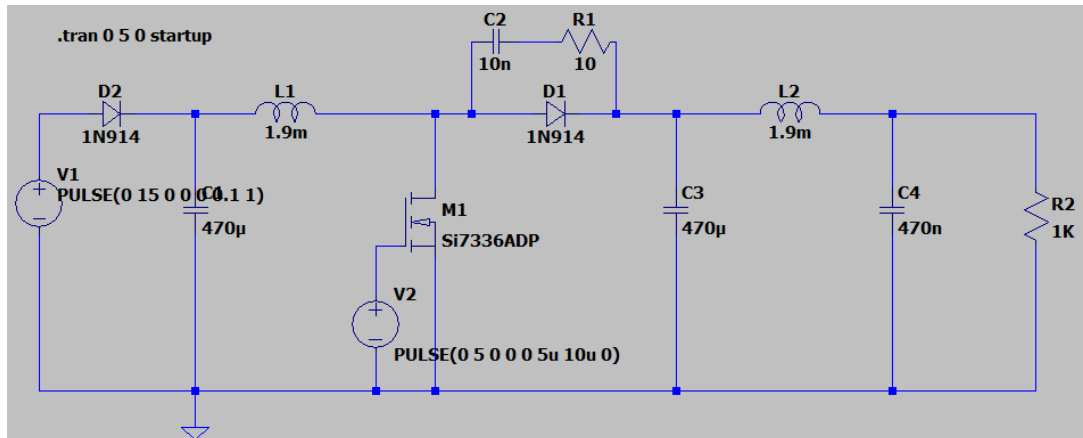


Figura 23. Circuito convertidor elevador (LTspice XVII).

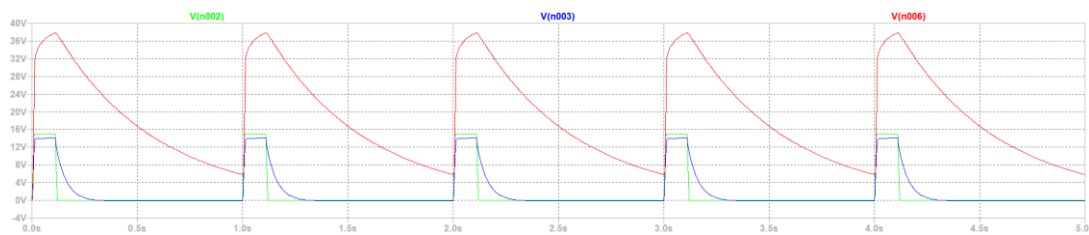


Figura 24. Voltajes del circuito convertidor elevador: Verde (V1); Azul (Vc1); Roja (VR2) (LTspice XVII).

4.3 Ensayos realizados (Tratamiento de la señal)

Este apartado tiene como objetivo el tratamiento de la señal que generamos al someter el material piezoeléctrico a un esfuerzo. Básicamente, se va a transformar la señal de entrada en otra señal de salida apta para ser almacenada para propósitos de consumo eléctrico. A continuación, se presentan varios ensayos realizados con el fin de analizar, estudiar y conocer mejor el material del que disponemos.

- Transductor y Led en serie

Uno de los primeros ensayos realizados tras haber analizado la señal que se genera en los bornes del transductor es la conexión de este en serie con un led (Figura 25). Al someter el transductor a compresión, mientras está conectado ocurre un flujo de cargas a través del led. Como resultado, se aprecia el parpadeo del led. Obviamente no se mantiene encendida ya que los requerimientos energéticos para mantener esta encendida excede la potencia que se genera mediante un transductor. La corriente generada por el piezoeléctrico está por debajo de la máxima que tolera el led.

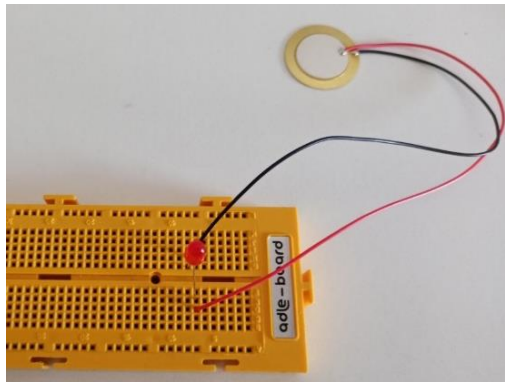


Figura 25. Transductor conectado aun led.

- Rectificación de la señal de entrada

En la Figura 26, se aprecia la señal obtenida al haber aplicado un rectificador de onda completa a la señal alterna que genera el transductor piezoeléctrico. Usamos el puente rectificador para obtener una corriente que circule siempre en el mismo sentido y para evitar la conducción nula.

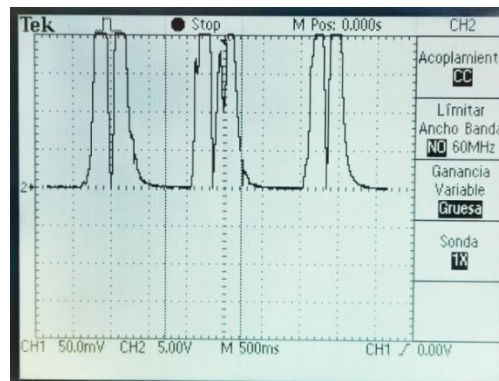


Figura 26. Señal de transductor rectificada.

- Filtrado de la señal

Posteriormente a la rectificación de la señal del transductor piezoeléctrico mediante el puente de diodos, se propone una etapa de filtrado cuyo propósito es obtener una señal continua. La Figura 27 muestra como al conectar el condensador a la salida del rectificador de onda completa, transformamos la señal obteniendo así una señal más continua que la anterior.

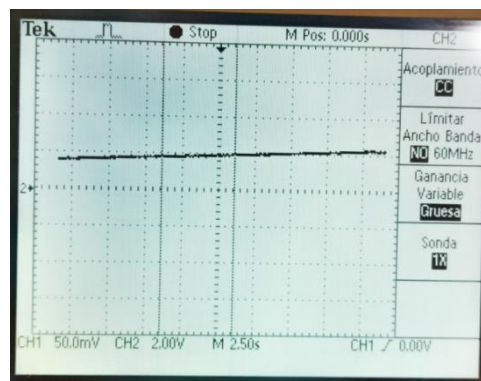


Figura 27. Señal filtrada mediante un condensador.

- Convertidor dc-dc para la elevación del voltaje

Una vez rectificada y filtrada la señal de transductor piezoeléctrico, se hace pasar por el convertidor elevador para elevar la tensión de entrada y así obtener un voltaje superior a la salida del circuito. En la Figura 28, vemos el circuito convertidor elevador. Para probar el correcto funcionamiento de este, antes de conectarlo al material piezoeléctrico se ha conectado a la entrada la fuente de alimentación continua de 5V y, efectivamente, se ha conseguido un voltaje superior a la salida. Sin embargo, al sustituir la fuente de alimentación continua por el transductor piezoeléctrico, este no es capaz de suministrar la suficiente potencia al circuito como para que este sea capaz de elevar el voltaje de entrada. Una solución sería utilizar convertidores DC-DC de muy baja potencia como el TPS62743 que ofrece la empresa Texas Instrument [25], lo que excede del propósito de este trabajo fin de grado.

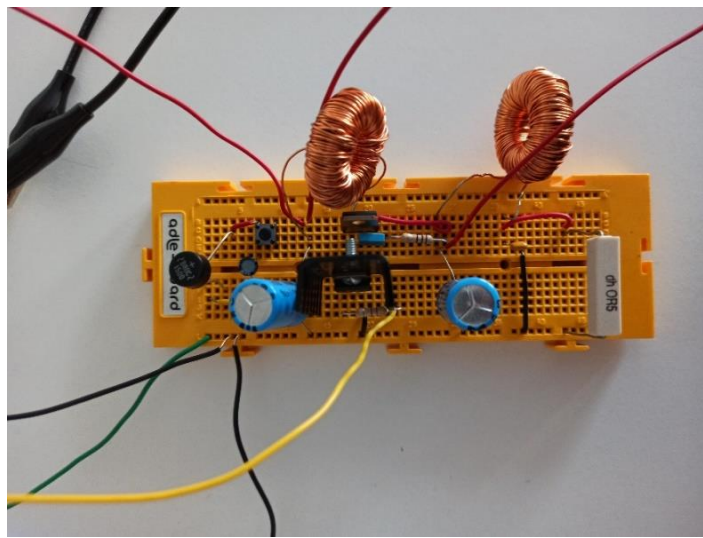


Figura 28. Circuito convertidor elevador DC-DC.

5. Conclusiones previas; replanteamiento del problema y mejoras

Tal y como se ha reflejado en los ensayos realizados, el circuito elevador DC-DC es inviable usarlo para esta aplicación, pues los requerimientos energéticos de este exceden la potencia que es posible aportar mediante los transductores piezoeléctricos. Debido a esto, se ha decidido replantear el problema y pensar en una nueva solución para elevar el voltaje de salida.

Como nueva medida, se va a usar un multiplicador de tensión para la elevación del voltaje. La ventaja de este con respecto al convertidor elevador DC-DC es que no necesita de un generador de señales externo para realizar ninguna excitación del circuito.

5.1. Multiplicador de tensión para la elevación del voltaje

Un multiplicador de tensión es un circuito eléctrico que convierte tensión desde una fuente de corriente alterna a otra de corriente continua de mayor voltaje mediante etapas de diodos y condensadores.

5.2. Simulación del multiplicador de tensión

Tal y como se ve en la Figura 30, el circuito de la Figura 29 es capaz de incrementar la tensión de entrada (en este caso como prueba se ha supuesto tener un voltaje de entrada de 2 voltios). Además, como ventaja este circuito, no necesita de ningún tipo de alimentación como sí la necesita el convertidor DC-DC.

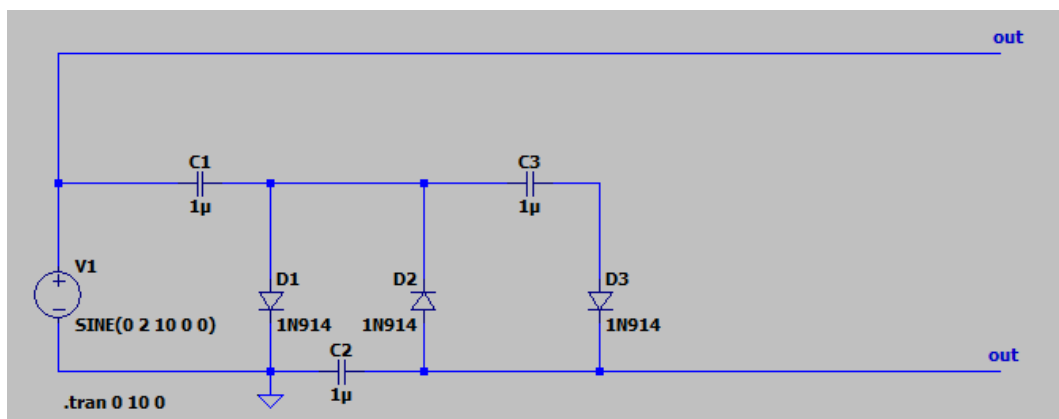


Figura 29. Circuito Triplicador de voltaje (LTspice XVII).

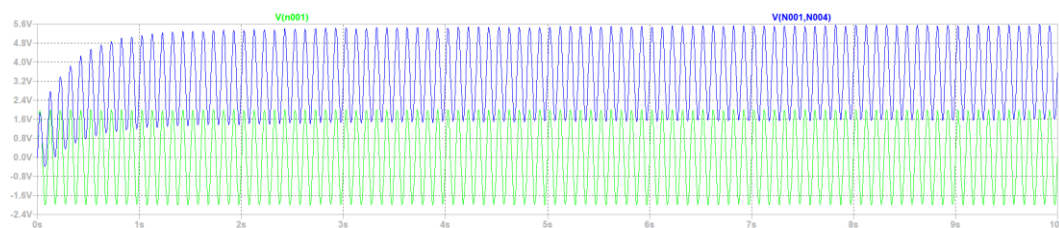


Figura 30. Voltajes del circuito Triplicador de voltaje: Verde (Señal de entrada V1); Azul (señal de salida "out") (LTspice XVII).

5.3. Simulación del circuito completo

La Figura 31 representa como quedaría el circuito final haciendo uso del Triplicador de voltaje, y la Figura 32 muestra los resultados de la simulación.

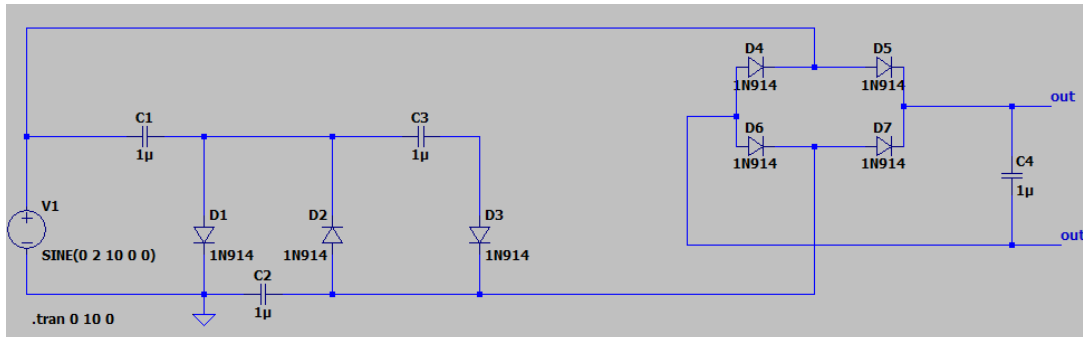


Figura 31. Circuito Triplicador conectado a la etapa de rectificación y filtrado (LTspice XVII).

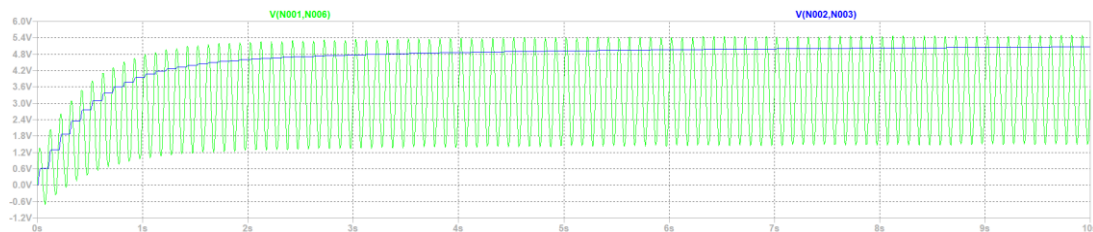


Figura 32. Voltajes: Verde (Señal a la salida del Triplicador de voltaje); Azul (Señal a la salida de la etapa de filtrado en C4) (LTspice XVII).

5.4. Ensayo multiplicador de tensión; Resultados

En la Figura 33 se muestra el resultado experimental de la salida del triplicador de tensión. Al montar el circuito y realizar la prueba se ve como el voltaje se incrementa a la salida del multiplicador de tensión.

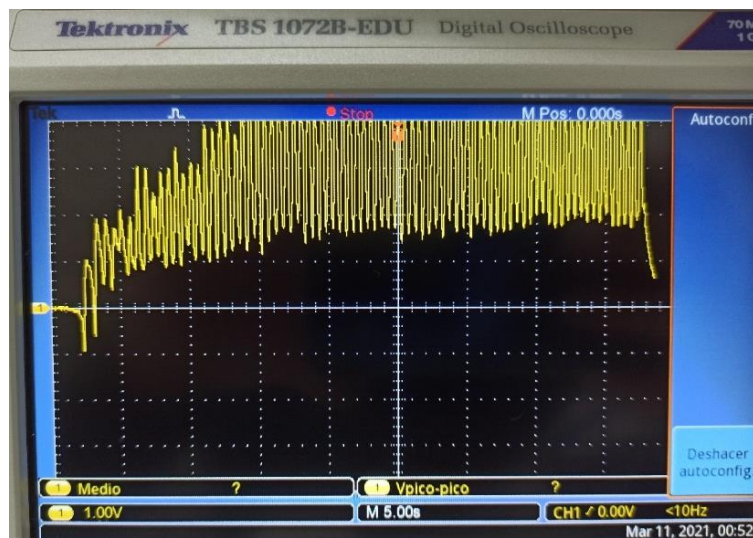


Figura 33. Voltaje experimental a la salida del Triplicador de voltaje.

Sin embargo, aunque el triplicador de tensión realiza su función elevando el voltaje en su “propia” salida respecto a su entrada, al conectarlo con la parte restante del circuito (Etapa de rectificación y filtración de la señal) no se observa en realidad ninguna modificación en el voltaje o aportación por parte del triplicador. Es más, se ha observado mediante las pruebas realizadas que se consigue cargar el condensador de salida en un tiempo inferior sin el triplicador. Como finalmente el elemento de almacenamiento va a ser un condensador y no una batería, se ha descartado añadir cualquier circuito para la elevación del voltaje. No obstante, como idea alternativa para incrementar el voltaje obtenido por pisada humana, se plantea el diseño de una estructura la cual permita aumentar la densidad de transductores por metro cuadrado.

5.5. Mejoras

5.5.1. Esfuerzo mecánico al que es sometido el transductor piezoeléctrico

Tras realizar diferentes pruebas con los transductores piezoeléctricos, se llega a la conclusión de que incluso es posible mejorar la forma en la que se somete el material a un esfuerzo. Resulta que cuando la presión se produce en los laterales del transductor piezoeléctrico, el material es sometido a una mayor deformación, de modo que, es posible obtener un voltaje superior en los bornes de este. Debido a esto, se ha decidido el diseño de una pieza que sea capaz de concentrar el esfuerzo entorno a los laterales del material (Figura 34). Además, para aumentar la eficiencia de estos y conseguir producir una mayor cantidad de energía por pisada se ha pensado realizar el diseño de una estructura doble, es decir será posible colocar dos transductores (uno arriba y otro abajo) para aprovechar y someter dos piezoeléctricos a presión en vez de solo uno.

Al poner a prueba la estructura, se ha notado una gran diferencia ya que ha resultado ser más fácil presionar el material. Además, el pico de voltaje que se genera al presionar el material es mayor cuando se usa la estructura debido a que en este caso existe un mayor movimiento de cargas. En este caso, podemos decir que, al usar la estructura que se muestra en la Figura 34, se consigue mayor voltaje, ya que se aprovecha más el esfuerzo mecánico en comparación a la situación anterior cuando no se hacía uso de la pieza.

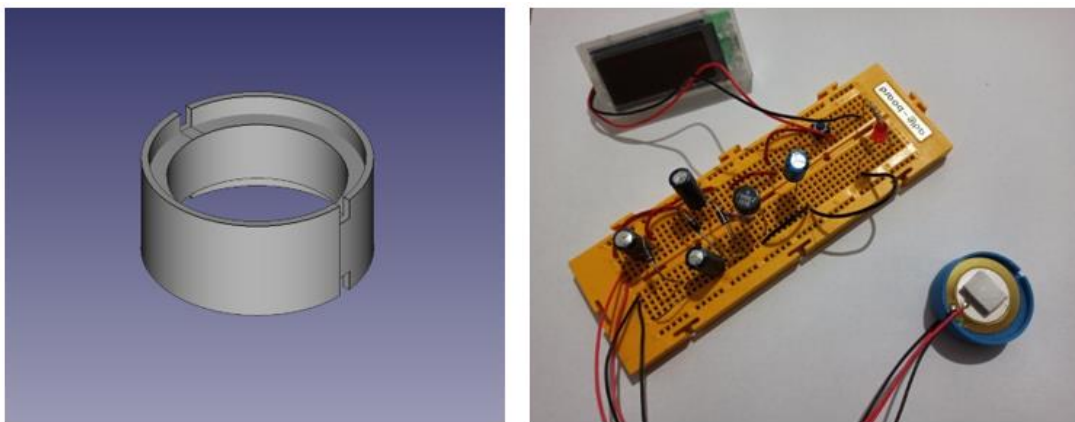


Figura 34. Primera estructura piezoeléctrica.

5.5.2. Ventajas de la estructura piezoeléctrica

La idea del diseño de la estructura nace después de haber manipulado el material durante un tiempo y pensar en opciones que maximicen la deformación del material para una misma presión para generar mayor energía por pisada e incrementar el voltaje de salida. Además, se ha planteado de modo que sea posible situar un transductor arriba y otro abajo permitiendo así la ventaja de presionar dos materiales a la vez, en lugar de uno solo.

El diseño de la estructura ha ido evolucionando a lo largo del proyecto; se ha empezado con una estructura circular (Figura 34), y se ha finalizado con una estructura cuadrada con tapa que veremos más adelante. La estructura cuadrada tiene una ventaja en comparación con la circular: esta permite obtener un prototipo fijo ya que la idea es situar las estructuras encajadas entre sí, de modo que no se muevan al ser presionadas. A continuación, se comprueban los beneficios que supone usar una estructura para contener el transductor piezoeléctrico.

Mediante el uso de la estructura, se consigue empaquetar el transductor piezoeléctrico de modo que está protegido. Además, la estructura está diseñada de manera que al ser sometida a presión se consigue distribuir la carga de la pisada sobre la superficie cerámica (mediante una cinta entre la tapa y el transductor) de forma que, se obtiene un mayor flujo de cargas en el conductor; y por lo tanto mayor es el voltaje que obtenemos. La facilidad y comodidad a la hora de presionar el material es otro punto a favor. Además, el rendimiento de la pisada es el doble al haber realizado un diseño que es capaz de aprovechar la presión y someterla a dos transductores piezoeléctricos a la vez.

Algunas de las pruebas que se han realizado, muestran como el hecho de usar la estructura es más favorable:

- Piezoeléctrico sin estructura

Antes de imprimir las estructuras, se ha querido demostrar que son eficientes en cuanto a uso. Por ello, la primera prueba realizada ha sido someter el transductor solo a presión y ver el voltaje generado. En la Figura 35 vemos tanto el flanco positivo como el negativo de la señal que se genera al pulsar y dejar de pulsar, mientras que en la Figura 36, podemos ver la parte positiva de la señal que se genera al someter el transductor a presión. Tal y como se aprecia en la última figura, los picos de voltaje están entre los 10 y 15 voltios.



Figura 35. Señal completa a la salida del transductor sin estructura.

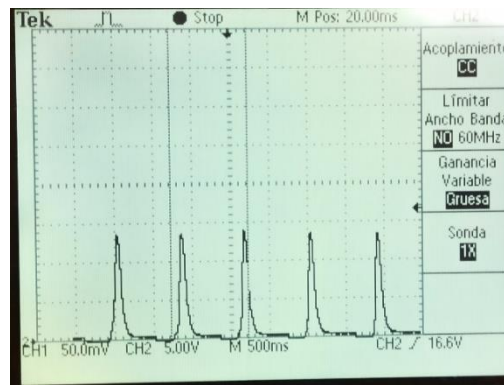


Figura 36. Semiciclo positivo de la señal a la salida del transductor piezoeléctrico sin estructura.

- Un Piezoeléctrico con estructura

A continuación, en la Figura 37 y la Figura 38 tenemos la señal generada por el transductor piezoeléctrico cuando está dentro de la estructura. En comparación con el anterior, vemos que la migración de carga que se produce es mayor al usar la estructura, por ello obtenemos picos de entorno a los 25 y 30 voltios aproximadamente.

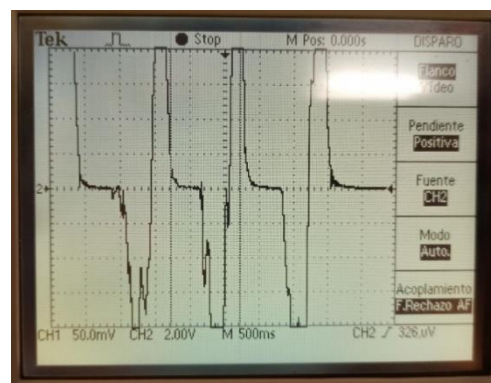


Figura 37. Señal completa a la salida del transductor piezoeléctrico en la estructura.

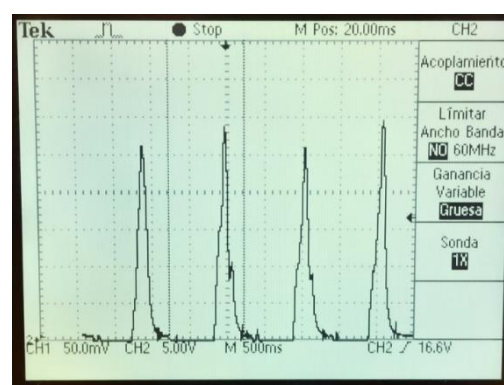


Figura 38. Semiciclo positivo de la señal a la salida del transductor piezoeléctrico con estructura.

- Dos Piezoeléctricos con estructura

Finalmente, al incluir dos transductores piezoeléctricos en paralelo dentro de la estructura, obtenemos lógicamente una señal mayor. En este caso, tal y como se aprecia en las Figura 39 y la Figura 40 la señal obtenida como resultado es la suma de las señales que produce cada transductor piezoeléctrico. El pico de voltaje para este caso supera los 40 voltios.

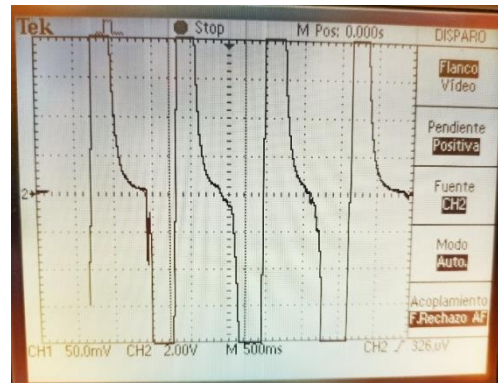


Figura 39. Señal completa a la salida de dos transductores piezoeléctricos en paralelo con la estructura.

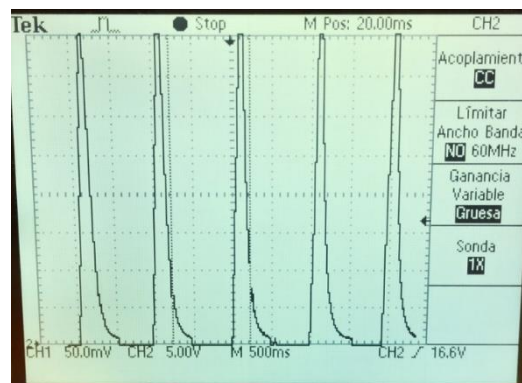


Figura 40. Semiciclo positivo de la señal a la salida de dos transductores piezoeléctricos en paralelo con estructura.

- Conclusión

Después de haber comparado los tres casos anteriores experimentalmente, parece claro que, al utilizar la estructura, el resultado obtenido es mejor, ya que al usarla se genera mayor voltaje al presionar el material piezoeléctrico.

5.6. Diseño e impresión de la estructura piezoeléctrica

Tanto la estructura como la tapa se han diseñado en FreeCAD, que es un programa de diseño totalmente libre. En la Figura 41 y la Figura 42 se muestra el resultado final del diseño realizado. Posteriormente, para imprimir la estructura se ha pasado a formato STL para que posteriormente mediante el programa Cura, que es un Software diseñado para impresora 3D en el que se pueden modificar los parámetros de impresión, se realizan los últimos retoques relativos a la metodología de impresión (Figura 43).

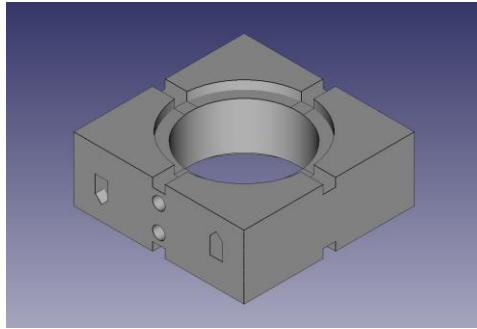


Figura 41. Estructura piezoeléctrica definitiva.

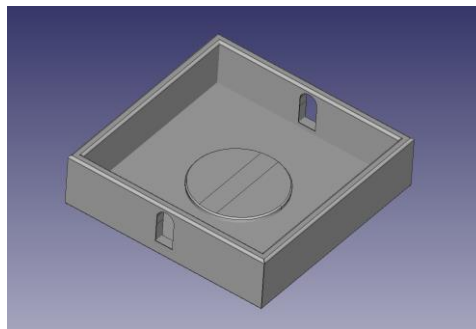


Figura 42. Tapa de la estructura piezoeléctrica.

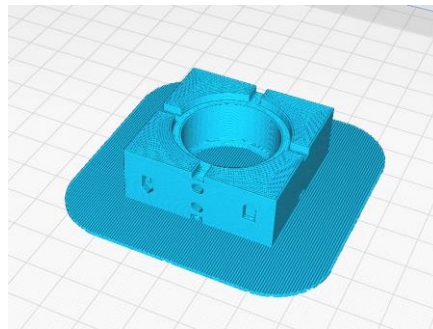


Figura 43. Metodología de impresión de la estructura piezoeléctrica en el programa Cura de impresión 3D.

Una vez impresa la estructura, se ha procedido a colocar los transductores piezoeléctricos en su correspondiente lugar (Figura 44). Cabe destacar que la estructura ha sido diseñada de manera que puedan ser presionados dos piezoeléctricos a la vez. Así pues, aunque no se aprecie en las imágenes, la estructura lleva dos transductores piezoeléctricos adjuntos. En la Figura 44 es posible visualizar mejor el resultado final de la estructura junto con los transductores ya instalados.

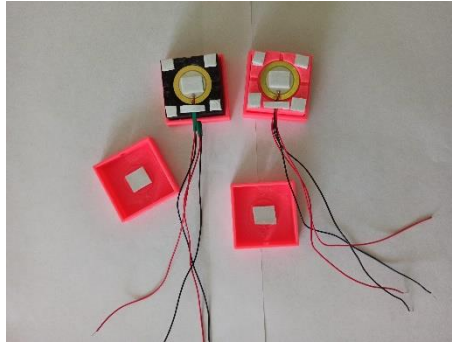


Figura 44. Transductores piezoeléctricos instalados en la estructura piezoeléctrica diseñada.

6. Resultados

El objetivo planteado al principio del proyecto, en cuanto al diseño de una baldosa piezoeléctrica, fue diseñar un circuito capaz de aprovechar la energía que se generaría al pisar la baldosa para propósitos de consumo y almacenamiento. En un principio, mediante la etapa de rectificación y filtrado es posible aprovechar la energía producida al pisar sobre la baldosa. Sin embargo, a lo largo del proyecto se ha tratado de diseñar una etapa adicional para el circuito con el objetivo de incrementar el voltaje que obtenemos de los transductores piezoeléctricos. Esta etapa no ha sido posible llevarla a cabo ya que los diferentes circuitos puestos a prueba no han sido aptos para esta aplicación. Como alternativa para aumentar la eficiencia de la baldosa, se ha realizado el diseño de una estructura la cual nos ha permitido aumentar la densidad de transductores piezoeléctricos por metro cuadrado y con ello aumentar la tensión que producimos al pisar.

Como resultado final del trabajo, la estructura de la baldosa está formada de ocho módulos (mini estructuras por las que está compuesta la baldosa) los cuales constan de dos transductores piezoeléctricos en su interior cada uno. Los ocho módulos forman la estructura completa de la baldosa (Figura 45). El circuito al que están conectados está compuesto básicamente por un rectificador de onda completa y un condensador para filtrar la señal y almacenar la energía producida al pisar la baldosa. Aunque el circuito es simple, se alcanza el propósito general de conseguir almacenar la energía producida para propósitos de consumo.

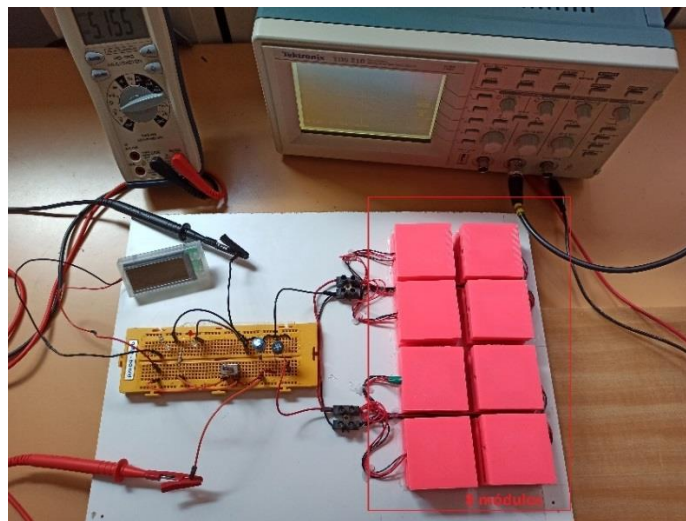


Figura 45. Estructura de la baldosa.

Los resultados alcanzados se pueden considerar aceptables, pues es posible obtener una potencia significativa dependiendo de la carga conectada a la salida del circuito. A continuación, se realiza una estimación de la potencia producida por esta estructura y un estudio para analizar la recuperación de energía mecánica producida por peatones en una zona transitada.

6.1. Curva V-I y Potencia

Mediante la curva de potencia podemos saber la resistencia de carga a la cual la baldosa rinde al máximo. En este caso concreto, he ido conectando a la salida varias resistencias para jugar con la carga. Al medir el voltaje e intensidad es posible estimar la potencia generada a la salida de la baldosa (Tabla 4). Como es posible observar en la Figura 46, la baldosa compuesta por 16 piezoeléctricos podría entregar una potencia máxima de 0.75mW por pisada.

Tabla 4. Voltaje, Intensidad y Potencia en función de la Resistencia de carga. Datos experimentales.

Resistencia de carga (Ω)	Intensidad eficaz [μ A]	Voltaje eficaz [V]	Potencia [mW]
Vacío	0	30	0
333000	50	15	0.75
47000	60	3	0.18
6800	80	0.9	0.072
3300	83	0.3	0.0189
39	115	0.004	0.00046
3.3	100	0	0

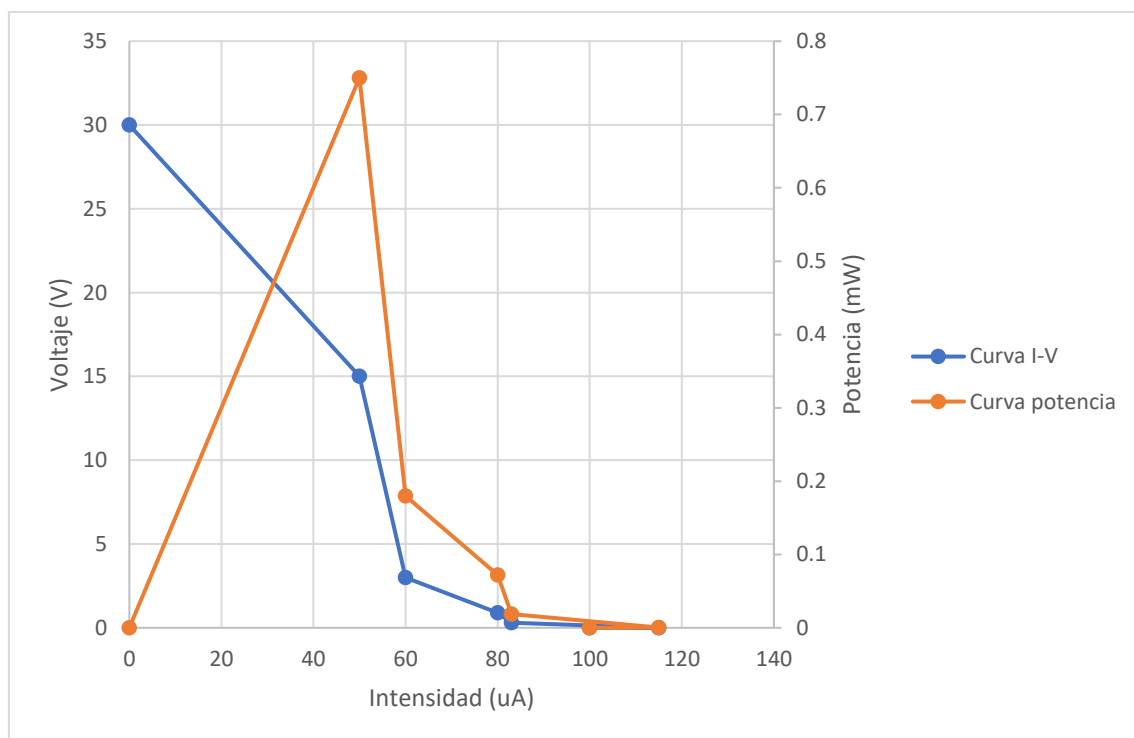


Figura 46. Gráfica V-I y P-I

6.1.1. Aprovechamiento de la energía mecánica peatonal

En este apartado se muestra un cálculo aproximado del aprovechamiento de energía que sería posible lograr mediante la colocación de baldosas piezoeléctricas en una zona de abundante tránsito de peatones. En este caso “La plaza del Torico, Teruel”.

Tenemos una estructura que contiene 16 transductores piezoeléctricos en paralelo, los cuales reparten la carga de la pisada. Sabemos que el valor de la amplitud de la señal producida dependerá de la fuerza que se aplique sobre la baldosa por parte del peatón. Considerando los datos gráficos de la Figura 46, suponemos que la baldosa consigue entregar una potencia máxima por pisada de 0.75mW. Con esto, procedemos a realizar el siguiente estudio.

Suponiendo la frecuencia de pisada de 2Hz (considerando que en un segundo se dan en promedio 2 pasos), como en cada paso se generan 0.75mW, tendríamos 1.5mW por segundo. La energía producida en una hora para este caso será de:

$$1.5 \frac{mW}{s} \cdot \frac{60s}{1min} \cdot \frac{60min}{1hora} = 5400 \frac{mW}{hora}$$

Lógicamente debido al tamaño reducido de la baldosa y la baja potencia que entrega, no tendría sentido poner sola una baldosa. Se plantea poner como mínimo una conexión de 30 metros, constituidas por 10 railes de 200 baldosas cada rail. En este caso tendríamos que instalar en total 2000 baldosas.

Considerando un momento del día en el cual los railes estarían en pleno funcionamiento, se podría obtener una potencia en kilovatios de (aquí pasamos de mili vatios a vatios y multiplicamos por la cantidad de baldosas):

$$5.4 \frac{W}{h} \cdot 2000baldosas = 10.8 \frac{kW}{h}$$

Suponiendo un promedio de 5horas diarias en las cuales los railes están en pleno funcionamiento, se podría deducir, de manera aproximada, que la potencia generada al día es de:

$$10.8 \frac{kW}{hora} \cdot 5 \frac{horas}{dia} = 54 \frac{kW}{dia}$$

Esta podría ser almacenada para propósitos de consumo para dispositivos de baja potencia tales como, paneles luminosos, reloj digital (los cuales presentan una baja resistencia interna), cámaras de tráfico, leds de iluminación de bajo consumo y otras muchas aplicaciones que podrían aprovechar la energía que se produce por la pisada humana.

7. Conclusiones y líneas futuras

7.1. Conclusiones

El trabajo desarrollado se ha enfocado principalmente en el estudio y adquisición de conocimiento en el campo de la producción de energía piezoeléctrica. El aprovechamiento de la energía mecánica de la pisada humana mediante sensores piezoeléctricos con el objetivo de obtener energía eléctrica para propósitos de consumo en dispositivos de baja potencia ha sido un tema que se ha tratado ampliamente.

Mediante el marco teórico, se han podido adquirir conocimientos principalmente sobre el efecto piezoeléctrico, formulación matemática del efecto piezoeléctrico y diferenciación entre los distintos transductores piezoeléctricos, entre otros. Este apartado ha sido esencial a la hora de elegir el material a usar en el caso práctico.

El caso práctico se ha enfocado en el diseño de un circuito apto para la elevación de la tensión con el propósito de poder obtener una tensión mayor en la salida del circuito. Eventualmente se ha llegado a la conclusión de que el circuito DC-DC no era apto debido a que los requerimientos energéticos de este excedían la potencia que es posible aportar mediante los transductores piezoeléctricos. Además, el circuito DC-DC necesita una excitación externa lo cual no tendría sentido depender de otra fuente de energía externa para elevar el voltaje que estamos generando. Al final nos damos cuenta de que gastamos más de lo que generamos. Posteriormente se decidió el diseño de un circuito que pudiese aumentar el voltaje a la salida sin depender de ninguna fuente de excitación externa, de ahí el triplicador de tensión. Este circuito tenía como objetivo aportar el triple de voltaje a la salida, aunque una vez probado se ha descartado debido a su ineficiencia para esta aplicación.

Eventualmente, como solución al aumento de energía se realizó el diseño de una estructura capaz de maximizar la tensión producida por los transductores piezoeléctricos, la cual permitió aumentar la densidad de carga de los transductores piezoeléctricos por metro cuadrado. De esta forma se han obtenido resultados experimentalmente aceptables.

Finalmente, cabe destacar con respecto al caso práctico desarrollado los siguientes puntos:

- La parte electrónica del circuito ha conllevado una serie de dificultades tales como la no compatibilidad del circuito DC-DC debido a los altos requerimientos energéticos por parte de este.
- La difícil parametrización de resultados que se obtiene debido a la inestabilidad de la señal a la salida; por ejemplo, al colocar el osciloscopio a la salida no se consigue parametrizar la tensión de salida, aunque es posible realizar medidas aproximadas haciendo uso del polímetro.
- Los transductores piezoeléctricos usados no son para aplicaciones de generación de energía eléctrica. Sin embargo, se ha optado por estos debido a que presentan un marcado efecto piezoeléctrico, además de que su precio es económico.

- Como punto positivo, se ha comprobado el efecto piezoeléctrico que presentan los transductores piezoeléctricos escogidos y se ha conseguido alimentar diferentes cargas electrónicas de baja potencia tales como leds o un reloj digital.
- El presupuesto y el tiempo son dos factores que han impedido realizar un análisis más amplio. Además, existe limitación en cuanto al material usado en comparación a los que se usan en ámbito industriales y en entornos de investigación, ya que el material usado se encuentra muy por debajo en calidad y precisión.
- Pese a todos imprevistos originados a lo largo del proyecto, se ha conseguido el propósito esencial de estudiar la viabilidad de producir energía mediante tecnología piezoeléctrica. Además, se han adquirido conocimientos de diferentes ramas como Electrónica de potencia, Electrotecnia, Ingeniería de materiales y diseño en 3D entre otros. Esto ha supuesto que el trabajo sea muy enriquecedor a nivel académico.

7.2. Trabajo futuro

Como posible continuación de proyecto, cabe destacar lo siguiente:

- En este trabajo se ha conseguido generar la energía y su almacenamiento y descarga sobre dispositivos tales como leds y un reloj. Como trabajo futuro existe la posibilidad de adecuar la tensión a la salida mediante el diseño de un circuito electrónico para alimentar otros dispositivos específicos de bajo consumo.
- Realizar un análisis más exhaustivo sobre la implantación de baldosas piezoeléctricas en una zona urbana.
- Llevar a cabo el estudio y la implantación de la estructura de la baldosa en un entorno urbano para analizar su eficiencia y poder obtener datos más reales.
- Diseño de una estructura que pueda englobar un mayor número de módulos en su interior.
- Diseño de un circuito apto para la transformación de la tensión obtenida en una “estación de baldosas piezoeléctricas”.

8. Referencias

[1] R.J.M. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, R. Mertens, "Micropower energy harvesting", *Solid-State Electronics* 53, 684-693, 2009.

[2] Antonio Arnau and David Soares, *Piezoelectric Transducers and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008

[3] Piezoelectricidad:

https://es.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricidad#Historia_de_los_materiales_piezoel%C3%A9ctricos (accessed Jun. 24, 2021)

[4] A.R. von Hippel, "Dielectric and Waves", Artech House, (2nd Ed.), 1994.

[5] S.R. Platt, S. Farritor, H. Haider, "On Low-Frequency Electric Power Generation With PZT Ceramics" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 10, 240-252, 2005.

[6] L. Beranek, T. Mellow, "Acoustics: Sound Fields, Transducers and Vibration", (2nd Ed.) Academic Press, ISBN: 9780128152287, 2019.

[7] D.I Alemán, "Electromechanical system for eco-friendly piezoelectric energy harvesting" *Universidad Politécnica de Cataluña*, 2015.

[8] M. Hirao, H. Ogi, "Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMATs", (2nd Ed.) Springer, ISBN: 9784431560364, 2017.

[9] M.E. Staley, "Development of a prototype magnetostrictive energy harvesting device" *University of Maryland*, 2005.

[10] L. Wang, F. Yuan, "Vibration energy harvesting by magnetostrictive material", *Smart Materials and Structures*, 17, 45009-14, 2008.

[11] S. Boisseau, G. Despesse, B. seddik, "Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting", *Small-Scale energy harvesting*, Intech, DOI: 10.5772/51360, 2012.

[12] What is piezoelectricity by Onscale:

<https://onscale.com/piezoelectricity/what-is-piezoelectricity/> (accessed Jun. 24, 2021).

[12] K. Cook-Chennault, N. Thambi, A. Sastry, "Powering MEMS portable devices a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems", *Smart Materials and Structures*, 17, 043001-33, 2008.

[14] Piezoelectricity:

<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html> (accessed Jun.24,2021).

[15] J. Kim, H.S. Kim, "Finite element analysis of piezoelectric underwater transducers for acoustic characteristics", *Journal of Mechanical Science and Technology* 23, 452-460, 2009.

[16] A. Abdullah, M. Shahini, A. Pak, "An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer", *Journal of Electroceramics* 22, 369-382, 2009.

[17] Lead zirconate titanate: https://en.wikipedia.org/wiki/Lead_zirconate_titanate (accessed Jun. 24, 2021).

- [18] ABT-441-RC by Farnell: <https://es.farnell.com/multicomp/abt-441-rc/transductor-piezo-4200hz-30v/dp/1675548?st=sensor%20piezoelctrico> (accessed Jun. 24, 2021).
- [19] Datasheet Piezoelectric sound component, muRata, innovative in electronics: <https://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/sound/p37e.ashx> (accessed Jun. 24, 2021).
- [20] C. Keawboonchuay, T.G. Engel, "Electrical Power Generation Characteristics of Piezoelectric Generator Under Quasi-Static and Dynamic Stress Conditions" *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 50, 1377-1382, 2003.
- [21] N. Kawawi, Y. Kushino, H. Koizumi, "MPPT Controlled Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Synchronized Switch Harvesting on Inductor", *IECON2015-Yokohama*, DOI: 10.1109/IECON.2015.7392250, 2015.
- [22] J. Espí, G. Camps, J. Muñoz, "Fundamentos de electrónica analógica", Universidad de Valencia, ISBN: -13: 9788437065601, 2006.
- [23] Apuntes de la asignatura de Electrónica de potencia del Grado en Ingeniería Electrónica y Automática de la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel – Universidad de Zaragoza. Curso 2020-2021.
- [24] M.K. Kazimierczuk, A. Ayachit, "Laboratory Manual for Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters", Wiley, ISBN: 9781119052760, 2016.
- [25] TPS62743 – Texas Instruments: <https://www.mouser.es/new/texas-instruments/ti-tps62743-converters/> (accessed Jun. 24, 2021).