

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

Trabajo Fin de Grado  
Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos

**Autor:** Álvaro Gómez Molina

**Tutor:** Pablo Ramos Sainz

**TRIBUNAL:**

**Presidente:** Ana Jiménez Martín

**Vocal 1º:** Sonia Martín López

**Vocal 2º:** Pablo Ramos Sainz

**FECHA:** 18/06/2018



## Resumen

Este TFG surge de la idea de diseñar un sistema que sirva como sustituto de las fuentes de energía convencionales, especialmente para dispositivos inalámbricos. El energy harvesting se basa en esta idea para explotar fuentes de energía renovables, como son las vibraciones producidas al montar en bici o caminar. Para aprovechar estas vibraciones, nos serviremos del fenómeno de la piezoelectricidad, presente de forma natural en cristales como el cuarzo, y en materiales compuestos como las cerámicas piezoeléctricas. Partiendo de estas cerámicas, diseñaremos nuestro sistema de energy harvesting y comprobaremos su viabilidad mediante simulaciones.

## Abstract

This Final Degree Project arises from the idea of design a system that serves as substitute for conventional energy sources, particularly for wireless devices. Energy harvesting is based on this idea to exploit renewable energy sources, such as the vibrations produced when riding a bike or walking. To take advantage of these vibrations, we will use the phenomenon of piezoelectricity, present naturally in crystals such as quartz, and in composite materials such as piezoelectric ceramics. Starting from these ceramics, we will design our energy harvesting system and check its viability through simulations.

## Palabras Clave

Energy harvesting, piezoelectricidad, cerámicas piezoeléctricas, cantiléver, generador piezoeléctrico.

## Índice

Resumen.....	3
Abstract .....	3
Palabras Clave .....	3
1 Introducción .....	7
1.1 Objetivos .....	7
1.2 Estado del arte de energy harvesting.....	7
1.3 Introducción a los piezoeléctricos.....	9
1.3.1 Historia .....	9
1.3.2 Definición de Piezoelectricidad .....	11
1.3.3 Formulación matemática del efecto piezoeléctrico (Ecuaciones de la piezoelectricidad) .....	13
1.3.4 Parámetros del efecto piezoeléctrico (Constantes).....	16
1.3.5 Materiales Piezoeléctricos .....	20
2 Cerámicas Piezoeléctricas .....	24
2.1 Definición .....	24
2.2 Preparación Cerámicas Piezoeléctricas.....	25
2.3 Tipos de cerámicas .....	26
2.3.1 Cerámicas Blandas.....	26
2.3.2 Cerámicas Duras.....	26
2.4 PZT. Propiedades y procesos de fabricación.....	26
2.5 Tipos de cerámicas PZT .....	27
2.6 Modelo eléctrico equivalente .....	28
2.7 Tipos de configuración .....	29
2.7.1 Viga en voladizo (Cantilever).....	29
2.7.2 Tipo Címbalo (Cymbal) .....	29
2.7.3 Tipo Pila (Stack) .....	30
2.7.4 Tipo Concha (Shell).....	31
2.8 Aplicaciones.....	31
2.8.1 Sensores .....	31
2.8.2 Actuadores .....	32
2.8.3 Transductores.....	32
2.8.4 Acelerómetros.....	33
2.8.5 Generadores.....	33
3. Piezoeléctricos generadores de electricidad.....	34
3.1 Diseño de un generador piezoeléctrico .....	34

3.2 Modelo mecánico equivalente generador piezoeléctrico .....	37
3.3 Modelo eléctrico y electromecánico de un generador piezoeléctrico .....	37
3.4 Circuito Acondicionador de un generador piezoeléctrico .....	39
3.4.1 Rectificador de Onda completa.....	39
3.4.2 Convertidor DC/DC.....	41
3.4.3 Carga (Batería o Supercondensador) .....	42
3.4.4 Modelo Simulink.....	43
4 Resultados .....	45
5 Discusiones.....	50
6 Conclusiones.....	55
7 Pliego de condiciones.....	56
7.1 Recursos Software.....	56
7.2 Recursos Hardware .....	56
8 Presupuesto.....	57
8.1 Coste software .....	57
8.2 Coste hardware .....	57
8.3 Coste de mano de obra .....	57
8.4 Presupuesto Total .....	58
9 Bibliografía .....	59



# 1 Introducción

## 1.1 Objetivos

El objetivo de este trabajo de fin de grado como su nombre indica, es diseñar un sistema de energy harvesting mediante piezoeléctricos y ver su posible utilidad y mejoras realizables. En primer lugar se realizara un estudio de las diferentes tecnologías de energy harvesting, así como un estudio de los materiales piezoeléctricos, con el objetivo de elegir el que más se ajuste a nuestras necesidades de diseño. Posteriormente, se diseñara el piezoeléctrico generador de energía así como su circuito acondicionador. Por último se analizaran los resultados obtenidos con el objetivo de ver la viabilidad del diseño y sacar las conclusiones correspondientes.

## 1.2 Estado del arte de energy harvesting

El cosechamiento de energía (energy harvesting) se define como la captación de pequeñas cantidades de energía de una o varias fuentes de energía de nuestro entorno, acumulándola o almacenándola para un uso posterior [1].

Cuando se habla de sistemas de *energy harvesting* o *energy scavening*, se hace referencia a sistemas encargados de la recuperación, la reutilización y el aprovechamiento de los diferentes tipos de energía que se encuentran en el ambiente y normalmente se desperdician. Los sistemas de energy harvesting se encargan de transformar los diferentes tipos de energía (solar, térmica, eólica, el ruido, la energía en forma de vibraciones, etc.) en energía eléctrica para su aprovechamiento [2] [3] [4].

Podemos hacer una clasificación de las diferentes energías susceptibles de ser aprovechadas mediante energy harvesting y sus respectivos transductores como muestra la figura 1.

La energía procedente de las vibraciones, que es la que vamos a tratar más a fondo en este trabajo, es una de las fuentes de energía más fáciles de encontrar en estructuras civiles, maquinas o el cuerpo humano. Para el aprovechamiento de la energía en forma de vibraciones los tres sistemas básicos de conversión en energía eléctrica son como vemos en la figura 1: transductores electromagnéticos (bobina magnética) [6]; transductores electrostáticos (capacitores) [7]; transductores piezoeléctricos [2] [3].

Dentro de las diferentes formas de convertir energía en forma de vibraciones mecánicas en energía eléctrica, los sistemas piezoeléctricos son una de las maneras más efectivas y prácticas [8]. Las principales ventajas de usar materiales y sistemas piezoeléctricos en energy harvesting (comparado con los transductores electromagnéticos y electrostáticos) son su mayor densidad de potencia y su fácil aplicación [2].

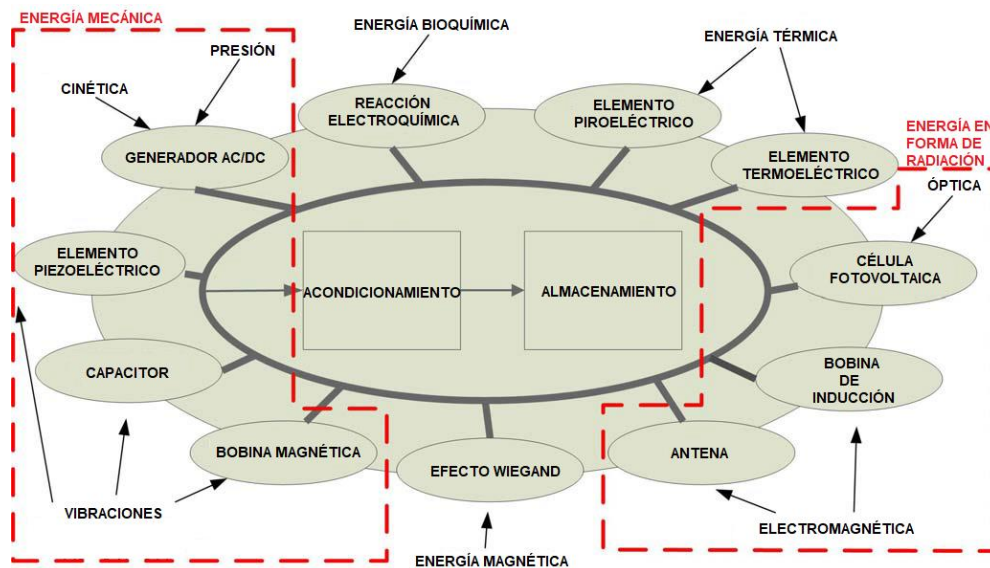


Fig. 1. Fuentes de energía y sus respectivos transductores. Adaptada de [5]

Debido al creciente uso de dispositivos inalámbricos el cosechamiento de energía ha destacado como una alternativa al uso de baterías convencionales, al ser una fuente de energía limpia y renovable. Estos dispositivos inalámbricos, las tecnologías MEMS, sensores para la monitorización de la salud, sensores para aplicaciones médicas, monitorización de presión de las ruedas en automóviles, son sensibles de aprovechar las diferentes tecnologías de cosechamiento de energía [9].

La evolución tecnológica en las últimas décadas de estos dispositivos electrónicos, ha propiciado que estos sean cada vez de más reducido tamaño y menor consumo de potencia. Estos avances, hacen que estos dispositivos electrónicos sean cada vez más portables [10], siendo necesarias una gran autonomía dado que usamos estos dispositivos (reproductores de música, sensores, teléfonos móviles, etc.) de forma continua a lo largo del día.

Esto ha supuesto un aumento en la investigación de tecnologías de energy harvesting debido a la necesidad de buscar una manera de aumentar esa autonomía sin tener que depender únicamente de baterías convencionales [10]. Por otro lado, como hemos comentado antes al ser una fuente de energía limpia y renovable, el energy harvesting se posiciona como una opción amigable con el medio ambiente ya que a medida que crece la demanda de dispositivos electrónicos portables, crecen a su vez los desperdicios electrónicos de dispositivos que se quedan obsoletos en un corto plazo de tiempo. Dentro de estos desperdicios, los más contaminantes son las baterías. Este foco de contaminación ambiental, se podría reducir, haciendo uso de sistemas de energy harvesting generadores de electricidad en sustitución de las baterías convencionales o como parte de sistemas híbridos embebidos para la recarga de baterías dándoles una mayor vida útil [11] [12].

En los últimos años se han publicado multitud de artículos e investigaciones en diferentes tipos aplicaciones de energy harvesting relacionadas con las vibraciones y la actividad diaria en [13] hay un extenso estudio de diferentes tecnologías y aplicaciones relacionadas con la energía generada de forma pasiva por el cuerpo humano así como otros artículos disponibles en la bibliografía [14] [15] [16] [17].



## 1.3 Introducción a los piezoeléctricos

### 1.3.1 Historia

El efecto piezoeléctrico fue descubierto en 1880 por Jaques y Pierre Curie. Descubrieron que en ciertos cristales al aplicarles una tensión mecánica, se polarizaban eléctricamente y que esta polarización era proporcional a la tensión aplicada. Su experimento consistió en la medición concluyente de las cargas que aparecen en la superficie de los cristales sometidos a tensión mecánica. Estos cristales fueron turmalina, cuarzo, topacio y sal de Rochelle entre otros.

Esta fue la primera demostración de la conexión entre el fenómeno piezoeléctrico y la estructura cristalográfica.

Lo que no predijeron los hermanos Curie es que los cristales que presentan el efecto piezoeléctrico directo (electricidad producida al aplicar tensión mecánica), también pueden presentar efecto piezoeléctrico inverso (deformación del material al aplicarle un campo eléctrico). Esta propiedad la dedujo matemáticamente, en 1881, Gabriel Lippmann (físico luxemburgués y francés) a partir de los principios fundamentales de la termodinámica. Jaques y Pierre Curie confirmaron el efecto piezoeléctrico inverso y continuaron investigando y obteniendo pruebas de la reversibilidad de las deformaciones electro-elasto-mecánicas de los cristales piezoeléctricos.

Después de dos años de trabajo interactivo de la comunidad científica europea, se establecieron las bases de las principales aplicaciones piezoeléctricas: la identificación de cristales piezoeléctricos sobre la base de estructuras cristalinas asimétricas, el efecto piezoeléctrico directo e inverso, y la utilidad de la termodinámica para cuantificar las complejas relaciones entre variables.

En los siguientes 25 años, se trabajó en estas bases. Se definieron 20 cristales naturales en los que se producían efectos piezoeléctricos, con 18 coeficientes piezoeléctricos macroscópicos apoyándose en las bases de la termodinámica y un análisis tensorial apropiado. En 1910, Woldemar Voight, físico alemán, publicaba el trabajo que serviría de referencia estándar.

Sin embargo, no fue hasta la Primera Guerra Mundial cuando se produjeron las primeras aplicaciones con cristales piezoeléctricos, puesto que esta era una ciencia que requería una matemática compleja para su comprensión y no podía competir con otras ciencias como el electromagnetismo, que ya se estaba convirtiendo en una tecnología.

La primera aplicación práctica del efecto piezoeléctrico la realizó Paul Langevin, físico francés, en 1917. Este físico junto con sus colaboradores, diseñó un detector de submarinos ultrasónico. El transductor estaba formado por una red de cristales de cuarzo montada entre dos placas de acero, cuya frecuencia de resonancia era de 50KHz. El detector se componía también de un hidrófono para la detección del eco. Se consiguió emitir sonidos a alta frecuencia (muy agudos), que chocaban con los cuerpos sólidos bajo el agua. El eco producido por estos choques era recogido. El tiempo del eco en volver era utilizado para medir la profundidad (distancia) al cuerpo sólido (submarinos, rocas...). Desde el momento en que se probó la utilidad de este transductor, no han dejado de desarrollarse dispositivos ultrasónicos piezoeléctricos.

En los años que fueron entre la Primera y la Segunda Guerra Mundial se empezaron a desarrollar muchas de las aplicaciones piezoeléctricas que utilizamos hoy en día (micrófonos, acelerómetros, filtros de señal...), aunque los materiales disponibles (principalmente cuarzo) limitaban mucho la capacidad de rendimiento de los dispositivos.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se llevaron a cabo investigaciones en países como Estados Unidos, Japón y la Unión Soviética, en las que se descubrieron que algunos materiales cerámicos tenían constantes dieléctricas hasta 100 veces mayores que los cristales comunes.

Los avances más importantes en relación a materiales piezoeléctricos en los 20 años posteriores a la Segunda Guerra Mundial son:

- Desarrollo de piezocerámicos como la familia del titanato de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ) y la de titanato de zirconato de plomo (PZT).
- El desarrollo de un fundamento para conseguir las propiedades deseadas (coeficientes de acoplamiento piezoeléctrico, constante dieléctrica...), en estas dos familias, dopándolas con impurezas metálicas.

Estos avances ayudaron a concebir un nuevo modelo de desarrollo de dispositivos piezoeléctricos, se empezaron a adaptar los materiales a la aplicación a realizar y no al revés, como se venía haciendo desde el descubrimiento de la piezoelectricidad.

En relación a la aplicación de estos materiales, se desarrollaron numerosas, entre ellas:

- Micrófonos pequeños se convirtieron en la regla y no en la excepción.
- Transductor de audio de cerámica: Consistente en un disco de cerámica laminado en un disco de chapa de acero. Este transductor era de reducido tamaño y baja potencia y bajo voltaje.
- Se fabricó al menos un relé piezoeléctrico.

Los materiales piezoeléctricos son por naturaleza difíciles de desarrollar, pero fáciles de reproducir una vez conocido el proceso. Esta es una de las causas de que se trabajara con un alto secretismo dentro de las compañías desarrolladoras, sin comunicación entre ellas. Esto propició que el desarrollo de la industria se viera obstaculizado y retrasado con respecto al mercado.

En Japón, al contrario que en Estados Unidos, se optó por compartir la información entre empresas, formando una asociación. Esto propició que entre 1960 y 1980, cuando en el resto del mundo los avances en aplicaciones piezoeléctricas eran lentos, en Japón se consiguieran mayores avances en la investigación. Se crearon nuevas familias de piezocerámicas, que competían con el PZT, y polímeros como el PVDF (Polifluoruro de vinilideno). Gracias a estas nuevas familias, libres de patentes, se desarrollaron diversas aplicaciones, como filtros de señal para televisión y radio.

En el presente, se puede comprobar solo con mirar el número de publicaciones anuales, que se sigue investigando y desarrollando aplicaciones piezoeléctricas en todo el mundo, siendo este un mercado en auge, y con grandes posibilidades de crecimiento.

### 1.3.2 Definición de Piezoelectricidad

La palabra piezoelectricidad, proviene del griego y significa electricidad bajo presión (la palabra piezo significa presionar en griego). El nombre de efecto piezoeléctrico fue propuesto por Hankel en 1881 para nombrar el descubrimiento de los hermanos Curie el año anterior [20].

La piezoelectricidad o efecto piezoeléctrico es la propiedad que presentan ciertos cristales al ser sometidos a presión o tensión mecánica, este es el denominado efecto piezoeléctrico directo.

Desde un punto de vista molecular, antes de someter al cristal piezoeléctrico a tensión, los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas coinciden (Figura 2.a). Cuando ejercemos cierta tensión, su estructura reticular interna se deforma, desalineando los centros de gravedad de las cargas, generando pequeños dipolos (Figura 2.b). Los polos opuestos que están enfrentados se cancelan, y aparece una distribución de cargas en la superficie del material (Figura 2.c). El material queda polarizado, y esta polarización genera un campo eléctrico.

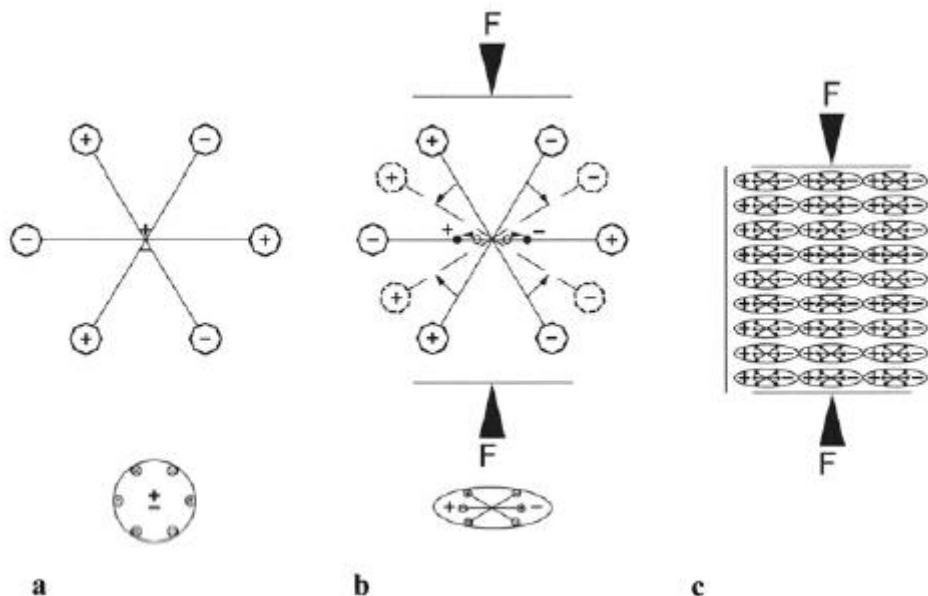


Fig. 2. Modelo molecular simple [20]

A su vez, el efecto piezoeléctrico inverso, como su nombre indica es el efecto recíproco al directo. Al aplicar un campo eléctrico al cristal piezoeléctrico este se deforma de manera proporcional a la intensidad del mismo.

Como hemos comentado antes, al aplicar un campo eléctrico el elemento piezoeléctrico queda polarizado (figura 3.a). Si la presión es ejercida a lo largo de la dirección de polarización (figura 3.b1), lo que equivale a comprimir el material piezoeléctrico, el voltaje generado tiene la misma polaridad que la polarización interna del material piezoeléctrico. Si la presión es ejercida perpendicular a la dirección de polarización (figura 3.b2), lo que equivale a estirar el material piezoeléctrico, el voltaje generado tiene la polaridad inversa respecto a la polarización del material piezoeléctrico. En los dos casos se genera un voltaje a partir de variaciones en el momento dipolar.

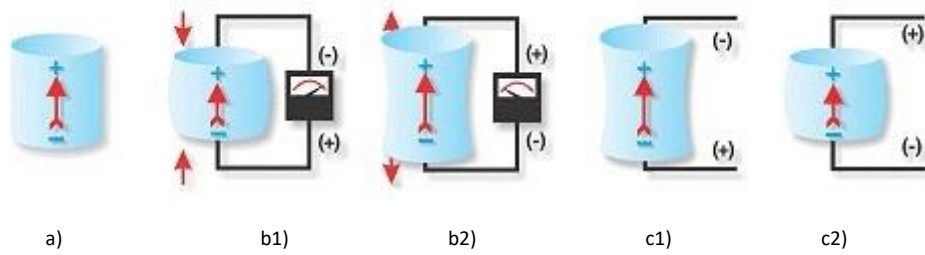


Fig. 3. a) Polarización b) Efecto piezoeléctrico directo c) Efecto piezoeléctrico inverso. Fuente: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezolectricity.html>

Si atendemos al efecto piezoeléctrico inverso, al aplicar un voltaje de la misma polaridad que la polaridad del material piezoeléctrico (figura 3.c1), el material piezoeléctrico se estirará a lo largo de su dirección de polarización. Si aplicamos un voltaje de polaridad opuesta a la polarización del material piezoeléctrico (figura 3.c2), el material piezoeléctrico se comprime a lo largo de su dirección de polarización. Si se aplica un voltaje alterno (CA), el elemento piezoeléctrico se estirará y comprimirá a la misma frecuencia que el voltaje aplicado.

### 1.3.3 Formulación matemática del efecto piezoeléctrico (Ecuaciones de la piezoelectricidad)

En este apartado, se van a analizar las ecuaciones que relacionan las deformaciones, tensiones y campo eléctrico generados en un material piezoeléctrico.

El efecto piezoeléctrico directo viene caracterizado por la siguiente ecuación:

$$P = dT \quad (1)$$

, donde  $P$  es el vector de polarización piezoeléctrico,  $d$  (m/V o C/N) es la constante de carga piezoeléctrica, y  $T$  (N/m<sup>2</sup>) es la tensión a la que se ve sometido el material piezoeléctrico.

A su vez, el efecto piezoeléctrico inverso viene caracterizado por la siguiente ecuación:

$$S = dE \quad (2)$$

$$S = gD \quad (3)$$

, donde  $S$  es la deformación sufrida por el piezoeléctrico,  $g$  (Vm/N) es la constante de tensión (voltaje) piezoeléctrica,  $\epsilon$  es la permitividad dieléctrica y  $E$  (V/m) el campo eléctrico al que se ve sometido el material piezoeléctrico.

Considerando las propiedades elásticas del material piezoeléctrico las ecuaciones (1) y (2) se puede reformular como:

$$P = dT = dcS = eS \quad (4)$$

$$T = cS = cdE = eE \quad (5)$$

, donde  $c$  es la constante elástica que relaciona el estrés generado al aplicar una deformación ( $T=cS$ ),  $s$  es la compilancia elástica del medio a un campo eléctrico constante que relaciona la deformación producida al aplicar una tensión ( $S= sT$ ),  $e$  es la constante piezoeléctrica de tensión.

Si el material piezoeléctrico está sujeto a una deformación ( $S$ ), esta deformación tendrá dos efectos. Por un lado generara una tensión elástica ( $T_e=cS$ ), por otro lado generara polarización piezoeléctrica ( $P_p=eS$ ), esta polarización creara un campo eléctrico (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):

$$E_p = \frac{P_p}{\epsilon} = \frac{eS}{\epsilon} \quad (6)$$

Este campo eléctrico de origen piezoeléctrico produce a su vez una deformación ( $T_p=eE_p$ )

$$T = T_e + T_p \quad (7)$$

$$S = S_e + S_p \quad (8)$$

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 ( $\sigma$ ) cuya magnitud es  $D = \epsilon E$ . 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:

$$D = dT + \epsilon E \quad (9)$$

Esta ecuación representa el desplazamiento eléctrico inducido al aplicar una tensión mecánica y un campo eléctrico al material piezoeléctrico.

Así mismo la deformación S que se tendrá en el material piezoeléctrico, se obtendrá teniendo en cuenta que la aplicación de un campo eléctrico causa deformación ( $S_p = dE$ ). Esta deformación, produce una tensión elástica ( $S_p=sT_e$ ). Por otro lado, el campo eléctrico ejerce una fuerza en la estructura interna, provocando deformación ( $T_p=eE$ ). Aproximando las expresiones se puede concluir que:

$$S = s^E T + dE \quad (10)$$

Esta ecuación representa la deformación en el material piezoeléctrico al aplicar una tensión mecánica y un campo eléctrico externo.

Como veremos en el apartado 1.3.4, el campo eléctrico puede generarse por deformaciones paralelas a la dirección de polarización, o perpendiculares a ella. Debido a esta propiedad de las cerámicas, las ecuaciones anteriores se pueden reescribir de manera matricial de la siguiente manera:

La ecuación (11) es la correspondiente al efecto piezoeléctrico directo, y la ecuación (12) al efecto piezoeléctrico inverso.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 1.3.4 Parámetros del efecto piezoeléctrico (Constantes)

En este apartado veremos los parámetros y constantes piezoeléctricas más importantes. Para tener en cuenta todas las posibles constantes, hay que tener en cuenta que las cerámicas piezoeléctricas son anisotrópicas (sus constantes varían dependiendo de la dirección). Las constantes físicas se relacionaran tanto con la dirección de la fuerza mecánica o eléctrica aplicada, como con la dirección perpendicular a esta. Por lo tanto, cada constante tendrá 2 subíndices que indicaran las direcciones de las fuerzas según la figura 4. La dirección de polarización generalmente se hace coincidir con el eje z (dirección 3 positiva).

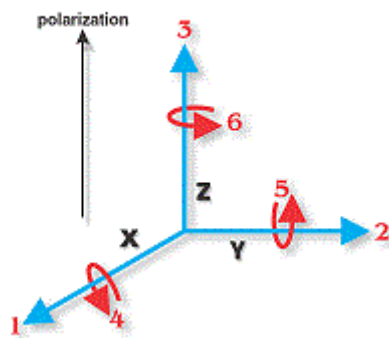


Fig. 4. Numeración ejes en cerámica piezoeléctrica y dirección de polarización. Fuente: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>

#### Constante de carga piezoeléctrica

La constante de carga piezoeléctrica ( $d$ ) es la polarización generada por unidad de tensión mecánica ( $T$ ) aplicada a un material piezoeléctrico. También se puede definir como la deformación mecánica ( $S$ ) experimentada por un material piezoeléctrico por unidad de campo eléctrico aplicado.

La unidad de medida de la constante es m/V o C/N.

La constante va acompañada de dos subíndices (Ej:  $d_{11}$ ). El primer subíndice indica la dirección de polarización ( $P$ ) generada en el material cuando el campo eléctrico es 0. El segundo subíndice indica la dirección de la presión aplicada ( $T$ ) o la deformación ( $S$ ) inducida. El parámetro  $d$  es un indicador de la idoneidad de materiales para ser usados como actuadores.

Por otro lado para materiales que actúan como generadores piezoeléctricos, serán importantes las constantes  $d_{33}$  y  $d_{31}$ . Los materiales que dependen de presión aplicada perpendicularmente a los electrodos del piezoeléctrico, explotaran el coeficiente  $d_{33}$ , mientras que aquellos que dependen de la presión aplicada paralelamente a los electrodos utilizaran el parámetro  $d_{31}$ . [9]



## Constante de voltaje piezoeléctrica

La constante de voltaje piezoeléctrico ( $g$ ) es el campo eléctrico generado por un material piezoeléctrico por unidad de presión mecánica ( $T$ ) aplicada. También se puede definir como la deformación mecánica ( $S$ ) experimentada por un material piezoeléctrico por unidad de desplazamiento eléctrico ( $D$ ) aplicado.

La unidad de medida de la constante es mV/N.

El primer subíndice de  $g$  indica la dirección del campo eléctrico generado en el material. El segundo subíndice es la dirección de la tensión aplicada ( $T$ ) o la deformación inducida ( $S$ ). El parámetro  $g$  es un indicador de la idoneidad de materiales para ser usados como sensores.

Igual que en el caso de la constante  $d$  los coeficientes que más se tendrán en cuenta para las aplicaciones serán el  $g_{33}$  y el  $g_{31}$ .

La constante de voltaje piezoeléctrica se relaciona con la constante de carga piezoeléctrica mediante la siguiente expresión:

$$g = \frac{d}{\epsilon^T} \quad (13)$$

## Constante dieléctrica (Permitividad)

La permitividad ( $\epsilon$ ) es el desplazamiento eléctrico por unidad de campo eléctrico. Esta variable además de definirse mediante subíndices, también lo hace con dos superíndices. El superíndice  $T$  ( $\epsilon^T$ ) indica la permitividad a presión constante. El superíndice  $S$  ( $\epsilon^S$ ) indica permitividad a deformación constante. De los dos subíndices, el primero indica la dirección del desplazamiento dieléctrico, y el segundo indica la dirección del campo eléctrico.

## Compilancia elástica (Flexibilidad Elástica)

La flexibilidad elástica ( $s$ ) es la deformación ( $S$ ) producida en un material piezoeléctrico por unidad de tensión aplicada ( $T$ ). Como en el caso de la permitividad ( $\epsilon$ ), tenemos la constante definida mediante dos superíndices:

- $s^D$  es la flexibilidad a desplazamiento eléctrico constante.
- $s^E$  es la flexibilidad elástica a campo eléctrico constante.

De los dos subíndices que definen la constante, el primero indica la dirección de la tensión ( $T$ ). El segundo subíndice indica la dirección de la presión ( $S$ ).

En el caso de las direcciones 11 y 33, la flexibilidad elástica es a su vez el recíproco del módulo de elasticidad (Módulo de Young).

## Módulo de Young

El módulo de Young ( $Y$ ), es un indicador de la rigidez de un material cerámico. Se obtiene a partir de la tensión aplicada ( $T$ ) dividido por el valor de la deformación resultante en la misma dirección.

$$Y = T/S$$

### Factor de Acoplamiento Electromecánico

El factor de acoplamiento electromecánico ( $k$ ), es un indicador de la eficacia con que un material piezoeléctrico convierte la energía mecánica en eléctrica y viceversa. El primer subíndice para  $k$  indica la dirección a lo largo de la cual se sitúan los electrodos. El segundo subíndice para  $k$  indica la dirección en que se aplica la energía mecánica al material piezoeléctrico.

Dependiendo de las dimensiones y la geometría del material piezoeléctrico tendremos diferentes expresiones del parámetro  $k$ :

- Para un disco plano de cerámica piezoeléctrica tendremos  $k_p$ , que expresa el acoplamiento radial. El acoplamiento radial, es el acoplamiento entre un campo eléctrico paralelo a la dirección de polarización (dirección 3) y las vibraciones radiales (direcciones 1 y 2).

$$k_p^2 = 2d_{31}^2 / ((s_{11}^E + s_{12}^E)\epsilon_{33}^T)$$

- Para un disco o lámina de material piezoeléctrico cuya superficie es mucho mayor que su grosor tendremos  $k_t$ , que expresa el acoplamiento entre un campo eléctrico en la dirección 3 y vibraciones en la misma dirección ( $k_{33}$ ). La frecuencia de resonancia para estas dimensiones, es mucho mayor en la dirección 3 (dirección del ancho) que en la dirección 1 (dirección de la superficie). Esto hace que  $k_t < k_{33}$ .
- Para varillas metálicas con longitud 10 veces mayor que el diámetro usaremos el parámetro  $k_{33}$ .

$$k_{33}^2 = d_{33}^2 / s_{33}^E \epsilon_{33}^T$$

- Para varillas metálicas usaremos el parámetro  $k_{31}$  (Plato cerámico).

$$k_{31}^2 = d_{31}^2 / s_{11}^E \epsilon_{33}^T$$

Las ecuaciones anteriores solo son válidas a bajas frecuencias.

Los valores máximos que suelen dar los fabricantes para este parámetro se refieren a valores máximos teóricos. A bajas frecuencias de entrada, para el caso de cerámicas piezoeléctricas, pueden convertir entre el 30% y el 75% de la energía recibida.

Para una conversión de energía eficiente es necesario un alto valor de  $k$ . El valor de eficiencia sin embargo, debe tomarse como la energía convertida por el piezoeléctrico entre la energía absorbida por el piezoeléctrico. Bajo esta medida, la eficiencia puede llegar al 90%.

### Factor de Disipación dieléctrico

El factor de disipación dieléctrico ( $\delta$ ), para un material cerámico mide las pérdidas dieléctricas del material. La tangente de  $\delta$  ( $\tan \delta$ ), se determina por la relación de conductancia efectiva y susceptancia efectiva en un circuito paralelo, midiéndolo mediante un puente de impedancias. Los valores de  $\tan \delta$  se determinan a 1kHz.

### Constante de Frecuencia

La constante de frecuencia (N), describe la relación entre la dimensión geométrica de un elemento piezoeléctrico y su correspondiente frecuencia de resonancia (serie). Las diferentes variantes según la geometría vendrán indicadas mediante un subíndice:

- La relación entre un la constante de frecuencia en modo radial y el diámetro de un elemento cerámico se muestra en la siguiente expresión:

$$N_p = f_s D \Phi$$

, donde  $f_s$  es la frecuencia de resonancia y  $D\Phi$  el diámetro del material.

- La constante de frecuencia en modo planar, está relacionada con el grosor ( $h$ ) del elemento cerámico.

$$N_T = f_s h$$

- Por ultimo tenemos la contante de frecuencia del modo longitudinal que está relacionada con la longitud del material.

$$N_L = f_s l$$

Los valores típicos para cerámicas piezoeléctricas están entre 800 a 3000 Hzm (Hertz\*metro). Es un valor a tener en cuenta para dispositivos que trabajan en resonancia.

### Factor de Calidad Mecánico

El factor de calidad mecánico ( $Q_m$ ), mide el amortiguamiento de un material piezoeléctrico y se determina a partir del ancho de banda a 3dB de la resonancia en serie del material que oscila. El valor recíproco es el factor de pérdidas mecánico.

### Temperatura de Curie

Es la temperatura a la que una red cristalina deja de presentar propiedades piezoeléctricas. Si se supera esta temperatura, el material se despolariza, y deja de servir como transductor de energía eléctrica en mecánica.

Para cerámicas piezoeléctricas (PZT) los valores oscilan entre 150°C y 350°C.

### 1.3.5 Materiales Piezoeléctricos

Antes de empezar a enumerar los diferentes materiales piezoeléctricos, hay que estudiar las diferentes estructuras cristalinas que pueden formar los cristales piezoeléctricos.

La mayoría de los materiales piezoeléctricos de interés para aplicaciones tecnológicas son sólidos cristalinos. Estos pueden ser monocristales (naturales o sintéticos) o materiales policristalinos como las cerámicas ferroeléctricas, que polarizándolas se pueden volver piezoeléctricas y tener a escala macroscópica simetría monocristalina al formarse dos polos. La ciencia de la cristalografía proporciona una nomenclatura altamente desarrollada y una gran cantidad de datos útiles para los ingenieros y científicos que trabajan con cristales piezoeléctricos. [22].

El termino cristal se aplica a un sólido en que los átomos están dispuestos en un único patrón repetido en todo el cuerpo. En cada cristal, los átomos están agrupados en pequeños grupos, todos ellos iguales, orientados de igual manera y alienados en las tres dimensiones. Cada grupo se puede considerar delimitado por un paralelepípedo. El cristal se forma juntando en las tres dimensiones estos paralelepípedos sin espacio entre ellos. A esto se le llama celda unitaria. La celda unitaria puede tener diferentes formas y dimensiones dependiendo de los átomos que la formen. La celda unitaria tiene el menor tamaño posible.

Las propiedades de un cristal se describen mediante un sistema de coordenadas naturales, indicados por las letras a b y c, que son los bordes de la celda unitaria.

Dependiendo de su grado de simetría los cristales se clasifican en siete sistemas: triclinico (el menos simétrico), monoclinico, ortorrómbico, tetragonal, trigonal, hexagonal y cúbico. Los sistemas son a su vez divididos en grupos puntuales según su simetría respecto a un punto. En total hay 32 clases (grupos puntuales), 12 de las cuales presentan grado de simetría demasiado alto para presentar propiedades piezoeléctricas, por lo tanto 20 clases pueden presentar propiedades piezoeléctricas. Cada sistema contiene al menos una de estas 20 clases como se puede ver en la tabla (X mirar en [22]).

Se puede hacer una primera separación de los materiales piezoeléctricos en dos grandes grupos como son los materiales naturales y los fabricados artificialmente.

#### **Materiales Naturales**

Los materiales que poseen propiedades piezoeléctricas de manera natural, se encuentran en forma de minerales o cristales en la naturaleza.

Entre sus características destacan que sus propiedades casi no varían con el paso de tiempo, pero el mayor problema es que las señales eléctricas que producen son muy pequeñas por lo que no son una buena opción para un sistema de *energy harvesting*.

Entre los materiales que poseen piezoelectricidad de manera natural destacan el Cuarzo, la turmalina y la sal de Rochelle.

## Materiales Ferroeléctricos y Cerámicas

Estos materiales se pueden polarizar, aplicando un campo eléctrico externo, y así presentan propiedades piezoeléctricas. Estos materiales pueden ser a también cerámicas diseñadas sintéticamente. Dentro de los materiales sintéticos de alta densidad de energía tenemos las cerámicas, los materiales monocristalinos, los polímeros y películas delgadas.

### - Cerámicas policristalinas

La cerámicas policristalinas están compuestas por numerosos cristales ferroeléctricos, formando una estructura policristalina. Estas cerámicas son útiles para aplicaciones en las que se requiere materiales con alta densidad de energía.

Un material de alta densidad de energía, se caracteriza por un valor alto del producto de la constante de carga ( $d$ ) y la constante de voltaje ( $g$ ). Para tener un alto valor de  $d \cdot g$  hay que tener en cuenta la ecuación  $|d| = \epsilon^n$ , donde  $\epsilon$  es la permitividad del material y  $n$  un parámetro del material con límite inferior de 0.5 [18]. En la tabla 1 se puede ver una comparación de cerámicas de diferentes fabricantes, así como sus valores de  $d$ ,  $g$  y  $d \cdot g$ .

Compuesto	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$	$d_{33}$ (pC/N)	$g_{33}$ (Vm/N)	$d_{33} \cdot g_{33}$ (m <sup>2</sup> /N)	$n$
<b>Morgan electroceramics</b>					
PZT 701	425	153	$41 \times 10^{-3}$	$6273 \times 10^{-15}$	1.165
PZT 703	1100	340	$30 \times 10^{-3}$	$10200 \times 10^{-15}$	1.181
PZT 502	1950	450	$25 \times 10^{-3}$	$11250 \times 10^{-15}$	1.204
PZT 507	3900	700	$20 \times 10^{-3}$	$14000 \times 10^{-15}$	1.227
<b>American Piezoelectric Ceramics International</b>					
APC 880	1000	215	$25 \times 10^{-3}$	$5375 \times 10^{-15}$	1.20
APC 840	1250	290	$26.5 \times 10^{-3}$	$7685 \times 10^{-15}$	1.198
APC 841	1350	300	$25.5 \times 10^{-3}$	$7650 \times 10^{-15}$	1.202
APC 850	1750	400	$26 \times 10^{-3}$	$10400 \times 10^{-15}$	1.203
APC 855	3400	620	$21 \times 10^{-3}$	$12600 \times 10^{-15}$	1.224
<b>Ferroperm Piezoceramics</b>					
Pz 24	400	190	$54 \times 10^{-3}$	$10260 \times 10^{-15}$	1.150
Pz 26	1300	300	$28 \times 10^{-3}$	$8400 \times 10^{-15}$	1.199
Pz 39	1780	480	$30 \times 10^{-3}$	$14400 \times 10^{-15}$	1.194
Pz 52	1900	420	$25 \times 10^{-3}$	$10500 \times 10^{-15}$	1.206
Pz 29	2900	575	$23 \times 10^{-3}$	$13225 \times 10^{-15}$	1.217
<b>Edo Corporation</b>					
EC-63	1300	295	$24.1 \times 10^{-3}$	$7109.5 \times 10^{-15}$	1.20
EC-65	1725	380	$25 \times 10^{-3}$	$9500 \times 10^{-15}$	1.205
EC-70	2750	490	$20.9 \times 10^{-3}$	$10241 \times 10^{-15}$	1.222
EC-76	3450	583	$19.1 \times 10^{-3}$	$11135.3 \times 10^{-15}$	1.228

Tabla 1. Cerámicas policristalinas comerciales. Propiedades piezoeléctricas [18]

A la hora de seleccionar una cerámica para una determinada aplicación, hay que tener en cuenta parámetros como el rango de temperatura en el que opera ( $-20 < T < 80$  °C), el rango

de frecuencia (10-200Hz), la rango de amplitud de la fuerza externa que se le puede aplicar (0.1-3N) y el tiempo de vida ( $>10^6$  ciclos) [18].

Para aplicaciones médicas y domésticas, en los últimos tiempos se están empezando a utilizar cerámicas que no contienen plomo en su composición. Una alternativa son las cerámicas basadas en el compuesto (Na, K) NbO<sub>3</sub> (KNN).

#### - Materiales Monocristalinos

Los materiales monocristalinos tienen excepcionales propiedades, como factor de acoplamiento electromecánico de 0.95 (Kuwata et al. 1981, 1982; Park and Shrout 1997a, 1997b, 1997c), coeficiente de carga piezoeléctrico entre 1500 y 2000 pC/N. En la tabla 2 se pueden ver las propiedades de algunos materiales monocristalinos diseñados mediante diferentes técnicas.

Material	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>R-T</sub> (°C)	d <sub>33</sub> (pC/N)	ε <sub>33</sub> /ε <sub>0</sub>	tan δ (%)	k <sub>33</sub>
PMN-PT-B (HC Material)	-	~75	2000-3500	5500-6500	0.8	0.90-0.94
TRS-X2C (TRS Tech.)	160	75	2200-2700	6500-8500	1	0.92
Type IB (Ibule Ph.)	-	88	1871	6502	<1	0.91
70PMN-30PT (Ceracomp)	130	90	1500	5000	<1	0.9
CPSC20-130 (Ceracomp)	195	130	1450	4200	<1	0.9

Tabla 2. Materiales Monocristalinos comerciales orientados en la dirección 001. Propiedades [18]

Los coeficientes piezoeléctricos de los materiales monocristalinos se pueden mejorar dependiendo de las dimensiones y la dirección de polarización (figura 5). Esto es muy útil para diseñar transductores de tipo bimorfo porque utilizan principalmente los coeficientes d<sub>31</sub> y d<sub>32</sub>.

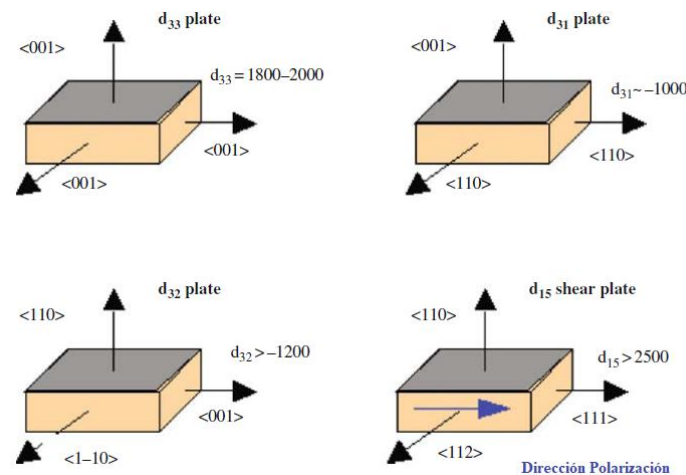


Figura 5. Variación de los coeficientes piezoeléctricos con la orientación y dirección de polarización [18].

La ventaja de estos dispositivos bimorfos es que son simples y baratos de fabricar. La desventaja es que son sistemas uniaxiales y tienen una densidad de potencia limitada.

- **Polímeros Piezoeléctricos (PVDF)**

El polifluoruro de vinilideno o fluoruro de polivinilideno (PVDF), es un polímero semicristalino. Es aproximadamente 50% amorfo y 50% cristalino. En estos materiales se obtiene un momento dipolar neto aplicando un fuerte campo eléctrico por encima de su temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y luego se congela enfriando el material, con lo que se consigue el efecto piezoeléctrico en el material. Son útiles para aplicaciones a temperaturas altas ya que su temperatura de Curie es cercana a 110°C. Son útiles también como sensores, puesto que tienen altas constantes de voltaje piezoeléctricas. [18]

Una de las ventajas del PVDF es que es mecánicamente muy fuerte y resiste cantidad de productos químicos como ácidos y puede fabricarse sobre una base de carrete continuo. También presenta una fuerte respuesta piezoeléctrica incluso a frecuencias del orden de microondas. Otra de las ventajas, como ya hemos dicho antes es su alta constante  $g$  con respecto a otros piezoeléctricos. En la tabla 3 podemos ver una comparación entre el PVDF y otros materiales piezoeléctricos comúnmente usados.

Material	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$	$d_{33}$ (pC/N)	$g_{33}$ ( $10^{-3}$ Vm/N)
BaTiO <sub>3</sub>	1700	191	12.6
Quartz	4.5	2.3 ( $d_{11}$ )	50.0 ( $g_{31}$ )
PVDF	13	-33	-339.0
PZT-4	1300	289	25.1

Tabla 3. Comparación entre los materiales más usados y el PVDF [2]

- **Películas delgadas**

Las películas delgadas de materiales como PZT se emplean comúnmente para aplicaciones como sensores, interruptores y diafragmas de actuación. Las películas gruesas de PZT (policristalinas) se usan para aplicaciones MEMS (sistemas micro electromecánicos), puesto que su constante piezoeléctrica ( $d$ ) es mayor que en otros materiales. [18]

La constante de carga piezoeléctrica en una película delgada o gruesa, difiere de la del material del que está compuesta, debido a la restricción impuesta por el sustrato sobre el que esta la película. La constante  $d_{33}$  es más pequeña para la película que para el volumen.

La deposición de solución química o el método sol-gel (método de producción de materiales sólidos a partir de moléculas pequeñas) son los métodos normalmente utilizados para sintetizar películas gruesas dado su rentabilidad, el conseguir una mejor textura y un buen control de la estequiometría. Las películas delgadas de PZT orientadas en la dirección (110) muestran una respuesta piezoeléctrica más alta. Las propiedades piezoeléctricas y dieléctricas, aumentan con el grosor de la película y se vuelven equivalentes a las del material cuando el grosor es mayor de 10µm.

## 2 Cerámicas Piezoeléctricas

En este capítulo nos vamos a centrar en las cerámicas piezoeléctricas, puesto que estas son los materiales piezoeléctricos más usados en la actualidad para todo tipo de aplicaciones. Dentro de estas cerámicas nos centraremos en las de compuesto PZT. Para nuestro sistema elegiremos una de estas cerámicas piezoeléctricas (PZT), por lo que haremos un estudio de sus propiedades, características y aplicaciones para elegir el tipo de compuesto que más se adecua a nuestras necesidades.

### 2.1 Definición

Una cerámica piezoeléctrica es un cuerpo macizo de cristales de perovskita. Cada cristal está compuesto de un ion metálico pequeño tetravalente, colocado dentro de una red formada por iones metálicos divalentes más grandes que el anterior y oxígeno como se muestra en la figura 6. Por encima de la temperatura de Curie (fig. 6 izq.) tenemos simetría cubica por lo que no tenemos momento dipolar. Por debajo de la temperatura de Curie, se observa un momento dipolar (fig. 6 derecha) en condiciones de simetría tetragonal o romboédrica [24].

Para poder aprovechar el efecto piezoeléctrico de estas cerámicas, se han de colocar dos electrodos en dos caras opuestas de la misma con el fin de que se produzca una diferencia de potencial entre ellos (polarización). Como hemos en la figura 4 visto la dirección de polarización se suele considerar la del eje z positivo, por lo tanto los electrodos estarían en las caras perpendiculares a dicha dirección.

Desde un punto de vista eléctrico, esta cerámica piezoeléctrica incluyendo los electrodos, se comporta como un condensador plano-paralelo con la cerámica actuando como dieléctrico, por ello es una buena opción para aplicaciones que requieran poco consumo de energía.

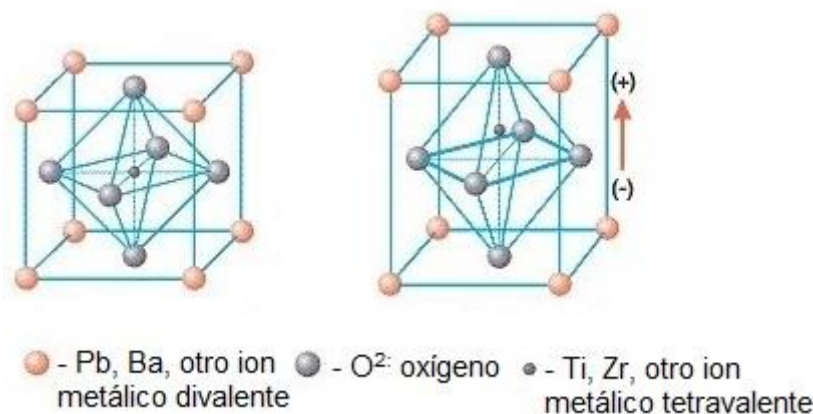


Figura 6. Estructura cristalina cerámica piezoeléctrica. Modificada de <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezolectricity.html>



## 2.2 Preparación Cerámicas Piezoeléctricas

Para preparar una cerámica piezoeléctrica, los metales que la componen, en forma de polvos finos, son mezclados en proporciones específicas. La mezcla, se calienta para formar un polvo uniforme. El polvo se mezcla a continuación con aglutinante orgánico, y se conforma según la forma que se quiera según la aplicación (discos, varillas, etc.). Posteriormente, esta mezcla de polvo, ya con la forma deseada, se calienta durante un tiempo y temperatura específicos (altas temperaturas). Este proceso hace que las partículas de polvo se sintericen y el material forma una estructura cristalina densa. Después de dejar la estructura cerámica enfriar, se procede a colocar los electrodos en las superficies deseadas.

Los dipolos presentes a temperaturas menores que la temperatura de Curie, cuando se encuentran adyacentes, forman regiones llamadas dominios que se encuentran alineadas localmente. Esta alineación proporciona un momento dipolar neto para el dominio, aunque este momento dipolar neto no mantiene la misma dirección para el resto de dominios, siendo aleatoria (figura 7a). Cuando se somete a la cerámica a un campo eléctrico de corriente continua entre sus dos electrodos (a una Temperatura cercana a la de Curie), los momentos dipolares de los dominios se alinean (figura 7b). Mediante el proceso de polarización los dominios más alineados con el campo eléctrico se expanden en detrimento de los menos alineados. La cerámica a su vez se expande en la dirección del campo eléctrico. Cuando se retira el campo eléctrico (figura 7c) los dominios quedan alineados en la dirección del campo consiguiendo así una polarización permanente en la dirección de polarización.

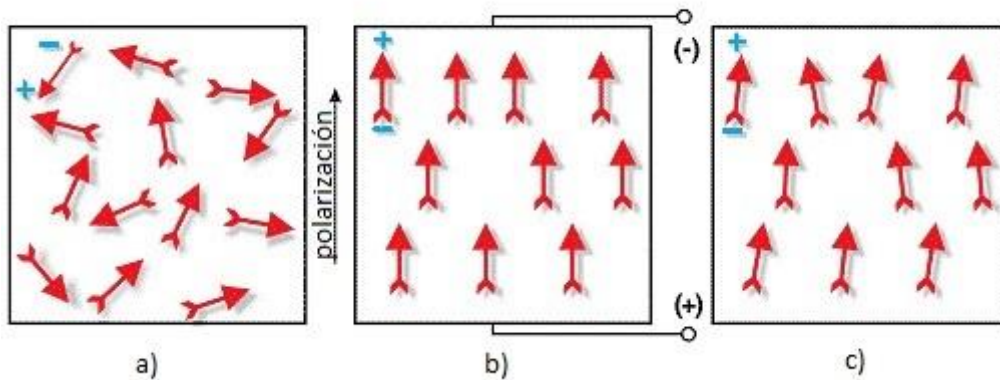


Figura 7. Polarización cerámica piezoeléctrica. Modificado de <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezolectricity.html>

## 2.3 Tipos de cerámicas

Las cerámicas piezoeléctricas las podemos dividir en dos grandes grupos según el tipo de dopante:

### 2.3.1 Cerámicas Blandas

Las cerámicas blandas se crean añadiendo pequeñas cantidades de dopantes donores a la cerámica, que crean cationes en la estructura cristalina. Estas cerámicas piezoeléctricas blandas, se caracterizan por grandes factores de acoplamiento electromecánico, grandes constantes piezoeléctricas, alta permitividad, grandes constantes dieléctricas, altas pérdidas dieléctricas, factores de calidad mecánica bajos y baja linealidad. Poseen a su vez ancho de banda de señal más amplio que las cerámicas duras, pero presentan una mayor histéresis y son más propensas a la despolarización y al deterioro. Debido a su temperatura de Curie se usan a bajas temperaturas. Generalmente, sus características impiden utilizarlas para aplicaciones que requieren alta frecuencia o grandes campos eléctricos. Se usan principalmente en aplicaciones de detección (sensores).

### 2.3.2 Cerámicas Duras

Las cerámicas duras se crean añadiendo pequeñas cantidades de dopantes aceptores a la cerámica, que crean aniones en la estructura cristalina. Las cerámicas piezoeléctricas duras tienen características opuestas a las cerámicas blandas, como pueden ser: temperatura de Curie por encima de los 300°C, constantes de carga piezoeléctrica pequeñas, grandes factores de acoplamiento electromecánico y grandes factores de calidad mecánica. Las cerámicas duras son más difíciles de polarizar o despolarizar. Son más estables que las cerámicas blandas pero producen menos desplazamiento. Soportan, al contrario que las cerámicas blandas, elevadas cargas mecánicas y grandes voltajes.

## 2.4 PZT. Propiedades y procesos de fabricación.

Las cerámicas PZT (titanato zirconato de plomo) son uno de los materiales cerámicos piezoeléctricos más usados en el mundo, y será el elegido para la realización de nuestro sistema. Las cerámicas PZT como se expone en el apartado 2.1 tienen una estructura cristalina de perovskita. En el caso del PZT el ion de metal tetravalente suele ser titanio o circonio y el ion de metal divalente plomo.

El PZT es un material piezoeléctrico basado en óxido metálico, que fue por primera vez desarrollado en 1952 en el Instituto de Tecnología de Tokio. Presentaba un avance respecto al titanato de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ) descubierto anteriormente, debido a su mayor sensibilidad y mayor temperatura de funcionamiento. Otras de sus ventajas respecto a las otras cerámicas piezoeléctricas es que se puede fabricar a un precio bajo, es físicamente fuerte y químicamente inerte. Además permite adaptarse para cumplir los requisitos que deseemos.

El proceso de fabricación del PZT consiste en seis operaciones distintas [21]. Primero se obtienen, evalúan y se seleccionan las materias primas. Además de tener en cuenta la pureza para su selección, también se tiene en cuenta la cantidad de impurezas nocivas que contienen y la aplicación que se la dará al material.

Una vez seleccionado y aprobado el uso que se le va a dar a cada material, se pesa de forma precisa para la composición a realizar y se introduce en molinos húmedos. Los materiales (ingredientes) se muelen en húmedo en las proporciones adecuadas para tener una distribución uniforme del tamaño de la partícula. Es necesario un control preciso de la distribución del tamaño para garantizar la correcta actividad del material durante la calcinación.

Después del proceso de molido, el producto resultante, se seca y se prepara para la calcinación. La calcinación se lleva a cabo con aire a aproximadamente 1000 °C en crisoles de alta pureza. El óxido de plomo es uno de los ingredientes principales del PZT y peligroso con la presión a altas temperaturas (calcinación), por lo que se toman medidas para que no se vea alterada la composición del material por la evaporación del mismo.

El siguiente paso consiste en introducir de nuevo el polvo PZT ya calcinado en el molino para asegurar la homogeneidad y preparar el material para la adición del agente aglutinante orgánico. La mezcla con el aglutinante se pasa por un secador por pulverización donde se evapora el agua.

Por último, se somete al polvo PZT a un proceso de compactación en moldes con la forma final deseada (discos, láminas, varillas, etc.)

Para poder utilizar esta cerámica como material piezoeléctrico, faltaría añadir los dos electrodos en caras opuestas. La técnica más utilizada comercialmente es la deposición por tinta de plata en la superficie.

Las cerámicas PZT se utilizan en multitud de aplicaciones, para las cuales se selecciona un tipo u otro de cerámica PZT (blanda o dura) como veremos a continuación.

## 2.5 Tipos de cerámicas PZT

Dentro de las cerámicas PZT y dependiendo del tipo de cerámica (blanda o dura) la clasificación Navy ha servido de estándar para la clasificación de los diferentes tipos de compuestos PZT. A su vez, dependiendo del fabricante que produzca el material, este puede variar con respecto a otro de otro fabricante con la misma clasificación [25] [26]. Esta clasificación define 6 tipos de materiales PZT:

- Navy type I: Este material, también conocido como PZT-4, permite altas amplitudes de vibración, con bajas pérdidas mecánicas y dieléctricas. Sus características hacen que sea adecuado para aplicaciones de uso continuo y repetitivo. Se usa para aplicaciones como pueden ser nano posicionamiento, aplicaciones médicas, sonar o aplicaciones que requieran alta potencia.
- Navy type II: También conocido como PZT-5A, posee una alta sensibilidad, permitividad y estabilidad en el tiempo en aplicaciones como receptor o generador en acelerómetros, en aplicaciones de captación de vibraciones e hidrófonos. Este material no es adecuado para aplicaciones con altas corrientes eléctricas (alta potencia) debido al calentamiento dieléctrico. Por lo tanto será adecuado para aplicaciones de baja potencia.
- Navy type III: También conocido como PZT-8. Este material es muy similar al tipo I pero mejorado para su uso más altas potencias con menores pérdidas. Su calidad mecánica

es muy alta y es el material PZT que mayores potencias soporta. Entre sus posibles aplicaciones destaca los ultrasonidos de alta potencia.

- Navy type V: Se trata de una composición intermedia entre los tipos II y VI. No es muy usado puesto que la mayoría de aplicaciones desarrollan con los tipos II o VI que se ajustan más específicamente a los requerimientos. Conocido como PZT-5J.
- Navy type VI: También conocido como PZT-5H. Este material tiene una muy alta permitividad, acoplamiento y constante piezoeléctrica pero menor estabilidad en el tiempo. Es similar al tipo II pero con mayor sensibilidad y constante dieléctrica a expensas de una temperatura de Curie menor. Se usa para aplicaciones que requieren un control de movimiento preciso o para receptores sensibles.

## 2.6 Modelo eléctrico equivalente

El circuito eléctrico equivalente más común al que podemos aproximar el comportamiento de una cerámica piezoeléctrica consiste en un generador de tensión en serie con un condensador (figura 8) o un generador de corriente en paralelo con un condensador (figura 9).



Figura 8. Modelo equivalente. Generador de Tensión.

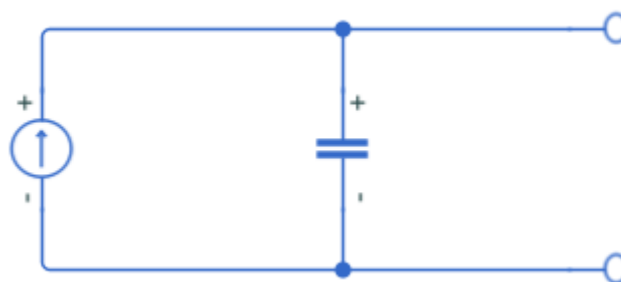


Figura 9. Modelo equivalente paralelo. Generador de Corriente.

La capacidad de este circuito equivalente depende de las dimensiones del material piezoeléctrico, con lo que habrá que tener en cuenta el tipo de configuración para el correcto modelado del material. Dependiendo del tipo de aplicación este circuito equivalente también sufre variaciones, como puede ser añadir en el modelo una resistencia de pérdidas.

## 2.7 Tipos de configuración

A la hora de diseñar un sistema de energy harvesting basado en la recolección de energía en forma de vibraciones, deberemos diseñar la forma y configuración de nuestro piezoeléctrico de manera que podamos aprovechar al máximo las características del entorno para la máxima recolección de energía. Algunos de los tipos de configuración encontrados en la bibliografía para la recolección de energía en forma de vibraciones se comentan en este apartado.

### 2.7.1 Viga en voladizo (*Cantilever*)

La configuración del tipo viga en voladizo es una de las estructuras más simples para recolección de energía mediante vibraciones, que además, puede producir una gran deformación bajo estas vibraciones (figura 10). Esta estructura consiste en una o dos láminas de material piezoeléctrico con los electrodos en la capa superior e inferior, fijas en un extremo. En el extremo contrario esta libre, y en él se coloca una masa que hace que aumente la deformación de las láminas piezoeléctricas, para ajustar esta masa se deberá tener en cuenta la frecuencia de trabajo que requiere la aplicación. Se han realizado multitud de estudios basados en esta configuración [1], demostrando su gran campo de aplicación.

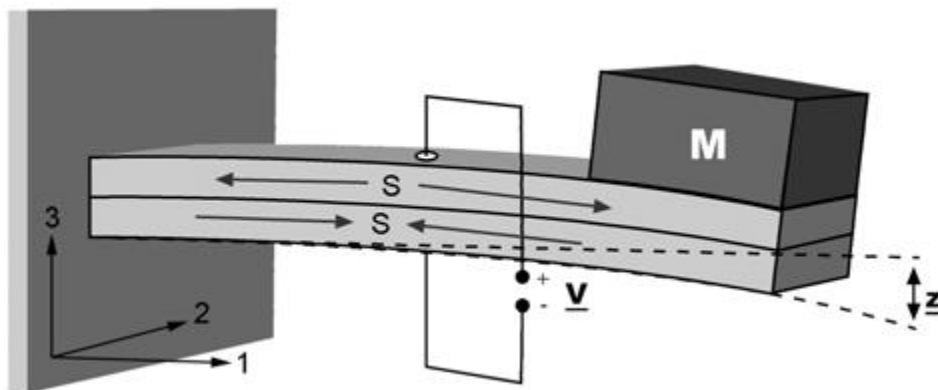


Figura 10. Estructura tipo Cantilever [1].

### 2.7.2 Tipo Címbalo (*Cymbal*)

Las configuraciones con estructura en forma de címbalo, pueden producir una gran deformación bajo una fuerza externa transversal, lo cual hace esta configuración adecuada para *micro energy harvesting*. Como se muestra en la figura 11 consiste en dos platillos de metal o cualquier otro material elástico, y una lámina de material piezoeléctrico que recibe la fuerza aplicada sobre los platillos metálicos.

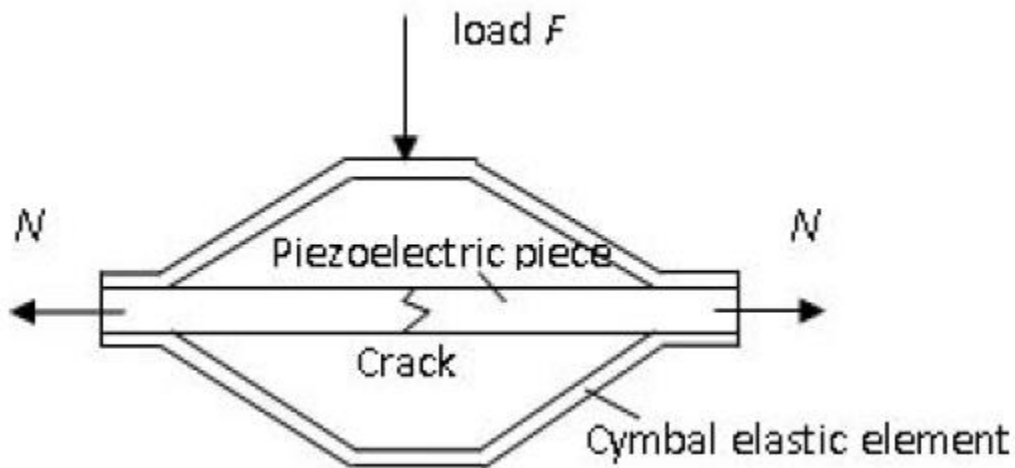


Figura 11. Estructura tipo Címbalo [1].

### 2.7.3 Tipo Pila (Stack)

La configuración tipo pila consiste en una pila de capas (laminas) de material piezoeléctrico (figura 12).

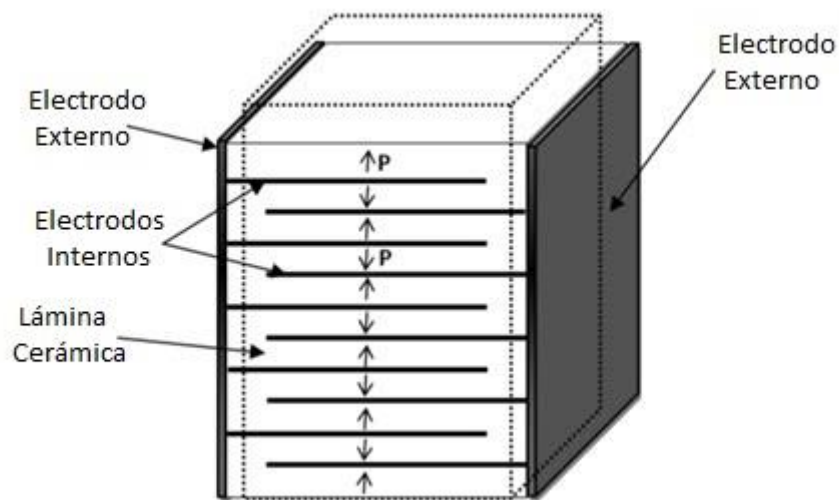


Figura 12. Estructura tipo pila. Modificado de: <https://www.ansys-blog.com/multilayer-piezoelectric-actuators-can-single-layer-modeled-simulate-layered-stack/>

Estas capas se colocan con polarización opuesta entre las capas adyacentes. Las capas son conectadas mecánicamente en serie y eléctricamente en paralelo. Cuanto mayor número de capas tenga la pila, aumenta su volumen y por tanto incrementa la energía que produce. Utiliza el modo 33 y tiene una gran capacidad debido al número de capas de material piezoeléctrico. Este tipo de configuración tipo pila tiene como desventaja que puede ser débil bajo golpes mecánicos.

### 2.7.4 Tipo Concha (*Shell*)

La configuración tipo concha, consiste en una lámina de piezoeléctrica curva (figura 13). Esta estructura en forma curvada, puede generar mayor tensión que una lámina plana, por lo que puede mejorar la eficiencia en el cosechamiento de energía por el efecto piezoeléctrico.

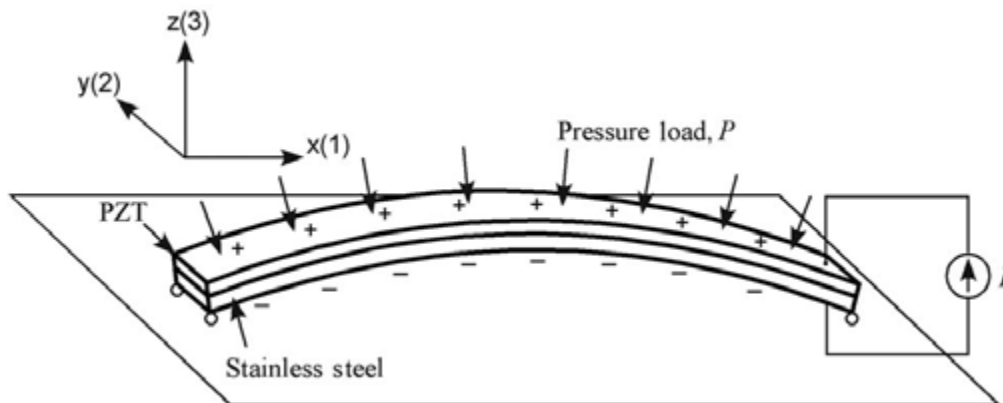


Figura 13. Estructura tipo concha [1].

## 2.8 Aplicaciones

Las cerámicas piezoeléctricas tienen multitud de aplicaciones en la actualidad, en todos los ámbitos de la tecnología. Las grandes ramas (sensores, actuadores, transductores, acelerómetros, generadores) en que podemos dividir las aplicaciones de las cerámicas se comentan en este apartado.

### 2.8.1 Sensores

Los sensores piezoeléctricos convierten una entrada física (aceleración, presión, etc.) en una señal eléctrica que sirve como entrada para un sistema de procesamiento de datos [21]. Para estas aplicaciones de detección se utilizan las cerámicas blandas, con factores de acoplamiento electromecánico más grandes, constantes piezoeléctricas más grandes como hemos visto en el apartado 2.3.

Los sensores piezoeléctricos típicos, generan una señal solo cuando experimentan un cambio en la presión aplicada. Bajo una entrada estática, sin cambios ni variaciones, las cargas libres se dirigen hacia los dipolos, descargando eléctricamente el piezoeléctrico. Si se aplica una nueva presión, la carga se restablecerá, pero si se mantiene dicha presión, se acabará descargando de nuevo.

Para medir señales de entrada de baja frecuencia (muy por debajo de la frecuencia de resonancia) se utilizan sistemas que se describen mediante la constante de tiempo (producto

de la capacidad de la cerámica y la resistencia de entrada del circuito electrónico). Esta constante de tiempo debe ser 10 veces menor que el periodo de la señal de entrada.

Para poder medir estas señales y mantener la resistencia de entrada baja se puede: construir el sensor con múltiples capas en paralelo; incluir un amplificador de carga o condensador en el sistema, en paralelo con el sensor.

Los sensores a su vez, dependiendo de la aplicación se pueden dividir en activos y pasivos.

- Activos: Las cerámicas usadas en aplicaciones de detección activa, miden el tiempo de una respuesta (eco) de un pulso enviado contra una superficie o el tiempo entre un transmisor y receptor. Los transmisores trabajan en resonancia y los receptores en anti resonancia.
- Pasivos: Las cerámicas usadas en aplicaciones de detección pasiva, funcionan por debajo de su frecuencia de resonancia, lo que hace que reciba una señal en un amplio rango de frecuencias.

### 2.8.2 Actuadores

Un actuador piezoeléctrico, convierte una señal eléctrica en un desplazamiento físico preciso [21]. Si ante esta señal eléctrica de entrada, se impide el desplazamiento, se obtendrá una fuerza de bloqueo utilizable según la aplicación.

Dado su diseño simple, se usa en infinidad de aplicaciones industriales, aplicaciones médicas, de aviación, aeroespaciales, etc. Dado que son silenciosos se usan también en lentes y autoenfoco de cámaras de video y teléfonos móviles.

Si usamos un actuador de tipo pila, se obtiene una resolución muy alta. Los actuadores piezoeléctricos pueden trabajar millones de veces sin desgaste ni deterioro. Tienen una gran velocidad de respuesta, solo limitada por la inercia del objeto a mover y la capacidad del controlador electrónico. Además no consumen casi energía y generan muy poco calor.

### 2.8.3 Transductores

Un transductor es cualquier dispositivo que sirve para convertir un tipo de energía en otro. Los transductores.

Los transductores piezoeléctricos son un tipo de transductores electroacústicos que convierten la electricidad producida en la cerámica piezoeléctrica en otro tipo de energía.

Un tipo de transductor piezoeléctrico de gran utilidad es el transductor piezoeléctrico ultrasónico, el cual genera ondas sonoras por encima de las frecuencias audibles por el ser humano. Se usa en aplicaciones de limpieza y ofrece una alta eficiencia electroacústica.

Los transductores se usan en numerosas aplicaciones como: automóviles, hogar, industria, dispositivos electrónicos, guitarras, etc.



#### 2.8.4 Acelerómetros

Un acelerómetro es un tipo de sensor que mide la fuerza debida a la aceleración del sensor. El funcionamiento básico de un acelerómetro es una masa suspendida y restringida por un transductor calibrado para detectar fuerza. El transductor mide la fuerza ejercida sobre la masa debida a la aceleración.

Si se desea medir la aceleración en diferentes direcciones, hay que integrar múltiples masas y transductores en una única unidad compacta para tener un acelerómetro de varios ejes.

Los acelerómetros a su vez pueden incorporar un circuito de acondicionamiento de señal integrado. Este circuito convierte y acondiciona la señal de voltaje del sensor para ser procesada más fácilmente por la instrumentación.

Se usan en diferentes aplicaciones como pueden ser: automoción, seguridad, drones, control de estabilidad en vehículos, sensores sísmicos, aviación, etc.

#### 2.8.5 Generadores

Un generador piezoeléctrico es una cerámica piezoeléctrica que convierte energía mecánica en eléctrica. A diferencia de un sensor u otro tipo de dispositivo piezoeléctrico capaz de convertir energía mecánica en eléctrica, los generadores buscan convertir la máxima cantidad de energía.

Para tener una conversión eficiente, es necesario un diseño adecuado. La configuración elegida para el generador tiene una gran importancia así como el tipo de material piezoeléctrico. La fuerza a la que se va a ver sometida la cerámica así como la impedancia de carga también debe tenerse en cuenta.

Los generadores piezoeléctricos pueden ser de una sola capa o multicapa. La principal diferencia entre ellos es el voltaje generado. Los generadores multicapa generan menos voltaje y una corriente significativamente mayor que los generadores de una sola capa.

### 3. Piezoeléctricos generadores de electricidad

Como ya hemos comentado en el apartado 2.8.5 un generador piezoeléctrico es un tipo de transductor piezoeléctrico que genera energía eléctrica a partir de energía mecánica, la cual en nuestro caso procede de las vibraciones a las que se ve sometido el elemento piezoeléctrico.

Para la elección de la cerámica piezoeléctrica que nos sirva para convertir la energía mecánica en forma de vibraciones en energía eléctrica, hay que elegir los materiales que mejores características posean para trabajar como piezoeléctricos generadores de electricidad.

Para un generador piezoeléctrico, el tipo de cerámica PZT idónea según lo visto en el apartado 2.3 y en el apartado 2.5 sería una cerámica blanda del tipo II o del tipo VI. De las dos se va a escoger la cerámica PZT de tipo II porque tiene una alta sensibilidad y está más orientada a aplicaciones de captación de vibraciones. Otra de las razones para decantarse por esta opción es que este tipo de cerámica es adecuada para aplicaciones de baja potencia como es nuestro caso.

Dentro de las cerámicas Navy tipo II se van a seleccionar materiales de diferentes fabricantes con el fin de ver cual ofrece mejores características para nuestro sistema, los materiales a seleccionar son:

- American Piezo: APC Material 850
- Harris Electro-ceramic: Material EC-65
- Pi Ceramic: Material PIC155

La configuración elegida en primer lugar es el tipo viga en voladizo (cantiléver) puesto que es una de las configuraciones más efectiva a la hora de capturar energía en forma de vibraciones y es la que mejor se adapta al diseño a la hora de recoger vibraciones del entorno como pueda ser en el manillar de una bicicleta. Las dimensiones serán elegidas más adelante siempre teniendo en cuenta que el espesor debe ser mínimo 10 veces menor que la longitud de la lámina. La formulación para el diseño y el circuito acondicionador, serán válidos para otros tipos de configuración como pueda ser una lámina de cerámica en forma de disco.

Para poder aprovechar esta energía en forma de vibraciones, primero hay que captar la energía en forma de vibraciones mediante el elemento piezoeléctrico, en segundo lugar transformar esta energía en forma de corriente alterna en corriente continua, y finalmente adaptar esta corriente continua para su almacenamiento en una batería.

#### 3.1 Diseño de un generador piezoeléctrico

En primer lugar, a la hora de diseñar el sistema de energy harvesting hay que tener en cuenta el tipo de entrada mecánica que se va a tratar. Tendremos 2 tipos diferentes de fuerzas mecánicas [27]:

- Fuerza cuasi-estática: La fuerza cuasi-estática, produce una tensión de salida cuando se aplica una presión a la cerámica PZT y otro pico de tensión opuesto cuando se deja de aplicar presión. Esta fuerza no es periódica, o tiene un periodo menor que la

contante de carga del condensador que simula el comportamiento de la cerámica piezoeléctrica.

- Fuerza dinámica: El tiempo de duración de la presión aplicada en este tipo de fuerza es menor que la contante de tiempo de carga del condensador, con lo cual el condensador no se carga con cada pulso. A su vez, al dejar de ejercer presión, no se produce un pico de tensión opuesto, puesto que no se descarga el condensador. Este tipo de fuerza genera más voltaje que la fuerza cuasi-estática.

Una vez elegida la ubicación de nuestro sistema (manillar bicicleta), habrá que calcular la masa a colocar en el extremo de nuestro piezoeléctrico en configuración cantiléver para aumentar la fuerza, y por tanto la presión ejercida sobre la cerámica. Para ello hay que ver a qué frecuencia va a trabajar nuestro piezoeléctrico ( $f_0$ ), e intentar que nuestra cerámica tenga la misma frecuencia de resonancia ( $f_r$ ). Esta masa se calcula con la expresión (1) que corresponde con la expresión de la pulsación natural de un sistema masa-resorte.

$$w_0 = \sqrt{\frac{K_s}{m}} \quad (1)$$

, donde  $K_s = \frac{Y \cdot A}{h}$

En segundo lugar, debemos calcular la tensión al que se ve sometido el material piezoeléctrico, para así transformar la energía mecánica en energía eléctrica para lo cual utilizamos la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

, donde  $F = m \cdot a$

Al ser un diseño en forma de viga en voladizo, la fuerza ejercida sobre el material piezoeléctrico aumentara o disminuirá según la aceleración (vibraciones) a la que se vea sometido el sistema. Por lo tanto, la aceleración, será una variable del sistema, que tendrá una frecuencia igual a la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico.

A partir de la tensión ejercida sobre el material piezoeléctrico, podemos calcular el campo eléctrico generado por el efecto piezoeléctrico directo y el voltaje de salida:

$$E = g_{33} \cdot \sigma \quad (3)$$

$$V_{piezo} = E \cdot h \quad (4)$$

Esta tensión  $V_{piezo}$  obtenida a partir de la ecuación (4) será la tensión de salida de la cerámica piezoeléctrica. Esta tensión, para convertirla a tensión en continua, la haremos pasar por un rectificador de onda completa y nos dará la tensión final que utilizaremos para cargar nuestra batería.

También podemos calcular la energía generada tanto mecánica como eléctrica en el material piezoeléctrico a partir de las ecuaciones (5) y (6).

$$E_{mec} = \frac{1}{2} s_{33}^D \frac{F^2 \cdot h \cdot n}{A} \quad (5)$$

, donde  $n$  es el número de capas de cerámica piezoeléctrica y  $s_{33}^D$  es el inverso del módulo de Young ( $Y$ ).

$$E_{elec} = k_{33}^2 E_{mec} \quad (6)$$

, donde  $k_{33}$  es el coeficiente de acoplamiento adimensional.

La energía de deformación del material, vendrá dada por la ecuación (7). La energía total del generador piezoeléctrico será la suma de la energía de deformación y la energía eléctrica del piezoeléctrico (8)

$$E_{def} = \frac{1}{2} k_{33}^4 s_{33}^E \frac{F^2 \cdot h \cdot n}{A} \quad (7)$$

$$E_{total} = E_{elec} + E_{def} \quad (8)$$

La carga generada se puede calcular a partir de la energía total del sistema y de la capacidad interna del generador piezoeléctrico y vendrá dada por la ecuación (9).

$$Q = \sqrt{2 \cdot E_{total} \cdot C_0} \quad (9)$$

, donde la capacidad de la cerámica piezoeléctrica se calcula con la siguiente expresión:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{h} \quad (10)$$

### 3.2 Modelo mecánico equivalente generador piezoeléctrico

El equivalente mecánico para una estructura piezoeléctrica sujeta a vibraciones, se puede modelar según la figura 14. La cerámica se comporta como un sistema de masa resorte. Un sistema masa resorte consiste en una masa “m” (masa a colocar en el extremo de la estructura cantiliver) unida a un muelle o resorte fijo en una pared, la cual oscila al ser separada de su punto de equilibrio. El resorte o muelle se caracteriza por una constante de deformación, que en nuestro caso se corresponderá con las constantes del piezoeléctrico, donde  $c_m$  se corresponde con el acoplamiento mecánico,  $r_m$  se corresponde con la resistencia mecánica.

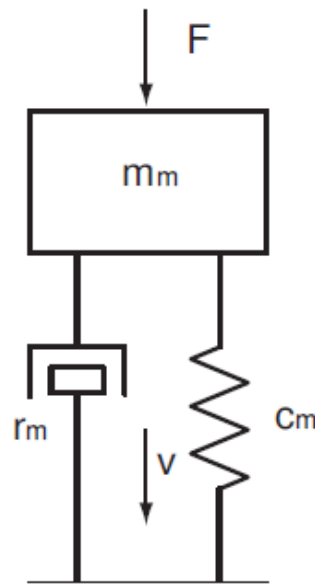


Figura 14. Modelo Equivalente mecánico. Modificado de [28].

### 3.3 Modelo eléctrico y electromecánico de un generador piezoeléctrico

El modelo mecánico visto en el apartado anterior, tiene su equivalente eléctrico y electromecánico como se muestra en la figura 15. La masa mecánica, se corresponderá con una inductancia ( $L$ ) en el modelo eléctrico. El acoplamiento mecánico se corresponderá con una capacidad ( $C$ ). La resistencia mecánica, se corresponderá con una resistencia ( $R$ ). A su vez, la fuerza ejercida ( $F$ ) se corresponderá con un voltaje en el modelo eléctrico.

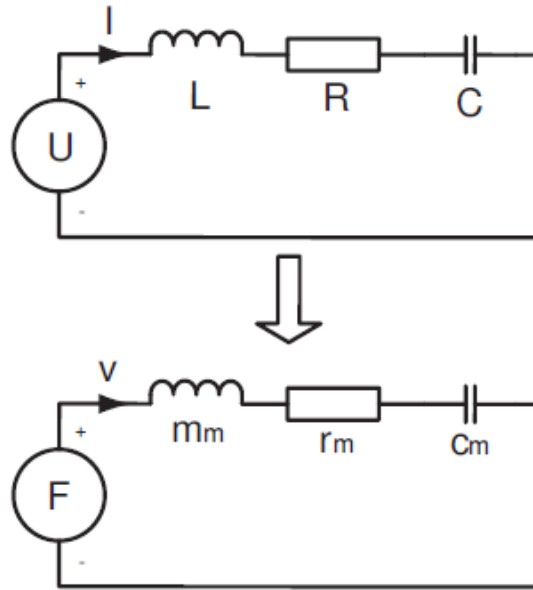


Figura 15. Modelo eléctrico y electromecánico. Modificado de [28].

Finalmente, si añadimos la capacidad interna del elemento piezoeléctrico ( $C_0$ ), tendremos un modelo electromecánico como el de la figura 16, en el que además se añade  $R_0$  (resistencia del elemento piezoeléctrico) y un transformador ideal que indica la conversión entre energía mecánica y eléctrica.

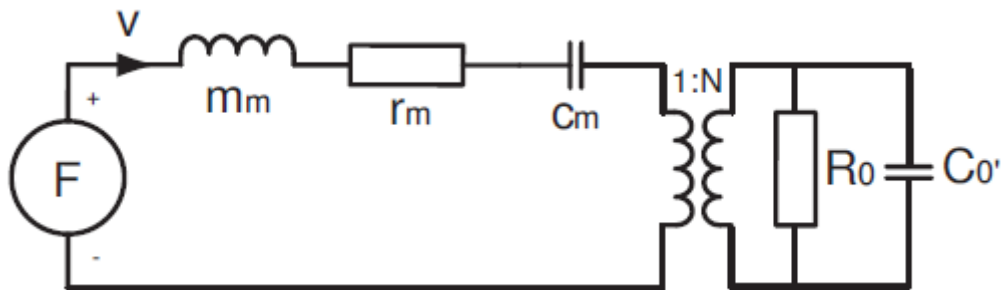


Figura 16. Modelo equivalente electromecánico completo [28].

Puesto que el voltaje obtenido en el elemento piezoeléctrico se puede calcular a partir de la formulación matemática mediante la fuerza ejercida en él y sus constantes piezoeléctricas, en la práctica no nos será necesario utilizar el modelo electromecánico completo. Utilizaremos como modelo, el modelo simplificado, compuesto por la fuente de tensión en serie con el condensador correspondiente a la capacidad interna del piezoeléctrico (figura 17). También se podría añadir al modelo simplificado una resistencia de pérdidas dada por la expresión:

$$R_{perdidas} = \frac{\tan \delta}{w C_0}$$

### 3.4 Circuito Acondicionador de un generador piezoeléctrico

El circuito acondicionador de un sistema de energy harvesting consta de 4 partes (figura 17). En primer lugar la fuente de energía, en nuestro caso la cerámica piezoeléctrica. En segundo lugar un rectificador de onda completa compuesto por diodos, para convertir la señal alterna en continua y un condensador de filtrado. En tercer lugar un convertidor de DC/DC que acondicione la señal de continua obtenida del rectificador a la requerida por la carga. En último lugar la batería que o el elemento que pretendemos cargar.

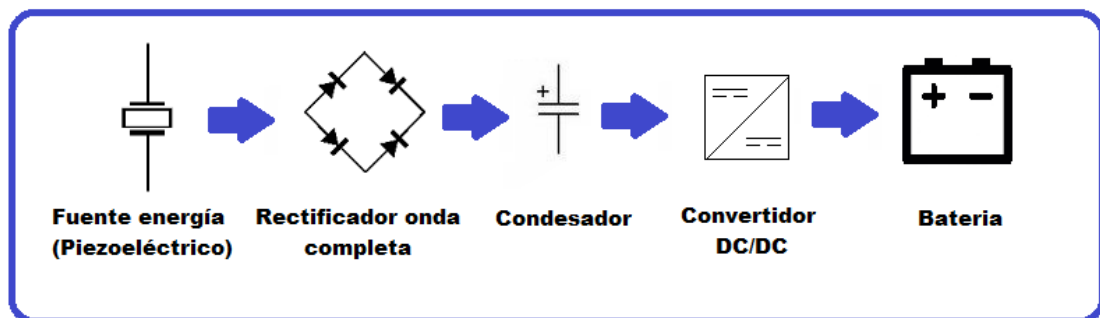


Figura 17. Etapas sistema energy harvesting.

#### 3.4.1 Rectificador de Onda completa

El rectificador servirá para convertir nuestra señal alterna de voltaje procedente del material piezoeléctrico a corriente continua para poder cargar nuestra batería. En nuestro caso este rectificador será de onda completa, no controlado. Utilizaremos un puente de diodos.

En rectificador de onda completa, consiste en dos grupos de diodos, en los cuales, la corriente circulara por el diodo que tenga mayor tensión ánodo cátodo en cada grupo.

Como vemos en la figura 18 cuando la tensión de entrada es positiva, conducen los diodos D1 y D2, obteniendo una tensión de salida igual a la de entrada siempre que los diodos sean ideales. Cuando la tensión de entrada es negativa conducen los diodos D3 y D4, con lo que obtenemos a la salida la misma tensión de entrada pero invertida.

El la figura 19 podemos observar gráficamente el resultado de rectificar una señal de onda sinusoidal. Vemos que la parte negativa de la señal sinusoidal pasa a ser positiva, obteniendo así un valor medio de señal mayor que en el caso de un rectificador de media onda, en el que la parte negativa pasa a ser 0.

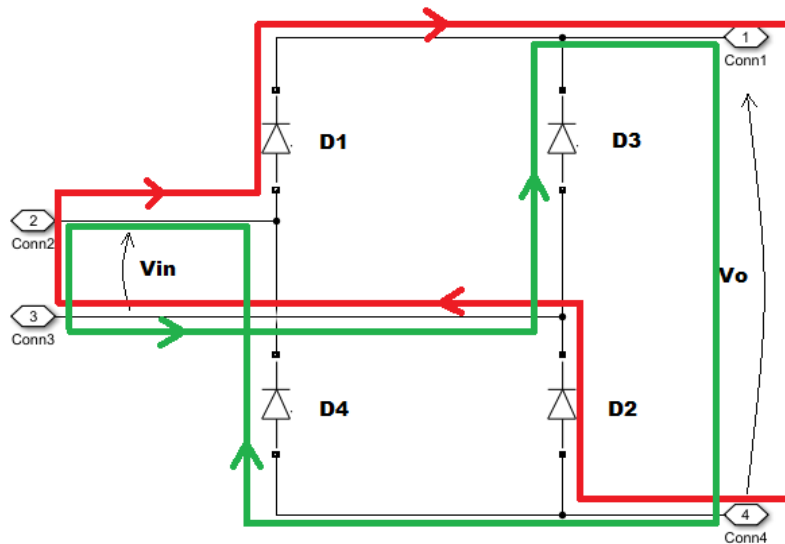


Figura 18. Rectificador. Rojo  $V_{in}$  positiva. Verde  $V_{in}$  negativa.

Uno de los grandes inconvenientes de los rectificadores es su alto contenido armónico. En la práctica los rectificadores se suelen conectar a las cargas mediante condensadores, con dos objetivos. El primero es filtrar la forma de onda de la señal de salida del rectificador para que esta sea continua. En segundo lugar aislamiento entre la fuente y la carga.

El valor de este condensador de acondicionamiento será calculado a partir de las simulaciones, eligiendo el valor en el que se observe menor rizado de la señal de salida.

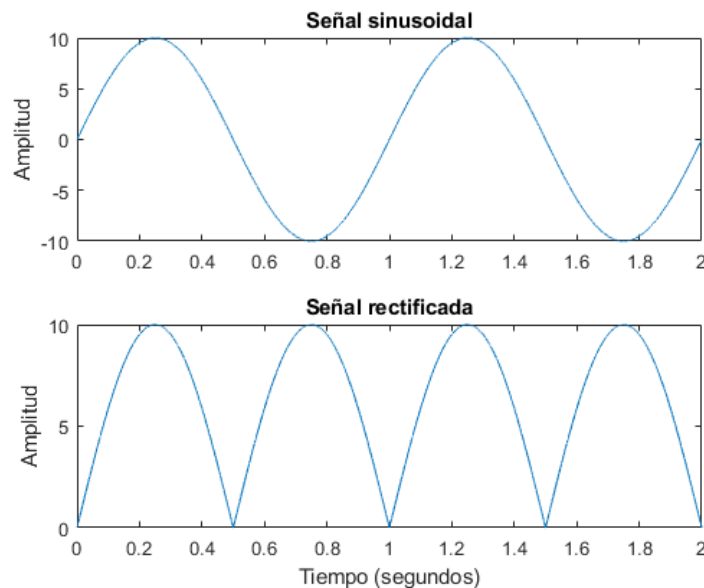


Figura 19. Señal rectificada onda completa.



### 3.4.2 Convertidor DC/DC

Los convertidores DC/DC se utilizan comúnmente en fuentes de alimentación como última etapa antes de la carga. El rectificador junto con el condensador de filtrado proporciona una tensión de salida que, aun estando rectificadas, es necesario adaptar para cumplir los criterios de calidad de la carga. Estos criterios de calidad son el nivel de rizado y la regulación (tensión, impedancia salida). El bloque DC/DC a su vez puede incluir, si es necesario un lazo de realimentación para su control.

Los convertidores DC/DC conmutados, se pueden clasificar en 4 categorías:

- Convertidor reductor
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor en puente completo

Las especificaciones que habrá que tener en cuenta a la hora de elegir un diseño para una fuente de alimentación serán:

- Rango de tensión de entrada
- Tensión de salida (margen de regulación)
- Potencias de salida
- Rizado en la tensión de salida

Puesto que el convertidor a utilizar dependerá de si necesitamos que la tensión a su salida sea mayor o menor que a la entrada (tensión de salida del rectificador), los dos posibles convertidores a utilizar serán:

#### Convertidor reductor

El convertidor reductor produce a su salida una tensión inferior o igual a la de entrada. En la figura 20 podemos ver su topología.

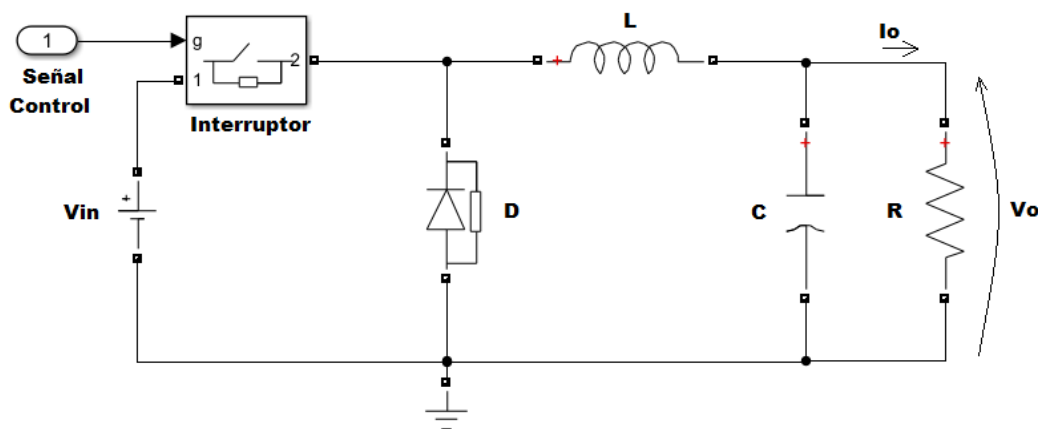


Figura 20. Convertidor Reductor

La tensión de salida viene dada por la siguiente expresión:

$$V_o = D V_{in}$$

### Convertidor elevador

El convertidor elevador produce a su salida una tensión mayor o igual a la de entrada. En la figura 21 podemos ver su topología.

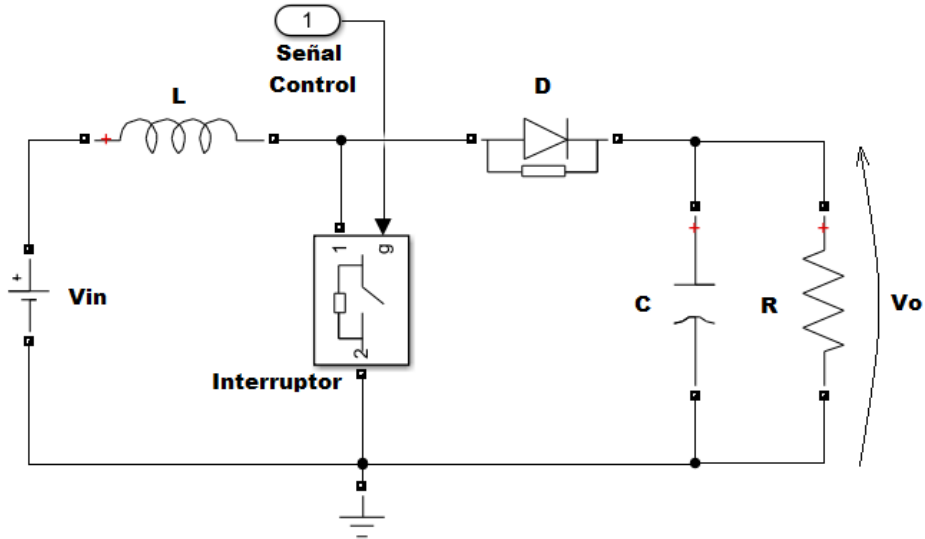


Figura 21. Convertidor Elevador.

La tensión de salida viene dada por la siguiente expresión:

$$V_o = \frac{1}{1 - D} V_{in}$$

La señal de control de los convertidores, será una señal PWM cuyo ciclo de trabajo se calculara dependiendo del nivel de tensión deseado a la salida. En ambos convertidores, la señal de salida depende del valor del ciclo de trabajo de la señal de control (D). Esta señal de control se utiliza para abrir o cerrar el interruptor (transistor). Ante entradas de tensión variables en el tiempo, el ciclo de trabajo se puede ajustar mediante realimentación de la salida.

El filtro paso bajo utilizado en ambas configuraciones sirve para eliminar los armónicos no deseados de la tensión de salida. Los valores para L y C se darán según la frecuencia de resonancia del filtro:

$$f_{pb} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

#### 3.4.3 Carga (Batería o Supercondensador)

Para almacenar la energía obtenida por el sistema, utilizaremos un supercondensador o condensador electroquímico de doble capa. Se ha optado por elegir un supercondensador de la marca Cooper Bussmann PowerStore de la serie PB (figura 22) que ofrece una alta capacidad, una alta densidad de potencia y un voltaje de salida de 5V que es el voltaje comúnmente utilizado en electrónica de consumo para cargar dispositivos. Sus principales características se presentan en la tabla 4.

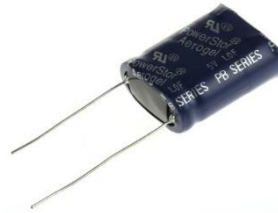


Figura 22. Supercondensador PB-5R0V105-R.

PARÁMETRO	VALOR
VOLTAJE DE TRABAJO	5V
SOBRETENSIÓN	6V
CAPACIDAD	1F
RANGO DE TEMPERATURA DE OPERACIÓN	-25°C a 70°C
RESISTENCIA SERIE EQUIVALENTE	500mΩ
CORRIENTE DE PERDIDAS	12μA

Tabla 4. Principales Características Supercondensador.

### 3.4.4 Modelo Simulink

El circuito utilizado para la obtención de las simulaciones mediante la herramienta Simulink es el mostrado en la figura 23. En rojo tenemos el piezoeléctrico utilizado; en azul el rectificador; en verde en convertor DC/DC; en marrón el supe capacitor.

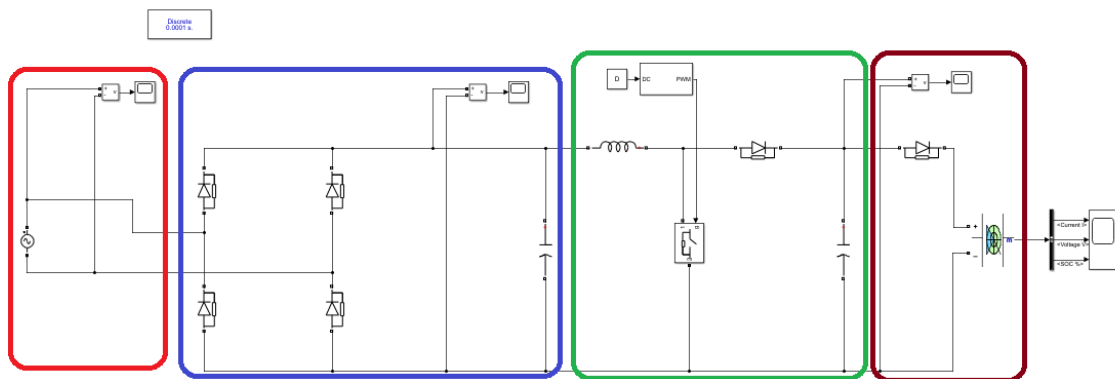


Figura 23. Circuito de energy harvesting.

El piezoeléctrico utilizado, se ha modelado a partir de las ecuaciones del apartado 3.1 como un generador de tensión, en el cual variaremos su amplitud y frecuencia dependiendo de los cálculos obtenidos.

El rectificador de onda completa se modela mediante diodos ideales con un voltaje  $V_f=0$  y los parámetros de resistencia, capacidad e inductancia por defecto del simulador.

El condensador de filtrado se ajusta dependiendo de la salida del rectificador para obtener una señal continua con el menor rizado posible.

El convertor DC/DC se elegirá dependiendo de la necesidad de aumentar o disminuir el voltaje a entregar a la carga. En el caso de la figura 23, se ha modelado un convertor elevador mediante un interruptor ideal que se abre y se cierra mediante una PWM cuyo ciclo de trabajo se calcula a partir del valor de tensión a la entrada del convertidor. Los valores de la bobina y condensador que forman la red de filtrado LC se calculan apoyándose en la simulación.

El supercondensador se modela según los datos de la tabla 4, incluyendo un diodo, para el caso de que se cambie el supercondensador por una batería para impedir el flujo de corriente que descargue la misma.

## 4 Resultados

En el apartado 3 hemos elegido el tipo de material y la configuración a utilizar. Se ha elegido para un primer estudio diseñar el sistema de energy harvesting que obtenga la energía de las vibraciones producidas en el manillar de una bicicleta mediante la configuración en cantiléver como hemos visto en el apartado 3.

Para ver la viabilidad del diseño, nos apoyaremos en simulaciones mediante la herramienta Simulink de Matlab.



Figura 24. Ubicación Acelerómetro para medir las vibraciones.

En primer lugar, hay que calcular las vibraciones a las que se ve sometida la bicicleta cuando circulamos sobre asfalto. Para ello montamos un acelerómetro, en nuestro caso el acelerómetro de un Smartphone, en el manillar de la bicicleta que nos permita obtener la aceleración en el eje Z. En la figura 24 podemos ver el montaje realizado para el cálculo de la aceleración.

Con el montaje de la figura 24 se han realizado pruebas a diferentes velocidades y en diferentes terrenos (asfalto, pista forestal) obteniendo los resultados de la figura 25. (Añadir el resto)

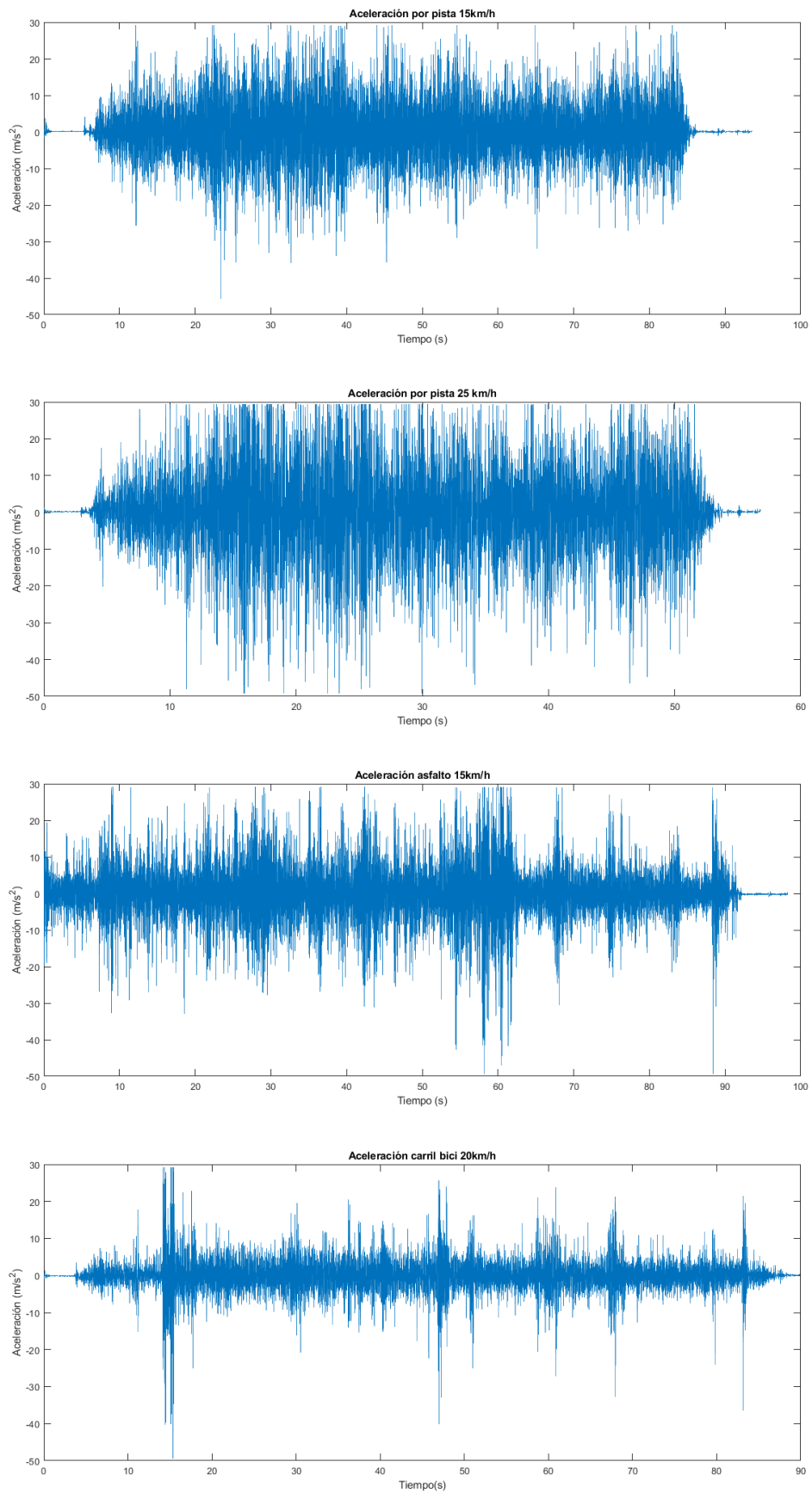


Figura 25. Aceleración medida en el manillar

La aceleración medida por medio del acelerómetro, nos sirve para calcular la fuerza a la que se ve sometida la cerámica piezoeléctrica, que nos servirá como punto de partida para calcular la tensión a la que se ve sometida la cerámica así como el campo eléctrico generado a partir de esta.

Para obtener la frecuencia fundamental a la que está vibrando el manillar de la bicicleta, obtenemos el espectro de la aceleración (figura 26).

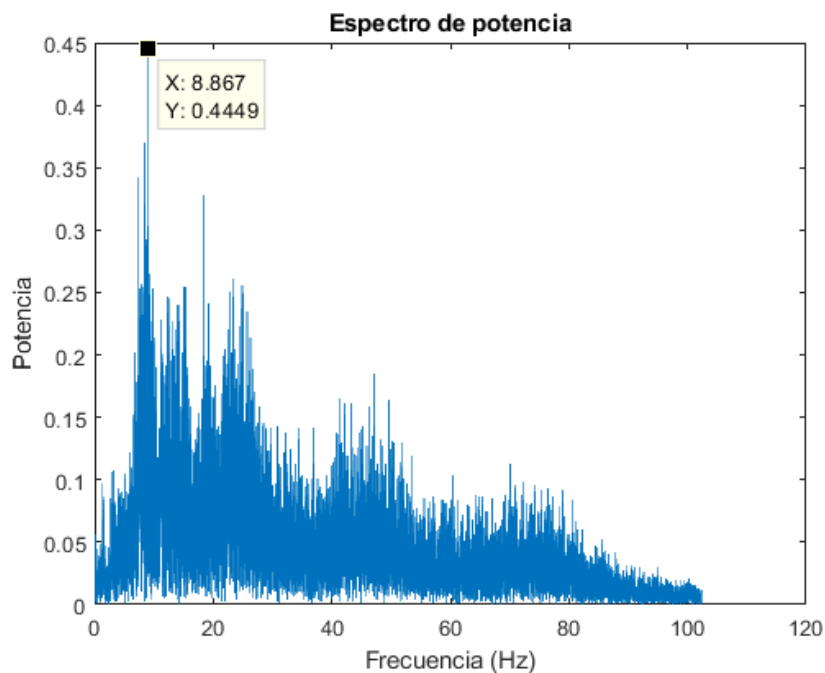


Figura 26. Espectro de la aceleración.

Como se puede observar, el primer pico de la aceleración se encuentra a 8Hz, que se corresponderá con la frecuencia fundamental a la que estará vibrando el conjunto bici-ciclista. Para obtener máxima eficiencia, la frecuencia de resonancia de nuestro piezoeléctrico debería coincidir con esta. En la práctica, esto es imposible puesto que requeriría colocar una masa del orden de las toneladas en el extremo del piezoeléctrico en forma de cantiléver. A la hora de elegir la masa en el cantiléver, se han seguido los datos obtenidos en [16] colocando una masa de 10g.

Las dimensiones de la estructura piezoeléctrica y los materiales piezoeléctricos a utilizar se muestran en las tablas 5 y 6. A la hora de elegir las dimensiones, se ha tenido en cuenta que estas deben ser de un tamaño reducido y que el grosor de la lámina piezoeléctrica debe ser 10 veces menor que el ancho.

Todos los materiales son de similares características, y para el caso que vamos a tratar las diferencias en cuanto al voltaje generado van a ser mínimas.

Constante\Material	APC 850	EC-65	PIC155
$g_{33}$ ( $10^{-3}$ Vm/N)	24.8	25	27
$d_{33}$ ( $10^{-12}$ m/V)	400	380	360
$Y$ ( $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	5.4	5.46	5.07
$K_{33}^T$	1900	1725	1450
$N_T$ (Hz*m)	2040	1778	1990
$f_r$ (MHz)	1	0.889	0.995
$\epsilon_o$ (F/m)	8.85*10 <sup>-12</sup>		
$T_c$ (°C)	360	350	345
$C_o$ (nF) para las dimensiones de la tabla 6	13.45	12.21	10.26
$\tan \delta$ (a 1KHz)	<2%	2%	0.02

Tabla 5. Materiales Piezoeléctricos a usar.

DIMENSIONES	UNIDADES
MASA (M)	10 g
LONGITUD (L)	0.08m
ANCHURA (W)	0.02cm
ESPEJOR (H)	0.002m
ÁREA (A)	1.6e-3m <sup>2</sup>

Tabla 6. Geometría de la cerámica piezoeléctrica.

Siguiendo la metodología desarrollada en el apartado 3.3, calculamos el voltaje generado por la cerámica piezoeléctrica (figura 27), a partir de los datos de presión sobre la cerámica y campo eléctrico generado en ella. Se ha elegido para el cálculo el valor de voltaje generado al circular sobre asfalto ya que los resultados para el resto de terrenos muestran unos valores similares.

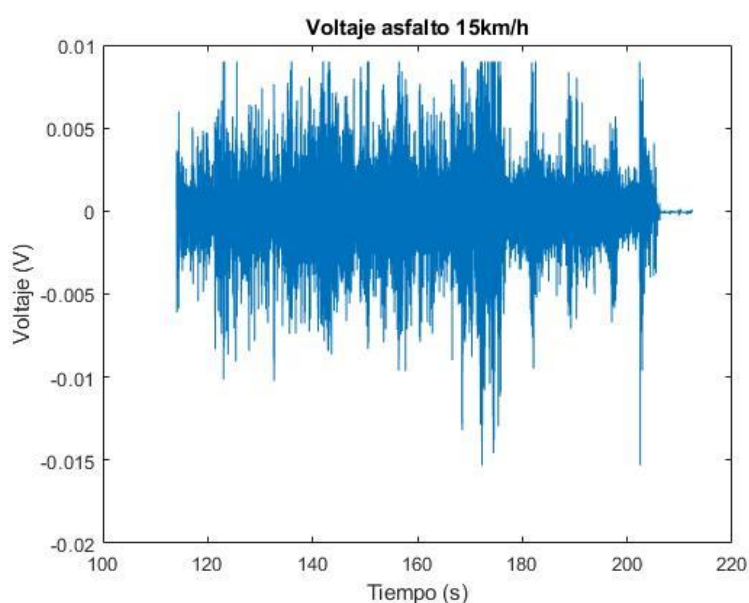


Figura 27. Voltaje generado en el piezoeléctrico.



El voltaje generado, como se aprecia en la figura 27, tiene valores de orden de milivoltios en corriente alterna. El siguiente paso es ver el valor de tensión continua que obtendríamos a la salida del rectificador del circuito de acondicionamiento.

Mediante la herramienta Simulink, se ha diseñado el circuito de acondicionamiento para su simulación. Para este caso en el que el voltaje generado es muy pequeño, se han considerado los diodos del rectificador ideales, para obtener unos resultados que se puedan valorar. La tensión continua obtenida a la salida del rectificador se muestra en la figura 28. Se ha calculado el valor del condensador de filtrado mediante la simulación, obteniendo un valor de  $C=10F$ .

Se observa que el valor a la salida del rectificador esta entre 6 mV y 16 mV un valor muy bajo como para que podamos convertirlo mediante un conversor DC/DC a una tensión que sirva para cargar una batería o supercondensador.

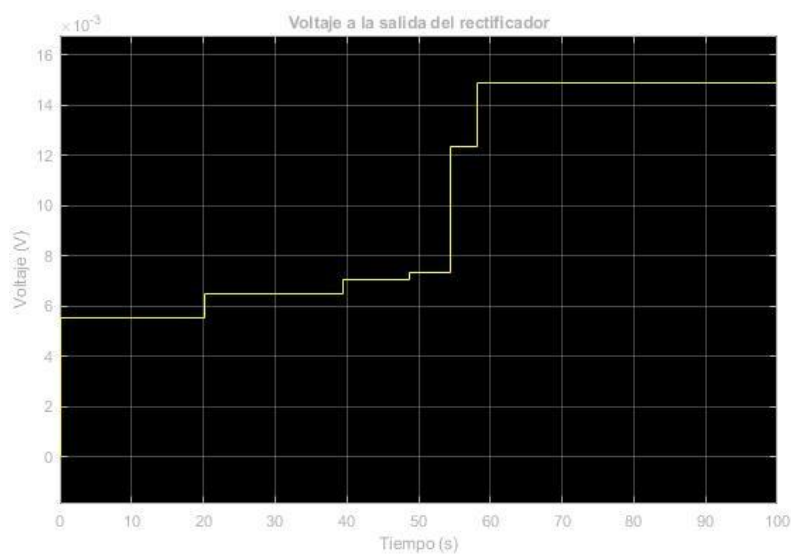


Figura 28. Voltaje a la salida del rectificador.

## 5 Discusiones

Puesto que los resultados obtenidos con esta configuración muestran, que no es una configuración viable para la obtención de energía a partir de las vibraciones, se va a buscar otra configuración que nos permita obtener la energía necesaria. Para ello se busca que emplazamiento en la estructura de la bicicleta producirá más fuerza por unidad de superficie.

Los 3 puntos donde se genera presión por el ciclista son los pedales, el manillar y el sillín de la bicicleta. La rueda trasera soportara del orden del 70 al 75% del peso mientras que la rueda delantera el 25 al 30% [29]. Si suponemos que en un terreno llano, el peso que soporta el manillar es el mismo que la rueda delantera y el que soporta el sillín el que soporta la rueda trasera sin incluir el peso de la bicicleta, podremos calcular la fuerza que se ejerce sobre estos por el ciclista. A partir de estas fuerzas calcularemos igual que para el caso de la configuración en cantiléver el voltaje obtenido gracias el efecto piezoeléctrico directo.

De manera experimental se ha medido mediante un osciloscopio el voltaje generado por un cantiléver piezoeléctrico y un disco de cerámica piezoeléctrica respectivamente, con el objetivo de ver la forma de onda de voltaje generada. En la figura 29 podemos ver los resultados obtenidos para una única presión ejercida sobre la cerámica piezoeléctrica. En ambos casos tenemos una forma de onda similar (invertida en el caso del disco) donde vemos el pico de tensión generado al aplicar la presión y la descarga del condensador al no recibir más presiones o deformaciones, para volver al estado inicial de voltaje nulo.

Si ahora tenemos en cuenta que nuestra fuente de energía va a ser las vibraciones, nos interesa saber la forma de onda del voltaje para unas vibraciones o presión ejercida en la cerámica de manera periódica.

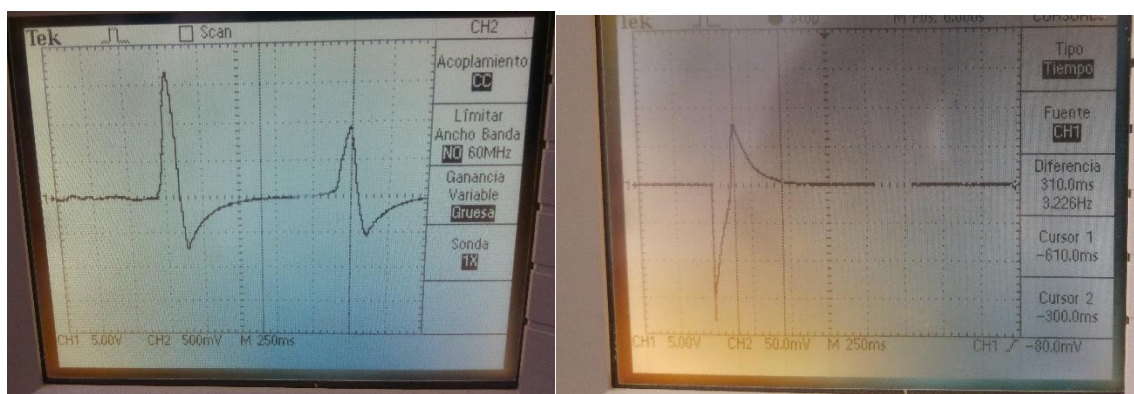


Figura 29. Voltaje generado en una cerámica piezoeléctrica. Izq. configuración cantiléver. Dcha. disco de cerámica.

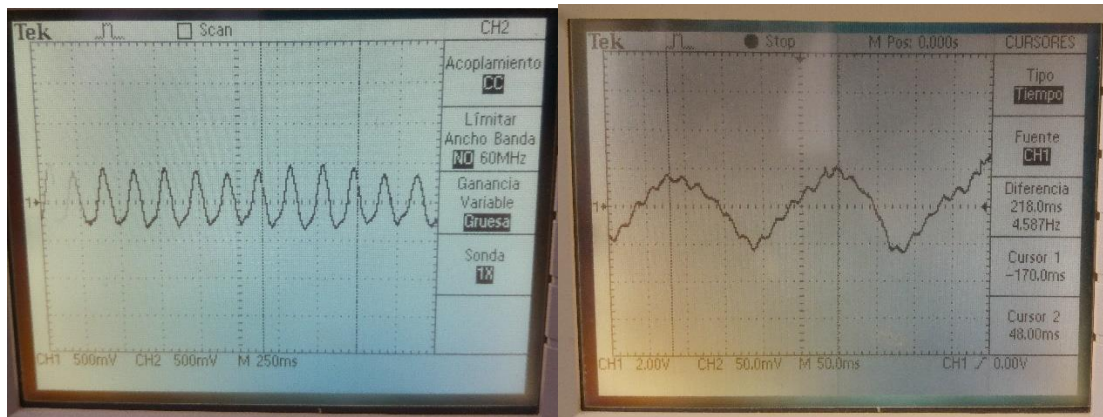


Figura 30. Voltaje generado para vibraciones o presiones periódicas. Izq. Configuración cantiléver. Dcha. Disco de cerámica.

En la figura 30 tenemos el voltaje generado para vibraciones a una frecuencia mayor que el tiempo de carga y descarga del condensador. Como se puede observar la forma de onda se puede aproximar a una señal sinusoidal, que nos ayudara a simplificar los cálculos para la configuración del disco de cerámica.

La fuerza ejercida sobre el manillar y sobre el sillín de la bicicleta para un peso medio del ciclista de 70kg y será respectivamente:

$$F=m \cdot g= 70 \cdot 0.25 \cdot 9.8=171.5 \text{ N, sobre el manillar}$$

$$F=m \cdot g= 70 \cdot 0.75 \cdot 9.8=514.5 \text{ N, sobre el sillín}$$

Con estos datos de la fuerza aplicada obtenidos, calculamos el voltaje que se generaría para una cerámica de las dimensiones de la tabla 7, a partir de los materiales de la tabla 5.

DATOS	VALORES
MASA CICLISTA (M)	70kg
DIAMETRO	0.027m
ESPESOR	5.2e-4m
ÁREA (A)	5.725e-4m

Tabla 6. Datos para el cálculo del voltaje generado en un disco cerámico.

Se observan resultados similares para todos los fabricantes, también como era previsible se genera más voltaje en el sillín puesto que la presión sobre este es mayor que en el manillar.

El voltaje generado en el disco piezoeléctrico para el caso de su colocación en el manillar esta alrededor de los 4 voltios (tabla 7).

El voltaje generado en el disco piezoeléctrico para el caso de su colocación en el sillín esta alrededor de los 12 voltios (tabla 8).

Estos voltajes obtenidos serán los voltajes pico de la tensión generada de manera sinusoidal con frecuencia 8Hz (figura 26) a la que aproximaremos la tensión generada por el piezoeléctrico. En la tabla 7 y en la tabla 8 podemos ver los resultados para el caso de colocar el disco piezoeléctrico en el manillar y sillín respectivamente de: fuerza aplicada; tensión obtenida en el piezoeléctrico; energía generada mecánica, eléctrica y energía total; carga generada.

<b>Resultado\Material</b>	<b>APC 850</b>	<b>EC-65</b>	<b>PIC155</b>
C <sub>0</sub> (nF)	18.51	16.80	14.12
Fuerza (N)	171.5	171.5	171.5
Tensión generada(V)	3.86	3.89	4.20
Energía mecánica (J)	$1.44 \times 10^{-9}$	$6.85 \times 10^{-10}$	$1.53 \times 10^{-9}$
Energía eléctrica (J)	$7.47 \times 10^{-10}$	$3.55 \times 10^{-10}$	$7.30 \times 10^{-10}$
Energía deformación (J)	$3.87 \times 10^{-10}$	$3.83 \times 10^{-10}$	$3.47 \times 10^{-10}$
Energía total (J)	$1.13 \times 10^{-9}$	$7.38 \times 10^{-10}$	$1.07 \times 10^{-9}$
Carga generada (C)	$6.48 \times 10^{-9}$	$4.98 \times 10^{-9}$	$5.51 \times 10^{-9}$

Tabla 7. Resultados para disco piezoeléctrico en manillar.

<b>Resultado\Material</b>	<b>APC 850</b>	<b>EC-65</b>	<b>PIC155</b>
C <sub>0</sub> (nF)	18.51	16.80	14.12
Fuerza (N)	514.5	514.5	514.5
Tensión generada(V)	11.58	11.68	12.61
Energía mecánica (J)	$4.32 \times 10^{-9}$	$2.05 \times 10^{-9}$	$4.60 \times 10^{-9}$
Energía eléctrica (J)	$2.24 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-9}$	$2.19 \times 10^{-9}$
Energía deformación (J)	$1.16 \times 10^{-9}$	$1.15 \times 10^{-9}$	$1.04 \times 10^{-9}$
Energía total (J)	$3.40 \times 10^{-9}$	$2.21 \times 10^{-9}$	$3.23 \times 10^{-9}$
Carga generada (C)	$1.12 \times 10^{-8}$	$8.62 \times 10^{-9}$	$9.55 \times 10^{-9}$

Tabla 8. Resultados para disco piezoeléctrico en sillín.

El voltaje que obtenemos a la salida del rectificador se observa en la figura 31 para el manillar y en la figura 32 para el sillín. Se observa que la tensión de salida se estabiliza a los 0.5 segundos, teniendo un pequeños rizado que se elimina en la siguiente etapa de conversión DC/DC.

Al considerar los diodos del rectificador ideales, la tensión a su salida es aproximadamente igual a la tensión de pico a la entrada, en este caso la del fabricante APC.

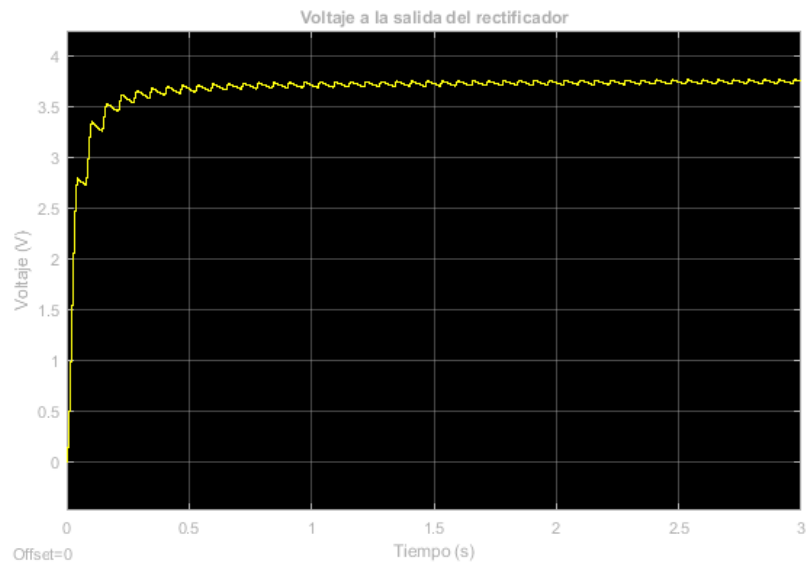


Figura 31. Tensión a la salida del rectificador para un disco cerámico en el manillar.

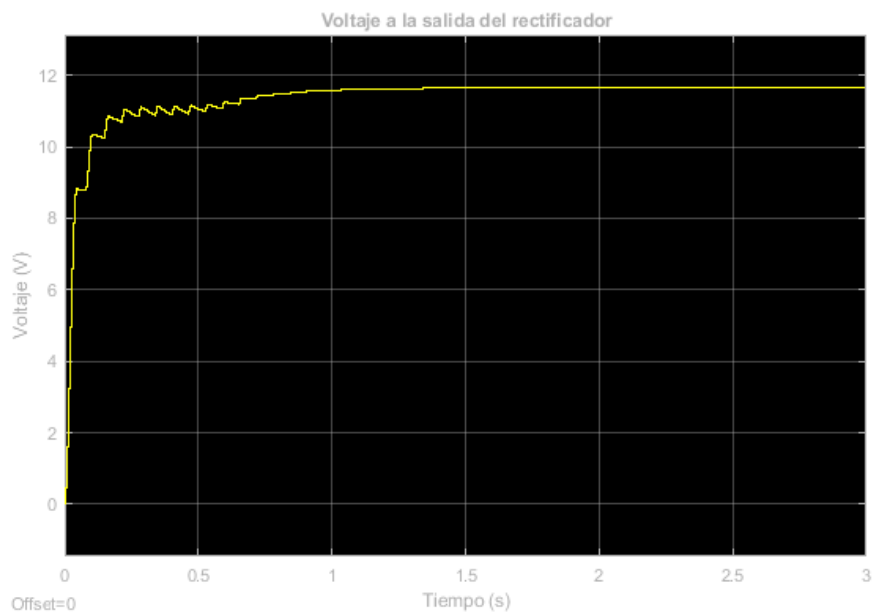


Figura 32. Tensión a la salida del rectificador para un disco cerámico en el sillín.

Esta tensión rectificada, y convertida mediante un convertidor DC/DC sirve para cargar el supercondensador que almacenara la energía de nuestro sistema de energía harvesting. Este supercondensador de 1 faradio y 5V se cargara en un tiempo de unos 2 segundos, teniendo así disponible cada 2 segundos la tensión y corriente necesarias para cargar nuestro dispositivo móvil (Smartphone, Tablet, GPS) o alimentar un foco led si necesitamos de iluminación.

Estos resultados se obtienen para un único disco piezoeléctrico, pero podríamos añadir más discos para aumentar la tensión generada o la corriente generada. Si colocamos otro disco conectado en serie, doblaremos la tensión a la salida del rectificador. Si por el contrario lo colocamos en paralelo, estaremos doblando la corriente. Se podrían colocar tantos discos

piezoeléctricos como sean necesarios dependiendo de la superficie del sillín o del manillar. Un posible montaje sería el de la figura 33 para el caso del sillín y el de la figura 34 para el manillar.



Figura 33. Montaje discos piezoeléctricos manillar.



Figura 34. Montaje discos piezoeléctricos sillín.

En la práctica, a la hora de aumentar la velocidad de carga de una batería, necesitaremos aumentar la corriente que genera el piezoeléctrico. Por lo tanto, los discos piezoeléctricos irán conectados en paralelo manteniendo así la corriente misma corriente que la obtenida para un solo disco piezoeléctrico y doblando la corriente en el caso de los montajes de la figura 33 y 34.

## 6 Conclusiones

Los materiales piezoeléctricos, tienen gran capacidad para ser utilizados en sistemas de cosechamiento de energía, debido a sus características de generar energía bajo vibraciones o deformaciones.

Las aplicaciones con estos materiales están en auge debido al gran número de artículos existentes, lo que demuestra su gran futuro en el campo del energy harvesting.

Se ha podido comprobar que dependiendo del tipo de configuración y propiedades de cada material piezoeléctrico, este será susceptible de ser utilizado para una u otra aplicación. A su vez las dimensiones de la cerámica también influyen en la cantidad de energía recolectada.

Para el caso de una configuración en forma de cantiléver con una cerámica tipo PZT la energía producida no es suficiente para alimentar dispositivos electrónicos.

Para una configuración en forma de disco cerámico, colocado en el sillín o manillar de la bicicleta, se han obtenido unos voltajes suficientes para que una vez acondicionados mediante un rectificador y un convertor DC/DC, se pueda utilizar este sistema para alimentar dispositivos electrónicos.

Este TFG abre una vía para poder implementar físicamente el sistema, realizando un prototipo, que pueda servir para en un futuro intentar comercializar el sistema.

Así mismo, este sistema debido a su manera de aprovechar las vibraciones, es susceptible de ser utilizado en diferentes medios que de igual manera estén sujetos a vibraciones, como una motocicleta ya sea en el manillar o sillín como la bicicleta.

## 7 Pliego de condiciones

### 7.1 Recursos Software

Los Requisitos mínimos de software son:

- Sistema operativo Windows 7
- Matlab 2016
- Microsoft Office 2016
- Aplicación para medir el acelerómetro del movil

### 7.2 Recursos Hardware

Los requisitos mínimos de hardware son los siguientes:

- Ordenador Portátil
- Osciloscopio
- Cerámica piezoeléctrica en forma de disco
- Cerámica piezoeléctrica compañía APC en forma de cantilever
- Bicicleta
- Smartphone con sistema operativo Android



## 8 Presupuesto

El presupuesto de este trabajo se divide en tres apartados, coste del hardware, coste del software y mano de obra.

### 8.1 Coste software

<b>SOFTWARE</b>	<b>PRECIO (EUROS)</b>
WINDOWS 7	165
MATLAB 2016 STUDENT	35
MICROSOFT OFFICE 2016	100
APP- ACELEROMETER	Gratis (Play Store)
<b>TOTAL</b>	<b>300</b>

### 8.2 Coste hardware

<b>HARDWARE</b>	<b>PRECIO (EUROS)</b>
OSCILOSCOPIO	Gratis (Universidad)
ORDENADOR PORTATIL	500
DISCO CERAMICO	0.5 (unidad)
CERAMICA APC	Gratis (Universidad)
BICICLETA	500
SMARTPHONE	300
<b>TOTAL</b>	<b>300</b>

### 8.3 Coste de mano de obra

Para el coste de la mano de obra se ha tenido en cuenta un ingeniero junior recién graduado cobra en torno a 15 euros la hora.

<b>HORAS EMPLEADAS</b>	<b>COSTE POR HORA (EUROS)</b>	<b>TOTAL</b>
480	15	7200

## 8.4 Presupuesto Total

COSTE SOFTWARE	300 EUROS
COSTE HARDWARE	300 EUROS
MANO DE OBRA	7200 EUROS
<b>TOTAL</b>	<b>7800 EUROS</b>

## 9 Bibliografía

- [1] Heung Soo Kim, Joo-Hyong Kim and Jaehwan Kim, "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration."
- [2] A. Erturk y D. J. Inman, Piezoelectric Energy Harvesting. John Wiley & Sons, 2011.
- [3] J. Park, S. Lee, y B. M. Kwak, Design optimization of piezoelectric energy harvester subject to tip excitation, *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 26, n.o 1, pp. 137-143, ene. 2012.
- [4] J. Paulo y P. D. Gaspar, Review and Future Trend of Energy Harvesting Methods for Portable Medical Devices, 2010.
- [5] M. T. Penella y M. Gasulla, A Review of Commercial Energy Harvesters for Autonomous Sensors, en *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007, 2007*, pp. 1-5.
- [6] Arnold, D. (2007) Review of microscale magnetic power generation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43, 3940–3951.
- [7] Mitcheson, P., Miao, P., Start, B., Yeatman, E., Holmes, A., and Green, T. (2004) MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation. *Sensors and Actuators A*, 115, 523–529.
- [8] S. Roundy, P. K. Wright and J. M. Rabaey, Energy scavenging for wireless sensor networks with special focus on vibrations, Kluwer Academic Publishers (2004).
- [9] S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications.
- [10] N. S. Shenck y J. A. Paradiso, Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics, *IEEE Micro*, vol. 21, n.o 3, pp. 30-42, 2001.
- [11] T. Starner y J. A. Paradiso, Human Generated Power for Mobile Electronics, en *Low-Power Electronics Design*, CRC Press, 2004, p. 896.
- [12] R. Riemer y A. Shapiro, Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions, *J. NeuroEngineering Rehabil.*, vol. 8, n.o 1, p. 22, abr. 2011.
- [13] L. Mateu y F. Moll, Energy Harvesting from Passive Human Power. Enero 2004
- [14] Kymissis, J., Kendall, C., Paradiso, J. and Gershenfeld, N., Parasitic power harvesting in shoes, *Second International Symposium on Wearable Computers*, pp. 132-139, 1998.
- [15] Granstrom, J., Feenstra, J., Sodano, H. A. and Farinholt, K., Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 5, pp. 1810-1820, 2007.

- [16] E. Minazara, D. Vasic, y F. Costa, Piezoelectric generator harvesting bike vibrations energy to supply portable devices, 2008.
- [17] Shenck, N. S. and Paradiso, J. A., Energy scavenging with Shoe-mounted piezoelectrics, Micro IEEE, Vol. 21, No. 3, pp. 30-42, 2001.
- [18] S. Priya, D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies. Springer 2009.
- [19] [www.piezo.com](http://www.piezo.com)
- [20] A. Arnau, Piezoelectric Transducers and Applications. Springer 2004.
- [21] <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>
- [22] IEEE Standard on Piezoelectricity 1987 ANSI/ IEEE Standard 176-1987
- [23] <https://www.physikinstrumente.com/en/technology/piezo-technology/fundamentals/>
- [24] S.O. Reza Moheimani and Andrew J. Fleming, Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping. Springer 2006.
- [25] <http://sensortechcanada.com/technical-notes/articles/navy-type-pzt/>
- [26] <http://www.bostonpiezooptics.com/equivalent-ceramic-materials>
- [27] C. Keawboonchuay and T. G. Engel, Electrical Power Generation Characteristics of Piezoelectric Generator Under Quasi-Static and Dynamic Stress Conditions.
- [28] D. Gretarsson. Energy Harvesting using Piezoelectric Generators. February 7, 2007.
- [29] P. Navarro, J. Rui-Wamba, A. Fernández, O. Altisench, C. García, J. Julià y M.A. Rui-Wamba. La ingeniería de la bicicleta. Fundación ESTEYCO. Diciembre 2010.