

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE
UN DISPOSITIVO PORTÁTIL POR RECOLECCIÓN
DE ENERGÍA DE LA PISADA

DESIGN OF A POWER SUPPLY SYSTEM FOR A
WEARABLE BY HARVESTING ENERGY OF THE
TREAD

Autor

Gonzalo Ayerbe Monclús

Director

Roberto Casas Nebra

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019

RESUMEN

En la actualidad, el uso de dispositivos *wearable* que utilizan transductores piezoeléctricos como *Energy Harvesting* para autoalimentarse, evitando así el uso de baterías y su contaminación, se multiplica exponencialmente. Esto se debe a su bajo nivel de consumo de energía y su reducido tamaño. La variedad de formas de recolección de esta energía es muy amplia, pero destacaremos la marcha humana, la energía que se desprende al caminar o correr.

En este trabajo se ha analizado la situación actual, recabando información de la piezoelectricidad y de los piezoeléctricos. Se han comparado numerosos ejemplos de utilización de diferentes piezoeléctricos en diferentes formas de recolección. Se ha tratado de escoger los más eficientes para la aplicación a la marcha humana, dentro de las nuestras posibilidades tanto por precio como por tiempo. Los piezoeléctricos seleccionados se han caracterizado y utilizado para realizar las diferentes mediciones. Se han analizado los circuitos de acondicionamiento que habitualmente se utilizan y se ha elegido el módulo más adecuado para nuestra aplicación. Con los diferentes piezoeléctricos y las posibles configuraciones del módulo de acondicionamiento se han realizado diversas simulaciones y mediciones tratando siempre de maximizar la generación de energía y de optimizar su almacenamiento. Se ha diseñado un prototipo PCB en el que se ha añadido un regulador de tensión para adaptarlo a los dispositivos *wearable* para los que está diseñado. Esta placa no se ha fabricado, pero nos da una idea del prototipo final, su tamaño y su adaptabilidad al calzado convencional.

El resultado final es un conjunto de conclusiones a cerca del circuito y de los componentes que lo integran, que optimizan todo el proceso desde la generación hasta la alimentación, pasando por el almacenamiento.

ÍNDICE

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción | 8 |
| 1.1. | Objetivos y metodología | 9 |
| 1.1.1. | Generales: | 9 |
| 1.1.2. | Específicos: | 9 |
| 1.2. | Contenido de la memoria..... | 10 |
| 2. | Estado del arte | 11 |
| 2.1. | Biomecánica de la marcha humana | 11 |
| 2.2. | <i>Energy Harvesting</i> (Colectores de energía)..... | 13 |
| 2.2.1. | Clasificación de los Energy Harvesting | 13 |
| 2.3. | Piezoelectricidad | 14 |
| 2.3.1. | Material piezoeléctrico | 14 |
| 2.3.2. | Tipos de materiales piezoeléctricos | 15 |
| 2.3.3. | Modelo eléctrico equivalente | 19 |
| 2.4. | Diseño del actuador piezoeléctrico..... | 20 |
| 2.4.1. | Extracción de energía | 24 |
| 3. | Selección de actuadores piezoeléctricos | 25 |
| 3.1. | Introducción | 25 |
| 3.2. | Clasificación de materiales..... | 25 |
| 3.3. | Ejemplos de aplicaciones reales..... | 25 |
| 3.4. | Piezoelectricos tipo címbalo (PCT) | 28 |
| 4. | Circuito de acondicionamiento | 32 |
| 4.1. | Introducción | 32 |
| 4.2. | Partes del circuito acondicionador..... | 33 |
| | Comparación y elección del integrado..... | 33 |
| 4.3. | | 33 |
| 4.3.1. | LTC3588-1..... | 34 |
| 4.3.2. | Simulaciones..... | 36 |
| 4.4. | Cálculos y experimentación | 40 |
| 4.4.1. | Mediciones | 41 |
| 4.4.2. | Predicciones | 49 |
| 4.5. | Diseño del circuito y de la PCB | 49 |
| 5. | Conclusiones..... | 51 |
| 6. | Bibliografía | 53 |
| 7. | Anexos..... | 54 |

ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 18: Fases de la marcha humana. (Sepúlveda Orozco, 2014)..... | 12 |
| Ilustración 19: Curvas de fuerza de reacción del suelo verticales. (izquierda) Miembro inferior derecho; (derecha) Miembro inferior izquierdo. (Sepúlveda Orozco, 2014)..... | 12 |
| Ilustración 1: Diferentes fuentes de energía y sus respectivos transductores para su conversión a energía eléctrica. (Sepúlveda Orozco, 2014)..... | 13 |
| Ilustración 2: Efecto piezoeléctrico directo e inverso. (Sepúlveda Orozco, 2014)..... | 14 |
| Ilustración 3: Estructura cristalina de una cerámica piezoeléctrica antes y después de ser polarizada (Pb: Plomo, O2: Oxígeno, Ti: Titanio, Zr: Circonio). (Gómez Molina, 2018)..... | 17 |
| Ilustración 4: Proceso de polarización: (a) Antes de la polarización los dominios polares se encuentran orientados aleatoriamente. (b) Un gran campo eléctrico DC es aplicado para la polarización. (c) Al quitar el campo eléctrico aplicado la polarización remanente permanece. (Gómez Molina, 2018)..... | 17 |
| Ilustración 5: Comportamiento de un material piezoeléctrico en aplicación como sensor o actuador. (a) Dirección de polarización. (b) Campo eléctrico aplicado con la misma polaridad que el de polarización. (c) Campo eléctrico aplicado con la polaridad opuesta al de polarización. (d) Compresión aplicada en la dirección de polarización. (e) Tracción aplicada en la dirección de polarización. (Gómez Molina, 2018)..... | 18 |
| Ilustración 6: Modelo equivalente. Generador de Tensión. (Gómez Molina, 2018) | 19 |
| Ilustración 7: Modelo equivalente paralelo. Generador de Corriente. (Gómez Molina, 2018).. | 19 |
| Ilustración 8: Dos piezoeléctricos PVDF (polifluoruro de vinilideno) colocados en la suela de un zapato en los puntos de mayor y más variable presión. (Sepúlveda Orozco, 2014) | 20 |
| <i>Ilustración 9: PZT dimorph en el talón, formado por la unión de dos PZT unimorph encima y debajo de un metal y el PVDF en la parte anterior del pie.</i> (Sepúlveda Orozco, 2014) | 20 |
| Ilustración 10: Estructura tipo Cantilever. (Gómez Molina, 2018) | 21 |
| Ilustración 11: Voladizo PZT en forma de S. (Li, Tian, & Deng, 2014) | 21 |
| Ilustración 12: Configuración básica de actuadores tipo luna y cimbalo. (Ochoa, Villegas, & Fernández, 2001)..... | 21 |
| Ilustración 13: Esquema de diafragmas de campo radial (RFD). (Li, Tian, & Deng, 2014) | 22 |
| Ilustración 14: Cosechadora de energía cilíndrica piezoeléctrica. (Li, Tian, & Deng, 2014) | 23 |
| Ilustración 15: Cosechador MEMS (RMEMS) de anillo piezoeléctrico de baja frecuencia: (a) esquema de la estructura en capas del anillo; (b) momentos de torsión de la punta; (c) vista superior. (Li, Tian, & Deng, 2014)..... | 23 |
| Ilustración 16: Estructura tipo pila. (Gómez Molina, 2018) | 23 |
| Ilustración 17: Estructura tipo concha. (Gómez Molina, 2018) | 24 |
| Ilustración 20: Piezoeléctrico diseñado por MOT. (Sepúlveda Orozco, 2014)..... | 27 |
| Ilustración 21: MFC. (Sepúlveda Orozco, 2014) | 27 |
| Ilustración 22: PVDF. (Shenck & Paradiso, 2001)..... | 27 |
| Ilustración 23: PZT dimorfo. (Pérez Lepe, Fernández Lozano, Ochoa Pérez, & Urquiza Cuadros, 2015) | 27 |
| Ilustración 24: Estructura del PCT. (Wu, Chure, Wu, & Tung, 2014)..... | 28 |
| Ilustración 25: PCT comprados para ensayos, diámetros de izquierda a derecha 12mm, 15mm, 20mm, 27mm, 35mm..... | 29 |
| Ilustración 26: PVDF comprados para ensayos..... | 30 |
| Ilustración 27: Etapas sistema Energy Harvesting. (Gómez Molina, 2018)..... | 33 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 28: Aplicación típica del LTC3558-1..... | 35 |
| Ilustración 29: Máquina de estados del funcionamiento del LTC3588-1..... | 35 |
| Ilustración 30: Esquema de la parte de recolección del circuito. | 51 |
| Ilustración 32: LabJack T7-PRO. (labjack)..... | 64 |
| Ilustración 33: Montaje del módulo con el piezo..... | 65 |
| Ilustración 34: Circuito de simulación en LTspice XVII. | 65 |
| Ilustración 35: Capacidad frente a tensión de carga de la batería ML2430. | 65 |

GRÁFICAS

| | |
|--|-----------|
| Gráfica 1: Medidas del DISCO F con LabJack T7-PRO..... | 30 |
| Gráfica 2: Medidas del DISCO F con osciloscopio. | 31 |
| Gráfica 3: Respuesta Z en función de la frecuencia del PCT D35mm más caro. | 32 |
| <i>Gráfica 14: Simulación CIN=10μF con LTspice XVII. El trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en CIN y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida VOUT.</i> | <i>37</i> |
| <i>Gráfica 15: Simulación CIN=100μF con LTspice XVII. El trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en CIN y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida VOUT.</i> | <i>37</i> |
| <i>Gráfica 16: Simulación CIN=10μF, ESR 5ohms con LTspice XVII. El trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en CIN y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida VOUT.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Gráfica 17: Simulación CIN=10μF, ESR 0.9ohms con LTspice XVII. El trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en CIN y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida VOUT.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Gráfica 4: Simulación CIN=10μF y COUT = 100μF con LTspice XVII. El trazado V(n008) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n012) en azul es la tensión que se va acumulando en CIN y V(n014) en rojo es la tensión que se establece a la salida VOUT.....</i> | <i>39</i> |
| Gráfica 18: Medición con CIN=10μF con terminales de conexión y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO. | 42 |
| Gráfica 19: Medición con CIN=330μF con terminales de conexión y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO. | 43 |
| Gráfica 20: Medición con CIN=10μF SMD y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO. | 44 |
| Gráfica 12: Comparativa entre VOUT de los tres CIN probados. | 45 |
| Gráfica 13: Medición con COUT=200mF y PIEZO F, con LabJack T7-PRO..... | 46 |
| Gráfica 22: Medición con COUT=200mF, diodo Schottky y PIEZO F, con LabJack T7-PRO..... | 47 |
| Gráfica 6: Medidas del PCT D15mm con LabJack T7-PRO..... | 56 |
| Gráfica 7: Medidas del PCT D20mm con LabJack T7-PRO..... | 56 |
| Gráfica 8: Medidas del PCT D27mm con LabJack T7-PRO..... | 57 |
| Gráfica 9: Medidas del PCT D35mm con LabJack T7-PRO..... | 57 |
| Gráfica 10: Medidas del PVDF pequeño con LabJack T7-PRO..... | 58 |
| Gráfica 11: Medidas del PVDF grande con LabJack T7-PRO..... | 58 |
| Gráfica 12: Medidas del PCT D27mm con osciloscopio. | 59 |
| Gráfica 13: Medidas del PTC D35mm más caro conectado al circuito, con LabJack T7-PRO. | 59 |
| Gráfica 23: Medición con CIN=10μF con terminales de conexión, Batería y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Gráfica 24: Medición con CIN=10 μ F SMD, Batería y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO. | 61 |
| Gráfica 25: Medición con CIN=100 μ F SMD, Batería y PCT D35mm más caro, con LabJack T7- PRO..... | 62 |
| Gráfica 26: Medición con CIN=1 μ F SMD, Batería y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO. | 63 |

TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Características de los actuadores. (Li, Tian, & Deng, 2014) | 8 |
| Tabla 2: Propiedades para cerámicas piezoeléctricas seleccionadas, monocristales, compuestos de polímero PZT y polímeros. (Li, Tian, & Deng, 2014)..... | 16 |
| Tabla 3: Frecuencia y aceleración de diversas fuentes de vibración. (Li, Tian, & Deng, 2014)... | 24 |
| <i>Tabla 4: Comparativa de aplicaciones reales de piezoeléctricos.</i> | 26 |
| Tabla 5: Piezoeléctricos PZT seleccionados..... | 29 |
| Tabla 6: Piezoeléctricos PVDF seleccionados..... | 30 |
| Tabla 6: Respuesta (Z, θ) en función de la frecuencia del PCT D35mm más caro. | 31 |
| Tabla 6: Respuesta (Cp, Rp) en función de la frecuencia del DISCO F..... | 32 |
| Tabla 7: Comparativa entre integrados para circuito de acondicionamiento. | 33 |
| Tabla 8: Simulaciones que vamos a realizar variando CIN y COUT..... | 36 |
| Tabla 11: Resumen de los resultados de las simulaciones..... | 40 |
| Tabla 9: Mediciones que vamos a realizar variando CIN y COUT | 41 |
| Tabla 10: Mediciones que vamos a realizar con la batería ML2430 variando CIN..... | 47 |
| Tabla 11: Comparación de tensión almacenada con los diferentes CIN medidos. | 48 |
| Tabla 12: Tensiones medias de las diferentes combinaciones de los piezoeléctricos..... | 49 |
| Tabla 13: Resumen de predicciones para un piezo..... | 49 |
| Tabla 14: Resumen de predicciones para dos piezoeléctricos en serie..... | 49 |
| Tabla 16: Componentes del esquemático del Anexo V..... | 50 |
| Tabla 15: Características de piezoeléctricos seleccionados..... | 55 |
| Tabla 16: Componentes utilizados. | 55 |
| Tabla 15: Recolectores de energía piezoeléctrica. (Li, Tian, & Deng, 2014) | 64 |

GLOSARIO DE TÉRMINOS

| | |
|------------|---|
| °C | Grado centígrado |
| ϵ | Constante dieléctrica |
| Θ | Ángulo tita |
| Ω | Ohmio |
| A | Amperios |
| AC | Alterna |
| AlN | Nitruro de aluminio |
| C | Condensador |
| CC | Corriente continua |
| D | Constante de tensión piezoeléctrica |
| D | Diámetro |
| DC | Continua |
| DCR | Resistencia en continua del inductor |
| E/S | Entradas y salidas |
| ESR | Resistencia serie equivalente del condensador |
| F | Faradios |
| G | Constante de tensión piezoeléctrica |
| H | Henrios |
| Hz | Hercio |
| J | Julio |
| K | Factor de acoplamiento electromecánico |
| K | Kilo |
| L | Inductancia |
| LDO | Regulador de baja caída |
| M | Metro |
| MFC | Macro compuesto de fibra |
| MOT | Método de optimización topológica |
| MPPT | Seguidor de Punto de Máxima Potencia |
| N | Newton |
| PCB | Placa de circuito impreso |
| PCT | Transductor piezoeléctrico tipo címbalo |
| PIC155 | Titanato de zirconato de plomo modificado |
| PMN-PT | Niobato de plomo y titanato de plomo |
| PVDF | Polímero polifluoruro de vinilideno |
| PZT | Titanato de plomo y zirconato |
| Q | Factor de calidad mecánica |
| R | Resistencia |
| RFD | Diafragmas de campo radial |
| s | Segundo |
| SMD | Dispositivo de montaje en superficie |
| T | tiempo |
| TFG | Trabajo fin de grado |
| T_g | Temperatura de transición vítrea |
| V | Tensión en voltios |
| w | Vatio |
| W | Trabajo/Energía |
| Z | Impedancia |

1. Introducción

El mundo pasa por un momento crítico en cuanto a **generación de energía**, muchos investigadores estudian fuentes alternativas y sistemas para aprovecharla del ambiente. Cada vez se construyen más dispositivos que usan la energía eléctrica y se requieren nuevas fuentes de potencia. Unida a esta problemática, se encuentran las **dificultades ambientales** por el ritmo al que se generan desperdicios electrónicos contaminantes como las baterías. (Sepúlveda Orozco, 2014)

En algunas aplicaciones, como los sensores desplegados en lugares remotos o dentro del cuerpo humano, el reemplazo de la batería al final de su vida útil puede ser desafiante o incluso poco práctico. Por lo tanto, surge la necesidad de **recolectar energía ambiental** para alimentar los dispositivos electrónicos en estas situaciones. Los ejemplos de fuentes de energía ambiental incluyen el viento, la energía solar, la vibración mecánica y el movimiento del cuerpo humano. Para dispositivos electrónicos pequeños, el nivel de consumo de energía generalmente se encuentra en el rango de mW o μ W y el tamaño de la unidad de alimentación debe ser pequeño para acompañar al dispositivo *host* o anfitrión. Además, la mayoría de estas aplicaciones requieren que el dispositivo pueda funcionar tanto en interiores como en exteriores, sin una gran dependencia de las condiciones climáticas. En este sentido, la vibración mecánica y el **movimiento del cuerpo humano** se convierten en opciones atractivas de fuente de energía para pequeños dispositivos electrónicos. (Li, Tian, & Deng, 2014)

Una posible alternativa para abordar estos problemas son los **Energy Harvesting (Colectores de energía)**, diseñados para tomar cualquier tipo de energía del ambiente usualmente desperdiciada y convertirla en energía eléctrica.

Se propone el uso de los **Energy Harvesting** específicamente en la aplicación del calzado, sacando provecho de la **energía que el ser humano desperdicia al caminar**. (Sepúlveda Orozco, 2014)

Según (Ochoa, Villegas, & Fernández, 2001) la necesidad de dispositivos más precisos en campos como la óptica, robótica, microcirugía y la demanda de motores cada vez más pequeños han renovado el enfoque en el diseño de **transductores de desplazamiento**, clasificándolos en dos grupos principales:

- Los **convencionales**: cilindros de presión de aceite, motores servo o “paso a paso” y bobinas de altavoz. Generan desplazamientos grandes, baja precisión en posicionamiento y tiempos de respuesta grandes.
- Los **transductores (actuadores)**: efecto de memoria de forma, magnetostrictivos y **piezoeléctricos**. (Ochoa, Villegas, & Fernández, 2001)

| | Piezoeléctrico | Magnetostrictivo | Memoria de Forma |
|---|-----------------|------------------|------------------|
| Clase Ferroica | Ferroelectrico | Ferromagnético | Ferroeelástico |
| Fuerza de conmutación | Campo Eléctrico | Campo Magnético | Tensión Térmica |
| Deformación | 0.1% (2) | 0.1-0.2% (3) | 7-10% (4) |
| Velocidad de respuesta | μ s | μ s | s |
| Fuerza Generatriz (por cm²) | 3500 | 3500 | 20000 |
| Eficiencia | 50% | 80-90% | 3% |
| Ejemplo | PZT | Terfenol | Nitinol |

Tabla 1: Características de los actuadores. (Li, Tian, & Deng, 2014)

En comparación con los métodos electromagnéticos y electrostáticos, la recolección de energía con materiales piezoeléctricos proporciona una **mayor densidad de energía y una mayor flexibilidad** para integrarse en un sistema, por lo que ha sido el más ampliamente estudiado. (Li, Tian, & Deng, 2014)

El interés actual en actuadores piezoeléctricos está provocado por el reciente desarrollo de **materiales cerámicos** con prestaciones avanzadas. Los materiales piezoeléctricos transforman energía eléctrica en energía mecánica o acústica y viceversa. Cuando se aplica un campo eléctrico paralelamente a la dirección de polarización del material se produce una dilatación en la dirección longitudinal acompañada de una contracción en la dirección transversal. Los objetivos del presente TFG se desarrollan a continuación.

1.1. Objetivos y metodología

1.1.1. Generales:

Diseñar y desarrollar un prototipo funcional lo más eficiente posible a partir de dispositivos de recolección de energía y componentes electrónicos ya existentes.

1.1.2. Específicos:

- Diseñar o seleccionar el transductor más eficiente que se ajuste a nuestro objetivo.
- Estudiar la colocación de dicho transductor en la zona del calzado de mayor generación de energía.
- Diseñar el circuito de acondicionamiento para obtener las menores pérdidas posibles.
- Diseñar el almacenamiento de energía obtenida minimizando pérdidas.
- Elaborar un prototipo de laboratorio de acuerdo con el diseño para realizar pruebas y verificar su funcionamiento.

Para alcanzar estos objetivos se han seguido las siguientes pautas:

- **Búsqueda de información**, en la primera fase realizamos una búsqueda intensiva de información acerca del estado del arte. Comenzamos analizando el fenómeno de la piezoelectricidad y los *Energy Harvesting*, los materiales que los componen y las diferentes formas y configuraciones de piezoeléctricos existentes. Además, analizamos la biomecánica de la marcha humana para conocer como colocar estos transductores de la forma más eficiente posible. Estudiamos como se están aplicando estos piezoeléctricos, sus características y las respuestas que nos proporcionan para decidir cuáles son más adecuados para nuestra aplicación. Una vez tenemos una visión general de la situación hacemos hincapié en aquellos que nos van a resultar más útiles.
- **Diseño del circuito electrónico**, el circuito de acondicionamiento será muy importante para la eficiencia del dispositivo. Hacemos un estudio de los integrados que se están utilizando para propósitos similares, sus diferentes ventajas e inconvenientes y seleccionamos el más adecuado para nuestra aplicación. También hacemos una primera selección de los componentes que acompañarán al integrado, que luego en función de las pruebas realizadas se ajustarán sus características. Además, buscamos una aplicación para simular el funcionamiento del integrado y poder comparar con los resultados obtenidos en el laboratorio. Diseñamos el esquemático con los componentes necesarios para poder analizar que componentes vamos a tener que probar en el laboratorio y decidir los que mejor se ajustan a nuestra aplicación.

- **Simulaciones y mediciones**, realizamos tanto simulaciones como mediciones con los distintos componentes para ajustar a nuestro circuito los que mejores prestaciones presenten. Comparamos los resultados de simulaciones y mediciones y tomamos las decisiones para obtener el esquemático definitivo. Además, realizamos mediciones con el prototipo final para obtener resultados orientativos de lo que obtendríamos si construyéramos un prototipo para colocarlo en el calzado y lo utilizaríamos durante largos periodos de tiempo.
- **Diseño de la PCB**, diseñamos tanto el esquemático como la PCB del dispositivo para hacernos una idea de las dimensiones y ver si es factible su integración de manera cómoda a su aplicación final.
- **Redacción de la documentación**, a lo largo de todo el trabajo vamos analizando y adaptando la información a la memoria final. Una vez finalizado el trabajo de laboratorio analizamos y añadimos todos los resultados obtenidos para la correcta elaboración del documento.

1.2. Contenido de la memoria

A modo de documentación del TFG se ha redactado la siguiente memoria donde se presenta el trabajo realizado. La memoria se ha estructurado de la siguiente manera:

- **Introducción**: Se realiza una ubicación del punto y la situación de la que se parte para la realización de este TFG. Además, se presentan los objetivos generales y específicos a alcanzar y el procedimiento que se ha seguido para lograrlos.
- **Estado del arte**: Se analiza el modo en el que caminamos las personas centrándonos en la pisada, para adaptar nuestra tecnología de una forma óptima. Se realiza un análisis de los sistemas de *Energy Harvesting* y una clasificación de los mismos según sus tipos, con especial interés en los que vamos a utilizar. Se estudia el fenómeno de la piezoelectricidad, haciendo hincapié en los diferentes materiales que poseen estas propiedades. Destacamos las cerámicas piezoeléctricas por su buena adaptación de sus propiedades a nuestra aplicación. También analizamos la dependencia de sus propiedades con la frecuencia ya que será capital en nuestra aplicación. Además, analizamos las diferentes formas y configuraciones de los piezoeléctricos existente
- **Selección de actuadores piezoeléctricos**: Comparamos diferentes aplicaciones que se han realizado con diferentes configuraciones de piezoeléctricos para extraer información de las respuestas que estos proporcionan y poder seleccionar el que mejor se adapte a nuestras necesidades. Nos decantamos por el tipo disco o címbalo y realizamos mediciones con diferentes configuraciones.
- **Circuito de acondicionamiento**: Realizamos una comparativa entre los integrados utilizados para este tipo de aplicaciones y seleccionamos el LTC3588-1 porque es el que mejor se adapta a nuestra aplicación. Realizamos una breve explicación de su funcionamiento. Utilizamos un módulo de este integrado para tomar medidas en el laboratorio. También una aplicación de este módulo para simular los resultados y compararlos con las mediciones del laboratorio. Con los resultados obtenidos realizamos ciertas predicciones de lo que se podría obtener si se realizara un prototipo adaptable al calzado.

- **Diseño del circuito y de la PCB:** Diseñamos el esquemático definitivo en base a los resultados de las simulaciones y mediciones, y explicamos su funcionamiento. También diseñamos la PCB para analizar en función de su tamaño las posibilidades de una adaptación al calzado.
- **Conclusiones:** Analizamos los resultados obtenidos a partir de los objetivos planteados inicialmente. Proponemos algunas posibles líneas futuras para continuar con el trabajo con objetivo de mejorarlo y complementarlo.
- **Anexo I. Información acerca de los piezoeléctricos comprados y otros componentes:** Resumen de los piezoeléctricos que se han estudiado con la información de la página web de los que se obtuvieron. También información de los diferentes componentes con los que se ha trabajado y los que conforman el circuito definitivo.
- **Anexo II. Gráficas:** Diferentes gráficas de mediciones que se han realizado, que han servido para obtener conclusiones y que no se encuentran en la memoria por no ser las más relevantes.
- **Anexo III. Ilustraciones y Tablas:** Varias ilustraciones y tablas que complementan la información de la memoria.
- **Anexo IV. Esquemático del módulo del LTC3588-1:** Plano esquemático del módulo que utilizamos en el laboratorio del LTC3588-1 para la comprensión de su composición y funcionamiento.
- **Anexo V. Planos del esquemático y la PCB:** Planos del esquemático y la PCB que se han realizado tras todas las conclusiones obtenidas en el laboratorio.
- **Anexo VI. Datasheet LTC3588-1:** Hoja de datos completa del integrado que utilizamos para complementar la información del apartado de circuito de acondicionamiento en el que se explica su funcionamiento.
- **Anexo VII. Datasheet batería ML2430:** Hoja de datos de la batería que utilizamos para la comprensión de su funcionamiento y sus características.

2. Estado del arte

Este apartado continúa con la introducción y comienza con un breve estudio sobre nuestra forma de caminar. Se analizan los Energy Harvesting y se realiza una clasificación de estos en función de sus propiedades. A continuación se introduce el fenómeno de la pizeoelectricidad, comenzando por un resumen histórico desde los primeros descubrimientos sobre ésta, seguido de una explicación acerca de su comportamiento. También se estudiarán los materiales piezoeléctricos más relevantes haciendo hincapié en las cerámicas, de las que estudiaremos los modelos equivalentes que presentan habitualmente y las aplicaciones más típicas en las que suelen integrarse. Presentaremos las principales formas y configuraciones que se utilizan, poniendo especial interés en las de tipo disco o címbalo. Por último, tendremos en cuenta la dependencia de estas con la frecuencia, ya que nos afectará en nuestra aplicación.

2.1. Biomecánica de la marcha humana

Según (Sepúlveda Orozco, 2014), se analiza una persona normal, sin ninguna patología. Tendremos en cuenta la distribución de las **presiones plantares**, las fuerzas de reacción del suelo y la frecuencia con la que ocurre o número de pasos en determinado tiempo. Con esto se decidirá la **ubicación** de los captadores o *Energy Harvesting*.

La marcha humana es un proceso cíclico que comienza con el contacto del talón del miembro inferior derecho, en este caso, y termina cuando el talón derecho vuelve experimentar otro contacto.

Existen dos fases para cada miembro, la de apoyo y la de oscilación, y una sucesión de apoyos bipodales y monopodales, como se muestra en la .

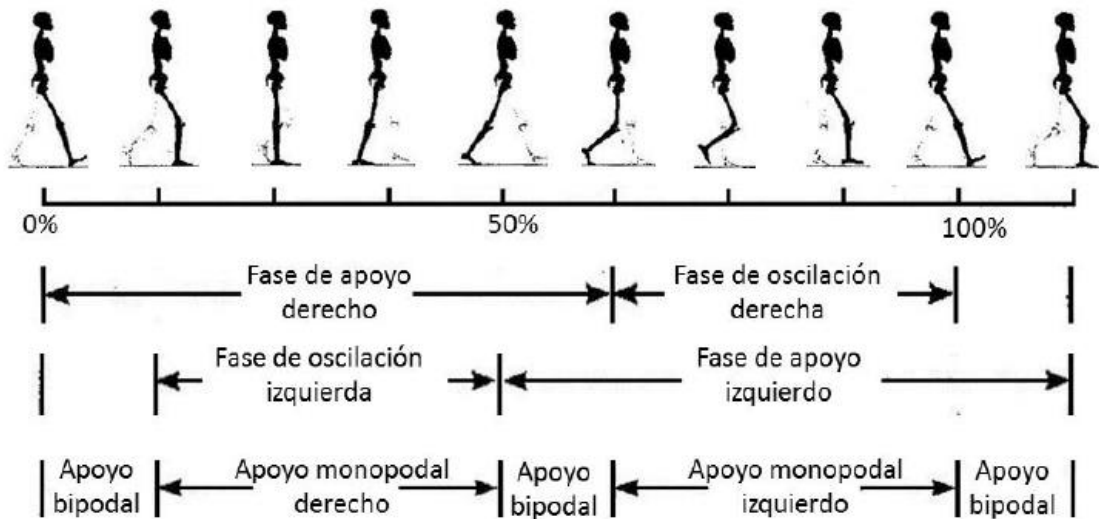


Ilustración 1: Fases de la marcha humana. (Sepúlveda Orozco, 2014)

Extrayendo información de varios estudios sobre las fuerzas de reacción del suelo en dirección vertical se obtienen las siguientes gráficas, muy similares para ambos pies ya que el movimiento es repetitivo, donde el primer pico corresponde al contacto del talón y el segundo al momento en el que se está apoyando sobre la punta.

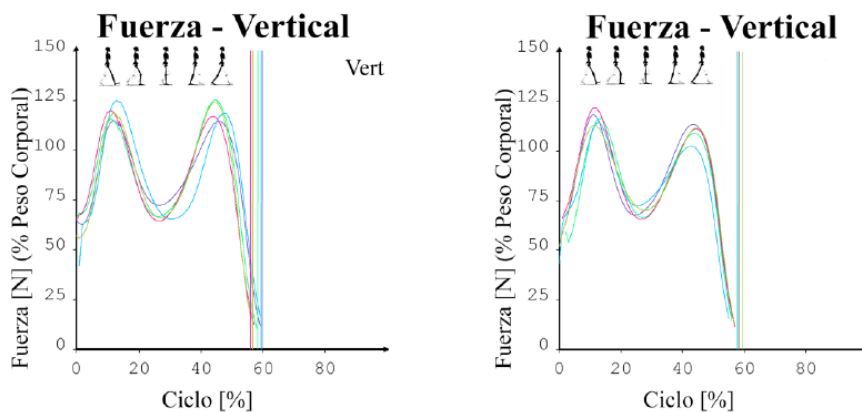


Ilustración 2: Curvas de fuerza de reacción del suelo verticales. (izquierda) Miembro inferior derecho; (derecha) Miembro inferior izquierdo. (Sepúlveda Orozco, 2014)

(eje X, porcentaje del ciclo de la marcha; eje Y, fuerza de reacción del suelo en N)

En general, el primer pico de la curva es ligeramente mayor que el segundo, lo que indica que en el **talón** se genera una fuerza de magnitud superior, además generalmente en este punto la

suela tiene un espesor mayor, lo cual es apropiado para la inserción del dispositivo recolector de energía.

2.2. Energy Harvesting (Colectores de energía)

Sistemas encargados de la recuperación, la reutilización y el aprovechamiento de energía del ambiente que usualmente se desperdicia, también conocidos como *Energy Scavenging*. El principal objetivo de esta tecnología es proveer una **fuentes remota de energía eléctrica** y/o la recarga de dispositivos de almacenamiento, alcanzando un impacto ecológico importante al reducir los residuos químicos de sustituir los dispositivos de almacenamiento tradicionales.

La evolución tecnológica en los últimos veinte años ha llevado a la construcción de un sinnúmero de dispositivos electrónicos, cuyo tamaño y consumo se han ido reduciendo en gran escala. Las investigaciones y las aplicaciones sobre los *Energy Harvesting* se han potencializado y los dispositivos se han hecho cada vez más portables. (Sepúlveda Orozco, 2014)

2.2.1. Clasificación de los Energy Harvesting

Según (Sepúlveda Orozco, 2014) los *Energy Harvesting* pueden clasificarse en función del **tipo de energía que utilizan**, y para cada uno se utiliza un transductor apropiado. Estos grupos son:

- Mecánicos
- Magnéticos
- Radiantes
- Térmicos
- Bioquímicos

De los cuales destacamos los **mecánicos**, que pueden usar:

- Presión
- Cinética
- Vibraciones
- Actividades humanas

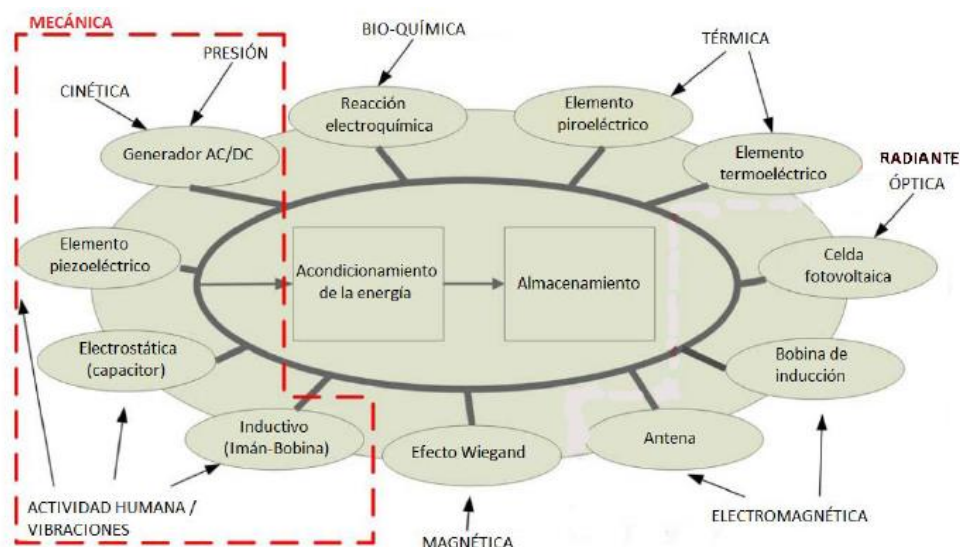


Ilustración 3: Diferentes fuentes de energía y sus respectivos transductores para su conversión a energía eléctrica. (Sepúlveda Orozco, 2014)

2.3. Piezoelectricidad

La palabra **piezo** significa presionar. En 1880 los hermanos Pierre y Jacques Curie descubrieron que ciertos materiales, como el cuarzo o la turmalina, sufrían una pequeña polarización si se sometían a esfuerzos mecánicos o presiones, desarrollando superficies cargadas eléctricamente, a lo que se denominó **efecto piezo**, a la electricidad producida piezoelectricidad, y a estos **materiales piezoeléctricos**. Un año después Gabriel Lippmann predijo lo que se denominó **efecto piezo inverso**, sometiendo un piezoeléctrico a una carga eléctrica se generaban deformaciones mecánicas en este.

En 1917 se utilizó el eco ultrasónico para detectar objetos bajo el agua, el piezoeléctrico emitía y recibía ondas de baja frecuencia. Se utilizó en submarinos y para micrófonos, audífonos, grabar sonido, medida de vibraciones, fuerzas y aceleraciones.

En 1944 se desarrollaron los primeros piezoeléctricos sintéticos, piezocerámicas.

En 1969 se aprovecha la flexibilidad del polímero polifluoruro de vinilideno (PVDF), con un gran efecto piezoeléctrico. Hoy en día se utilizan para el control de vibraciones, aeronáutica, estructuras flexibles, sensores robóticos y prototipos de *Energy Harvesting* entre otros muchos. (Sepúlveda Orozco, 2014)

2.3.1. Material piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos poseen **estructuras cristalinas** en las que los centros de las cargas positivas y negativas no se superponen, lo que produce **momentos dipolares**. Cuando se somete a vibraciones o movimientos mecánicos, se aplica una tensión mecánica a estos materiales y provoca la distorsión de los dipolos, creando una **carga eléctrica**. (Li, Tian, & Deng, 2014)

Según (Sepúlveda Orozco, 2014) presentan:

- El **efecto directo**, polarización eléctrica al sufrir una deformación mecánica, actuando como sensor.
- El **efecto inverso**, deformación mecánica al aplicarle una carga eléctrica, comportándose como actuador.

Estos efectos son comunes a los cristales ferroeléctricos, denominación por la analogía con los materiales ferromagnéticos ya que presentan una polarización eléctrica espontánea y un efecto de histéresis entre el desplazamiento dieléctrico y el campo eléctrico. A temperaturas superiores a las de Curie se pierden las propiedades piezoeléctricas.

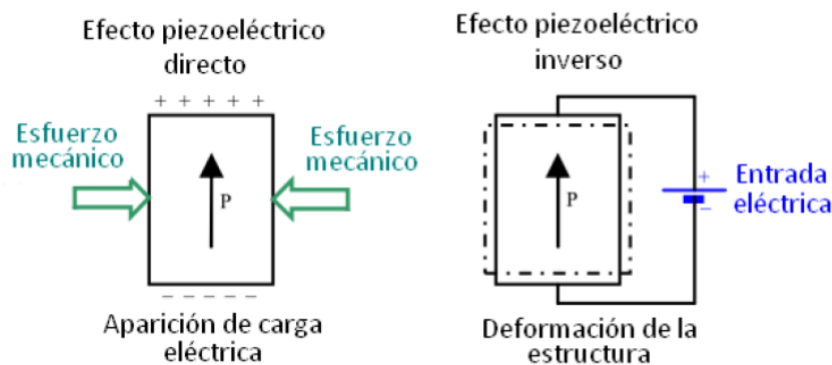


Ilustración 4: Efecto piezoeléctrico directo e inverso. (Sepúlveda Orozco, 2014)

2.3.2. Tipos de materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos se dividen en **cuatro categorías** según sus características de estructura:

- Cerámicas.
- Monocristales (naturales o sintéticos).
- Polímeros.
- Compuestos (el material compuesto es una combinación de cerámicas piezoeléctricas o monocristales con polímeros). La mayoría de las cerámicas piezoeléctricas y los cristales individuales utilizados hasta la fecha para la recolección de energía son un subgrupo de piezoeléctricos llamados "ferroeléctricos" (PZT; titanato de plomo y zirconato, y PMN-PT; la solución sólida de niobato de plomo y titanato de plomo).

Por debajo de una temperatura crítica llamada **temperatura de Curie**, estos materiales poseen dipolos espontáneos, que otorgan excelentes propiedades piezoeléctricas. Por lo tanto, los monocristales, cerámicos y compuestos ferroeléctricos tienen propiedades piezoeléctricas mucho mejores que los polímeros. (Li, Tian, & Deng, 2014)

Materiales Naturales

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

Sus propiedades casi no varían con el paso de tiempo, pero las señales eléctricas que producen son muy pequeñas. Destacan el cuarzo, la turmalina y la sal de Rochelle. (Gómez Molina, 2018)

Materiales Ferroeléctricos y Cerámicas

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

Las cerámicas policristalinas están compuestas por numerosos cristales ferroeléctricos. Son útiles para aplicaciones en las que se requiere materiales con alta densidad de energía.

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, el rango de frecuencia, el rango de amplitud de la fuerza externa que se le puede aplicar y el tiempo de vida. (Gómez Molina, 2018)

Polímeros Piezoeléctricos (PVDF)

Los polímeros son materiales a base de carbono compuestos de largas cadenas de polímeros que tienen muchas unidades estructurales repetidas llamadas "monómeros". Estos materiales son mucho **más flexibles** que la cerámica y los cristales individuales. En algunas aplicaciones, para lograr ciertas propiedades que ninguno de estos tres grupos de materiales puede proporcionar por sí mismos, estos materiales se pueden combinar para formar materiales compuestos. (Li, Tian, & Deng, 2014)

El **PVDF** es un polímero semicristalino. Aproximadamente 50% amorfo y 50% cristalino. 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, consiguiendo el efecto piezoeléctrico en el material. Útiles para temperaturas altas (temperatura de Curie cercana a 110°C) y como sensores (altas constantes de voltaje piezoeléctricas).

Es mecánicamente muy fuerte y resiste cantidad de productos químicos como ácidos. Presenta una fuerte respuesta piezoeléctrica incluso a frecuencias del orden de microondas. Presenta una constante $g(10^{-3}\text{Vm/N})$ elevada con respecto a otros piezoeléctricos.

Los polímeros piezoeléctricos tienen la capacidad de soportar una tensión mucho mayor debido a su flexibilidad intrínseca, lo que los hace más adecuados para aplicaciones en las que el dispositivo se someterá a una gran cantidad de flexión o se ajustará a una superficie de montaje curvada (por ejemplo, dispositivos portátiles). (Gómez Molina, 2018)

Películas delgadas

Las películas delgadas de materiales como **PZT** se emplean para aplicaciones como sensores, interruptores y diafragmas de actuación. Las películas gruesas de PZT (policristalinas) se usan para aplicaciones MEMS (sistemas micro electromecánicos), su constante piezoeléctrica (d) es mayor que en otros materiales. (Gómez Molina, 2018)

Según (Li, Tian, & Deng, 2014), estrictamente desde la perspectiva de los materiales, las **propiedades** importantes de los materiales piezoeléctricos para aplicaciones de recolección de energía incluyen:

- **Constante de tensión piezoeléctrica d** (polarización inducida por unidad de tensión aplicada, o la tensión inducida por unidad de campo eléctrico aplicado).
- **Constante de tensión piezoeléctrica g** (campo eléctrico inducido por tensión unitaria aplicada).
- **Factor de acoplamiento electromecánico k** (raíz cuadrada de la eficiencia de conversión de energía mecánico-eléctrica).
- **Factor de calidad mecánica Q** (grado de amortiguamiento; valor más bajo indica mayor amortiguamiento).
- **Constante dieléctrica ϵ** (la capacidad de la carga de almacenamiento del material).

| | PZT-5H (ceramic) | PMN-32PT with (001) orientation (single crystal) | PZT rod-Polymer composite with 30 vol. % PZT | PVDF (polymer) |
|---|---------------------|---|---|-------------------|
| Density (g/cm^3) | 7.65 | 8.10 | 3.08 | 1.78 |
| Dielectric constant ϵ_r | 3250 | 7000 | 380 | 6.0 |
| Young's modulus Y_{33} (GPa) | 71.4 | 20.3 | | 2 |
| Mechanical quality factor Q_m | 32 | | | 10 |
| Piezoelectric charge constant d_{33} (pC/N) | 590 | 1620 | 375 | 25 |
| Piezoelectric charge constant d_{31} (pC/N) | -270 | -760 | | 12-23 |
| Electro-mechanical coupling factor k_{33} | 0.75 | 0.93 | | 0.22 |
| Reference | 31 | 32 | 33 | 34, 35 |

Tabla 2: Propiedades para cerámicas piezoeléctricas seleccionadas, monocristales, compuestos de polímero PZT y polímeros. (Li, Tian, & Deng, 2014)

Cerámicas Piezoeléctricas

Según (Gómez Molina, 2018) una cerámica piezoeléctrica es una masa de cristales de perovskita. Cada cristal se compone por un pequeño ion de metal tetravalente dispuesto dentro de una cuadrícula de un gran ion de metal divalente y oxígeno. Para su preparación, se mezclan polvos muy finos de óxidos metálicos con un aglutinante orgánico y se dispone en formas específicas y son sometidas a altas temperaturas. Se forma una **estructura cristalina** muy densa que se enfría, corta y se le aplican los electrodos.

Por encima de la temperatura crítica, temperatura de Curie, cada cristal de perovskita exhibe una simetría cúbica simple sin momento dipolar. Sin embargo, a temperaturas inferiores cada cristal tiene **simetría tetragonal**, y un **momento dipolar**.

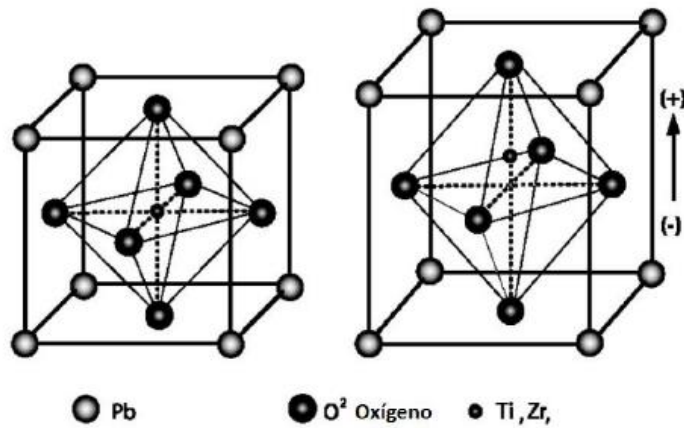


Ilustración 5: Estructura cristalina de una cerámica piezoeléctrica antes y después de ser polarizada (Pb: Plomo, O²⁻: Oxígeno, Ti: Titanio, Zr: Circonio). (Gómez Molina, 2018)

Dipolos adyacentes forman regiones de alineamiento local llamadas **dominio**, esta alineación da un **momento dipolar neto** para el dominio y de esta manera **una polarización neta**.

- a, la dirección de polarización entre los dominios vecinos es aleatoria, la cerámica no se encuentra polarizada.
- Al ser expuesta a un fuerte campo eléctrico DC, a una temperatura por debajo de la temperatura de Curie, los dominios son alineados (b), proceso de polarización. Los dominios mejor alineados se expanden a costa de los que no se alinearon, por tanto, el elemento cerámico se expande en la dirección del campo.
- Al retirar el campo eléctrico, la mayor parte de los dipolos siguen alineados (c). La cerámica piezoeléctrica queda con una polarización y elongación permanente de micrómetros.

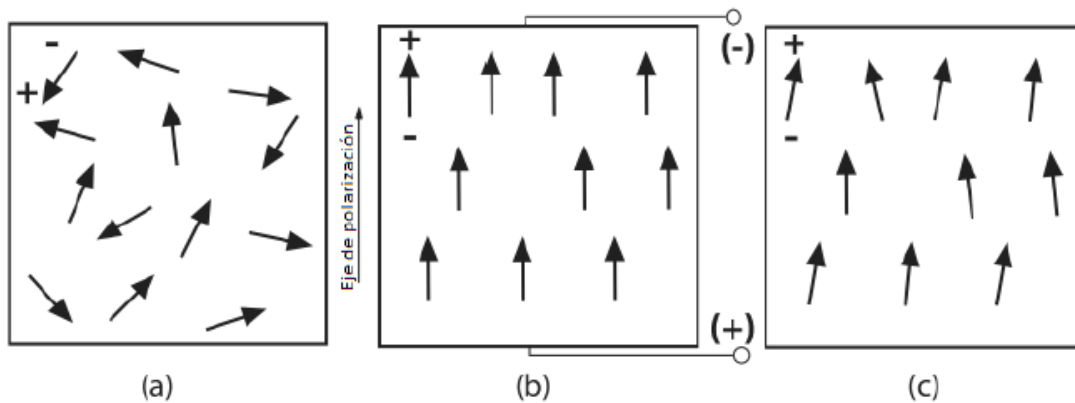


Ilustración 6: Proceso de polarización: (a) Antes de la polarización los dominios polares se encuentran orientados aleatoriamente. (b) Un gran campo eléctrico DC es aplicado para la polarización. (c) Al quitar el campo eléctrico aplicado la polarización remanente permanece. (Gómez Molina, 2018)

Las propiedades de una **piezocerámica polarizada**, tanto para el efecto directo (sensor) como para el inverso (actuador), son analizadas en la .

- Para el **efecto inverso**:

- Con un campo eléctrico opuesto a la de polarización, la cerámica sufre una contracción en la dirección de polarización, disminuyendo su diámetro (**Ilustración 5b**).
- En el mismo sentido, la cerámica se expande perpendicular a la dirección de polarización, aumentando su diámetro (**Ilustración 5c**).
- En cuanto al **efecto directo**:
 - Una fuerza que comprime la piezocerámica en la dirección de polarización o se ejerce una tracción perpendicular a la misma, ésta genera una diferencia de potencial con la misma polaridad con la que fue polarizada (**Ilustración 5d**).
 - Mientras que, si una tracción mecánica en la dirección de polarización o una compresión es aplicada perpendicular a la dirección de polarización, éstas generarán un voltaje con la polaridad opuesta (**Ilustración 5e**).

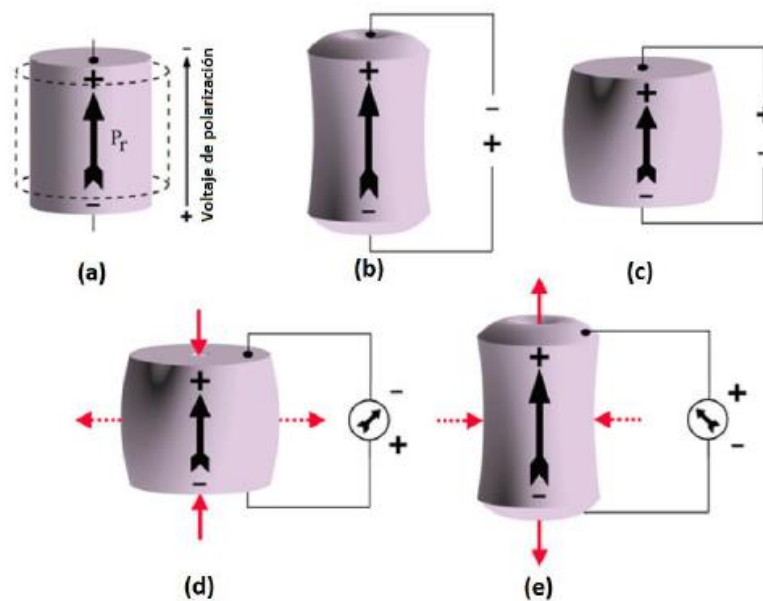


Ilustración 7: Comportamiento de un material piezoeléctrico en aplicación como sensor o actuador. (a) Dirección de polarización. (b) Campo eléctrico aplicado con la misma polaridad que el de polarización. (c) Campo eléctrico aplicado con la polaridad opuesta al de polarización. (d) Compresión aplicada en la dirección de polarización. (e) Tracción aplicada en la dirección de polarización. (Gómez Molina, 2018)

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

Cerámicas Blandas

Las cerámicas blandas se crean añadiendo pequeñas cantidades de **dopantes donores** a la cerámica, que crean cationes en la estructura cristalina. Presentan 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. Se usan a bajas temperaturas, frecuencias y campos eléctricos (sensores). (Gómez Molina, 2018)

Cerámicas Duras

Las cerámicas duras se crean añadiendo pequeñas cantidades de **dopantes aceptores** a la cerámica, que crean aniones en la estructura cristalina. Características opuestas a las blandas: alta temperatura de Curie (más de 300°C), constantes de carga piezoeléctrica pequeñas, grandes factores de acoplamiento electromecánico y grandes factores de calidad mecánica. Son más difíciles de polarizar o despolarizar y más estables que las cerámicas blandas, pero producen menos desplazamiento y soportan elevadas cargas mecánicas y grandes voltajes. (Gómez Molina, 2018)

2.3.3. Modelo eléctrico equivalente

Según (Gómez Molina, 2018) los circuitos eléctricos equivalentes más comunes a los que podemos aproximar el comportamiento de una cerámica piezoeléctrica consisten en:

- Un generador de tensión en serie con un condensador ()
- Un generador de corriente en paralelo con un condensador ().

Ilustración 8: Modelo equivalente. Generador de Tensión.
(Gómez Molina, 2018)

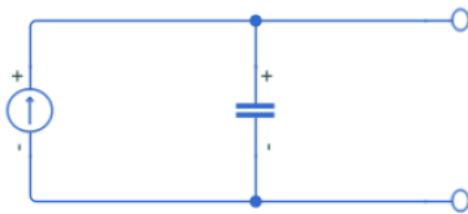


Ilustración 9: Modelo equivalente paralelo. Generador de Corriente. (Gómez Molina, 2018)

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**.

Aplicaciones

Las cerámicas piezoeléctricas tienen multitud de aplicaciones:

- Sensores
- Actuadores
- Transductores
- Acelerómetros
- Generadores

De las cuales vamos a utilizarlas como sensores.

Los **sensores piezoeléctricos** convierten una entrada física (aceleración, presión, etc.) en una señal eléctrica. Para estas aplicaciones de detección se utilizan las **cerámicas blandas** por sus características previamente comentadas. Los sensores piezoeléctricos típicos, generan una señal solo cuando experimentan un cambio en la presión aplicada.

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.
- Pasivos.

De los cuales vamos a utilizarlas en **modo pasivo**.

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. (Gómez Molina, 2018)

En cuanto a las aplicaciones en zapatos destacamos las más típicas:

Ilustración 10: Dos piezoeléctricos PVDF (polifluoruro de vinilideno) colocados en la suela de un zapato en los puntos de mayor y más variable presión. (Sepúlveda Orozco, 2014)

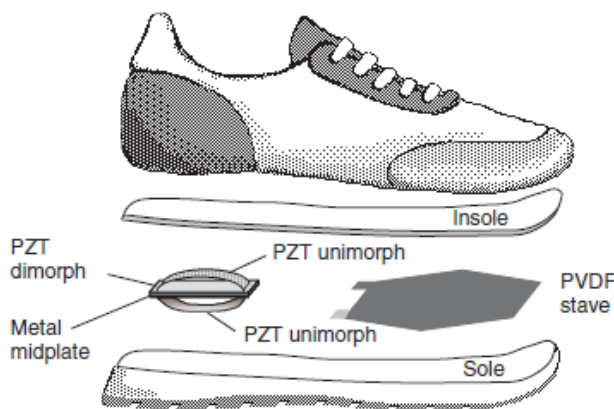


Ilustración 11: PZT dimorph en el talón, formado por la unión de dos PZT unimorph encima y debajo de un metal y el PVDF en la parte anterior del pie. (Sepúlveda Orozco, 2014)

2.4. Diseño del actuador piezoeléctrico

Diferenciamos entre:

- Actuadores **cerámicos multicapa** con electrodos internos, con fuerzas generatrices elevadas y sus velocidades de respuesta altas, pero con desplazamientos pequeños y capacitancia elevada.
- Actuadores **dimorfos**, con desplazamientos grandes, pero fuerza generatriz pequeña.

Los actuadores tipo “luna” y “címbaro”, que trabajan en modo flexional y rotacional-flexional, fueron diseñados con niveles intermedios de desplazamiento y fuerza generatriz.

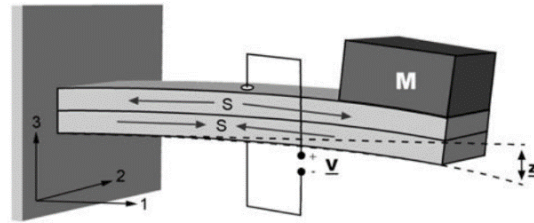
(Ochoa, Villegas, & Fernández, 2001)

En la mayoría de los casos de captación de energía piezoeléctrica, las fuentes de energía de vibración o mecánica tienen bajas frecuencias de movimiento o baja aceleración. Un **factor de forma delgado y plano** permite que un elemento piezoeléctrico reaccione fácilmente al

movimiento. Además, también es beneficioso para reducir las dimensiones y el peso del dispositivo de recolección de energía. Por lo tanto, los materiales piezoeléctricos más utilizados poseen una forma **geométrica de capa delgada**. (Li, Tian, & Deng, 2014)

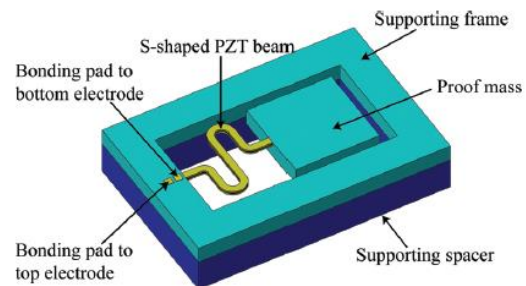
- **Viga en voladizo**, muy usada para vibraciones.

Ilustración 12: Estructura tipo Cantilever. (Gómez Molina, 2018)



- **Voladizo con viga serpenteante en forma de S**, que reduce la rigidez del voladizo para lograr una baja frecuencia de resonancia (menos e 30Hz).

Ilustración 13: Voladizo PZT en forma de S. (Li, Tian, & Deng, 2014)



- **Tipo luna**, metal-cerámica, alcanza desplazamientos de más de 100mm, fuerzas generativas máximas de hasta varios N, tiempos de respuesta desde 20 hasta 100ms, y baja respuesta en ensayos de fatiga a más de 10⁷ ciclos.

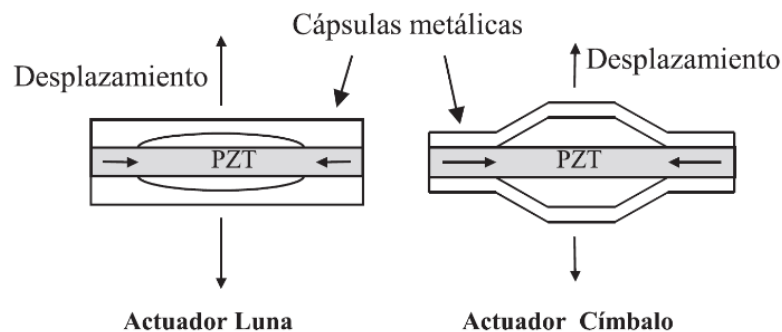


Ilustración 14: Configuración básica de actuadores tipo luna y címbalo. (Ochoa, Villegas, & Fernández, 2001)

- **Tipo címbalo (Cymbal)**, los transductores de platillos o discos se desarrollaron para aplicaciones que tienen **altas fuerzas de impacto**. Normalmente consta de un disco cerámico piezoeléctrico y una tapa de metal (acero) en cada lado. El acero se utiliza normalmente porque proporciona una mayor resistencia de rendimiento que el latón y el aluminio, lo que lleva a una mayor capacidad de carga de fuerza del transductor. (Li, Tian, & Deng, 2014)

Pueden producir una gran deformación bajo una fuerza externa transversal. Consiste en dos platillos de metal o cualquier otro material elástico que encapsula una lámina/disco de material piezoeléctrico que recibe la fuerza aplicada sobre los platillos metálicos. Poseen una cavidad que favorece la amplificación de los efectos piezoeléctricos directo

e inverso. Es el que recupera un porcentaje mayor de energía mecánica. Al modificar la configuración de sus extremos se distribuye uniformemente la fuerza aplicada y soporta mayores carga y frecuencias de carga permitiendo transformar mayor cantidad de energía. Posee desplazamientos dos veces mayores que los obtenidos con actuadores tipo luna para el mismo tamaño, fuerzas generativas mucho mayores y la posibilidad de eliminar la dependencia del desplazamiento con la temperatura mediante selección de los materiales. Además, poseen unas características únicas de sintonización que permiten seleccionar distintas frecuencias de resonancia con el mismo actuador. (Ochoa, Villegas, & Fernández, 2001)

Los transductores de platillos pueden proporcionar una salida de energía más alta que los recolectores de energía en voladizo porque la estructura de los platillos soporta un mayor impacto que el haz en voladizo. (Li, Tian, & Deng, 2014)

- Diafragma circular**, funciona de manera similar a la de los voladizos. Se une un disco de cerámica piezoeléctrico circular y delgado a una cuña metálica y luego toda la estructura se sujeta al borde. En algunos casos, se coloca una masa de prueba en el centro del diafragma para proporcionar pretensado a la cerámica piezoeléctrica que puede mejorar el rendimiento de baja frecuencia del recolector de energía y aumentar la potencia de salida. Otro método para introducir el pretensado ocurre durante la etapa de fabricación. Se intercala una capa de cerámica piezoeléctrica entre dos capas metálicas diferentes y se calienta y se enfría a temperatura ambiente. La diferencia en los coeficientes de expansión térmica de los dos metales diferentes hace que toda la estructura se deforme, introduciendo así el pretensado en el piezoeléctrico. La NASA desarrolló un patrón de electrodo espiral para diafragmas cerámicos piezoeléctricos que funciona de manera similar a los electrodos interdigitados. En este patrón, los electrodos positivo y negativo giran alternativamente hacia el centro del disco piezoeléctrico (**ilustración 10**). Dichos transductores piezoeléctricos de diafragma se denominan diafragmas de campo radial (RFD). A una frecuencia baja de 10 Hz, se ha demostrado que los RFD muestran un desplazamiento fuera del plano más grande que un diafragma piezoeléctrico convencional.

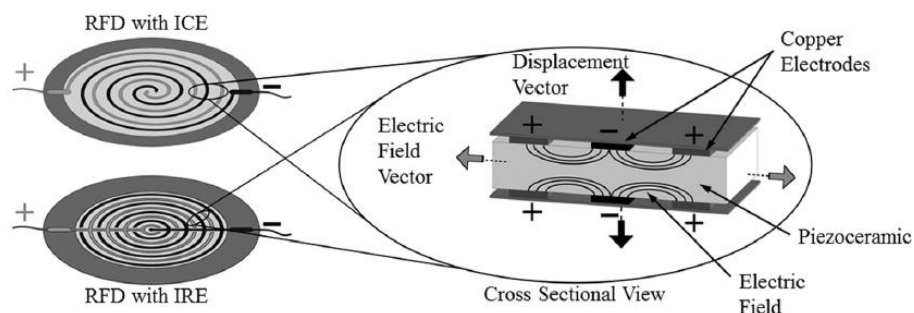
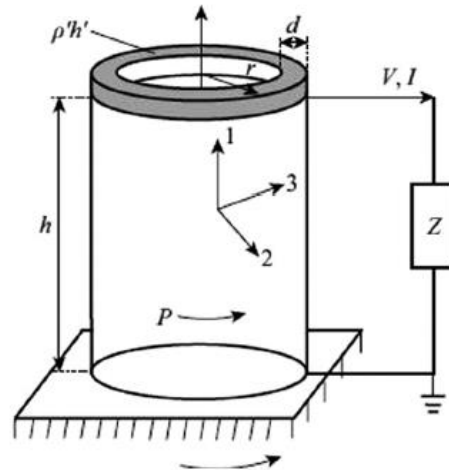


Ilustración 15: Esquema de diafragmas de campo radial (RFD). (Li, Tian, & Deng, 2014)

(Li, Tian, & Deng, 2014)

- **Carcasa**, la frecuencia de resonancia de la estructura de la cáscara disminuye, lo que obliga a la cáscara a tensarse más severamente para una mayor potencia de salida.

Ilustración 16: Cosechadora de energía cilíndrica piezoeléctrica. (Li, Tian, & Deng, 2014)



- **Estructura de anillo MEMS (RMEMS)**, se fabricó grabando una capa de sustrato debajo de una tira de película delgada de nitruro de aluminio (AlN). La gran tensión residual dentro de la estructura en capas hizo que la tira de AlN se enrollara. El prototipo RMEMS no solo podía lograr una fuerte resonancia a una frecuencia baja de 64 Hz, sino que también poseía otros picos de resonancia a frecuencias aún más bajas (40 y 48 Hz) debido al movimiento torsional de la estructura del anillo.

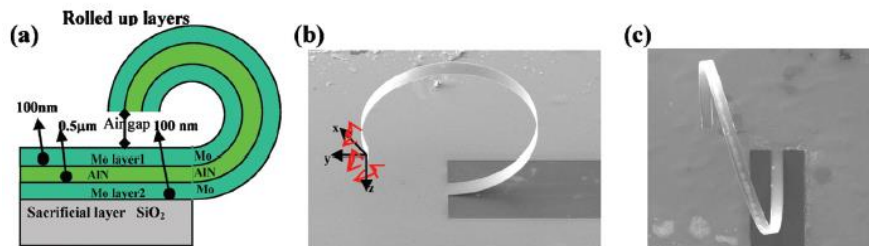
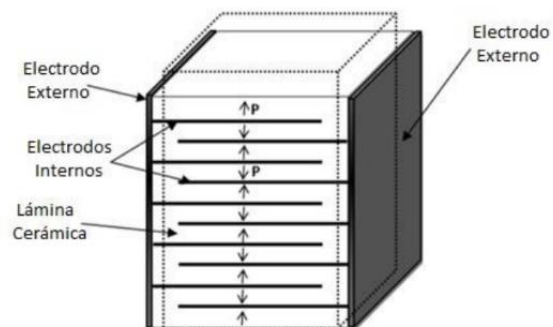


Ilustración 17: Cosechador MEMS (RMEMS) de anillo piezoeléctrico de baja frecuencia: (a) esquema de la estructura en capas del anillo; (b) momentos de torsión de la punta; (c) vista superior. (Li, Tian, & Deng, 2014)

(Li, Tian, & Deng, 2014)

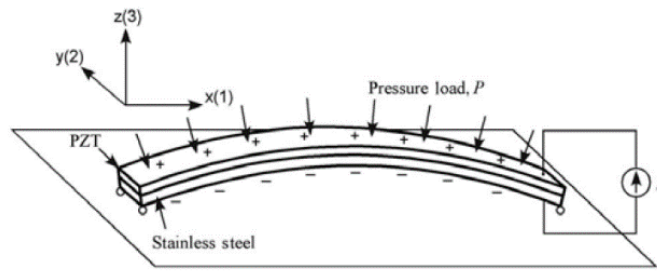
- **Tipo pila**, de capas de materia piezoeléctrica con polarización opuesta entre las adyacentes, conectadas mecánicamente en serie y eléctricamente en paralelo.

Ilustración 18: Estructura tipo pila. (Gómez Molina, 2018)



- **Tipo concha**, lámina piezoeléctrica curva.

Ilustración 19: Estructura tipo concha. (Gómez Molina, 2018)



2.4.1. Extracción de energía

Según (Li, Tian, & Deng, 2014) la eficiencia y la densidad de potencia de un dispositivo de recolección de energía vibratoria piezoeléctrica dependen en gran medida de la frecuencia, porque el piezoeléctrico genera la máxima potencia en su **frecuencia de resonancia**. Por lo tanto, la frecuencia fundamental del *host* o anfitrión determina el tamaño del elemento piezoeléctrico.

Las frecuencias de algunas de las fuentes de vibración típicas se enumeran en la . La mayoría de los equipos de maquinaria tienen una frecuencia de 100 Hz o más, mientras que el **movimiento humano** o animal muestra una frecuencia mucho más baja, generalmente dentro del rango de **1–30 Hz**.

Las cerámicas piezoeléctricas son óxidos metálicos, que dan como resultado frecuencias fundamentales mucho más altas cuando se comparan con compuestos y polímeros del mismo tamaño y geometría, con el mismo modo de vibración. Dentro del rango de tamaño razonable permitido por los dispositivos electrónicos pequeños, el modo de frecuencia de resonancia más baja está muy por encima del rango de frecuencia de las fuentes de vibración.

| Vibration source | Frequency (Hz) | Acceleration amplitude (m/s ²) |
|-------------------------------|----------------|--|
| Car instrument panel | 13 | 3 |
| Casing of kitchen blender | 121 | 6.4 |
| Clothe dryer | 121 | 3.5 |
| HVAC vents in office building | 60 | 0.2–1.5 |
| Car engine compartment | 200 | 12 |
| Refrigerator | 240 | 0.1 |
| Human walking | 2–3 | 2–3 |

Tabla 3: Frecuencia y aceleración de diversas fuentes de vibración. (Li, Tian, & Deng, 2014)

Por lo tanto, para lograr una **frecuencia de resonancia más baja** en un tamaño de paquete relativamente pequeño, se emplean varias técnicas:

- Elección del material piezoeléctrico utilizado.
- Configuración.
- Diseño del elemento de recolección de energía.
- Acondicionamiento de los circuitos de recolección de energía.

Para aplicaciones con frecuencias de vibración más altas (100 Hz o más), la elección del material piezoeléctrico es relativamente simple. Sin embargo, cuanto más baja es la frecuencia del *host* de vibración, más complejo se vuelve diseñar la unidad de recolección de energía, ya que las restricciones de dimensión y peso limitan el uso de la cerámica para lograr la frecuencia fundamental deseada. Por lo tanto, para estas situaciones, los compuestos y polímeros piezoeléctricos a menudo pueden ser los candidatos materiales.

3. Selección de actuadores piezoeléctricos

3.1. Introducción

En este apartado comparamos diferentes materiales piezoeléctricos en diferentes aplicaciones reales y de sus características y respuestas seleccionamos el tipo disco o címbalo como el más adecuado para nuestros intereses. Hacemos un estudio más profundo a cerca de estos piezoeléctricos tipo címbalo, buscamos los que podemos conseguir en internet y compramos los que mejor se adaptan a nuestras necesidades y dentro de unos márgenes lógicos de precio y tiempo de envío. Por último, analizamos estos piezoeléctricos realizando diferentes mediciones con ellos para caracterizarlos y seleccionar los que vamos a utilizar más adelante.

3.2. Clasificación de materiales

En la **Tabla 21 (Anexo III)** se muestran varios ejemplos de materiales piezoeléctricos.

3.3. Ejemplos de aplicaciones reales

Con el objetivo de seleccionar el tipo de material piezoeléctrico óptimo para nuestro propósito elaboramos la *donde* podemos encontrar varios casos en los que se utilizan diferentes materiales piezoeléctricos en aplicaciones en zapatos o similares. El objetivo es compararlos y seleccionar el más conveniente para nuestra aplicación.

Los aspectos que tenemos en cuenta son:

- **Posición X/Y** en la que se encuentra el material piezoeléctrico. Cuando se encuentra en un zapato los tres puntos posibles son el talón, el puente o arco del pie y la punta. Otras opciones son en el manillar y/o sillín de una bicicleta, en el tobillo, o en la rueda de un coche.
- **Posición Z**, que afectará a los que estén colocados en un zapato y cuyas opciones serán dentro de la suela o entre plantilla y suela.
- **Material** del que está compuesto el piezoeléctrico, algunos como el PVDF, PZT, Duraluminio, PIC155...
- **Volumen** que ocupan los dispositivos en cm^3 .
- **Tensión de pico máxima** que generan ($V_{P_{MAX}}$) y la tensión promedio ($V_{promedio}$).
- **Potencia** que generan en función del volumen.
- **Resistencia de carga** que presentaban.

| | Posición X/Y | Posición Z | Material | Volumen | V _{P_{MAX}} | V _{promedio} | Potencia/Volumen | Resistencia de carga |
|--|------------------------|-------------------------|--------------------------------|---|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1 Piezoeléctrico (suela atada a pie) | Talón | Dentro suela | Duraluminio (7075-T6) | 30x10x10mm 3cm ³ | 2.48V | 1.08V | 23.15 μW/cm ³ | 100kΩ |
| 2 Energy Harvesting (MOT, suela atada a pie) | Talón | Dentro suela | Duraluminio (7075-T6) | 30x10x10mm 3cm ³ | 2.8V | 1.09V | 26.13μW/cm ³ | 100kΩ |
| 3 Energy Harvesting (MOT, calzado deportivo) | Talón | Dentro suela | Duraluminio (7075-T6) | 30x10x10mm 3cm ³ | 8.24V | 4.57V | 76.91 μW/cm ³ | 100kΩ |
| 4 MFC (calzado deportivo) | Puente (arco plantar) | Dentro suela | Duraluminio (7075-T6) | 30x100x3mm 9cm ³ | 0.704V | 0.45V | 2.19μW/cm ³ | 100kΩ |
| 5 Piezoeléctrico (Cerámica PZT dimorfo) | Talón | Entre plantilla y suela | Titanato de circonato de plomo | 5.4cm ³ | - | 44V | 1.56mW/cm ³ | 500kΩ |
| 6 Piezoeléctrico (PVDF) | Punta | Entre plantilla y suela | Fluoruro de polivinilo | 5cm ³ | - | 9.8V | 0.26mW/cm ³ | 250kΩ |
| 7 PCT (transductor piezoeléctrico tipo címbalo) | Rueda de coche | - | Titanato de circonato de plomo | 1.52cm ³ (Para 0.9MPa) Para 65Kg | - | 30-50V | 16W 4.93mW/cm ³ | 1MΩ |
| 8 PCT | Manillar y sillín bici | - | PIC155 | 70Kg | - | 4V y 12V | 4.3x10 ⁻⁹ J | - |
| 9 Colector electro magnético | Tobillo | - | - | 1.5cm ³ | - | - | 2.6μW/cm ³ | - |
| 10 PCT | - | - | PZT-5H | 0.5cm ³ (Para 3.5Kg) | 80V | - | 1.32mW/cm ³ | 2.6MΩ |
| 11 PCT | - | - | Acero | 0.25cm ³ (Para 5.1Kg) | 60V | - | 1.84mW/cm ³ | 3MΩ |

Tabla 4: Comparativa de aplicaciones reales de piezoeléctricos.

Analizando los casos de la :

- En los **casos 1 y 2** se trata de, un rectángulo de material piezoeléctrico macizo en el caso 1, y uno diseñado por MOT (método de optimización topológica) con una forma optimizada en el caso 2, colocados en una suela de zapato colocada directamente en el pie.



Ilustración 20: Piezoeléctrico diseñado por MOT. (Sepúlveda Orozco, 2014)



- En el **caso 3** se coloca el diseñado por MOT en un calzado deportivo, al igual que el caso 4, que es un MFC (Macro Compuesto de Fibra) compuesto por varias piezocerámicas rectangulares alineadas de forma uniaxial, confinadas entre electrodos.

Ilustración 21: MFC. (Sepúlveda Orozco, 2014)

- En los **casos 5 y 6** se trata de los mostrados anteriormente en la . El tipo PVDF, **Ilustración 22**, aprovecha la energía cuando se curva el pie y el dimorfo, **Ilustración 23**, el golpe del talón del pie.

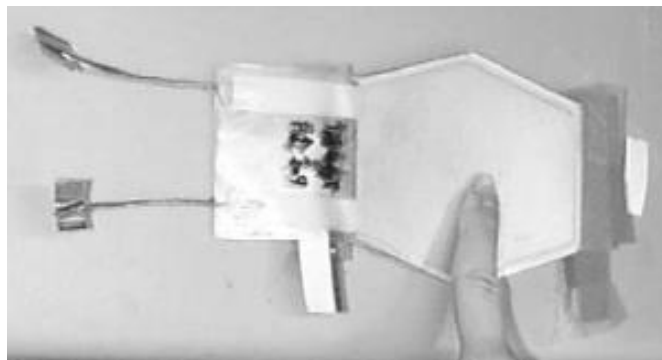
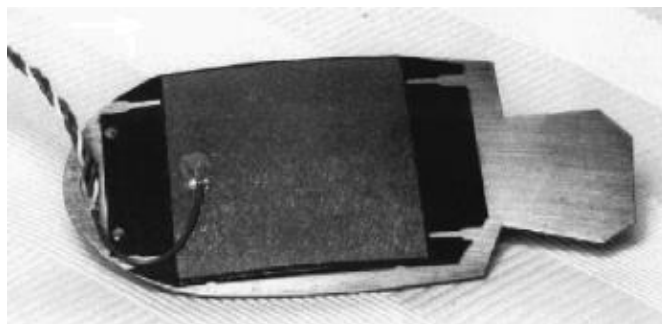


Ilustración 22: PVDF. (Shenck & Paradiso, 2001)

Ilustración 23: PZT dimorfo. (Pérez Lepe, Fernández Lozano, Ochoa Pérez, & Urquiza Cuadros, 2015)



- En el **caso 7** se trata de un PCT (transductor piezoeléctrico tipo címbalo) colocado en una probeta asfáltica sobre la que se hace pasar una rueda que simula el peso de un vehículo. (Se ha calculado la respuesta

proporcional con el peso se una persona de 65Kg para que sea comparable al resto de casos.)

- En el **caso 8** se trata de dos PCT colocados en el manillar donde se apoyan las manos y uno en el sillín de una bicicleta. (Gómez Molina, 2018)
- En el **caso 9** se trata de un colector electromagnético colocado en el tobillo. (Elham Maghsoudi, 2017)
- En los **casos 10** (Palosaari, 2017) y 11 (Chua, Kok, & Goh, 2014) se trata de un PCT que se golpea. En el 10 a una baja frecuencia (1.19Hz).

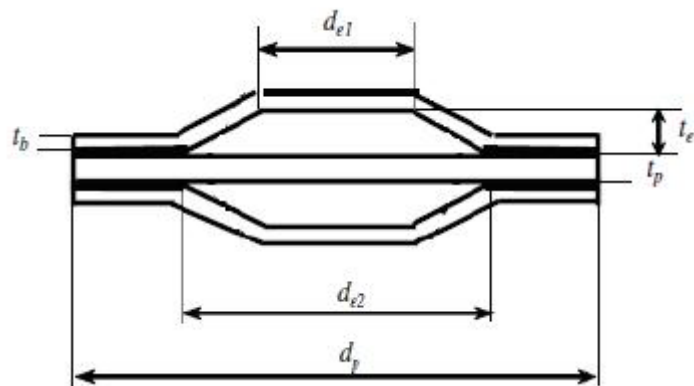
3.4. Piezoeléctricos tipo címbalo (PCT)

Tras la obtención de la potencia que se genera con el uso de estos diferentes tipos de colectores piezoeléctricos en distintas aplicaciones reales, la conclusión es que los discos tipo címbalo obtiene de los mejores resultados, en cuanto a **potencia por superficie**, del orden de mW. Los **discos PCT** (transductor piezoeléctrico tipo címbalo) y el **PVDF** son los más fáciles de conseguir en el mercado, por lo que serán con los que llevemos a cabo nuestras pruebas.

El transductor de platillos piezoeléctrico cerámico o PCT tiene la capacidad de generar más salida de voltaje eléctrico y potencia en comparación con el transductor de modo de flexión convencional.

El voltaje de salida de circuito abierto del PCT se incrementa con el aumento de la energía mecánica aplicada. Bajo el mismo impacto de energía mecánica, los voltajes de salida de circuito abierto generados del PCT son mucho más altos que los del disco de cerámica piezoeléctrica sin tapa. El voltaje de salida de circuito abierto generado del PCT depende de los parámetros geométricos de la estructura de la tapa terminal, y se incrementa con el aumento de la relación de diámetros que aparece en la **Ilustración 24** (d_{e1}/d_{e2}). También depende del grosor del metal de la tapa. Además, el voltaje de circuito abierto del PCT con espesor de metal grueso es menor que con espesor de metal fino.

Ilustración 24: Estructura del PCT.
(Wu, Chure, Wu, & Tung, 2014)



Se planteó la posibilidad de **fabricar los discos a medida** dado que la aplicación para la que se necesitan se desarrolla a una frecuencia muy baja, y la mayoría de estos piezoeléctricos suelen utilizarse para recolectar energía de vibraciones de altas frecuencias. Pero llevar a cabo el diseño completo del piezoeléctrico se excedía del trabajo que comprende el TFG, por lo que finalmente se trabaja con dispositivos ya existentes en el mercado.

Se hace un **análisis del mercado** para conocer las posibilidades tenemos en cuanto al tipo de PCT y su facilidad de obtención para realizar con ellos las mediciones y ensayos necesarios. Uno de los aspectos que destacan es que todos los discos tipo címbalo están diseñados para trabajar a frecuencias muy elevadas, las menores que encontramos son entorno a 1kHz. Al contactar con distribuidores de estos materiales para preguntar sobre cuáles eran los que menores frecuencias de trabajo tenían y si podían fabricármelos de la menor frecuencia posible, ya que la frecuencia en nuestra aplicación andando o corriendo es sobre 1-5Hz, se remitían a su catálogo, u ofrecían la opción de diseñarlo a la medida, pero proporcionándonos las especificaciones exactas de las dimensiones del piezoeléctrico. Como ya hemos comentado solo hemos hecho un pequeño análisis de como se ha de fabricar el piezoeléctrico para favorecer unas características u otras, pero no un estudio intensivo para su fabricación óptima, por lo que lo que hicimos fue seleccionar **discos de diferentes tamaños (Ilustración 25)**, para analizar sus diferentes respuestas. Los diámetros de izquierda a derecha son **12mm, 15mm, 20mm, 27mm y 35mm**. De 35mm seleccionamos otros aparte que tienen el mismo aspecto, pero eran llamativamente **más caros**, para ver si había diferencias en la respuesta. En la

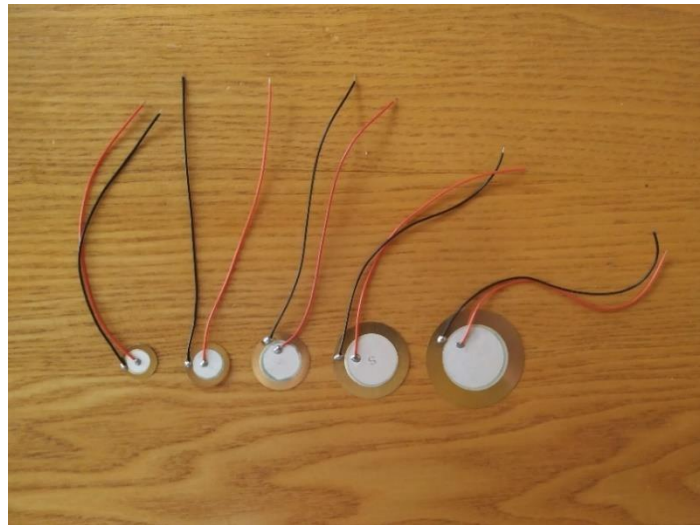
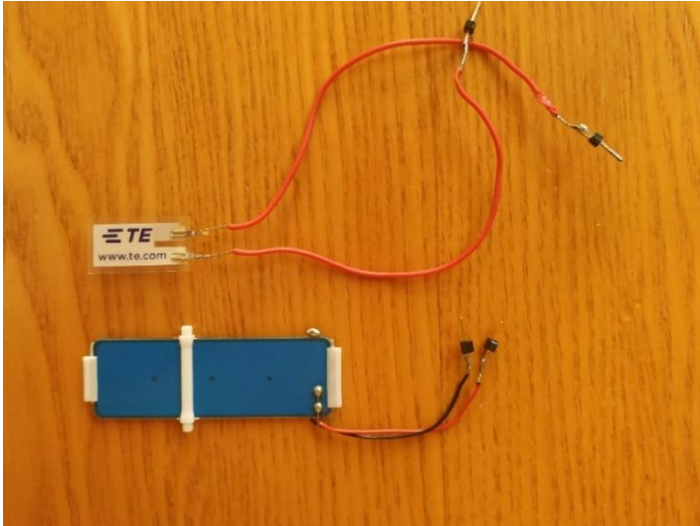


Tabla 5 les asignamos un nombre para diferenciarlos. En la Tabla 19 (Anexo I) se resumen sus principales características.

Ilustración 25: PCT comprados para ensayos, diámetros de izquierda a derecha 12mm, 15mm, 20mm, 27mm, 35mm.

| Nombre | Diámetro (mm) | Particularidades |
|----------------|---------------|------------------|
| DISCO A | 12 | - |
| DISCO B | 15 | - |
| DISCO C | 20 | - |
| DISCO D | 27 | - |
| DISCO E | 35 | Más barato |
| DISCO F | 35 | Más caro |

Tabla 5: Piezoeléctricos PZT seleccionados.



También seleccionamos un par de PVDF (**Ilustración 26**), que diferenciaremos como **pequeño y grande**, para comparar su respuesta con los PCT. En la Tabla 6 les asignamos un nombre para diferenciarlos. En la Tabla 19 (Anexo I) se resumen sus principales características.

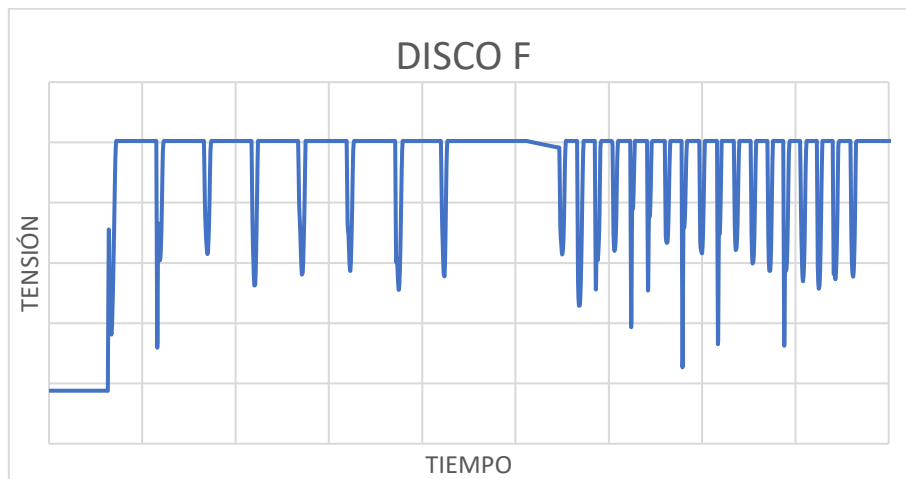
Ilustración 26: PVDF comprados para ensayos.

| Nombre | Tamaño |
|----------------|---------|
| DISCO G | pequeño |
| DISCO H | grande |

Tabla 6: Piezoeléctricos PVDF seleccionados.

Las primeras medidas que realizamos para caracterizarlos fueron con el **LabJack T7 PRO** (**Ilustración 31, Anexo III**), limitado entre -10 y 10V.

Dadas las limitaciones de tensión de medida en este dispositivo el objetivo de estas medidas será el de comparar las formas de las respuestas, su regularidad y estabilidad. Midiendo todos los piezoeléctricos (**Anexo II**) en circuito abierto la respuesta más destacada que obtenemos es la siguiente:



Gráfica 1: Medidas del DISCO F con LabJack T7-PRO.

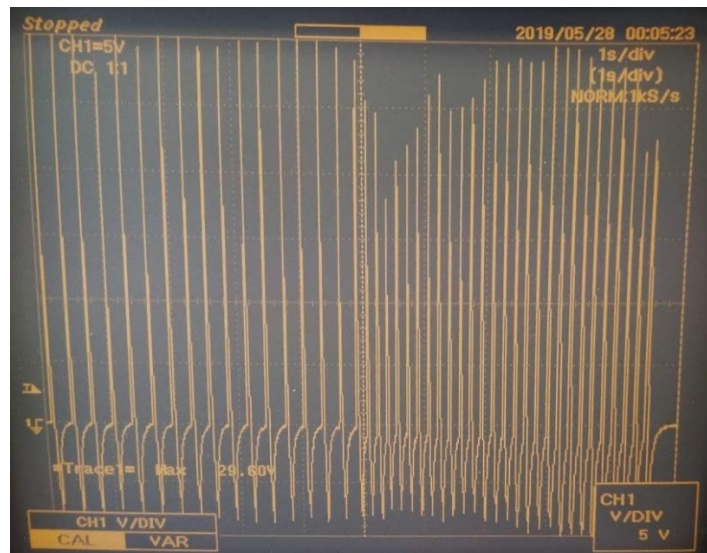
En la **Gráfica 1** vemos la respuesta del **DISCO F**. Golpeando con el dedo el piezoeléctrico, con pulsos:

- Lentos (que simularían la acción de **caminar**)
- Rápidos (que simularían la acción de **correr**).

Tanto para pulsos lentos como para rápidos se mantienen picos muy **regulares y anchos**, por lo que la diferencia con el PCT de su mismo diámetro, pero más barato, es notable (**Anexo II**).

De estas medidas podemos deducir que tanto los **DISCO E (Gráfica 17, Anexo II)** y los **DISCO F** nos proporcionan una buena respuesta, con picos muy regulares y anchos, tanto para pulsos lentos como rápidos.

A continuación, tomamos medidas de todos los piezoeléctricos con un **osciloscopio** para saber que **amplitud** tiene los picos de tensión, midiendo también en circuito abierto. Las respuestas de los destacados anteriormente están en el **(Anexo II)**, donde destaca la siguiente:



Gráfica 2: Medidas del DISCO F con osciloscopio.

En la **Gráfica 2** vemos la respuesta del **DISCO F**, el osciloscopio está configurado a 5V/división. Los picos de tensión tanto para pulsos lentos como rápidos son muy regulares y tienen una amplitud de -10 a 30V para pulsos lentos y de -10 a 25/30V para pulsos rápidos.

De estas medidas podemos deducir que los PCT de 35mm más caros proporcionan las mejores respuestas, con unos picos de tensión muy regulares y de la mayor amplitud.

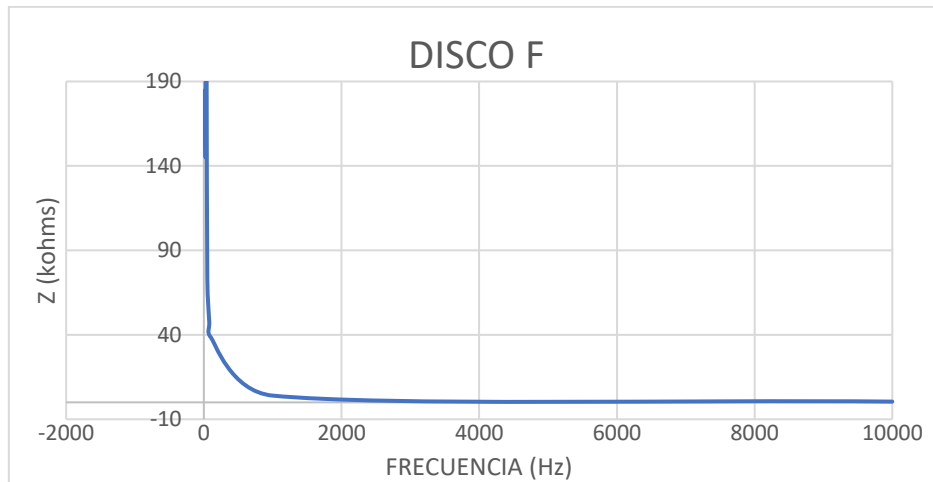
Cabe destacar que en las medidas del resto de piezoeléctricos se corrobora que sus respuestas no son tan regulares como los anteriormente comparados, y la anchura de tensión de los picos son menores.

A continuación, utilizamos un **medidor de impedancias** para caracterizar los piezoeléctricos. Obtenemos la respuesta de estos e la forma (Z, θ) . Hacemos un barrido de frecuencias, sobre todo de las más bajas, que caracterizarán mejor el piezoeléctrico en relación con la aplicación para la que se van a utilizar. Todos los piezoeléctricos presentan una respuesta similar. En la **Tabla 7** podemos ver la respuesta del DISCO F, como ejemplo del comportamiento general que presentan todos.

| FRECUENCIA(Hz) | Z (kΩ) (tita -86.5°) |
|----------------|----------------------|
| 20 | 185 |
| 25 | 145 |
| 30 | 225 |
| 40 | 195 |
| 50 | 73.6 |
| 80 | 46.8 |
| 100 | 38.6 |
| 1000 | 4 |
| 10000 | 0.451 |

Tabla 7: Respuesta (Z, θ) en función de la frecuencia del PCT D35mm más caro.

En la **Gráfica 3** vemos la **impedancia Z en función de la frecuencia**, respuesta que presenta un comportamiento muy similar al de un **condensador**, con una impedancia muy elevada a bajas frecuencias y prácticamente nula a frecuencias elevadas.



Gráfica 3: Respuesta Z en función de la frecuencia del PCT D35mm más caro.

Tomando el PCT como un condensador, con su resistencia paralela, realizamos otras medidas y obtenemos la respuesta (C_p , R_p), un condensador y una resistencia en paralelo. En la **Tabla 8** vemos los resultados obtenidos para el DISCO F.

| FRECUENCIA(Hz) | C_p (nF) | R_p (k Ω) |
|----------------|------------|---------------------|
| 20 | 43,6 | 4200 |
| 100 | 12 | 3500 |
| 1000 | 11,6 | 356 |
| 10000 | 10 | 7,5 |

Tabla 8: Respuesta (C_p , R_p) en función de la frecuencia del DISCO F.

Para nuestra aplicación nos interesa el comportamiento a la **menor frecuencia posible**, por lo que el DISCO F se comportará aproximadamente como un condensador $C_p = 43.6\text{nF}$, en paralelo con una resistencia $R_p = 4.2\text{Mohms}$.

4. Circuito de acondicionamiento

4.1. Introducción

En este apartado comenzamos diferenciando las diferentes partes que componen el circuito acondicionador que vamos a implementar. A continuación, comparamos los diferentes integrados que se utilizan habitualmente y seleccionamos el que mejores prestaciones muestra. Elegimos el LTC3588-1, explicamos su funcionamiento y seleccionamos un módulo de este integrado con el que trabajaremos. Con una aplicación que simula el comportamiento de este módulo realizamos simulaciones de su comportamiento con diferentes condensadores tanto de entrada como de salida, con diferentes capacidades y otras características para ver el efecto que estas variaciones tienen en el comportamiento del circuito y en la eficiencia de su funcionamiento. Hacemos lo mismo midiendo en el circuito real y comprobamos que se comporta de la misma manera. Con los resultados que vamos obteniendo moldeamos el circuito para optimizarlo. Por último, realizamos unas predicciones a partir de las mediciones del laboratorio de lo que teóricamente obtendríamos si integráramos este dispositivo en una persona y lo utilizáramos durante periodos de tiempo más largos.

4.2. Partes del circuito acondicionador

Según (Gómez Molina, 2018) el circuito acondicionador típico de un sistema de *Energy Harvesting* consta de 4 partes ().

- En primer lugar, la **fuerza de energía**, en nuestro caso el **PCT**.
- 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** o el elemento que pretendemos cargar.

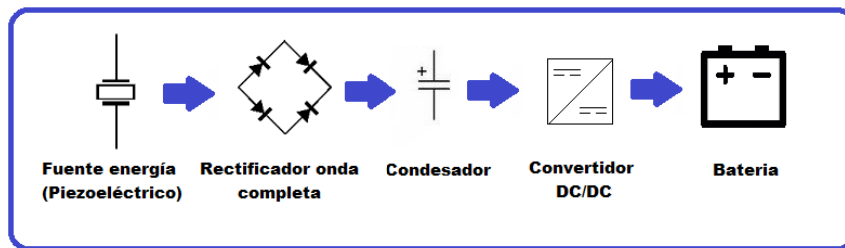


Ilustración 27: Etapas sistema Energy Harvesting. (Gómez Molina, 2018)

Tabla 9: Comparativa entre integrados para circuito de acondicionamiento.

4.3. Comparación y elección del integrado

| Integrado | Entrada | Arranque | Salida | Eficiencia | Tamaño | PROS | CONTRAS |
|------------------|--|--|---|---|-----------|--|---|
| BQ25505 | 0.1-5.1V (5µw-510mW) Hasta 100mV | 600-700mV 15uW | 2-5.5V 230-285mA | 90% 325-400nA (25°C) | 3.5x3.5mm | Protección sobretensión y subtenión. MPPT. Umbral $V_{bat_{ok}}$ definido por usuario. | Necesita puente de diodos, 2 Cs y 5 Rs. 2Cs(4.7uF), L(22nH) externos. |
| SPV1050 | 75mV-18V | 0.55-0.58V, 30uA (<i>boost</i>) 2.6-2.8V, 5uA (<i>Buck-boost</i>) | 2.6(2.2)-5.3V Hasta 70mA (LDOs 1.8 y 3.3V, hasta 200mA) | 0.8uA (espera) 1.7-2.6uA (carga) | 3x3mm | DC-DC integrado. MPPT. Función desconexión protección. Controla fin carga y V_{min} (sobrecarga). Recorte voltajes protección. | MPPT (divisor resistencias externas). |
| LTC3588-1 | 2.7-18V 250uA | 450nA | 1.8V, 2.5V, 3.3V y 3.6V | 450nA | 3x3mm | Rectificador de puente de onda | 2Cs y 1L externos |

| | | | | | | | |
|----------------|------------|------------|-------------------------------------|--|-------|---|---|
| | | | 100mA | | | completa integrado de baja pérdida. Protección subtensión. Protección lin hasta 25mA. Puede dar más corriente de salida. | |
| LTC3108 | Desde 20mV | 0.01-0.1uA | 2,35V, 3,3V, 4,1V o 5V 2.8-7.5mA | 0.2uA (V_{OUT}) 6-9uA (V_{AUX}) | 3x4mm | Convertor DC/DC integrado. | No es específico para <i>Energy Harvester</i> |

4.3.1. LTC3588-1

El LTC3588-1 es una fuente de alimentación de pérdida de corriente ultra baja diseñada específicamente para aplicaciones de captación de energía con una fuente de energía de AC piezoeléctrica. Rectifica una forma de onda de voltaje y almacena la energía recolectada en un capacitor externo, purga el exceso de energía a través de un regulador de derivación interno y mantiene un voltaje de salida regulado por medio de un regulador *buck* sincrónico de alta eficiencia.

Las **características** que destacan del LTC3588-1 son:

- Integra el **punteo rectificador de onda completa** de baja pérdida y un convertidor reductor de alta eficiencia consiguiendo una solución completa de recolección de energía optimizada para fuentes de energía de alta impedancia de salida como son los transductores piezoeléctricos.
- Cuenta con un modo de **bloqueo de subtensión** de corriente quiescente ultravioleta (UVLO) con una amplia ventana de histéresis que permite que la carga se acumule en un capacitor de entrada hasta que el convertidor puede transferir de manera eficiente una parte de la carga almacenada a la salida.
- En regulación, el LTC3588-1 entra en un **estado de reposo** en el que las corrientes de reposo tanto de entrada (450nA) como de salida son mínimas. El convertidor *buck* se enciende y apaga según sea necesario para mantener la regulación.
- Presenta **cuatro voltajes de salida (1.8V, 2.5V, 3.3V y 3.6V)** seleccionables por pin con hasta 100 mA de corriente de salida continua. Sin embargo, el capacitor de salida puede dimensionarse para dar servicio a una ráfaga de corriente de salida más alta.
- El **rango de operación de entrada** es de 2.7V a 20V, e incorpora una derivación protectora de entrada de 20 V que permite un mayor almacenamiento de energía para una capacidad de entrada conocida. Su tamaño es muy reducido (3mm x 3mm).

Su **circuito de aplicación** típico es el mostrado en la **ilustración 25**, donde:

- En los pines **PZ1 y PZ2** se conecta el sensor piezoeléctrico.
- En V_{IN} tenemos la tensión del piezo rectificada, y conectaremos un condensador $C_{STORAGE} = C_{IN}$ que soporte 25V (por los picos de tensión del piezo) y que servirá como depósito de energía y suministro de entrada para el regulador Buck.
- En V_{OUT} tenemos la tensión que se establece a la salida.

- Con **D1 y D2** seleccionamos una de las cuatro salidas disponibles, en nuestro caso la mayor posible para disponer a la salida de un mayor rango de tensión de alimentación. Para 3.6V tanto D1 como D2 conectados en alto, a VIN2.

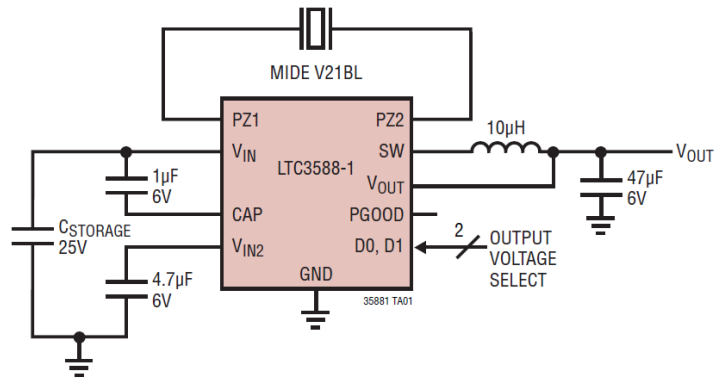


Ilustración 28: Aplicación típica del LTC3588-1.

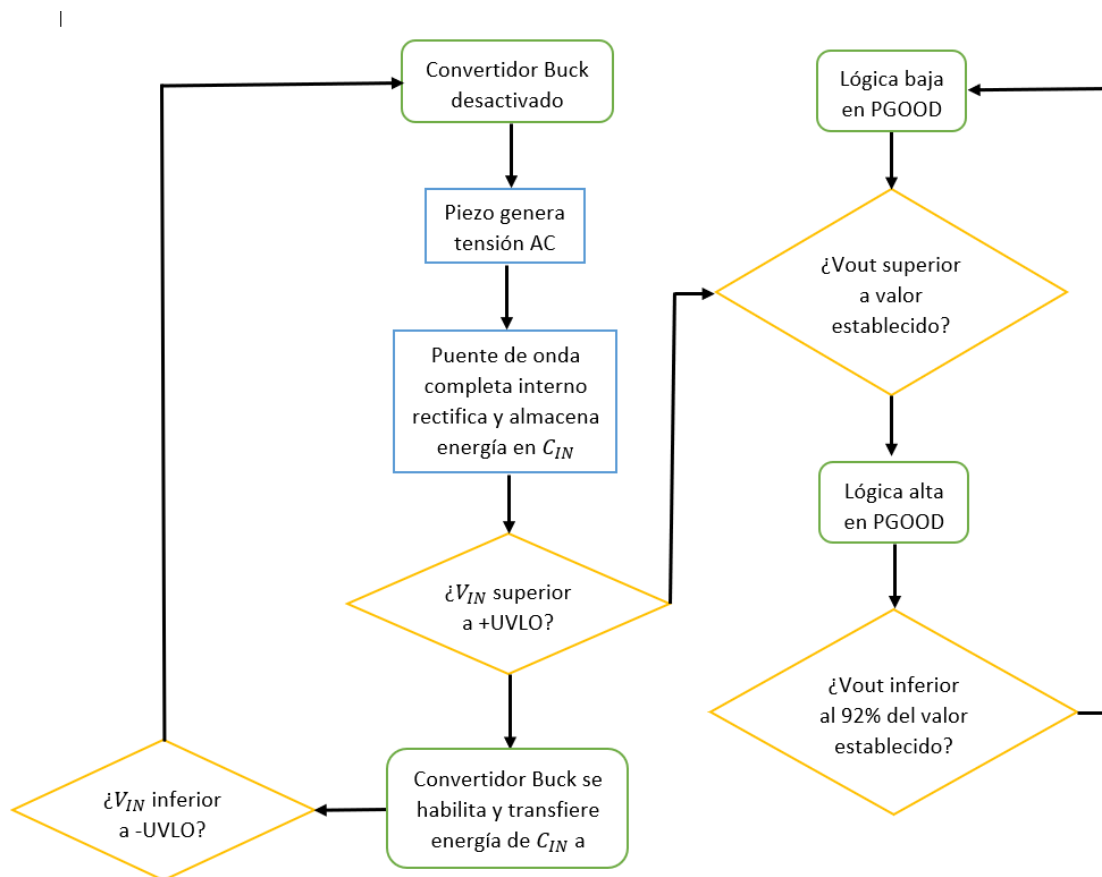


Ilustración 29: Máquina de estados del funcionamiento del LTC3588-1.

En cuanto a su **funcionamiento**:

- La tensión AC se rectifica en el puente (50mA) y se almacena en un **depósito de energía** C_{IN} para el convertidor Buck.
- Cuando el voltaje en V_{IN} se eleva por encima del umbral ascendente de UVLO, (1V mayor que $-UVLO = V_{OUT} + 0.3V = 3.9V$, $UVLO = 4.9V$) el convertidor Buck se habilita y **la carga se transfiere desde el capacitor de entrada C_{IN} al capacitor de salida C_{OUT}** . Cuando la tensión del capacitor de entrada se agota por debajo de $-UVLO$, el convertidor Buck se desactiva.

- Tenemos una lógica alta con referencia a V_{OUT} en el **pin PGOOD** cuando el convertidor alcanza el V_{OUT} programado (3.6V), lo que indica que la salida está en regulación. El pin PGOOD permanecerá alto hasta que V_{OUT} caiga al 92% de la tensión de regulación deseada (3.312V). Si PGOOD es alto y V_{IN} cae por debajo de -UVLO, PGOOD permanecerá alto. Esto permite utilizar la energía de salida incluso si la entrada se pierde. El pin PGOOD está diseñado para controlar un microprocesador u otro chip de E/S.
- Los **capacitores de entrada y salida** deben seleccionarse según las necesidades de energía y los requisitos de carga de la aplicación. En todos los casos, el capacitor C_{IN} debe resistir el voltaje más alto que haya estado presente en V_{IN} .
- No se recomienda un C_{OUT} de menos de $10\mu\text{F}$, ya que la ondulación V_{OUT} podría aumentar a un nivel indeseable. Si se requieren corrientes de carga transitorias por encima de 100 mA, se puede usar un capacitor más grande en la salida. En C_{OUT} para algunas aplicaciones puede ser adecuado un supercapacitor.

4.3.2. Simulaciones

Simularemos el comportamiento del módulo con su equivalente en **LTspice XVII**.

Lo primero que haremos será conectar un generador de pulsos junto con una resistencia y un condensador en paralelo que simule el piezoeléctrico, y que proporcionen al circuito pulsos de unos 5/6V, para simular la situación real que hemos medido anteriormente (**Ilustración 33, Anexo III**).

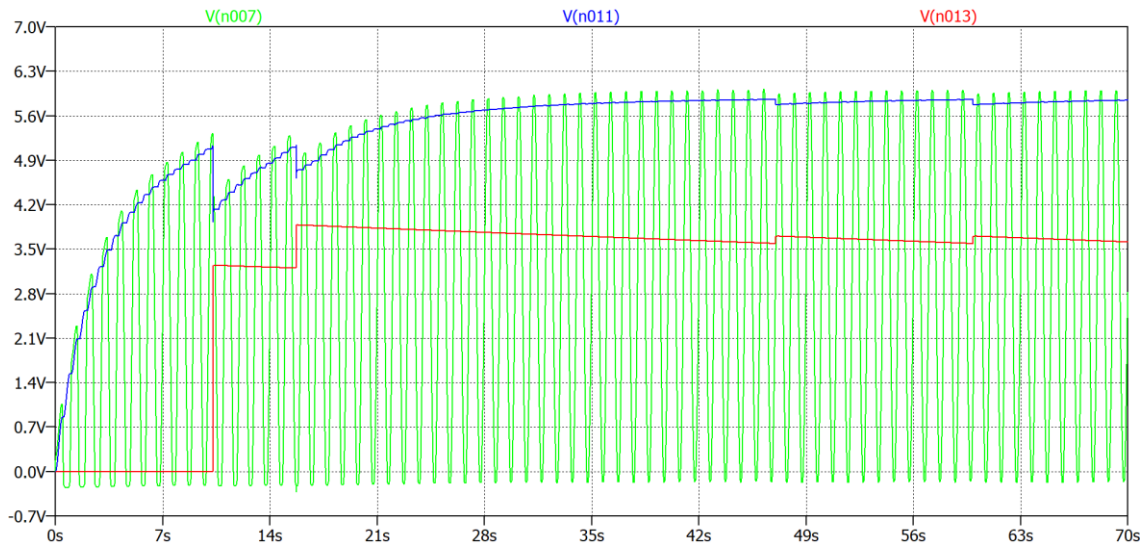
Probaremos con **diferentes tipos de condensadores C_{IN}** , con **diferentes capacidades y ESR**, y de C_{OUT} , para ver las consecuencias de variar sus diferentes parámetros ().

| VARIAMOS C_{IN} | | VARIAMOS C_{OUT} | |
|--|--|------------------------------------|---|
| 10μF | | 100μF | |
| 100μF | | - | - |
| 10μF con ESR 5Ω | | - | - |
| 10μF con ESR 0.9Ω | | - | - |

Tabla 10: Simulaciones que vamos a realizar variando C_{IN} y C_{OUT} .

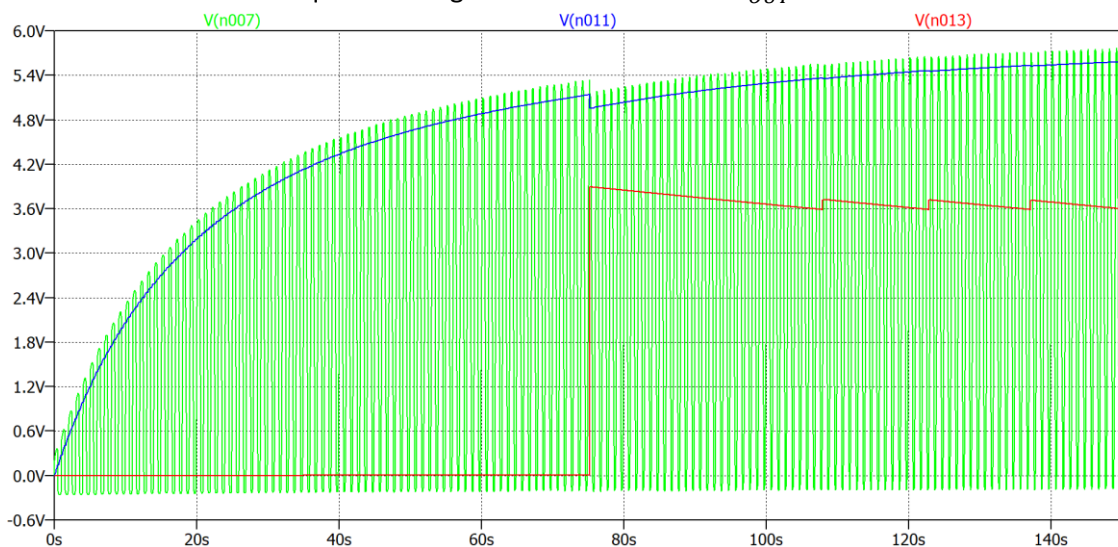
C_{IN}

- En primer lugar, comparamos condensadores de entrada C_{IN} con **diferente capacidad**:
 - Para un C_{IN} de **10 μF** obtenemos la respuesta de la , donde el trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en C_{IN} y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida V_{OUT} .
Vemos que conforme los picos van aumentando se va cargando C_{IN} , cuando alcanza el valor +UVLO = 4.9V trata de establecer la salida V_{OUT} a 3.6V. En el primer intento a los 10s carga C_{OUT} hasta unos 3.2V, es a la segunda a los **16s** cuando consigue establecer la salida V_{OUT} a 3.6V.
En esta simulación el condensador C_{OUT} es el que incorpora el módulo, de 10 μF , por lo que se comparará más adelante con otros condensadores C_{OUT} .



Gráfica 4: Simulación $C_{IN}=10\mu\text{F}$ con LTspice XVII. El trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en C_{IN} y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida V_{OUT} .

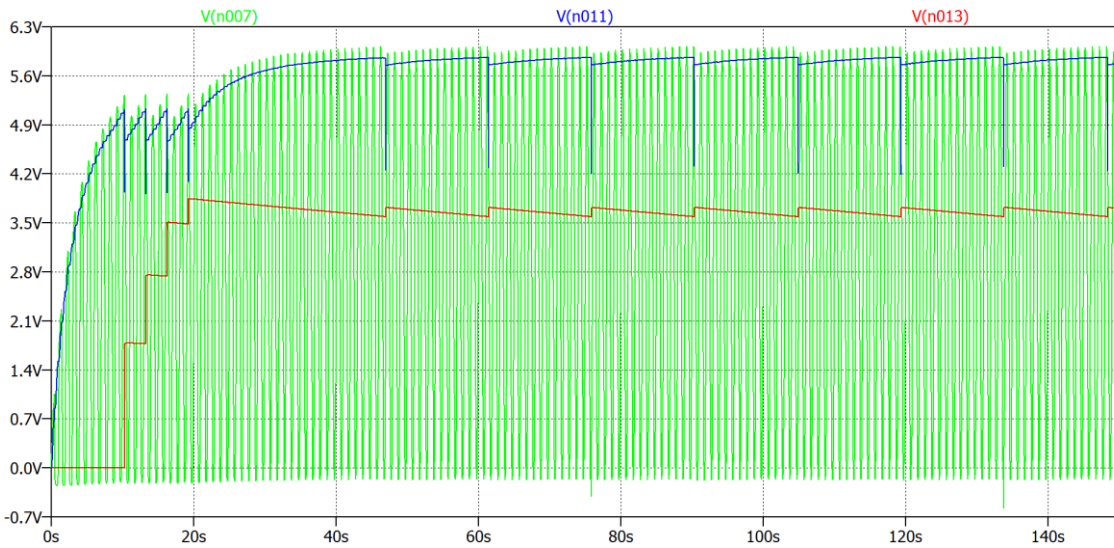
- Para un C_{IN} de **100µF** obtenemos la respuesta de la , con los mismos trazados. Vemos que el comportamiento es el mismo que en la , pero **la carga es más lenta**, debido a que la capacidad del condensador que se está cargando es mayor, por lo que la constante de tiempo de carga $t = R * C$ será mayor. Vemos que se consigue establecer la salida V_{OUT} a 3.6V a los **75s**.



Gráfica 5: Simulación $C_{IN}=100\mu\text{F}$ con LTspice XVII. El trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en C_{IN} y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida V_{OUT} .

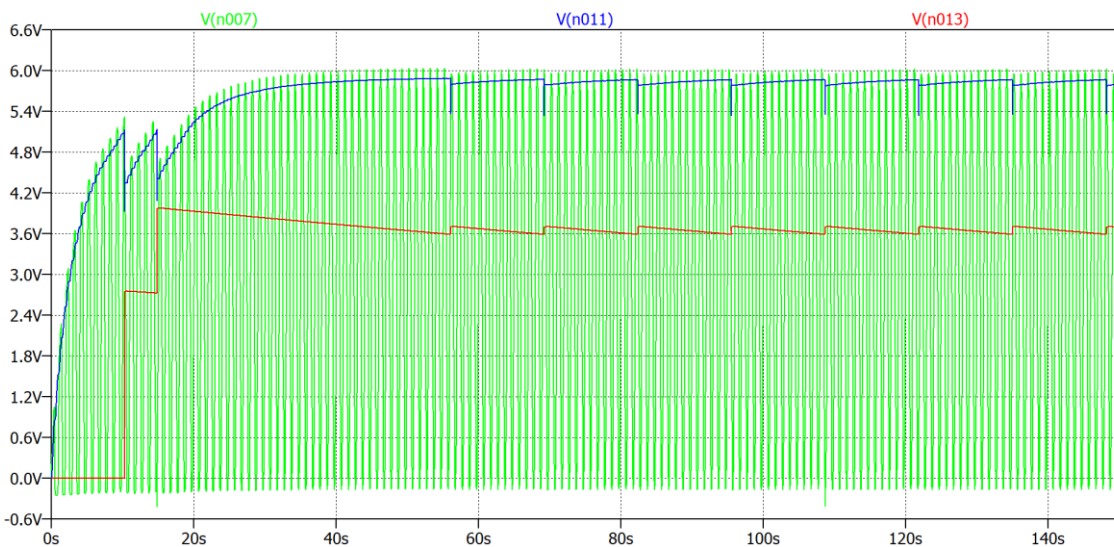
- En segundo lugar, comparamos condensadores de entrada C_{IN} con **diferente ESR** (resistencia serie equivalente):
 - Para un condensador C_{IN} de **10µF** y una **ESR de 5ohms** (típica de un condensador electrolítico de aluminio con terminales de conexión) obtenemos la respuesta de la , donde podemos observar que le cuesta establecer la salida

hasta casi **20s** debido a que las pérdidas por calor en el condensador C_{IN} serán altas.



Gráfica 6: Simulación $C_{IN}=10\mu\text{F}$, ESR 5ohms con LTspice XVII. El trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en C_{IN} y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida V_{OUT} .

- Para un condensador C_{IN} de $10\mu\text{F}$ y una ESR de 0.9ohms (típica de un condensador electrolítico de aluminio SMD) obtenemos la respuesta de la , donde podemos observar que **la salida se establece más rápido** que en el caso de la , sobre los **15s** debido a que las pérdidas por calor en el condensador C_{IN} son menores que en el caso anterior.



Gráfica 7: Simulación $C_{IN}=10\mu\text{F}$, ESR 0.9ohms con LTspice XVII. El trazado V(n007) en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, V(n011) en azul es la tensión que se va acumulando en C_{IN} y V(n013) en rojo es la tensión que se establece a la salida V_{OUT} .

Comprobamos que cuando reducimos el valor de C_{IN} las pérdidas también se reducen, ya que el tiempo que tarda en establecerse la tensión de salida se reduce.

También comprobamos que los condensadores con una menor ESR también tienen unas menores pérdidas.

Lo mismo ocurrirá con la **corriente de fuga**, que variará en función del tipo de condensador que utilicemos, y por lo tanto las pérdidas que tengamos también. Dado que la energía que obtenemos de los piezoeléctricos es muy limitada es muy importante que las pérdidas sean lo menores posibles.

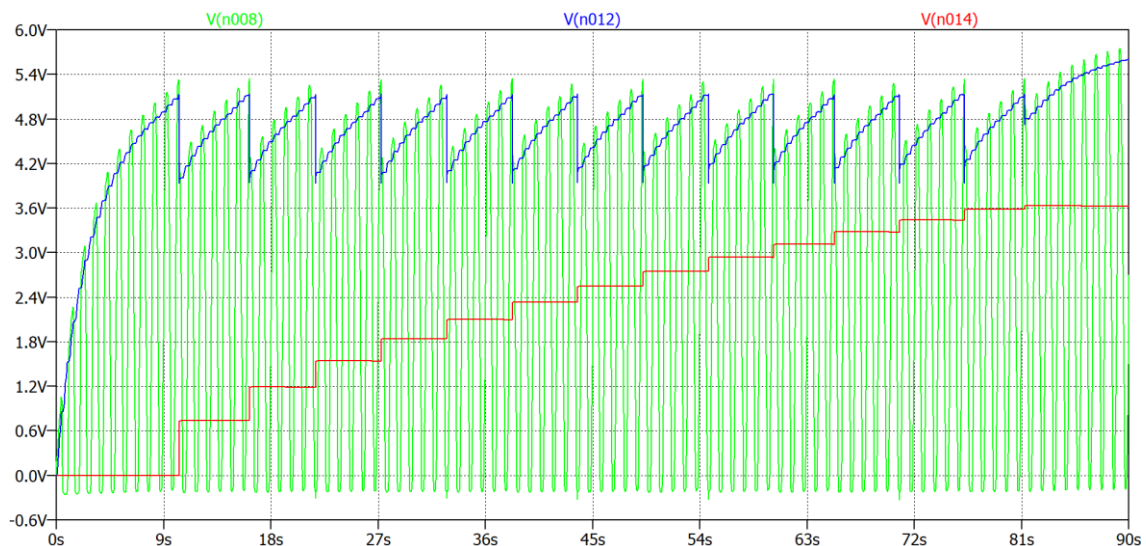
C_{OUT}

- Comparamos condensadores de salida C_{OUT} con diferente capacidad:

Dado que el módulo con el que trabajamos ya tiene integrado un condensador a la salida de $10\mu\text{F}$ probaremos conectando uno de mayor capacidad en paralelo con este. Esta simulación se hace con un condensador C_{IN} de $10\mu\text{F}$, por lo que el resultado se compara con la primera simulación, en la **Gráfica 4**, en la que el condensador C_{IN} era de $10\mu\text{F}$ también y el condensador C_{OUT} es el que tiene el módulo por defecto, de $10\mu\text{F}$.

- Para un **C_{OUT} de $100\mu\text{F}$** obtenemos la respuesta de la , donde el trazado $V(n008)$ en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, $V(n012)$ en azul es la tensión que se va acumulando en C_{IN} y $V(n014)$ en rojo es la tensión que se establece a la salida V_{OUT} .

Vemos que cuando se quiere establecer la salida V_{out} a 3.6V cuesta hasta **81s** cargar el C_{OUT} debido a su elevada capacidad. **Conforme se aumenta la capacidad de C_{OUT} la carga es cada vez más lenta**, lo que hace inservible el uso de condensadores más grandes para almacenar más energía, ya que no se llega a establecer la tensión de salida.



Gráfica 8: Simulación $C_{IN}=10\mu\text{F}$ y $C_{OUT} = 100\mu\text{F}$ con LTspice XVII. El trazado $V(n008)$ en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, $V(n012)$ en azul es la tensión que se va acumulando en C_{IN} y $V(n014)$ en rojo es la tensión que se establece a la salida V_{OUT} .

| RESULTADOS C_{IN} | | RESULTADOS C_{OUT} | |
|---|-----|-----------------------------|-----|
| Tiempo en establecer salida | | Tiempo en establecer salida | |
| 10μF | 16s | 10μF | 16s |
| 100μF | 75s | 100μF | 81s |
| 10μF con ESR 5Ω | 20s | - | - |
| 10μF con ESR 0.9Ω | 15s | - | - |

Tabla 11: Resumen de los resultados de las simulaciones.

4.4. Cálculos y experimentación

Tras analizar el funcionamiento de nuestro integrado vamos a realizar, en primer lugar, diversas **simulaciones** para conocer los resultados que obtendríamos en función de la variación de varios componentes, y en segundo lugar **experimentaciones** para comprobar los resultados de las simulaciones con los diferentes componentes que van a influir en la eficiencia del circuito de acondicionamiento:

- **Generadores**, hemos analizado diferentes piezoeléctricos en busca de los que nos proporcionan una mayor cantidad de energía a partir de nuestro modo de utilización de éstos. Comprobaremos los resultados anteriormente obtenidos.
- **Condensador de entrada C_{IN}** , en este condensador se acumula la energía del piezoeléctrico rectificadora, y cuando alcanza un valor de tensión determinado se pasa al condensador de salida C_{OUT} . Variaremos diferentes características de C_{IN} para comprobar las que nos son más favorables en cuanto a eficiencia de acumulación de energía.
 - **Capacidad**, cuanto menor sea este parámetro el condensador C_{IN} se cargará más rápido, haciendo que la transferencia de energía a C_{OUT} se lleve a cabo más veces en un mismo tiempo, por lo que comprobaremos si se reducen las pérdidas en el condensador C_{IN} al estar menos tiempo acumulando energía, y por lo tanto menos tiempo de pérdidas.
 - **Resistencia equivalente serie ESR**, cuanto menor sea este parámetro, menores deben ser las pérdidas del condensador. Comprobaremos esto y buscaremos los condensadores con mejores prestaciones en este aspecto.
 - **Corriente de fuga**, mismo caso que la ESR.
 - **Tipo de condensador**, de conexión radial o SMD. Las propiedades de estas diferentes configuraciones de condensadores son diferentes, en general las pérdidas varían de unos a otros.
- **Condensador de salida C_{OUT}** , este es el condensador que va a acumular la energía, por lo que habrá que tener en cuenta las mismas consideraciones que en el C_{IN} para conseguir las menores pérdidas posibles. Probaremos con supercondensadores dadas sus buenas prestaciones en este aspecto, en comparación con los condensadores.
- **Diodo Schottky**, dadas las elevadas pérdidas será necesaria la inclusión de un diodo Schottky. Se comprobará que se reducen las pérdidas en C_{OUT} por descarga inversa a través del circuito.
- **Batería**, comprobaremos que es necesaria dada la pequeña cantidad de energía que se acumula y la necesidad de que las pérdidas sean mínimas dada esta carga tan reducida.

Para realizar pruebas con el LTC3588-1 hemos utilizado un **módulo** cuyo esquema eléctrico, donde se pueden apreciar los componentes que integra, aparece en el **Anexo VI**.

El módulo incluye los condensadores de $1\mu\text{F}$ y $4.7\mu\text{F}$, la bobina de la salida del valor mínimo de $10\mu\text{H}$, y un C_{OUT} mínimo de $10\mu\text{F}$. Por lo tanto, solo hay que conectar las salidas D0 y D1 para seleccionar la tensión V_{OUT} (en nuestro caso 3.6V , los conectaremos a V_{IN} ya que así lo indican las referencias del módulo), y un condensador C_{IN} entre los terminales V_{IN} y GND. (**Ilustración 32, Anexo III**).

4.4.1. Mediciones

Una vez **conectado el piezoeléctrico al módulo** analizamos los picos de tensión que nos proporciona al circuito, que serán menores que en circuito abierto por la impedancia del módulo. En la **Gráfica 22 (Anexo II)** podemos ver la respuesta del DISCO F, que es el que mayor tensión nos ha dado, con valores de unos $5/6\text{V}$, en general superiores al valor $+UVLO = 4.9\text{V}$ que se ha de superar en V_{IN} para que se transmita la energía almacenada de C_{IN} a C_{OUT} . Corroboramos por lo tanto que este es el más adecuado de los que tenemos.

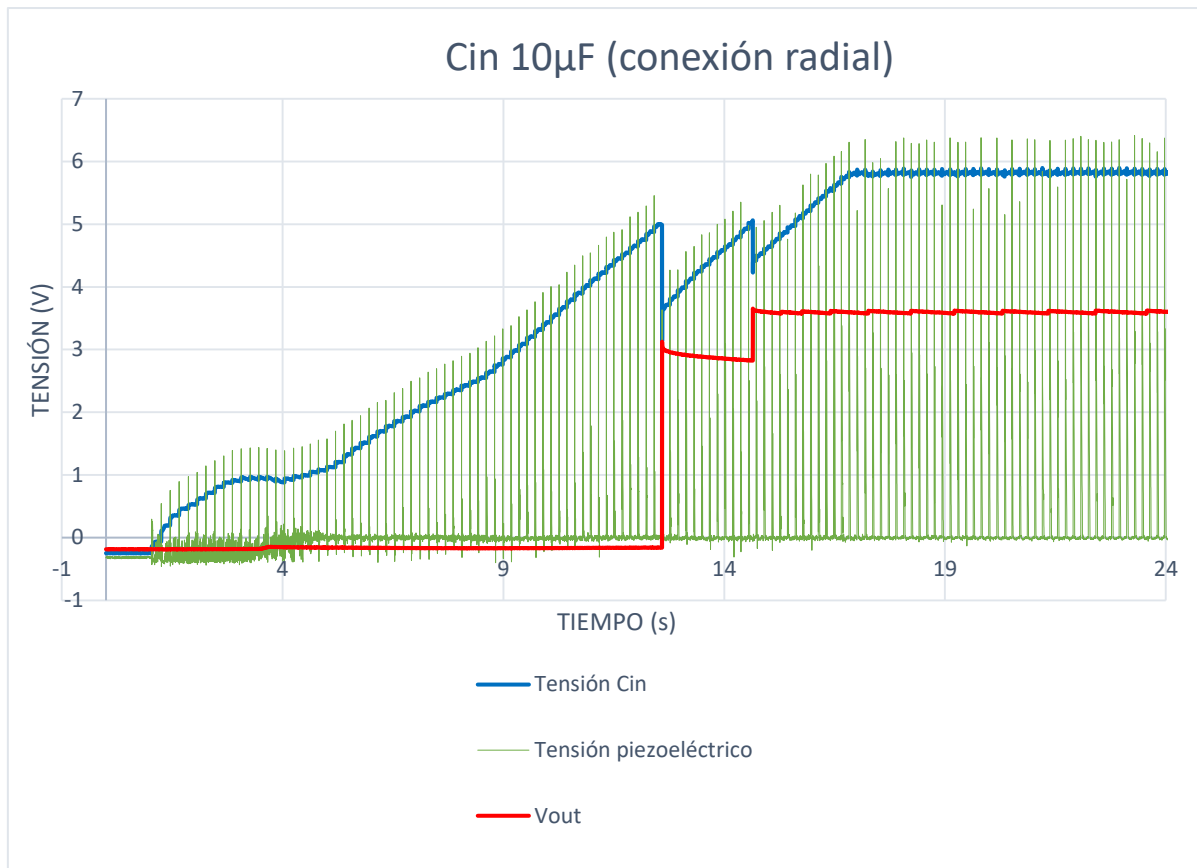
Probaremos con **diferentes tipos de condensadores** tanto en C_{IN} como C_{OUT} para ver las consecuencias de variar sus diferentes parámetros. Para C_{IN} variaremos la capacidad para comprobar que se cumplen los resultados simulados anteriormente. También compararemos condensadores de diferentes tipos, con conexión radial (patillas) o SMD, ya que sus propiedades de ESR, corriente de fuga, y pérdidas en general son diferentes.

| VARIAMOS C_{IN} | | VARIAMOS C_{OUT} | |
|--|------------|---------------------------|------------|
| 10μF conexión radial | Gráfica 9 | 200mF | Gráfica 13 |
| 330μF conexión radial | Gráfica 10 | 200mF con Schottky | (Anexo II) |
| 10μF SMD | Gráfica 11 | - | - |

Tabla 12: Mediciones que vamos a realizar variando C_{IN} y C_{OUT} .

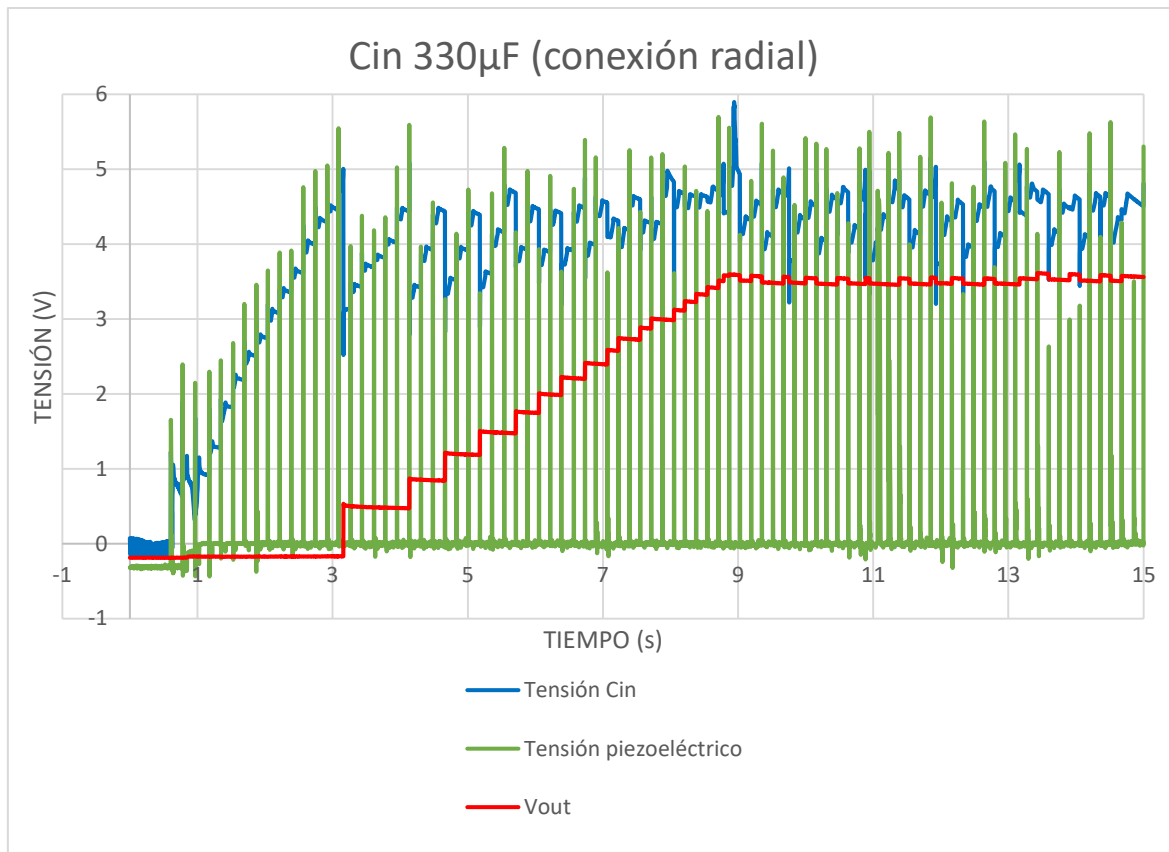
C_{IN}

- En primer lugar, comparamos condensadores de entrada C_{IN} con diferente capacidad:
 - Para un C_{IN} **electrolítico de aluminio con terminales de conexión de $10\mu\text{F}$ y 25V** obtenemos la respuesta de la **Gráfica 9**, donde el trazado en verde son los picos de tensión que genera el piezoeléctrico, en azul es la tensión que se va acumulando en C_{IN} y en rojo es la tensión que se establece a la salida V_{OUT} . **Al igual que en la simulación** vemos que conforme los picos van aumentando se va cargando C_{IN} , cuando alcanza el valor $+UVLO = 4.9\text{V}$ trata de establecer la salida V_{OUT} a 3.6V . En el primer intento a los 12.5s carga C_{OUT} hasta unos 3V , es a la segunda a los **14.6s** cuando consigue establecer la salida V_{OUT} a 3.6V .



Gráfica 9: Medición con $C_{IN}=10\mu F$ con terminales de conexión y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO.

- Para un C_{IN} electrolítico de aluminio con terminales de conexión de $330\mu F$ y $16V$ obtenemos la respuesta de la **Gráfica 10**, con los mismos trazados. Vemos que **el comportamiento empeora** comparado con el caso anterior **Gráfica 9**, ya que cuando trata de establecer la salida no consigue llegar a los $3.6V$, debido a que la capacidad del condensador que se está cargando C_{IN} es mayor y sus pérdidas son mayores. Se consigue establecer la salida V_{OUT} a $3.6V$ en unos $10s$, pero de una forma muy irregular, ya que no se consigue una carga constante a la entrada.

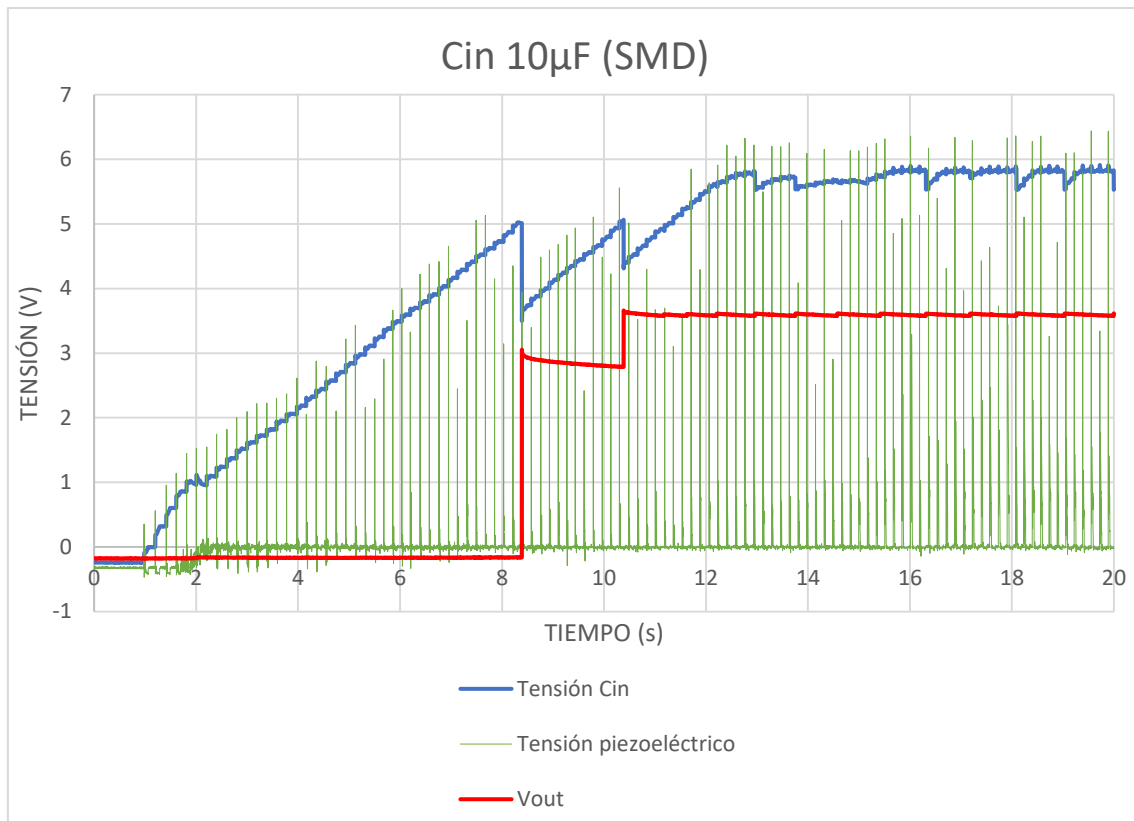


Gráfica 10: Medición con $C_{IN}=330\mu F$ con terminales de conexión y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO.

- En segundo lugar, comparamos condensadores de entrada C_{IN} con diferente estructura:

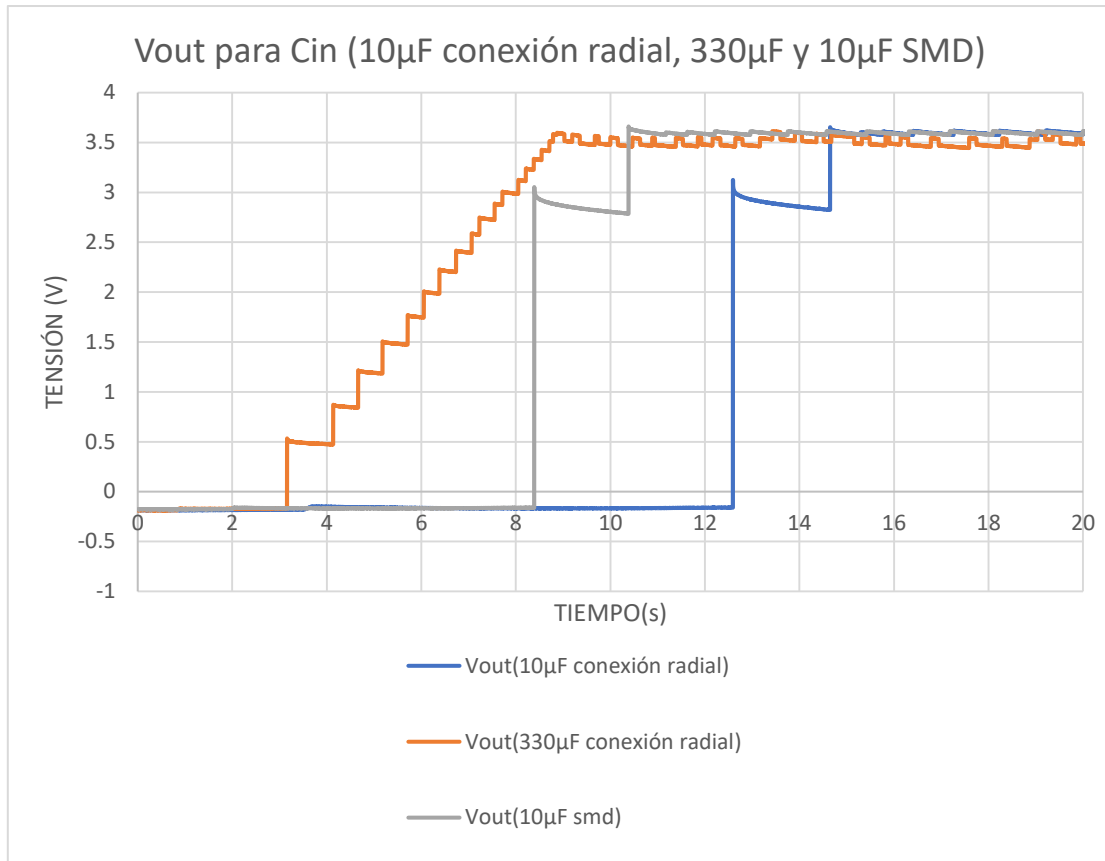
- Comparamos la primera medición de la **Gráfica 9**, con otra en la que también utilizamos un C_{IN} **electrolítico de aluminio de $10\mu F$** , pero esta vez **SMD**, por lo que sus pérdidas serán menores ya que tendrá una menor corriente de fuga y ESR.

Obtenemos la respuesta de la Error! Reference source not found., donde vemos que en el primer intento a los 8.3s carga C_{OUT} hasta unos 3V, es a la segunda a los **10.3s** cuando consigue establecer la salida V_{OUT} a 3.6V, **más rápido** que en el caso de la **Gráfica 9**.



Gráfica 11: Medición con $C_{IN}=10\mu F$ SMD y PCT D35mm más caro, con LabJack T7-PRO.

En la **Gráfica 12** tenemos la comparación de las salidas V_{OUT} para los tres C_{IN} que hemos probado (10 μF conexión radial en azul, 330 μF conexión radial en naranja y 10 μF SMD en gris), donde vemos que la **salida más rápida y regular** se obtiene con el **C_{IN} de 10 μF SMD**.

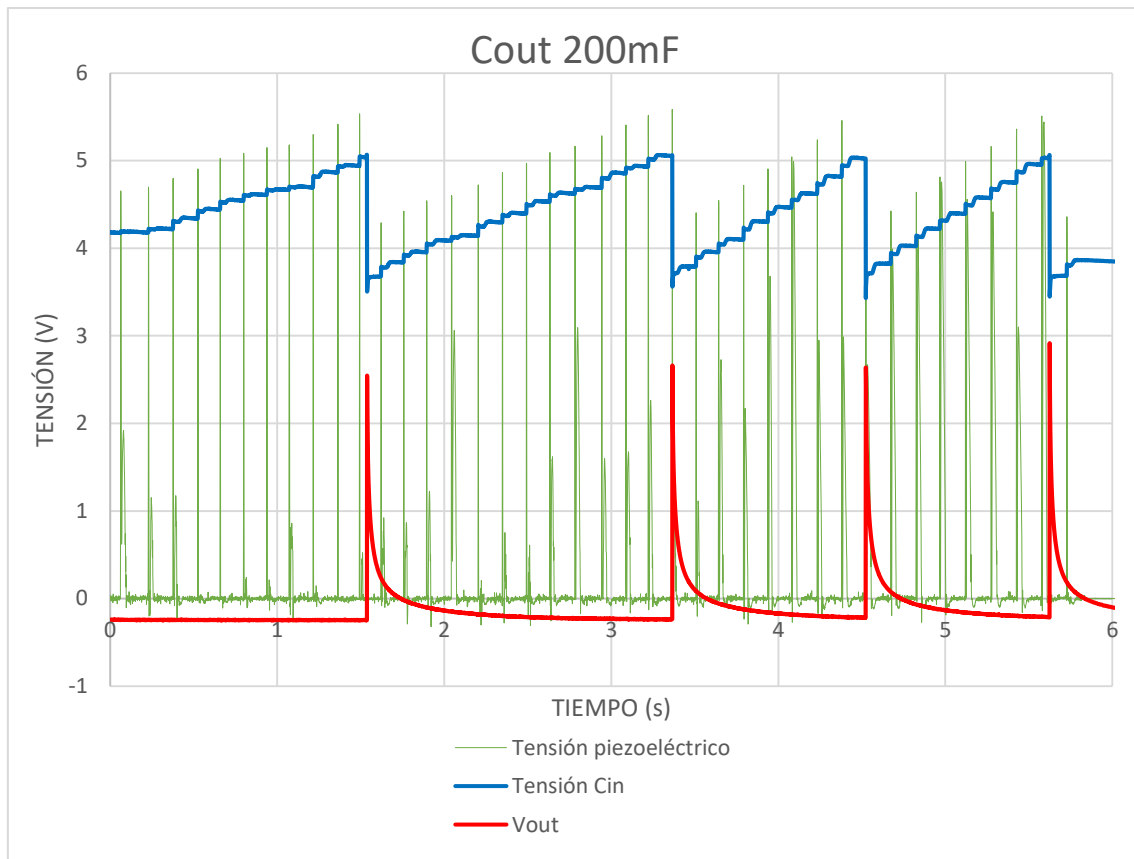


Gráfica 12: Comparativa entre V_{OUT} de los tres C_{IN} probados.

Tras las simulaciones y las mediciones comprobamos que **cuanto mayor es la capacidad el condensador de entrada más lenta es la carga** de este, debido al aumento de la constante de tiempo $t = R * C$. Además, las pérdidas también aumentan con la capacidad y con el tipo de condensador, ya sea con **terminales** o **SMD**, y dependerá también del material del que está compuesto, puesto que la **corriente de fuga** y su **ESR** aumentan. Dado que la energía que obtenemos es muy limitada habrá que utilizar los condensadores óptimos en cuanto a pérdidas, con las menores ESR y corrientes de fuga posibles.

C_{OUT}

- Variaremos la capacidad del condensador de salida C_{OUT} :
Dado que el módulo con el que trabajamos ya tiene integrado un condensador a la salida de 10µF probaremos conectando uno de mayor capacidad en paralelo con este.
 - Para un **supercondensador C_{OUT} de 200mF** obtenemos la respuesta de la **Gráfica 13** donde vemos que, tras un largo periodo hasta que se quiere establecer la salida V_{out} a 3.6V, cuando se consigue cargar el C_{OUT} éste se descarga en pocos milisegundos.

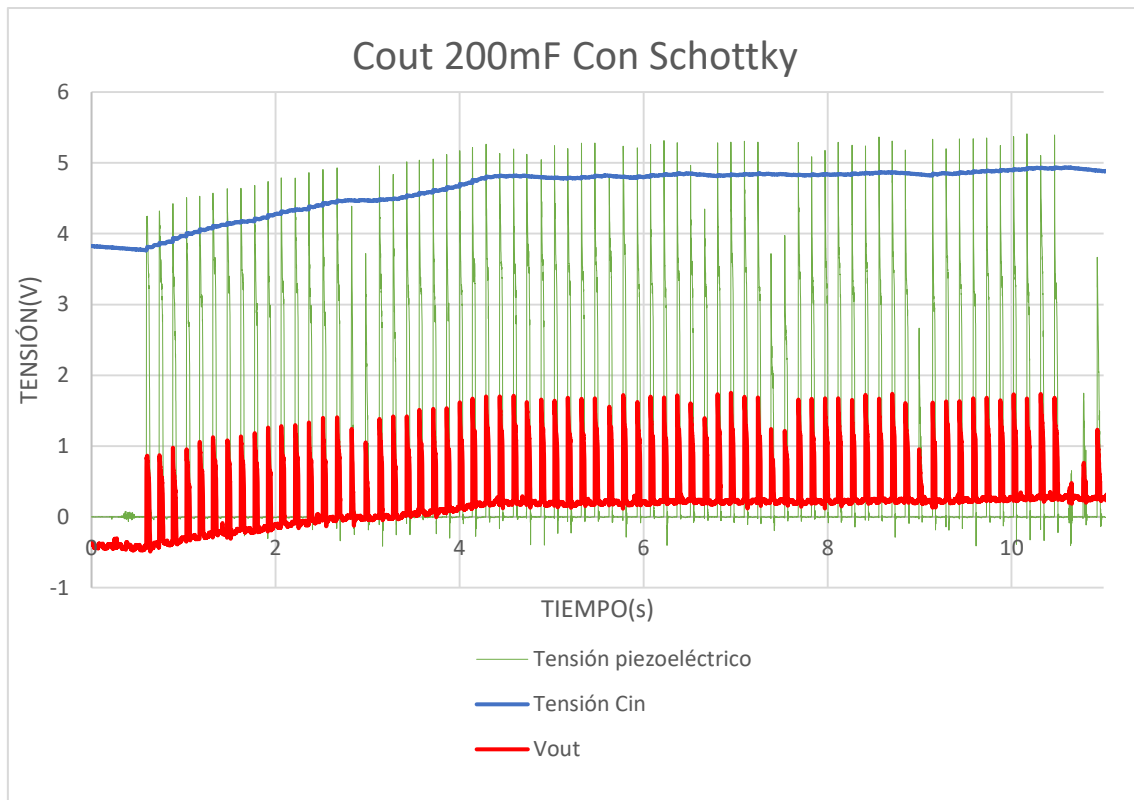


Gráfica 13: Medición con $C_{OUT}=200mF$ y PIEZO F, con LabJack T7-PRO.

Conforme se aumenta la capacidad de C_{out} la carga es cada vez más lenta, y su descarga es más rápida. Para poder almacenar más energía vamos a tener que utilizar **baterías** con una descarga mucho menor que los condensadores, ya que la energía que conseguimos extraer de los piezos es muy reducida.

DIODO

Dada esta descara que acabamos de comentar colocamos un **diodo Schottky** (BAT1504RE6152HTSA1, **Anexo I**) entre C_{OUT} y el circuito evitando así esta descarga a través del circuito y conseguimos ir aumentando la tensión de C_{OUT} , supercondensador 200mF, por lo que a partir de ahora incluiremos el diodo en las mediciones. Podemos comprobarlo comparando la **Gráfica 13** (donde se descarga rápidamente) con la (donde no se aprecia una descarga rápida).



Gráfica 14: Medición con $C_{OUT}=200\text{mF}$, diodo Schottky y PIEZO F, con LabJack T7-PRO.

CIN+BATERÍA

Dados los resultados anteriores, para obtener las menores pérdidas de energía posible, se utiliza una batería ML2430 de 100mAh y 3V (datasheet en Anexo VII), que se cargará a unos 3.6V (C_{OUT}) – 0.3V(Schottky) = 3.3V.

A partir de las deducciones anteriores en cuanto al condensador de entrada se seleccionan varios condensadores (Anexo I) con buenas características, tanto en corriente de fuga como de ESR, para optimizar las pérdidas. Antes hemos visto que a mayor capacidad de C_{IN} más lenta la carga, había más pérdidas. La capacidad de C_{IN} también afectará a la número de veces que se transfiere energía de C_{IN} a C_{OUT} , ya que, como hemos explicado en el funcionamiento del LTC3588-1, cuanto menor sea C_{IN} más rápido alcanzará la tensión necesaria para la transferencia.

| VARIAMOS C_{IN} (Con batería ML2430) | | |
|--|----------------------------|----------------------|
| C_{IN} | Carga de la batería en 29s | Gráfica |
| 10 μF conexión radial | 1.264mV | Gráfica 23(Anexo II) |
| 10 μF SMD | 1.58mV | Gráfica 24(Anexo II) |
| 100 μF SMD | 0.632mV | Gráfica 25(Anexo II) |
| 1 μF SMD | 0.948mV | Gráfica 26(Anexo II) |

Tabla 13: Mediciones que vamos a realizar con la batería ML2430 variando C_{IN} .

Estas **medidas** son como las anteriores, en la **Tabla 13** se resumen la información, de las tensiones que se obtienen en la batería con cada uno de los **condensadores** utilizados, que se encuentra en el **Anexo II**.

Hemos descargado un poco la batería para tener margen de carga, y observamos que debido a esto va aumentando su tensión automáticamente ya que se va recombinando sola tratando de alcanzar su tensión nominal. Para saber cuánta tensión hemos almacenado realmente con el piezoeléctrico tomamos medidas de cuanto tensión eleva la batería por sí sola en 29s, el resultado son 0.948mV. Por lo tanto, en la **Tabla 14** **comparamos los resultados** de las mediciones anteriores:

- Vemos que en el caso de **1μF** la tensión acumuladas es prácticamente igual que el valor que sube la batería por sí sola, por lo que la acumulación es prácticamente nula.
- Para el caso de **100μF** vemos que estamos perdiendo energía ya que la tensión sube menos que con la batería sola.
- Vemos que con el C_{IN} **SMD** se acumula el doble de energía que con el de **conexión radial**.

| Tamaño C_{IN} | Tensión real acumulada en batería (mV) |
|-------------------------------|--|
| 1μF SMD (lab.) | Aprox. 0 |
| 10μF (conexión radial) | 0.316 |
| 10μF SMD | 0.632 |
| 100μF SMD | < 0 |

Tabla 14: Comparación de tensión almacenada con los diferentes C_{IN} medidos.

Dado que estos resultados no son del todo fiables vamos a **medir la tensión y la corriente en la batería** para obtener la potencia y con ella la energía que acumulamos. Para el caso más favorable, con el C_{IN} **de 10μF SMD** obtenemos una potencia de 541.05μw, que en los 29s que hemos medido son 15.69mJ.

EFICIENCIA

Analizamos **cuanta energía generamos con el piezoeléctrico**, para saber que **perdidas** tenemos y por lo tanto la **eficiencia** de nuestro sistema. Medimos la tensión y la corriente en C_{IN} para obtener la potencia y con ella la energía acumulada. Obtenemos una potencia de 854.23μw, que en los 29s que hemos medido son 24.77mJ.

De esta operación obtenemos la energía generada en el piezoeléctrico (entrada), por lo tanto, comparándola con la acumulada en la batería (salida) obtenemos una **eficiencia del 63.3%**, por lo tanto, unas **pérdidas** en el circuito del **36.7%**.

Estos porcentajes son simplemente **orientativos** sobre que valores de eficiencia podemos obtener, ya que todas las medidas tienen su parte de error que hace que los resultados no sean muy precisos. Además, estamos trabajando con un montaje de circuito en placa blanda, por lo que esta eficiencia podría mejorar en una **PCB** diseñada como la que mostramos más adelante (**y Anexo V**).

ASOCIACIÓN PIEZOS

Analizamos las diferentes formas de **combinar los piezoeléctricos**, ya sea en **serie** o en **paralelo**. Para los casos de, dos piezoeléctricos en paralelo y dos en serie, obtenemos los resultados de energía almacenada de la **Tabla 15**:

| Configuración | Energía (mJ) (en 29s) |
|-------------------------------|-----------------------|
| Dos piezos en paralelo | 67.45 |
| Dos piezos en serie | 103.03 |

Tabla 15: Tensiones medias de las diferentes combinaciones de los piezoeléctricos.

Comprobamos que, en ambos casos, ya sea porque se obtiene mayor corriente, al ponerlos en paralelo, o más tensión, al ponerlos en serie, **la cantidad de energía generada aumenta**, unas dos y cuatro veces respectivamente. Esto demuestra que la conexión de varios piezoeléctricos tanto en serie como en paralelo colocados en la suela del calzado se traducirá en una mayor generación de energía.

4.4.2. Predicciones

A partir de los datos obtenidos se pueden hacer predicciones de lo que podríamos obtener con un **prototipo real**:

| Tiempo corriendo | Energía del piezoeléctrico (mJ) | Energía batería (mJ) | Tiempo usando dispositivo |
|------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 29s | 24.77 | 15.69 | 0.8s |
| 10min | 512.79 | 324.59 | 16s |
| 30min | 1538.38 | 973.79 | 50s |
| 1h | 3076.77 | 1947.59 | 100s / >1min |

Tabla 16: Resumen de predicciones para un piezo.

En la **Tabla 16** analizamos el tiempo que podríamos usar un dispositivo portátil (*wearable*) típico que consuma 2V y 10mA, usando **un único piezoeléctrico**. En 1h almacenaríamos energía para alimentarlo unos **100s**.

En la **Tabla 17** analizamos **dos piezoeléctricos** en serie y el tiempo es cuatro veces mayor, unos **400s**.

| Tiempo corriendo | Energía del piezoeléctricos (mJ) | Energía batería (mJ) | Tiempo usando dispositivo |
|------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 29s | 103.02 | 65.19 | 3s |
| 10min | 2132.12 | 1349.63 | 70s / >1 min |
| 30min | 6396.38 | 4048.91 | 200s / >3 min |
| 1h | 12792.77 | 8097.82 | 400s / >6min |

Tabla 17: Resumen de predicciones para dos piezoeléctricos en serie.

Estos resultados son simplemente **predicciones** que deberían comprobarse, pero nos pueden dar una idea de la cantidad de energía que podríamos obtener colocando varios de estos piezoeléctricos en la suela de un calzado convencional.

4.5. Diseño del circuito y de la PCB

Aunque por mayor comodidad y por tiempo hemos trabajado con el módulo anteriormente presentado, diseñamos el esquemático y la PCB de nuestro producto final para tener una orientación de sus **dimensiones** y poder estudiar su **implementación real** en el calzado de forma cómoda y eficiente.

Dado que las medidas y comprobaciones sobre el funcionamiento ya estarán cubiertas, con esto simplemente comprobaremos que la adaptación de esta tecnología a su aplicación en el calzado se puede llevar a cabo sin afectar a la estética y a su comodidad, y asegurando la protección del dispositivo para su correcto funcionamiento.

Una vez diseñado nos damos cuenta de que la placa es del mismo tamaño, incluso menor que la batería que vamos a utilizar. El dispositivo iría integrado en la zona del talón de la zapatilla, que es donde mayor espacio disponemos y donde mejor se puede integrar. Una zapatilla común, sobre un 40/43, tiene unos 7cm x 7cm ($4900mm^2$) y 3cm de alto. En el **Anexo V** podemos ver la **PCB**, cuyo tamaño es de 1.8cm x 2cm ($360mm^2$), perfectamente adaptable a una zapatilla común y con margen para calzados mucho más pequeños. La batería iría conectada en la ficha “B”, en paralelo a la placa, y no superaría los 3cm de alto, y los piezoeléctricos se distribuirían por la suela.

El **esquemático del Anexo V** consta de los siguientes componentes. Se ha estimado un presupuesto con referencias del distribuidor *Mouser Electronics*:

| Componente | Nº del Fabricante | Fabricante | Descripción | Precio por unidad |
|---|--------------------|---------------------|--|--------------------|
| Integrado del LTC3588-1 | LTC3588EDD-2#PBF | Analog Devices Inc. | Productos de gestión de potencia especializada - PMIC Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply | 6,23 € |
| Condensadores de 4.7µF | 08056D475KAT2A | AVX | Condensadores de cerámica multicapa (SMD), 6.3V, 4.7uF y 10%TOL | 0,47 € |
| Condensadores de 1µF | 0603B105K160CT | Walsin | Condensadores de cerámica multicapa (SMD), 1.0uF, +-10% y 16V | 0,14 € |
| C_{IN} que mejores resultados nos ha dado anteriormente y el mismo C_{OUT} | GRM21BR61E106MA73L | Murata | Condensadores de cerámica multicapa (SMD), 10uF , 25volts | 0,25 € |
| Diodo Schottky | BAT1504RE6152HTSA1 | Infineon | Diodos y rectificadores Schottky RF DIODES | 0,44 € |
| Inductor | LPD4012-331NRC | Coilcraft | Inductores acoplados LPD4012 Low Profile 33uH SMD | 1,34 € |
| Regulador de tensión | TPS82740ASIPR | Texas Instruments | Convertidores CC/CC no aislados 200-mA Stp-Dwn Converter | 2,45 € |
| | - | | | Presupuesto |
| | - | | | 11,32 € |

Tabla 18: Componentes del esquemático del Anexo V.

El **regulador de tensión** está controlado por la salida PGOOD, para tener una tensión a la salida de 2V (tensión típica de los dispositivos inalámbricos para los que se pretende diseñar esta tecnología).

Podemos ver la **parte de recolección** en la **Ilustración 30**. Por la ficha “P” se conecta el piezoeléctrico, que genera los pulsos de tensión, y a su vez se conecta a las patillas 1 y 2 del integrado “R” (LTC3588-1). En la patilla 4 conectamos el condensador C_{IN} donde se irá acumulando la tensión una vez rectificada por el integrado “R”. En la patilla 4 también tenemos

se podía corregir. De todas formas, teniendo en cuenta esto se puede llevar a cabo una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

En cuanto al **circuito de acondicionamiento**, uno de los objetivos principales era el de conseguir que el almacenamiento de energía fuera lo más óptimo posible, con las mejores pérdidas posibles ya que la generación de energía era muy baja. En este sentido se han realizado muchos experimentos para mejorar esta característica, y se ha conseguido en gran medida, comparando resultados con diferentes componentes y variando las diferentes características de los mismos. Aun así los resultados finales son bastante orientativos debido a ciertas aproximaciones que se han tenido que llevar a cabo y a que por tema de tiempo no se han podido realizar grandes mediciones, con un prototipo final y en intervalos grandes de tiempo y situaciones de aplicación reales que corroboren lo que se ha calculado.

En cuanto a la **construcción de un prototipo funcional**, se ha diseñado, tanto un esquemático y una PCB, como un prototipo de laboratorio para realizar pruebas y verificar el funcionamiento del circuito diseñado. Aun así, lo más importante de este apartado, tomar medidas, se consigue con el montaje en placa blanca, y con el esquemático y PCB diseñadas se puede analizar el tamaño e implantación de este en una posible aplicación real.

- Como **conclusión final** se puede decir que se han alcanzado los objetivos principales, y se han obtenido los resultados buscados.
Habría sido de utilidad tener resultados con experimentos más grandes como por ejemplo acoplar el prototipo a una zapatilla y probar su funcionamiento haciendo un largo recorrido tanto caminando como corriendo para corroborar las mediciones del laboratorio y así conseguir cerrar el trabajo de una forma más visual de los resultados.
- En cuanto a **objetivos futuros** para continuar con este trabajo tanto la prueba de piezoeléctricos de mayor calidad, como el acoplamiento a un calzado real de un prototipo en una PCB y la realización de mediciones a mayor escala podrían serlo.
La parte de análisis e implementación de la alimentación de dispositivos *wearable* sería el siguiente paso, ya que en este trabajo se ha llegado hasta el almacenamiento de la energía, que luego se tendrá que adecuar para alimentar estos dispositivos. En el diseño del esquemático y la PCB se incluye un regulador para adaptar la salida de nuestro prototipo para alimentar un dispositivo *wearable* típico.
- En cuanto a las **sensaciones personales**, el aprendizaje ha sido muy grande. Al principio en la búsqueda de información, se ha aprendido cómo y dónde buscar, a analizar la importancia de la información y su posible utilidad, y a saber elegir cual es relevante o no en el trabajo que estamos realizando. A la hora de realizar mediciones se han ido viendo las diferentes posibilidades y las pruebas que eran necesarias para llegar a los objetivos planteados. También se ha aprendido a superar situaciones adversas encontrando soluciones a estas para poder continuar con el trabajo dentro del tiempo disponible, y a priorizar unas tareas en detrimento de otras en función de su relevancia dentro del propio trabajo (ha habido varias partes del trabajo que se han alargado más

de lo que en principio se podría esperar, como por ejemplo la caracterización de los piezoeléctricos o la optimización del circuito de acondicionamiento).

6. Bibliografía

- Chua, H. G., Kok, B. C., & Goh, H. H. (2014). *citeseerx*. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.736.8244&rep=rep1&type=pdf>
- Elham Maghsoudi, N. (2017). *iopscience*. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/291/1/012026/pdf>
- Gómez Molina, Á. (18 de junio de 2018). *e_Buah*. Obtenido de https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- labjack*. (s.f.). Obtenido de <https://labjack.com/products/t7>
- Li, H., Tian, C., & Deng, Z. D. (6 de noviembre de 2014). *aip.scitation*. Obtenido de <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4900845?class=pdf>
- Ochoa, P., Villegas, M., & Fernández, J. F. (24 de 01 de 2001). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Obtenido de <http://boletines.secv.es/upload/20090505114136.200140301.pdf>
- Palosaari, J. (13 de diciembre de 2017). *jultika*. Obtenido de <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526217130.pdf>
- Pérez Lepe, A., Fernández Lozano, J. F., Ochoa Pérez, M. P., & Urquiza Cuadros, D. (Tercer trimestre de 2015). *asefma*. Obtenido de http://www.asefma.es/wp-content/uploads/2015/11/21_apelepe.pdf
- Sepúlveda Orozco, E. (2014). *bdigital*. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/47308/1/1128267719.2015.pdf>
- Shenck, N. S., & Paradiso, J. A. (mayo-junio de 2001). *IEEE Computer Society*. Obtenido de <https://resenv.media.mit.edu/pubs/papers/2001-Shenck-Paradiso.pdf>
- Vázquez Rodríguez, M., Jiménez Martínez, F. J., & de Frutos, J. (enero-febrero de 2012). *oa.upm*. Obtenido de http://oa.upm.es/20225/1/INVE_MEM_2012_131573.pdf
- Wu, L., Chure, M.-C., Wu, K.-K., & Tung, C.-C. (octubre de 2014). *file.scirp*. Obtenido de https://file.scirp.org/pdf/MSCE_2014102815390433.pdf