

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía”

Arturo Martín Malmcrona

Tutor

Domingo Javier Urquiza Cuadros

Leganés, 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons
Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

RESUMEN

La demanda energética global hace años que va en aumento, lo que ha llevado a que se habrán nuevos campos de investigación y desarrollo en las nuevas tecnologías de generación. A esto hay que sumarle que cada vez hay más dispositivos que necesitan alimentación eléctrica para su funcionamiento, aunque este sea reducido.

El presente trabajo tiene como objeto el estudio del aprovechamiento de energías residuales para su transformación a energía eléctrica.

Se propone y presenta el diseño de un sistema capaz de recuperar la energía mecánica producida por los vehículos a su paso por una carretera gracias al efecto piezoeléctrico. Para ello se hace una evaluación del efecto piezoeléctrico, de sus principales características y modelos matemáticos que lo representan. Así mismo se hace un estudio de la dinámica y tipo de onda generada, se proponen diferentes opciones de instalación de piezoeléctricos en las carreteras y se modela el efecto a gran escala que permitiría recuperar la energía a partir del tráfico.

Por último se proponen otros entornos como fuente para la recuperación de energía, así como posibles aplicaciones donde utilizar la energía obtenida.

Palabras clave

Piezoeléctrico; Generador; “Energy Harvesting”

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Estructura del proyecto..... | 3 |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 6 |
| 2.1. El efecto piezoeléctrico | 6 |
| 2.1.1. Introducción al efecto piezoeléctrico..... | 6 |
| 2.1.2 Los materiales piezoeléctricos..... | 9 |
| 2.1.3. Fabricación y conformado | 13 |
| 2.1.4. Aplicaciones | 15 |
| 2.2. Estudio y caracterización de los piezoeléctricos | 18 |
| 2.2.1. Medida y caracterización de los piezoeléctricos | 18 |
| 2.2.2. Circuito equivalente..... | 23 |
| 2.2.3. Tipos de conexión (serie – paralelo)..... | 27 |
| 2.3. Recuperación de almacenamiento de la energía generada | 29 |
| 2.3.1. Modelo del sistema de “ <i>Energy Harvesting</i> ” | 29 |
| 2.3.2. Estructura mecánica..... | 30 |
| 2.3.3. Transductor piezoeléctrico | 31 |
| 2.3.4. Circuito eléctrico | 32 |
| 3. PROPUESTA DE MODELO DE PIEZOELÉCTRICO | 34 |
| 3.1. Elección del software simulador | 34 |
| 3.2. Caracterización del PZT NCE51 | 37 |
| 3.3 Configuración de conexiones del PZT | 42 |
| 3.4. Modelado del circuito de carga | 47 |
| 4. CASO DE ESTUDIO: VEHÍCULOS | 53 |
| 4.1. Definición del entorno..... | 53 |

| | |
|---|-----|
| 4.1.1. Datos de tráfico..... | 53 |
| 4.1.2. Modelado del vehículo ligero..... | 55 |
| 4.1.3. Modelado del vehículo pesado..... | 58 |
| 4.2. Colocación de los PZTs..... | 60 |
| 4.2.1. Conexión serie paralelo de 16 PZTs..... | 60 |
| 4.2.2. Conexión paralelo de 8 PZTs..... | 66 |
| 4.2.3. Conexión en paralelo de 4 PZTs..... | 68 |
| 4.2.4. Diseño de alta densidad de PZTs..... | 70 |
| 4.3. Estudio de aplicación..... | 73 |
| 4.3.1. Modelado de circuito equivalente..... | 73 |
| 4.3.2. Cálculo de potencia por módulo de PZTs..... | 75 |
| 4.4. Posibles aplicaciones viales..... | 76 |
| 4.4.1. Alimentación de panel de mensaje variable (PMV)..... | 76 |
| 4.4.2. Iluminación..... | 77 |
| 4.4.3. Alimentación de señal de advertencia..... | 80 |
| 4.4.4. Alimentación de dispositivos de baja potencia..... | 82 |
| 5. CASO DE ESTUDIO: OTRAS APLICACIONES..... | 84 |
| 5.1. Recuperación de energía mecánica producida por peatones..... | 84 |
| 5.2. Calzado con transductores piezoeléctricos..... | 86 |
| 5.3. Vías ferroviarias..... | 89 |
| 5.4. Otras aplicaciones..... | 94 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 96 |
| 6.1. Conclusiones..... | 96 |
| 6.2. Recomendaciones para futuros trabajos..... | 98 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 100 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Efecto piezoeléctrico directo e inverso | 7 |
| Figura 2: Respuestas en función del tipo de excitación aplicada sobre el material piezoeléctrico | 8 |
| Figura 3: Modelo molecular simple..... | 11 |
| Figura 4: El efecto piezoeléctrico | 12 |
| Figura 5: Estructura de la Perovskita (PZT) | 13 |
| Figura 6: Proceso de polarización..... | 14 |
| Figura 7: Circuito equivalente de un piezoeléctrico | 23 |
| Figura 8: Simplificación de los valores del circuito equivalente..... | 24 |
| Figura 9: Valores equivalentes de resistencia e inductancia en función de la frecuencia | 25 |
| Figura 10: Modelo de circuito equivalente de piezoeléctrico cantiléver | 25 |
| Figura 11: Modelo de circuito equivalente piezoeléctrico..... | 26 |
| Figura 12: Circuito equivalente simple de generador piezoeléctrico con impedancias en serie | 26 |
| Figura 13: Stack de piezoeléctricos | 28 |
| Figura 14: Potencia entregada por stack de PZTs..... | 28 |
| Figura 15: Medidas de tensión en circuito abierto..... | 29 |
| Figura 16: Sistema de " <i>Energy Harvesting</i> " | 30 |
| Figura 17: Rectificación de onda generada por piezoeléctrico | 32 |
| Figura 18: Circuito convertidor para carga de baterías a partir del efecto piezoeléctrico | 33 |
| Figura 19: Modelo de circuito simple en Simulink | 35 |
| Figura 20: Modelo de circuito simple en Multisim | 36 |
| Figura 21: Voltaje pico frente a la tensión aplicada para un PZT NCE51 | 39 |
| Figura 22: Circuito equivalente simplificado | 40 |
| Figura 23: Onda generada por NCE51 al aplicar una fuerza de 686,7 N con una frecuencia de 1 Hz | 41 |
| Figura 24: Onda generado por NCE51 al aplicar fuerzas variables separadas en el tiempo | 41 |
| Figura 25: 25 Piezoeléctricos colocados en 5 series de 5 | 43 |
| Figura 26: 25 Piezoeléctricos conectados en 5 series de 5 | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 27: Circuito equivalente de n PZTs conectados en paralelo..... | 45 |
| Figura 28: Circuito equivalente de n PZTs conectados en serie..... | 46 |
| Figura 29: Señales producidas por los PZTs..... | 47 |
| Figura 30: Onda generada por un piezoeléctrico al paso de vehículos a 90 km/h cada 2 segundos..... | 48 |
| Figura 31: Modelo con onda rectificada | 48 |
| Figura 32: Condensador de filtrado | 49 |
| Figura 33: Regulador de tensión | 50 |
| Figura 34: Circuito de carga simple completo..... | 50 |
| Figura 35: Evolución de la forma de onda de impulsos según bloques del circuito..... | 51 |
| Figura 36: Circuito con 4 PZTs conectados en paralelo | 52 |
| Figura 37: Foto satélite del tramo de carretera a estudio para el modelo. | 54 |
| Figura 38: Superficie de contacto entre el neumático y la carretera..... | 56 |
| Figura 39: Circuito equivalente para vehículo ligero | 57 |
| Figura 40: Onda equivalente 2 vehículos ligeros circulando a 96Km/h, con una separación de 5 segundos entre su paso..... | 58 |
| Figura 41: Circuito equivalente para vehículo pesado..... | 59 |
| Figura 42: Onda equivalente vehículos pesados..... | 60 |
| Figura 43: Panel tipo "Sándwich" para montaje de 16 transductores..... | 61 |
| Figura 44: Conexión de los PZTs en serie-paralelo..... | 61 |
| Figura 45: Circuito equivalente baldosa serie-paralelo | 62 |
| Figura 46: Montaje de los PZTs para alimentar una carga | 63 |
| Figura 47: Modelo para cálculo de potencia entregada por la baldosa..... | 64 |
| Figura 48: Gráfica de potencia entregada para modelo de 16 PZTs en serie-paralelo ... | 65 |
| Figura 49: Panel tipo "Sándwich" para montaje de 8 PZTs..... | 66 |
| Figura 50: Circuito equivalente baldosa de 8 PZTs en paralelo | 66 |
| Figura 51: Gráfica de potencia entregada para modelo de 8 PZTs en paralelo | 68 |
| Figura 52: Panel tipo "Sándwich" para montaje de 4 PZTs..... | 68 |
| Figura 53: Gráfica de potencia entregada para modelo de 4 PZTs en paralelo | 70 |
| Figura 54: Gráfica de potencia entregada para modelo de 120 PZTs en paralelo | 72 |
| Figura 55: Colocación de piezoeléctricos en filas de 625 baldosas bajo las bandas de rodadura. | 72 |
| Figura 56: Circuito equivalente en condiciones de tráfico normales..... | 74 |
| Figura 57: Tensión en la carga para un módulo en condiciones normales para $1M\Omega$ | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 58: Regulador de corriente colocado como protección entre el módulo y la carga. | 75 |
| Figura 59: Curva de potencia para un módulo de PZTs en condiciones de tráfico normales..... | 76 |
| Figura 60: Ejemplos de PMV utilizados en las carreteras españolas..... | 77 |
| Figura 61: Luminaria propuesta por DIALux para iluminación de carretera de 3 carriles | 78 |
| Figura 62: Potencia en carriles central e izquierdo en condiciones de tráfico normales. | 79 |
| Figura 63: Esquema de montaje general de módulos de PZTs y luminarias..... | 79 |
| Figura 64: Gráfica de potencia frente a resistencia equivalente para la potencia instantánea producida por un vehículo | 81 |
| Figura 65: Circuito equivalente de señal de peligro activada con PZTs..... | 82 |
| Figura 66: Montaje de módulo de PZTs para iluminar una señal de advertencia..... | 82 |
| Figura 67: Baldosa con montaje piezoeléctrico,..... | 84 |
| Figura 68: Potencia frente a resistencia de carga en el caso de peatones caminando sobre baldosa piezoeléctrica | 86 |
| Figura 69: Forma de onda generada por un PZT en una zapatilla, considerando un ritmo de 2 pasos por segundo | 87 |
| Figura 70: Circuito equivalente de PZT colocado en zapatilla..... | 88 |
| Figura 71: Potencia frente a resistencia de carga en el caso de piezoeléctrico colocado en una zapatilla, considerando un ritmo constante de 2 pasos por segundo | 89 |
| Figura 72: Esquema de piezoeléctricos colocados en las vías ferroviarias | 90 |
| Figura 73: Valor de la fuerza aplicada sobre el piezoeléctrico C, en función de la posición de la rueda | 91 |
| Figura 74: Circuito equivalente a eje de un tren pasando de forma constante a una velocidad de 50 km/h..... | 92 |
| Figura 75: Potencia frente a resistencia de carga en el caso de 8 piezoeléctricos colocado en una traviesa trabajando a frecuencia de paso continua | 93 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Relación estímulo-respuesta de los materiales inteligentes..... | 6 |
| Tabla 2. Materiales piezoeléctricos más comunes según su naturaleza..... | 9 |
| Tabla 3: Constantes piezoeléctricas..... | 23 |
| Tabla 4: Propiedades del PZT NCE51..... | 38 |
| Tabla 5: Voltaje pico frente según la fuerza aplicada para piezoeléctrico NCE51 (datos teóricos)..... | 39 |
| Tabla 6: Datos IMD del tramo a entre Leganés y Getafe/Villaverde. M-45..... | 54 |
| Tabla 7: Valores obtenidos en modelo serie-paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos)..... | 65 |
| Tabla 8: Valores obtenidos en modelo paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos)..... | 67 |
| Tabla 9: Valores obtenidos en modelo de 4 PZTs en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos)..... | 69 |
| Tabla 10: Valores obtenidos en modelo de 120 PZTs en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos)..... | 71 |
| Tabla 11: Valores obtenidos en módulo de 2 5metros y un carril de 4 PZTs en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos)... | 75 |
| Tabla 12: Distribución del consumo de luminarias en las carreteras en función de la hora..... | 80 |
| Tabla 13: Valores de potencia en función de la resistencia de carga, caso de baldosa peatonal pzt..... | 85 |
| Tabla 14: Valores de potencia en función de la resistencia de carga, caso pzt en calzado..... | 88 |
| Tabla 15: Valores de potencia para una traviesa, en condiciones de paso de ejes constantes..... | 93 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

En la actualidad, la explotación y aprovechamiento de las fuentes de energía renovables se mantienen en apogeo, y esto no se debe únicamente a la sensibilización social por las ventajas del cuidado del medioambiente. Lo cierto es que, debido al avance tecnológico en el sector energético, cada vez es más atractivo en términos económicos, además de sostenible apostar por este tipo de tecnologías. Es por ello que con el avance del tiempo cada vez se estudian y desarrollan nuevas formas de obtención de energía.

Además, la posibilidad de colocar los puntos de generación cerca de los de consumo, teniendo una red eléctrica más equilibrada supone un gran ahorro en las pérdidas debidas al transporte de la energía eléctrica. Esto y que los usuarios conectados a una red puedan ser tanto generadores como consumidores según el momento en el que nos encontremos son dos de las principales características de una red integrada inteligente o “*Smartgrid*”.

Según describe Red Eléctrica de España en su página web: *“Una red inteligente es aquella que puede integrar de forma eficiente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella, de tal forma que se asegure un sistema energético sostenible y eficiente, con bajas pérdidas y altos niveles de calidad y seguridad de suministro.”* [1] Lo que parece estar claro es que tendemos hacia un modelo como ese, y por ello se hace tan interesante el estudio que se plantea.

Introducimos también un término que aunque no es nuevo si podemos decir que cada vez es más utilizado, se trata del “*Energy Harvesting*”. La traducción directa al castellano es “Cosechamiento de Energía”, y su naturaleza consiste en el aprovechamiento de energías que se encuentran en el entorno, como puede ser, calor, viento, energía cinética o solar. Esta energía se almacena y se utiliza posteriormente para la alimentación de pequeños dispositivos electrónicos, sensores, o cualquier tipo de aparato de consumo reducido y desconectado de la red.

Además de estos conceptos, un campo de estudio interesante para la optimización energética es estudiar los campos en los que sabemos que exista una energía residual que actualmente no se esté aprovechando. En el caso de los vehículos a motor, hace ya tiempo que los fabricantes comencamos a reutilizar la energía que se pierde en las

frenadas para alimentar una batería interna que posteriormente se utiliza como propulsión del vehículo (como es el ejemplo de los coches híbridos).

El estudio deber ir más allá del reaprovechamiento que realice el propio vehículo en sí de sus energías residuales internas. Este mismo automóvil interactúa con otros elementos que también pueden ser un campo de interés, principalmente la presión que ejerce sobre la vía al paso por la misma o el viento que genera al circular a gran velocidad.

Además de dispositivos eólicos, que no se van a estudiar en este trabajo, los materiales piezoeléctricos ofrecen una gran oportunidad para instalar generadores de “*Energy Harvesting*”. Los piezoeléctricos se pueden utilizar por tanto para transformar la energía residual generada por los vehículos de motor que pasan por una carretera en forma de presión sobre la superficie a energía eléctrica.

En la actualidad ya existen varios proyectos en los que gracias al efecto piezoeléctrico, se aprovecha lo que hasta ahora habían sido pérdidas energéticas, paneles que se iluminan al paso de los peatones, zapatos con dispositivos capaces de generar electricidad para cargar el teléfono móvil o incluso una pista de baile piezoeléctrica (existen ya varias en el mundo), que consigue aprovechar la energía de las personas que se encuentran bailando sobre ella. [2]

Si a esto a la vez le añadimos el avance tecnológico que se ha producido durante los últimos años en el área de la iluminación con la aparición de nuevas luminarias de LEDs, que hacen un uso mucho más eficiente de la energía, hace que sea posible pensar en carreteras altamente transitadas que se iluminen únicamente gracias al paso de los mismos vehículos. Incluso carreteras inteligentes, que no solo se iluminen únicamente por la propia carga del tráfico, si no que se encienda o apague la iluminación en función de si pasa algún vehículo o no.

Por ello el estudio de este trabajo consiste en el aprovechamiento de la energía residual utilizando el efecto piezoeléctrico. Baldosas en calles peatonales, zapatos con cargadores de teléfonos, generación en vías ferroviarias, en pistas de despegue y aterrizaje, carreteras... Las oportunidades de desarrollo para esta tecnología son muy amplias, pero nos basaremos en el estudio principal de las carreteras, donde el propio paso de los vehículos pueda convertirse en una fuente de energía.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en la creación de un modelo de estudio para sistemas de “*Energy Harvesting*” a través del efecto piezoeléctrico. A partir de dicho modelo teórico, deberá ser posible calcular estimaciones de potencia obtenidas en distintos sistemas según sus condiciones de contorno. Para ello se generará un modelo en un software simulador de circuitos capaz de reproducir estos parámetros y por tanto servir como estudio previo para posibles fases de prototipado.

Con el modelo generado se hará una proposición sobre cómo se podrían utilizar los materiales piezoeléctricos en carreteras altamente transitadas para crear un modelo de “*Energy Harvesting*”. Para ello se pretende crear un sistema capaz recuperar gran parte de la energía residual causada por la presión que ejercen las ruedas de los vehículos al circular sobre la vía.

Se propondrá el diseño de un sistema de iluminación inteligente y autosuficiente, para ello las luminarias solo tendrán que encenderse en caso de que algún vehículo esté transitando la vía, y la energía para utilizada para la iluminación deberá estar alimentada por los piezoeléctricos que transformen las energías residuales producidas por el tráfico de vehículos.

Además se simularán diferentes modelos de aplicaciones tanto viales como de otras características que servirán tanto para probar el modelo como para estimar energías que se podrían obtener en diferentes aplicaciones.

1.3. Estructura del proyecto

Para la consecución de los objetivos del trabajo se ha estructurado en los capítulos que se muestran a continuación:

- Introducción

Aquí se hace una breve introducción al tema, marcando los objetivos a conseguir así como la estructura del proyecto, intentando de esta manera ayudar al lector en la medida de lo posible para poder entender bien el estudio.

- Revisión bibliográfica

Este capítulo se divide en tres bloques principales:

- El efecto piezoelectrico:

En este bloque lo que se pretende es conocer el estado del arte, ¿Qué son los materiales piezoelectricos? ¿Para qué se utilizan en la actualidad? ¿Existen áreas de desarrollo a futuro? Estas son las preguntas que debemos hacernos antes de poder adentrarnos en el tema de lleno, y es por eso que este capítulo aun pareciendo más trivial que los demás es de muy gran interés.

- Estudio de los piezoelectricos:

Aquí lo que se pretende es conocer más en detalle el funcionamiento de los transductores piezoelectricos. ¿Cómo reaccionan frente a la excitación mecánica? ¿Qué diferencias obtenemos al acoplarlos en paralelo o en serie? Estas son algunas de las preguntas a resolver en este capítulo, donde obtendremos como producto final el conocimiento suficiente como para poder llevar a cabo el estudio.

- Caracterización del modelo de carga

Dada la naturaleza del efecto piezoelectrico, lo más habitual para los dispositivos de “*Energy Harvesting*” es convertir la energía para su almacenamiento o adecuar para su uso. Por ello se estudiarán los modelos más utilizados con dichos fines con el objetivo de en las siguientes etapas ser capaces de diseñar un sistema adecuado.

- Propuesta de modelo de piezoelectrico

En este capítulo, lo que se pretende es poder caracterizar el modelo a estudiar, el objetivo principal es el estudio de la generación dada por la energía residual de los vehículos al pasar por las carreteras, ejerciendo presión a lo largo de su recorrido. Para ello será necesario crear un modelo del sistema a estudio, características del material, comportamiento frente a la excitación mecánica y modelado de un circuito de carga son algunos de los puntos más relevantes en este capítulo.

- Casos de estudio

Este capítulo se divide en cuatro bloques, con la finalidad de llegar a estudios sobre posibles aplicaciones y simulaciones. Los bloques son los que siguen:

- Definición del entorno:

Aquí se detallan las condiciones de contorno del sistema, es decir los datos del tráfico y las características de la vía. Además se generan los modelos de los diferentes vehículos así como su interacción con los materiales piezoeléctricos.

- Colocación de los PZTs

Se proponen distintas disposiciones de los transductores con la finalidad de optimizar su colocación y así poder producir la energía necesaria para alimentar las cargas que se estudiarán a continuación.

- Estudio de aplicación

Con los datos de los capítulos anteriores, aquí se pretende modelar un circuito equivalente válido para las condiciones de contorno definidas anteriormente. Además se realiza el cálculo de la potencia que según la solución definida se puede generar gracias al paso de los vehículos.

- Posibles aplicaciones viales

Finalmente con estos datos calculados se estudian las potenciales aplicaciones en las que el uso de este tipo de generación puede ser una buena solución.

- Conclusiones

En este último capítulo se exponen las conclusiones del proyecto así como se proponen posibles áreas para proyectos futuros que pueden estar relacionados con el mismo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se lleva a cabo el estudio del estado del arte del efecto piezoeléctrico, en el se pretende recopilar información tanto del efecto, los materiales y las posibles aplicaciones existentes y potenciales.

2.1. El efecto piezoeléctrico

En este apartado, se tratará de describir la naturaleza del material piezoeléctrico, así como el efecto que provoca, entendiendo así su funcionamiento y las posibles aplicaciones. Para el alcance del trabajo es de vital importancia conocer en detalle la naturaleza del fenómeno a estudiar para poder tomar las decisiones correctas respecto a cómo se puede sacar el máximo provecho a esta tecnología.

2.1.1. Introducción al efecto piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos son los que algunas fuentes denominan como “*smart materials*” o “*multifunctional materials*” (materiales inteligentes o multifuncionales)[3]. Estos son los que tienen la propiedad de responder de forma significativa a estímulos de diferentes naturalezas como ejemplo, mecánicas, magnéticas, térmicas o luz. En la siguiente tabla, se muestra con cada tipo de material, la equivalencia entre el tipo de excitación al que se somete y la respuesta.

TABLA 1: RELACIÓN ESTÍMULO-RESPUESTA DE LOS MATERIALES INTELIGENTES. [3]

| OUTPUT INPUT | DEFORMACIÓN | CARGA ELÉCTRICA | FLUJO MAGNÉTICO | TEMPERATURA | LUZ |
|-----------------|-------------------|--------------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| TENSIÓN | ELASTICIDAD | PIEZOELECTRICIDAD | MAGNETOSTRICCIÓN | | FOTOELASTICIDAD |
| CAMPO ELÉCTRICO | PIEZOELECTRICIDAD | PERMITIVIDAD | | | EFECTO ELECTRO-ÓPTICO |
| CAMPO MAGNÉTICO | MAGNETOSTRICCIÓN | EFECTO MAGNETO-ELÉCTRICO | PERMEABILIDAD | | MAGNETO-ÓPTICO |
| CALOR | EXPANSIÓN TÉRMICA | PIROELECTRICIDAD | | CALOR ESPECÍFICO | |
| LUZ | FOTOSTRICCIÓN | EFECTO FOTOVOLTAICO | | | REFRACCIÓN |

Los campos que se encuentran fuera de la diagonal, corresponden a los fenómenos que se dan en los materiales inteligentes. Los materiales que presentan este tipo de efectos

generalmente se utilizan como transductores de varios tipos, ya sean sensores o actuadores. Este trabajo se basará en el efecto piezoeléctrico, que se verá más en detalle en este capítulo, y que tenemos en relación con la tensión/deformación y el campo/carga eléctrica.

Fue en el año 1880, cuando los hermanos Pierre y Jacques Curie descubrieron que cuando se aplica una tensión mecánica (presión) sobre el cuarzo este se polariza, llegando a crear pequeños arcos eléctricos, a este fenómeno lo denominaron como efecto piezoeléctrico. Su etimología tiene origen en el griego, donde “piezein” significa apretar o estrujar, y eléctrico de electrón.

En términos muy generales podemos decir que el efecto piezoeléctrico es el que aparece en algunos materiales (principalmente algunos cristales y cerámicas) al aplicarles una carga mecánica estos reaccionan generando una carga eléctrica. Sin embargo también aparece este efecto en estructuras biológicas, tales como huesos, tendones, arterias, etc. [4]

Pero lo cierto, es que tal y como podemos observar en la tabla 1, se trata de un fenómeno bidireccional, eso quiere decir que de igual manera que existe el efecto piezoeléctrico directo, también existe el efecto piezoeléctrico inverso. En este caso, lo que ocurre es que al aplicar un campo eléctrico sobre un material de este tipo este presenta deformaciones físicas.

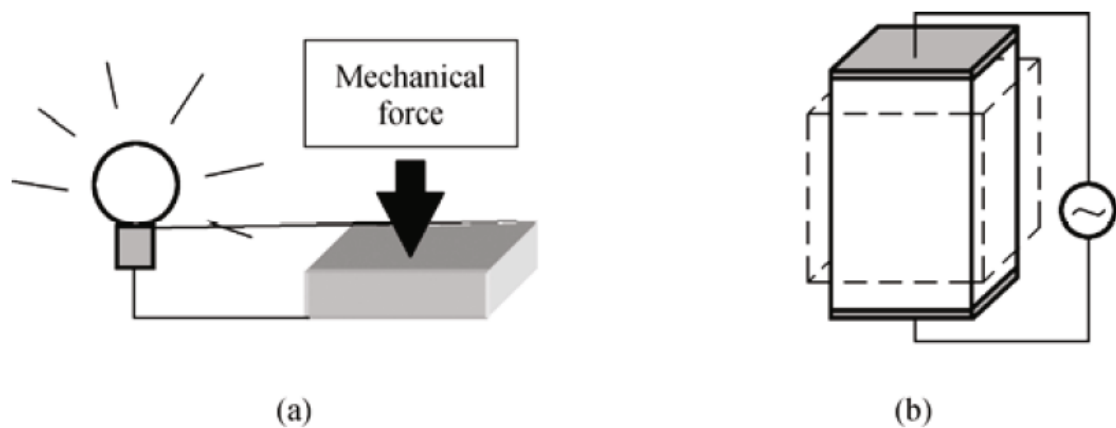


Figura 1: Efecto piezoeléctrico directo e inverso [5]

En la figura 1 se muestra un pequeño esquema del efecto piezoeléctrico directo e inverso. En el caso del efecto directo (a), al aplicar una fuerza mecánica sobre el material, se induce una diferencia de potencial, (ilustrado con una bombilla). En el caso del efecto inverso (b), al aplicar una diferencia de potencial sobre el piezoeléctrico este cambia de forma.

Por otra parte, además de la existencia del efecto directo y el inverso, en la gran mayoría de los casos se trata de un modelo reversible. Esto quiere decir que al dejar de aplicar la presión el material o al dejar de aplicarle la diferencia de potencial, este vuelve a su estado de reposo.

Además, la dirección de la polaridad podemos también determinarla en función de que se aplique una fuerza de presión o de tracción. En la siguiente figura se muestra de una forma muy sencilla las cuatro posibilidades que pueden existir en función de la excitación que se aplique sobre el material piezoeléctrico y la respuesta que se obtiene por la misma.

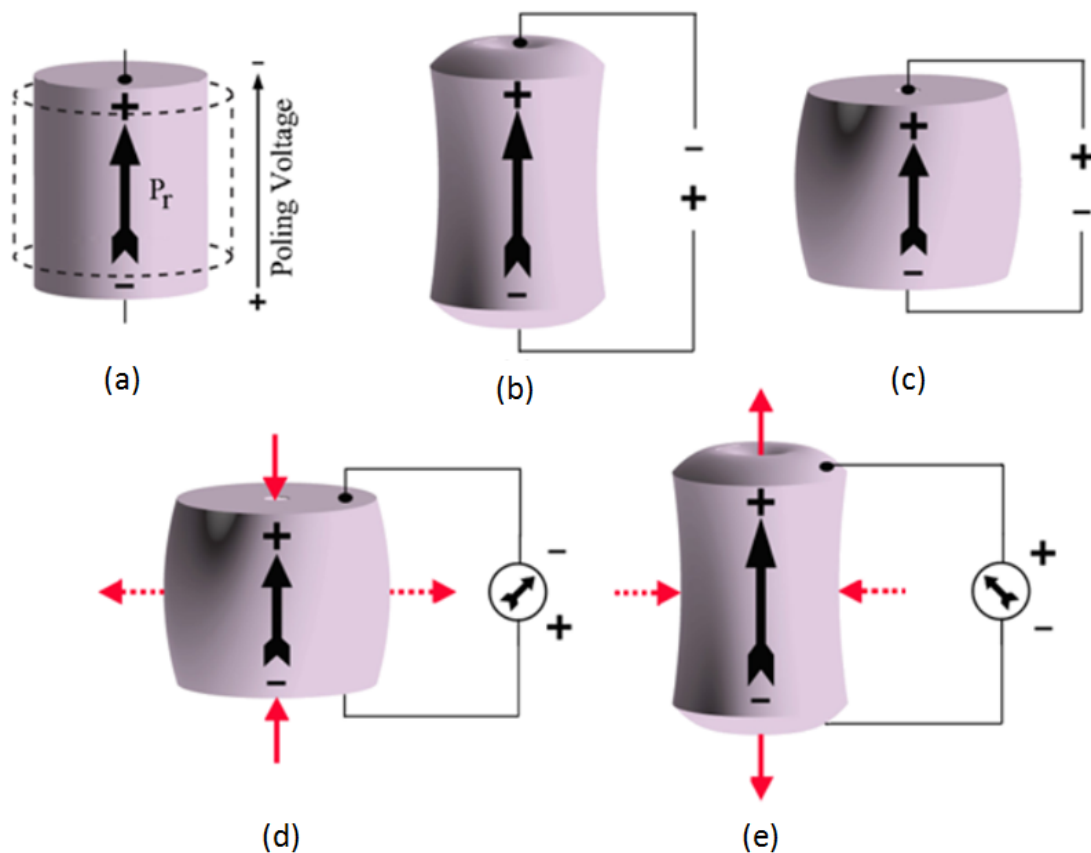


Figura 2: Respuestas en función del tipo de excitación aplicada sobre el material piezoeléctrico. [6]

Como podemos observar en la figura, (a) muestra la polaridad natural que muestra el material piezoeléctrico (o la generada en caso de ser un material sintético). En el caso de (b) al aplicar un campo eléctrico en la misma dirección que la polarización del material este se deforma alargándose, mientras en (c) tenemos el caso opuesto. En (d) y (e) se aplica una presión y una tracción, obteniendo como respuesta una carga eléctrica en un u otro sentido según el tipo de fuerza y la polarización.

2.1.2 Los materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos, son aquellos que muestran los efectos descritos anteriormente, y son materiales sin centro de simetría a nivel molecular, de hecho, es gracias a ello que estos se polaricen al deformarse o viceversa. Esto se debe a un desplazamiento de las cargas internas que veremos en detalle más adelante. Principalmente podemos dividir estos materiales en dos tipos, los naturales, que son los que se presentan el efecto piezoeléctrico sin tener que adaptarlos o modificarlos para ello. Y los sintéticos, estos hay que procesarlos para que presenten el efecto piezoeléctrico, en la siguiente tabla, se muestran unos pocos ejemplos de los más comunes de cada tipo.

TABLA 2. MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS MÁS COMUNES SEGÚN SU NATURALEZA [7]

| Naturales | Sintéticos |
|-----------------|---|
| Cuarzo | PZT (titaniato de plomo con zinconato) |
| Sal de Rochelle | PVDF (Polímero de fluoruro de polivinilideno) |
| Turmalina | Titanato de bario |
| Topacio | Óxido de Zinc |
| Sacarosa | |

Aunque fue con el cuarzo, y posteriormente con otros materiales que se encuentran en la naturaleza con los que los hermanos Curie, y otros científicos no descubrieron y determinaron el efecto piezoeléctrico lo cierto es que en la actualidad prácticamente la totalidad de los que se utilizan son materiales sintéticos. Pero no fue antes de los años

40 cuando se descubrió durante la segunda guerra mundial que algunos materiales cerámicos presentaban este tipo de propiedades.

Una vez introducido el concepto del efecto piezoeléctrico así como los materiales más comunes, se procede a definir su estructura en detalle y a explicar su comportamiento. Para ello se definirá la estructura, y se explicará en detalle que es lo que ocurre al excitarlos en la estructura tanto macroscópica como microscópica.

El efecto piezoeléctrico se da en cristales y cerámicas cuya estructura no tiene un centro de simetría, esto es una propiedad básica que deben cumplir los materiales, y es el motivo fundamental de su comportamiento. Al deformar dicho material macroscópicamente, este se deforma a nivel microscópico, es decir que en su estructura molecular se puede observar que se produce un desplazamiento en las cargas internas.[8]

A nivel molecular se observa una deformación de la célula elemental que crea un pequeño dipolo, y dado que esto ocurre en todo el volumen del sólido se suman todos estos pequeños dipolos llegando a generar un potencial eléctrico cuya dirección depende de la aplicación de la fuerza excitante.

Los dipolos de los monocristales o los dipolos formados por polarización, en el caso de los policristales conformados, generan una polarización en la superficie del material. Si se tratase de un sólido policristalino con sus cristales ordenados de forma aleatoria, no sería este el caso, pues los dipolos se anularían entre sí, llegando normalmente a un estado de equilibrio.

En la siguiente figura se muestra con un ejemplo muy simple como funciona el efecto piezoeléctrico a nivel molecular.

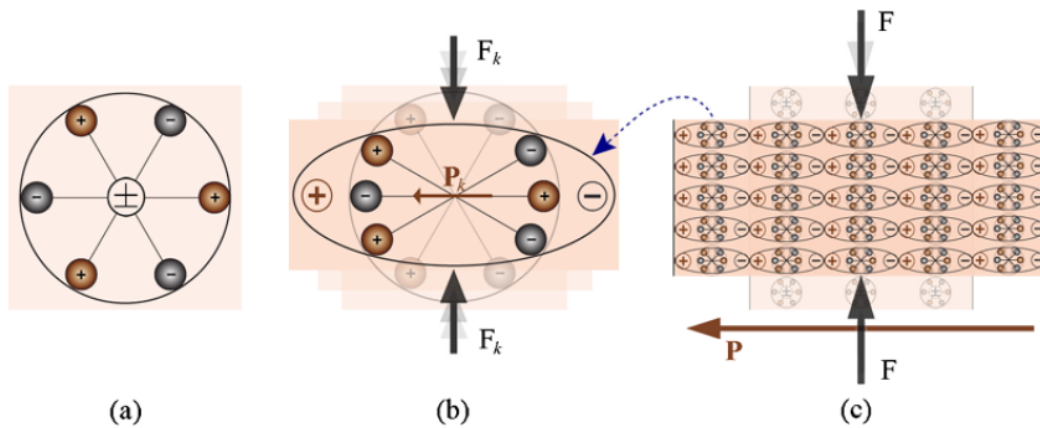


Figura 3: Modelo molecular simple. [6]

Como podemos observar en la figura, en la primera imagen, (a), se muestra la estructura molecular sin ningún tipo de excitación y con su centro de cargas en el centro del mismo, pues se anulan las cargas positivas con las negativas. En la figura (b), se le aplica a la misma molécula una presión F_k , deformando de esta forma la célula elemental y creando una polarización, como podemos observar en la parte derecha tenemos dos cargas negativas y una positiva, lo contrario que en el lado derecho, lo que genera este dipolo a nivel molecular. Finalmente en la figura (c) se puede ver como el sólido constituido por dicha estructura celular se polariza en su totalidad.

En la siguiente figura aparece este mismo sólido, colocando dos electrodos en sus superficies y haciendo un circuito simple. Al excitar mecánicamente el material y debido a la deformación, se genera una corriente eléctrica. Al dejar de excitar el material, este vuelve a su estado de reposo.

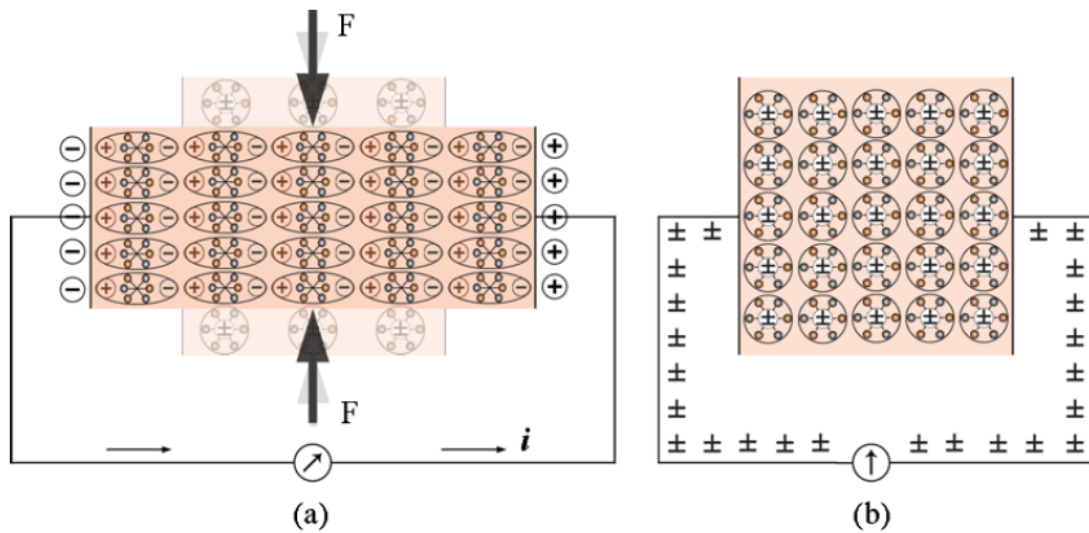


Figura 4: El efecto piezoeléctrico [6]

En este caso podemos ver como en la figura (a), al aplicar una fuerza F sobre el sólido piezoeléctrico, este se polariza y genera una corriente en el circuito descrito. En el caso de que el sólido se encuentre en reposo, no se está generando polarización eléctrica, y por tanto no existe ninguna corriente inducida sobre el circuito.

Debido a que el piezoeléctrico más utilizado es el PZT, a continuación se muestra la figura 6, donde se puede observar la estructura de la Perovskita, donde su átomo central, ya sea este titanio o circonio, se desplaza al deformarse, creando una polarización molecular.

El piezoeléctrico más utilizado está relacionado a una policristalina de provskita, $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$, a continuación se muestra la figura 6, donde se puede observar la estructura de la Perovskita, donde su átomo central, ya sea este titanio o circonio, se desplaza al deformarse, creando una polarización molecular.

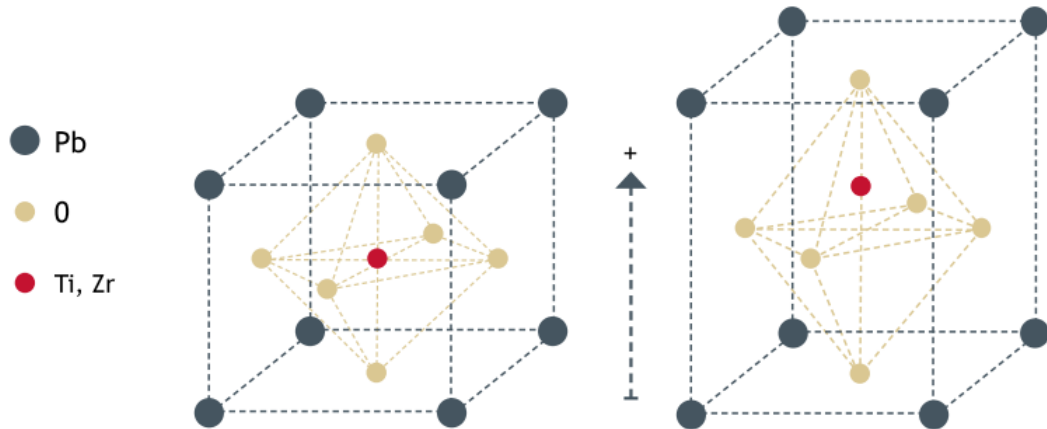


Figura 5: Estructura de la Perovskita (PZT) [9]

Se denomina perovskita a todo material que tenga la misma estructura que el titanato de calcio (CaTiO_3). El nombre de la Perovskita, proviene del mineralogista ruso Lev Perovski, y fue descubierta en el año 1839 en los montes Urales. Si bien es cierto que este mineral realmente fue descubierto por Gustav Rose, el que le puso el nombre en reconocimiento al trabajo de Perovski. [10]

Entre los años 40 y 50, se sintetizó en el Instituto Tecnológico de Tokio el denominado PZT, que es una perovskita con propiedades piezoeléctricas. Generalmente es el más utilizado de los materiales piezoeléctricos debido a su bajo coste y su buenas propiedades físicas y piezoeléctricas.[11]

2.1.3. Fabricación y conformado

Para conformar los materiales piezoeléctricos de forma artificial, o más bien, para polarizar estos para que presenten este efecto, se les realiza un proceso de polarización. Para ello, una vez ya conformado el material policristalino, como pudiera ser el PZT, que está compuesto por pequeños cristales, con sus propios dipolos en direcciones aleatorias, con lo que la suma total del sólido normalmente es nula hay que reordenar los dipolos en la misma dirección.

El proceso de polarización por tanto funciona de la siguiente manera: Primero se debe calentar el sólido policristalino por encima de la temperatura de Curie, que es la que al sobrepasarse permite que los dipolos de los cristales puedan cambiar su orientación. Todavía estando por encima de dicha temperatura se debe aplicar un campo potente eléctrico sobre el material, y manteniendo este campo dejar que el material se enfríe.

Durante el tiempo que este ha estado a mayor temperatura que la de Curie, y el campo eléctrico ha estado aplicado sobre el mismo, los dipolos se han ordenado, y una vez que se enfría se deja de aplicar el campo eléctrico.

Tras el proceso los cristales no quedan completamente alineados, pero si se obtiene un efecto de polarización remanente, y la suma de todos los dipolos crean no se anulan entre sí. Una vez realizado este proceso, el material cerámico ya es un piezoeléctrico de forma permanente. Como comentario, si este material se volviera a calentar sobre la temperatura de Curie, sería posible que perdiera total o parcialmente la polarización.

En la siguiente figura, se muestra como es el proceso descrito:

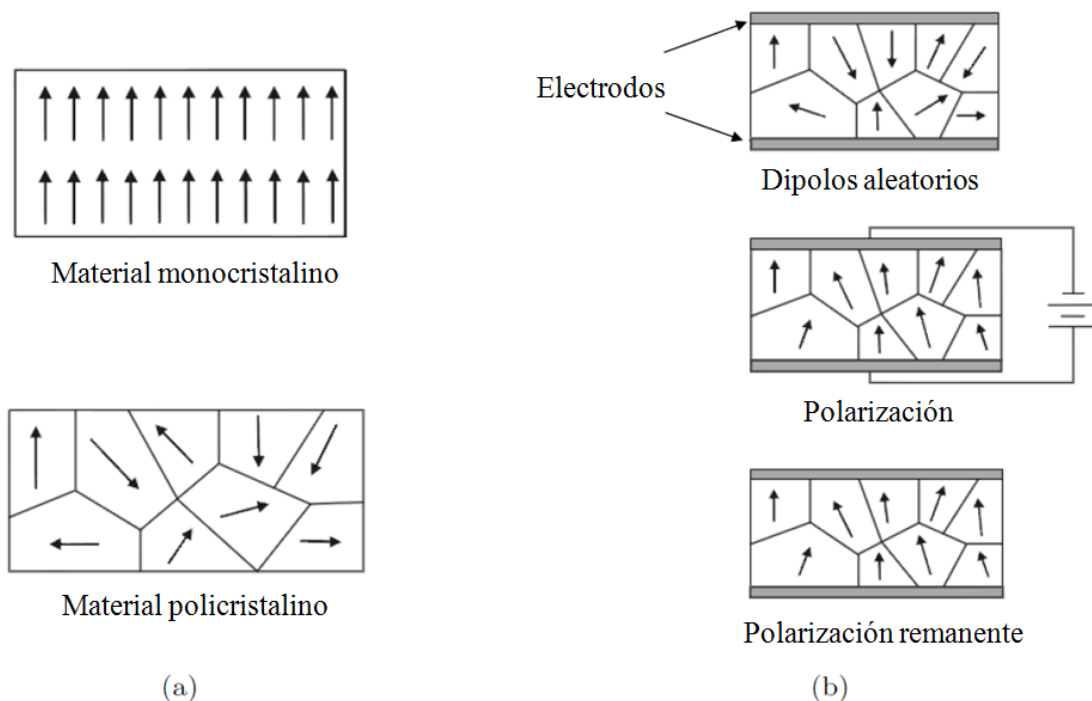


Figura 6: Proceso de polarización [12]

En (a) podemos observar en la parte superior un material monocristalino, donde toda la estructura macroscópica está compuesta por un solo cristal, mientras en la parte inferior, tenemos un material policristalino cuyos dipolos están ordenados de forma aleatoria teniendo por tanto una polaridad macroscópica nula. En (b) se observa el proceso descrito anteriormente.

Algunos de los fabricantes y distribuidores más accesibles son; Noliac, empresa danesa, en su página web se pueden encontrar numerosas tablas de características de sus materiales. Piezo Kinetics, que a su vez adquirió Channel Industries Inc. en 2017, que

es el mayor fabricante de Norteamérica. APC International, competidor de Piezo Kinetics, y Johnson Mattney, empresa alemana. Lo que resulta especialmente interesante de todos estos fabricantes, es que todos ellos fabrican también piezoeléctricos a medida según la aplicación que es le quiera dar.

En la actualidad, debido entre otros motivos a los requerimientos medioambientales para algunas aplicaciones, existen numerosos campos de estudio en los que se proponen nuevos materiales piezoeléctricos capaces de resolver las necesidades actuales. Por ello se proponen nuevos materiales sin plomo, como el $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$. (NBT) o el $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ (KNN) como candidatos sustitutos del PZT. Además también está creciendo el uso de los PVDF (Polímero de fluoruro de polivinilideno).[13][14]

2.1.4. Aplicaciones

Si bien el efecto piezoeléctrico no es nuevo, el auge de las nuevas tecnologías, su miniaturización y los avances en el uso eficiente de la energía, crean ahora las condiciones idóneas para evaluar el uso de posibles aplicaciones de este tipo de efecto.

El efecto piezoeléctrico fue descubierto hace más de 130 años, y aunque su uso como generadores sí que sea bastante joven, lo cierto es que este tipo de materiales se han utilizado en muy diversas aplicaciones, especialmente desde el descubrimiento de los piezoeléctricos sintéticos. A continuación se mostrarán algunas de las aplicaciones más comunes para este tipo de materiales.

La definición de transductor según la RAE es la siguiente: *“Dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.”*. [15] Esto hace que este tipo de materiales sean idóneos para utilizarse como tanto sensores como actuadores en sistemas que necesiten interactuar entre diferentes tipos de señales.

El primer ejemplo cotidiano en el que se utiliza un transductor piezoeléctrico es el caso del mechero, los mecheros que se encienden con un pequeño arco. En este caso el dispositivo funciona como actuador, básicamente, se aplica una tensión mecánica sobre una palanca, que a su vez presiona un material piezoeléctrico, que hace saltar una chispa sobre el gas que expulsa el propio mechero y lo prende. Este tipo de mecanismo se utiliza también en otros tipos de encendedores, generalmente hornillos, cocinas, barbacoas, etc.

Algunos teclados utilizan un impulso eléctrico generado por un transductor piezoeléctrico, estos generalmente presentan buenas condiciones para usos robustos, industriales, médicos o de exterior, incluso ya existen investigaciones de teclados que puedan generar una parte de la energía consumida por el dispositivo con el reaprovechamiento de la energía utilizada al escribir.

Micrófonos, altavoces o auriculares son otra aplicación cotidiana de los materiales piezoeléctricos que en este caso transforman ondas eléctricas en vibraciones y que posteriormente en sonido o viceversa. Algunas impresoras también utilizan actuadores piezoeléctricos como eyectores de tinta, esto tiene la ventaja de que el cabezal está montado sobre la misma impresora, con lo que se abarata el coste de los cartuchos.

En la industria de la automoción también existen inyectores de combustible piezoeléctricos, que sustituyen a los de bobina consiguiendo una mayor precisión y velocidad de actuación. O el caso del airbag, que también utiliza el piezoeléctrico como sensor de impacto para activar el inflado de la bolsa.

Sensores de vibración o de presión en aplicaciones industriales, motores piezoeléctricos, usos en medicina, principalmente aparatos de diagnóstico, fotografía... Son otros pocos ejemplos en los que se utilizan este tipo de materiales. Debido a las grandes funcionalidades que proporcionan este tipo de materiales, durante los últimos años el uso se ha extendido a muchos ámbitos, pero por lo general la madurez tecnológica es mucho mayor en dispositivos de baja potencia o como sensores o actuadores.

Lo cierto es que durante los últimos años se ha comenzado con el desarrollo de los piezoeléctricos para otro tipo de aplicaciones, principalmente la generación de energía eléctrica. Si un dispositivo de pequeño tamaño con una pequeña fuerza genera una carga, se puede multiplicar ese efecto, aplicando mayores cargas, instalando más dispositivos o haciéndolos de mayor tamaño.

La creciente necesidad del ser humano de producir energía, y principalmente que esto se haga de forma sostenible, utilizando menos fuentes de energía fósiles o finitas ha llevado por otro lado a un gran auge de las energías renovables. Estas energías simplemente deben captar la energía que se encuentra en la naturaleza en forma de viento, luz solar, calor, mareas, etc. Y transformarla a un medio que se pueda utilizar.

La energía eólica “clásica” generando a partir de molinos, la energía solar, ya sea fotovoltaica o térmica o la energía hidráulica son ejemplos de energías renovables conocidas, alguna de ellas con mayor madurez tecnológica y otras en mayor proceso de crecimiento. Pero debido al efecto piezoeléctrico aparecen otras fuentes de energía que hasta el momento no se estaban utilizando y suponen un amplio campo de estudio y posible desarrollo. Vibraciones producidas por el aire o las olas, reaprovechamiento de la energía mecánica de peatones, son algunos ejemplos. A continuación se citan algunas de las aplicaciones de generación con esta tecnología que existen en la actualidad.

Empezando con el caso de la energía marina con el uso de piezoeléctricos, en la actualidad existen numerosos prototipos que aprovechan el movimiento sinusoidal de las olas para captar dicha energía y transformarla en impulsos eléctricos que posteriormente se rectifican y acondicionan para su posterior uso. Actualmente algunos de los prototipos ya tienen una potencia nominal de entre 500 y 750 KW. [16] [17]

Para en caso de la energía eólica, una de las empresas líderes en este campo es la española Vortex Bladeless S.L. Esta empresa propone unos generadores eólicos sin aspas, que con la vibración producida por el viento puede transformar esa energía gracias al efecto piezoeléctrico. Los modelos van desde el Vortex Atlantis de 100W de potencia para alimentación de pequeñas cargas, el Mini, de 4KW para usos domésticos hasta la proyección del Vortex Grand, que pretende competir con los actuales molinos con una potencia nominal de 1 MW. [18]

Aunque estos generadores aún se encuentran en proceso de desarrollo, sus fabricantes aseguran que son una solución para pequeños consumos en el caso de los modelos más pequeños y en el caso de los más grandes un buen competidor debido a su ahorro en material y reducción de espacio necesario por generador.

Finalmente, existen numerosos estudios y prototipos para el uso de este tipo de generadores en los entornos viales, ya sea tanto de las carreteras como en los ferrocarriles. La empresa israelita INNOWATTECH, asegura que con su proyecto piloto, es capaz de generar 200KWh/h en un kilómetro de carretera de un carril asumiendo el paso de 600 vehículos pesados a la hora. [19]

2.2. Estudio y caracterización de los piezoeléctricos

Una vez introducido el concepto del efecto piezoeléctrico, las características generales, el funcionamiento, algunas de las aplicaciones y el conformado de estos materiales en el caso de los sintéticos, avanzamos entrando más en profundidad. En este apartado se pretende entender mejor la estructura de estos materiales, su funcionamiento y su caracterización. Esto es paso clave para poder llegar a aprovechar las propiedades que presenta el efecto piezoeléctrico.

2.2.1. Medida y caracterización de los piezoeléctricos

Para la caracterización del piezoeléctrico y su funcionamiento se van a desarrollar las ecuaciones que sirven para el análisis de cómo reacciona frente a los diferentes tipos de excitación.[3], [5]

Para un transductor trabajando en forma de sensor (efecto piezoeléctrico directo), de manera simplificada podemos decir que si se aplica una tensión paralela al eje de polarización de un material piezoeléctrico se cumple la siguiente ecuación.

$$P = dT \quad (2.1)$$

Donde:

P = dipolo

d = constante de voltaje piezoeléctrica

T = tensión mecánica aplicada

Modificando la ecuación en función tanto del campo eléctrico como del desplazamiento eléctrico, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$P = D - \varepsilon^T E \quad (2.2)$$

Donde:

D = desplazamiento eléctrico

ε^T = permitividad

E = campo eléctrico

A partir de las ecuaciones (1) y (2) obtenemos las siguientes:

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2.3)$$

$$E = -gT + \frac{D}{\varepsilon^T} \quad (2.4)$$

Donde:

g = constante de carga piezoeléctrica

Como se puede deducir de la ecuación despejada, d y g son constantes relacionadas entre sí respecto a ε^T : $g = d / \varepsilon^T$

En el caso de trabajar en modo de actuador (efecto piezoeléctrico inverso), es decir que si lo que queremos es conocer la deformación en función de un campo eléctrico, la ecuación sería la siguiente:

$$S = dE \quad (2.5)$$

Donde:

S = deformación mecánica

d = constante de voltaje piezoeléctrica

E = campo eléctrico

Nótese que la ecuación para obtener también la S con respecto a g (constante de carga piezoeléctrica) y D (desplazamiento eléctrico), se sustituye con las ecuaciones anteriores y se despeja para finalmente obtener:

$$S = gD \quad (2.6)$$

Por otro lado, sabemos que la deformación de un sólido elástico debido a una tensión depende de la ecuación de Hooke:

$$S = sT \quad (2.7)$$

Donde:

s = compiliancia (el inverso al módulo de Young)

T = tensión mecánica

Según la estandarización del transductor piezoeléctrico asumido por el IEEE tras la propuesta de V.W. Voight, las ecuaciones que representan el modelo son las siguientes:
[3] En este primer caso asumimos que se trabaja de forma que la polarización sea paralela al campo eléctrico, posteriormente se analizará el caso de que no lo sea.

$$D = \varepsilon^T E + d_{33} T \quad (2.8)$$

$$S = d_{33} E + s^E T \quad (2.9)$$

Donde:

D = desplazamiento eléctrico

E = campo eléctrico

T = tensión

S = deformación

ε^T = permitividad

s^E = constante de deformación elástica en campo eléctrico constante (inverso del módulo de Young)

d_{33} = constante piezoeléctrica (nótese que en este caso se le asigna el subíndice 33, esto es únicamente para los casos en los que la dirección de la polarización es paralela al campo eléctrico, no todos los casos son así, pero en este caso lo se considera de esta manera)

Estas fórmulas también se pueden escribir e forma matricial como se muestra a continuación:

$$\begin{Bmatrix} D \\ S \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T & d_{33} \\ d_{33} & s^E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E \\ T \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

Donde (E, T) son las variables independientes y (D, S) las variables dependientes, si se toman (E, S) como las ecuaciones independientes, la ecuación se puede reescribirse la siguiente forma:

$$D = \frac{d_{33}}{s^E} S + \varepsilon^T \left(1 - \frac{d_{33}^2}{s^E \varepsilon^T} \right) E \quad (2.11)$$

$$T = \frac{1}{s^E} S + \frac{d_{33}}{s^E} E \quad (2.12)$$

O matricialmente:

$$\begin{Bmatrix} D \\ T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T (1 - k^2) & e_{33} \\ e_{33} & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E \\ S \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

Donde:

c^E = el inverso de s^E (es decir el modulo de Young para $E=0$)

$$e_{33} = d_{33} / s^E$$

De aquí podemos también sacar la siguiente ecuación:

$$k^2 = \frac{d_{33}^2}{s^E \varepsilon^T} = \frac{e_{33}^2}{c^E \varepsilon^T} \quad (2.14)$$

Donde k se conoce como el factor de acoplamiento electromecánico, y sirve para medir la eficiencia de la conversión de energía mecánica a eléctrica. Sería una ecuación muy parecida a las que se usan siempre para calcular la eficiencia, y en palabras es básicamente:

$$k^2 = \frac{\text{energía convertida}}{\text{energía utilizada}} \quad (2.15)$$

Como hemos comentado anteriormente, hemos estado utilizando en todo momento el subíndice 33, lo que quiere decir que en todo momento se estaba considerando la polarización paralela al campo y la tensión, pero esto puede no ser siempre así. En para contemplar todos los casos posibles, lo único que tenemos que hacer es introducir como subíndice en la formula todas las demás posibilidades, lo que nos llevaría a un desarrollo matricial como el que se muestra a continuación.

Este es el caso para actuadores:

$$\begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{31} \\ 2S_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

Para el caso de sensores:

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

Finalmente, en la siguiente tabla se muestran todas las constantes piezoeléctricas utilizadas:

TABLA 3: CONSTANTES PIEZOELÉCTRICAS [20]

| Símbolo | Nombre | Unidades [SI] | Equivalencia |
|------------|-------------------------------------|---------------|------------------------|
| c | Módulo de Young | N / m^2 | $c = 1 / s$ |
| e | Tensión piezoeléctrica | $N / m V$ | $e = 1 / g$ |
| ϵ | Permitividad del medio | F / m | $\epsilon = 1 / \beta$ |
| d | Constante de carga piezoeléctrica | m / V | $s = 1 / h$ |
| s | Compliancia del medio | m^2 / N | - |
| g | Constante de tensión piezoeléctrica | $V m / N$ | - |
| h | Voltaje piezoeléctrico | V / m | - |
| β | Impermitividad del medio | m / F | - |

2.2.2. Circuito equivalente

Para poder trabajar con un modelo eléctrico para las simulaciones, es básico tener un circuito equivalente del material piezoeléctrico que sea fiable y que se asemeje con la realidad del comportamiento del mismo. Lo cierto es que existen varios modelos para conseguir asemejar el comportamiento del piezoeléctrico a un circuito equivalente, aunque estos son muy parecidos, a continuación se muestra uno de los más completos.

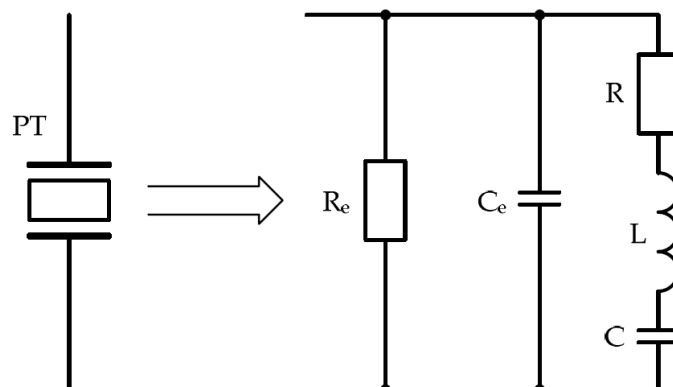


Figura 7: Circuito equivalente de un piezoeléctrico[21]

Donde R_e es la resistencia del disco piezoeléctrico, C_e es la capacidad estática del transductor, C la capacidad mecánica equivalente, L la inductancia mecánica equivalente y R la resistencia equivalente.

Lo cierto es que estos valores, dependen no solo del tipo de material del que esté compuesto el piezoeléctrico, sino también de la frecuencia, y se pueden modelar como se muestra a continuación:

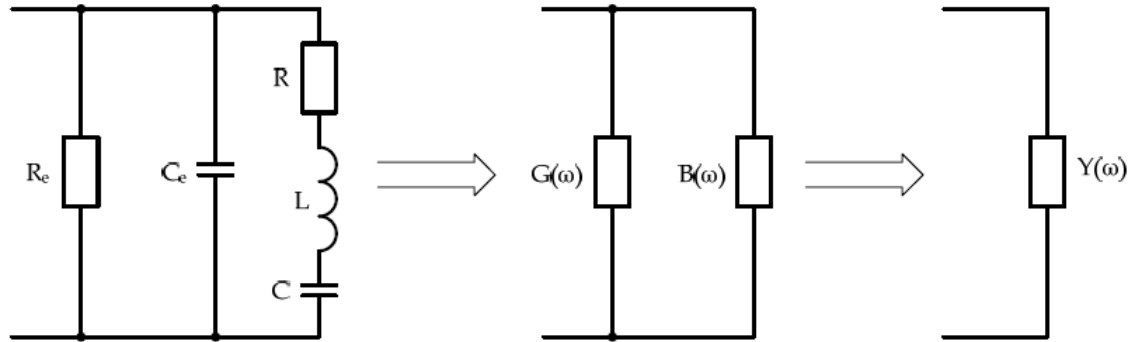


Figura 8: Simplificación de los valores del circuito equivalente [21]

Donde los valores de G , B e Y , se definen con las siguientes fórmulas [21]:

$$B(\omega) = \text{Im}Y(\omega) = \omega C_e + \frac{\omega C(1 - \omega^2 LC)}{\omega^2 C^2 R^2 + (1 - \omega^2 LC)^2} \quad (2.18)$$

$$G(\omega) = \text{Re}Y(\omega) = G_e + \frac{\omega^2 C^2 R}{\omega^2 C^2 R^2 + (1 - \omega^2 LC)^2} \quad (2.19)$$

$$Y(\omega) = \sqrt{G^2 B^2} \quad (2.20)$$

Donde:

$$G_e = 1 / R_e$$

$$\omega = 2\pi f$$

Con estas fórmulas, podemos construir su gráfica, que serán prácticamente iguales a las que se muestran en la siguiente figura, donde se han calculado los valores para los piezoeléctricos compuestos por PZT [22]:

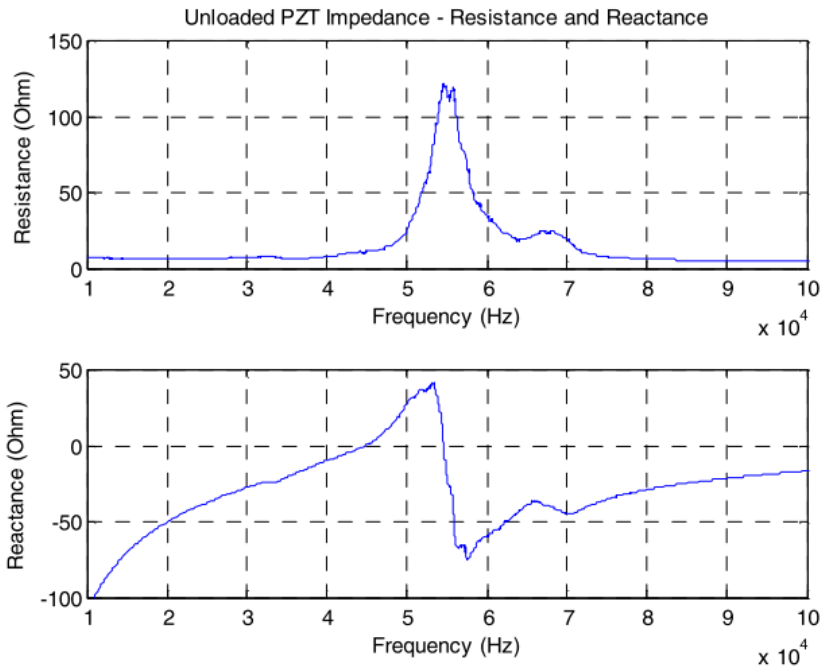


Figura 9: Valores equivalentes de resistencia e inductancia en función de la frecuencia [22]

Otro modelo para simular los piezoeléctricos, en este caso un modelo específico para los PZTs de tipo cantiléver, que son los más comunes para diseños de captación de vibraciones es el propuesto en la siguiente figura:

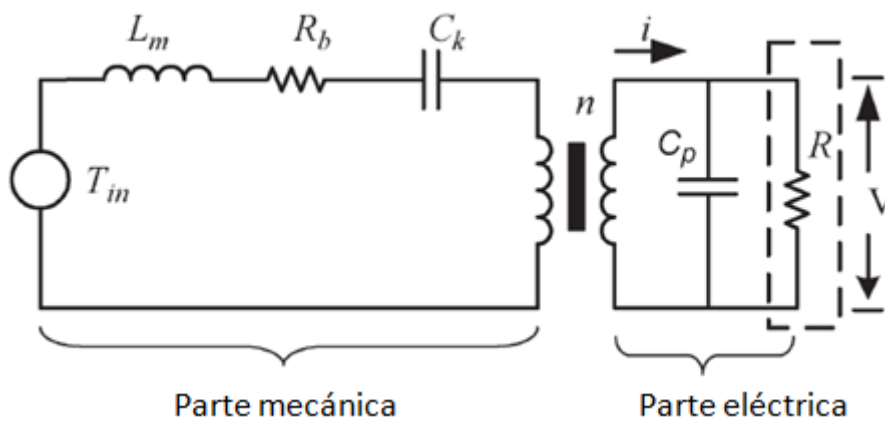


Figura 10: Modelo de circuito equivalente de piezoeléctrico cantiléver [23]

Como se puede observar en la figura, este modelo trata de separar la parte mecánica, más relacionada con las propiedades físicas del material. La parte mecánica (L_m , R_b y C_k) modela por tanto las pérdidas producidas por el efecto mecánico, principalmente el calor disipado. Por otro lado, la parte eléctrica modela principalmente las pérdidas dieléctricas.[24]

Otro modelo más sencillo que se encuentra entre la bibliografía, propone dos tipos de funcionamiento, p

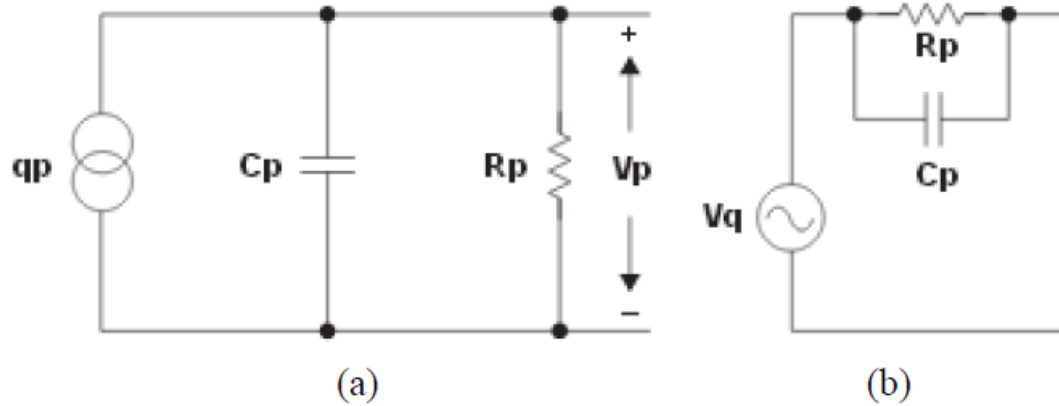


Figura 11: Modelo de circuito equivalente piezoeléctrico, (a) Actuando como carga, (b) Actuando como generador [25]

Este modelo propuesto, solamente se plantea para bajas frecuencias, y es bastante más sencillo que el anterior, tanto actuando como efecto directo como inverso. Los valores de C_p y R_p vienen determinadas en este caso por el material piezoeléctrico, normalmente en las hojas de especificación entregadas por los fabricantes, y tienen un valor constante. Por otro lado el valor de V_q depende tanto de las características físicas del piezoeléctrico como de la excitación aplicada sobre el mismo.

Finalmente, el último circuito equivalente elegido es muy similar al anterior, con la diferencia de que la resistencia y la capacitancia equivalente, se conectan en serie en lugar de paralelo. El motivo por el que se considera interesante este modelo es debido a la gran similitud que tiene el estudio de la fuente con el objetivo de este trabajo, generación mediante sistema de “*Energy Harvesting*” en entornos viales.

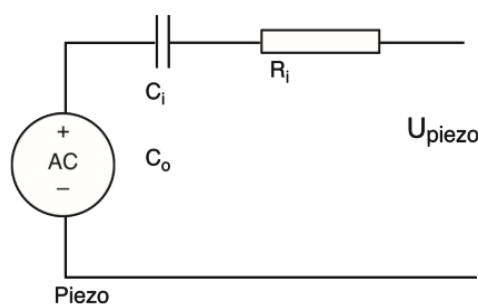


Figura 12: Circuito equivalente simple de generador piezoeléctrico con impedancias en serie [26]

En este caso se trata de nuevo de un circuito equivalente para bajas frecuencias, y los valores de las impedancias dependen del tipo de material así como de su morfología.

Como se ha podido observar, en la bibliografía existen numerosos circuitos equivalentes para el modelado de los materiales piezoeléctricos. Por lo general se puede observar que el modelo a utilizar va a depender principalmente de la frecuencia de trabajo, a que los modelos más sencillos que hemos visto son siempre los que trabajan a bajas frecuencias.

Además, como se puede observar en la figura 9, las mayores diferencias de comportamiento del material, se dan entre los valores de frecuencia de 10 a 100 kHz. Tanto por debajo como por arriba de esos valores de frecuencia de funcionamiento los PZTs generalmente presentan unas condiciones de trabajo más estables.

2.2.3. Tipos de conexión (serie – paralelo)

Los transductores piezoeléctricos, clásicamente se han utilizado como pequeños sensores o como actuadores, pero cuando el uso de los mismos pasa a ser como generador, el uso de un solo piezoeléctrico no será suficiente para alimentar una carga de suficiente intensidad. Es por ello que prácticamente en todas las aplicaciones de “*Energy Harvesting*” que existen en la actualidad es necesario el uso de varios transductores.

Por ello se hace de vital importancia la forma de conexión que se utilice entre los mismos, ya que esto determinará la forma que tendrá la energía eléctrica generada en estos transductores. Además, no solo es importante la conexión desde el punto de vista eléctrico, si no que es importante la disposición de los piezoeléctricos para poder maximizar la energía captada.

Una de las formas de aumentar la densidad de transductores para poder optimizar la energía obtenida por metro cuadrado, consiste en apilar varios transductores en lo que se denomina un stack, que es una pila de transductores colocados uno sobre otro ya sean estos en serie o en paralelo, llegando estos stacks de ser hasta 145 capas. [27]

Al igual que en el caso de colocar varios transductores al mismo nivel conectados ya sea en serie o en paralelo lo mismo se puede hacer para el caso de los stacks. Básicamente en función de las propiedades que se desean del transductor final, se configuran de una

u otra forma. En la siguiente figura se muestra gráficamente como se colocan en serie o en paralelo en función de su polaridad.

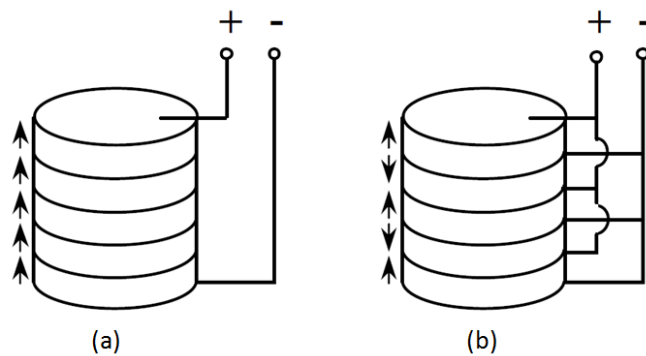


Figura 13: Stack de piezoeléctricos, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo [28]

Como se observa en el caso de los piezoeléctricos conectados en serie, se apilan con la misma polaridad uno sobre otro, y en caso de conectarse en paralelo, se contraponen las polaridades, generando por tanto nodos positivos y negativos.

Lo cierto es que el tipo de conexión, no afecta a la potencia máxima entregada, pero si a las condiciones en las que se entrega esa potencia. Lo cierto es que su comportamiento es exactamente igual que el de cualquier otra fuente, como podría ser una pila. Eso quiere decir que si se conectan dos transductores en serie, la resultante será obtener el doble de caída de tensión que con uno solo.

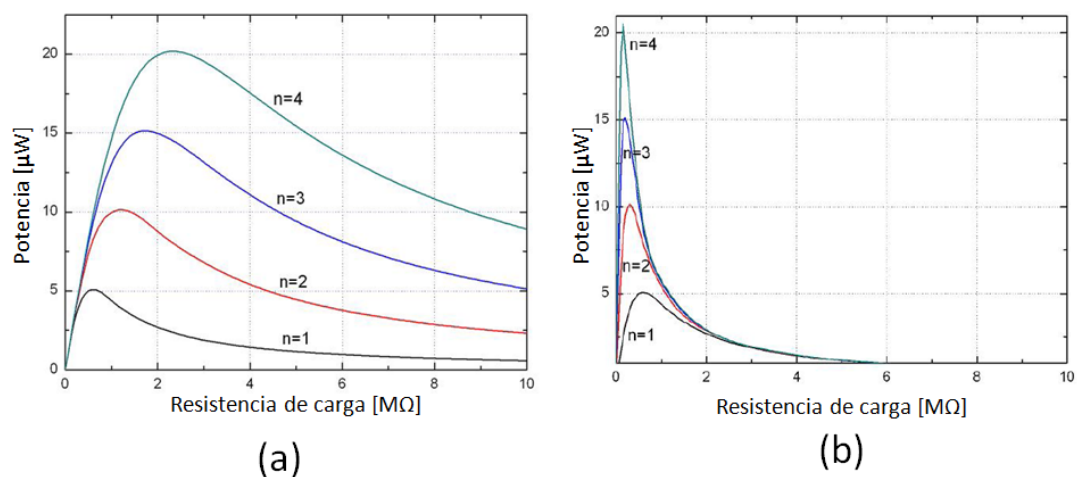


Figura 14: Potencia entregada por stack de PZTs, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo [28]

Como se puede observar en la figura, la potencia entregada máxima depende únicamente del número de transductores. No obstante la resistencia equivalente para la máxima potencia si varía considerablemente. Esto se debe a que la potencia entregada

es igual a la tensión multiplicada por la corriente, y según la conexión, igual que en cualquier otro circuito eléctrico lo que se suman son las tensiones en caso de conexiones en serie o las intensidades por las que se hacen en paralelo.

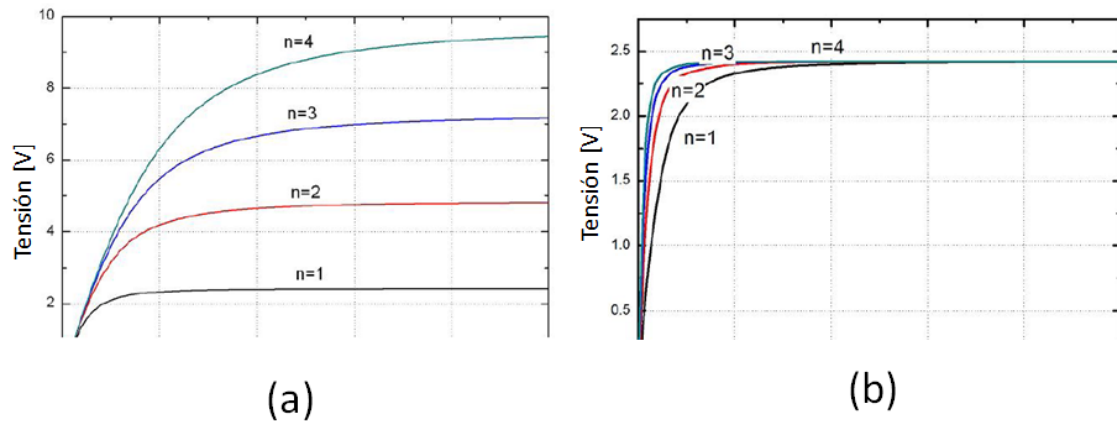


Figura 15: Medidas de tensión en circuito abierto, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo [28]

Como se puede observar en la figura, la tensión de salida medida en los piezoeléctricos dependerá del tipo de conexión. En el ejemplo de la figura, para la excitación aplicada un único piezoeléctrico entrega una tensión algo inferior a 2,5 V, lo que en serie se traduce a la suma de esas tensiones, y en paralelo se traduce al aumento de la intensidad entregada.

2.3. Recuperación de almacenamiento de la energía generada

Con la finalidad de poder utilizar la energía generada para la alimentación de cargas de baja potencia, y dado que la generación no es constante, será necesario almacenar la energía para poder utilizarla en el momento que se precise. Es por ello que surge la necesidad de realizar el estudio sobre los posibles circuitos de carga.

2.3.1. Modelo del sistema de “Energy Harvesting”

La energía en el comienzo de nuestro sistema, no se encuentra en forma de electricidad, y ni mucho menos adecuada para que se pueda hacer el uso deseado de ella, es por ello que el circuito de carga pasará por varios estados, desde la excitación mecánica de los materiales piezoeléctricos hasta la energía eléctrica en forma de corriente continua que se desea obtener.

En el siguiente diagrama se muestra los estados por los que debe pasar la energía en un sistema de “Energy Harvesting”[21]:

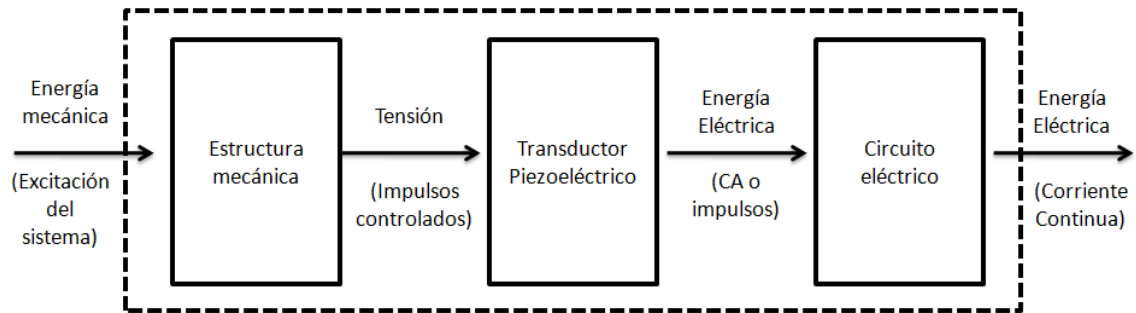


Figura 16: Sistema de "Energy Harvesting"

Como se puede ver en el diagrama, desde el momento en el que se capta la energía por el sistema, esta pasa por varios estados hasta que está adecuada para su uso como corriente continua que ya será la que alimente la carga, ya sea esta una batería, un LED, o cualquier tipo de dispositivo de baja potencia.

A continuación se analizará cada bloque del sistema por separado.

2.3.2. Estructura mecánica

La estructura mecánica es la primera en recibir la energía, normalmente en tipo de presión, vibración, o deformación producida por algún agente externo al sistema. Debe por ello captar esta energía para poder transmitirla al transductor piezoeléctrico con las menores pérdidas posibles. En función de la aplicación, esta estructura deberá adaptarse a la naturaleza del medio.

Esta parte del sistema es de gran importancia, pues es de aquí de donde parte la energía mecánica que se vaya a poder reutilizar gracias a los dispositivos piezoeléctricos. Debe ser capaz de captar la mayor cantidad de energía posible del entorno y ser capaz de entregar esta energía a los transductores de manera adecuada para que generen la corriente eléctrica que se requiere.

Existen varias empresas que se han especializado en la creación de baldosas que optimizan el sistema para captar la energía de las personas al caminar. Como ya se ha comentado anteriormente, existen varias pistas de baile "piezoeléctricas", cuyas baldosas están apoyadas sobre transductores piezoeléctricos, componiendo así la primera etapa del sistema. La empresa inglesa Pavegen, con su innovador diseño de baldosas es especialista sistemas de generación a partir de la fuerza aplicada por los humanos al caminar. [29]

Para casos aplicaciones en entornos viales, es importante tener en cuenta este primer paso, pues la forma en la que se coloque el piezoeléctrico en el asfalto es de vital importancia para conseguir el mayor reaprovechamiento posible. En el “Proyecto REC” se estudia la forma de introducir el piezoeléctrico en la carretera consiguiendo la mayor transferencia de energía posible directamente desde el firme de la carretera. También existen otros proyectos que aprovechan la vibración producida al paso de los vehículos. [30]

2.3.3. Transductor piezoeléctrico

En este bloque del sistema, es en el que se produce el efecto electromecánico, es decir que es cuando la energía pasa de energía mecánica a energía eléctrica. Esto lo hace gracias al efecto piezoeléctrico, que al deformarse genera impulsos eléctricos que posteriormente podremos utilizar.

La naturaleza del efecto piezoeléctrico así como su funcionamiento se ha detallado a lo largo de todo el capítulo 2, pero con respecto a lo que al sistema a estudio se refiere, es importante saber que las propiedades que afectaran al sistema de generación. Al circuito equivalente de la figura 10 del apartado 2.2.3. se le deben dar unos valores.

El voltaje que entrega la fuente, es directamente proporcional a la tensión aplicada sobre el piezoeléctrico y depende tanto del tipo de material como de la geometría y fuerza aplicada. En el caso de un piezoeléctrico de disco, con un diámetro al menos 5 veces mayor que su espesor, compuesto por PZT, y en régimen de baja frecuencia su valor viene determinado por la siguiente ecuación: [29]

$$V = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{t}{d^2} \cdot g_{33} \cdot F \quad (2.21)$$

Donde V es la diferencia de potencial, t es el espesor de la cerámica piezoeléctrica, d su diámetro, g_{33} la constante piezoeléctrica y F la fuerza aplicada sobre el transductor.

Por otro lado la capacitancia del mismo viene determinada por la ecuación 2.22:

$$C = \frac{4}{\pi} \cdot K_3^T \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{d^2}{t} \quad (2.22)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad del vacío y K_3^T la constante dieléctrica relativa.

2.3.4. Circuito eléctrico

Finalmente, para poder hacer uso de la energía producida en los transductores, lo más habitual es hacer una adecuación de esa energía a una que sea apta para la alimentación del dispositivo o la carga que se plantea alimentar. Para ello se modela la señal de salida en los pasos que se seguirán a continuación.

En primer lugar a la salida del piezoelectrico, se tiene una señal ya sea de corriente alterna o de impulsos y por lo general de muy baja intensidad. Esta señal tiene una forma sinusoidal, de onda completa, luego el primer paso por el que se pasa esta señal es por un puente rectificador.

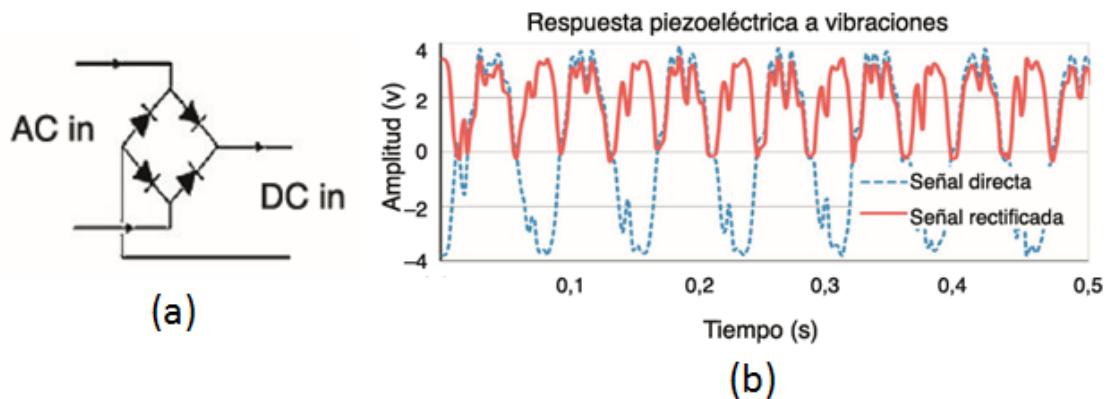


Figura 17: Rectificación de onda generada por piezoelectrico, (a) Puente rectificador, (b) Onda rectificada. [26]

El siguiente paso una vez rectificada la onda es el filtrado de la misma, lo que se consigue con un condensador, y finalmente en función de la carga que se alimentará, es muy normal colocar un circuito regulador de tensión, para evitar sobrecargas en la carga.

A efectos generales, el circuito encargado del modelado de la señal obtenida por el material piezoelectrico es como el que se muestra a continuación, que sigue los pasos anteriormente descritos y acaba en este caso en una batería para el almacenamiento de la energía

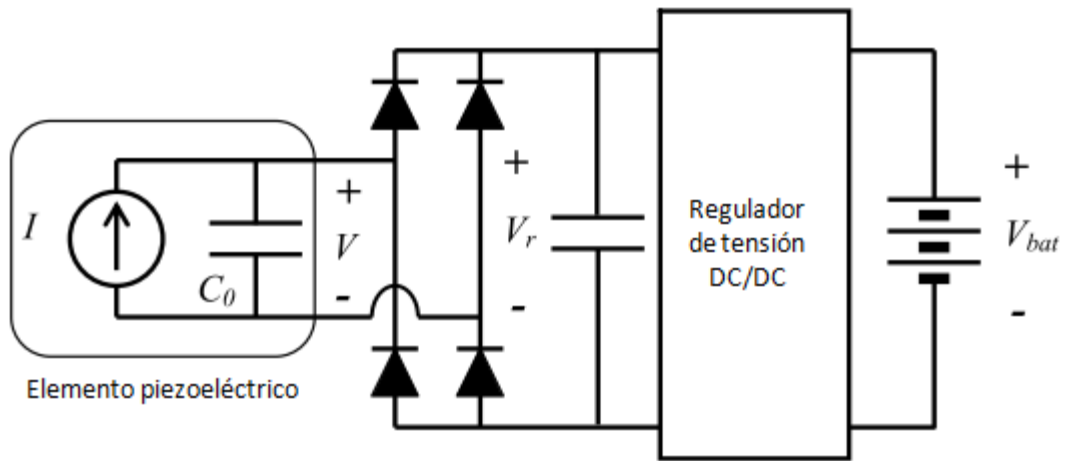


Figura 18: Circuito convertidor para carga de baterías a partir del efecto piezoeléctrico [21]

Otra posibilidad es recurrir directamente a circuitos integrados como el LTC3588-1, que directamente incluye los elementos necesarios para adecuar la energía al consumo o a su almacenaje en baterías o condensadores.

3. PROPUESTA DE MODELO DE PIEZOELÉCTRICO

Una vez conocido el estado del arte, el presente capítulo propone la elección de un material piezoeléctrico y lo modela para poder utilizarse en posteriores simulaciones en función de sus propiedades. Para ello se utilizan los conceptos del capítulo 2 y como resultado se obtiene un circuito de carga de “*Energy Harvesting*” que se podrá adaptar a cada una de las aplicaciones que se propongan en los siguientes capítulos.

3.1. Elección del software simulador

El primer paso para poder proponer un modelo del generador piezoeléctrico será hacer la elección del software de simulación que se utilizará. Es importante hacer por ello un análisis para saber si el programa que se propone utilizar cumple con los requisitos necesarios para la resolución del sistema. Otro punto a tener en cuenta es que el usuario entienda el programa y demuestre un dominio suficiente tanto para trabajar con él como para poder hacer uso de sus funcionalidades.

Para el desarrollo de este trabajo se han testado dos programas de simulación, con la intención de elegir el más adecuado para el modelo la resolución de los sistemas planteados. El primero de ellos es Simulink de MathWorks, un programa de base Matlab y que se utiliza para resolver todo tipo de sistemas, mecánicos, eléctricos, señales, etc. El otro programa testado es Multisim, de National Instruments, que es un programa especializado en circuitos y electrónica.

Antes de realizar las simulaciones a gran escala de todos los casos a estudiar, se modelaron algunos sistemas sencillos en ambos programas para analizar ventajas y desventajas de cada uno de ellos para poder compararlos y seleccionar el más adecuado. A continuación se muestran en más detalle algunas de las características de cada uno de los programas así como sus ventajas y desventajas:

- Simulink:

Este programa pertenece a MathWorks, y trabaja con base Matlab, es decir que con el modelo generado se puede también extraer el código. Se trata de un software muy potente, con extensas funcionalidades y capaz de trabajar con varios sistemas interactuando entre sí simultáneamente, incluso aunque estos sean de distinta naturaleza, (sistemas mecánicos, eléctricos, etc.). En la siguiente figura se muestra un modelo diseñado en este programa:

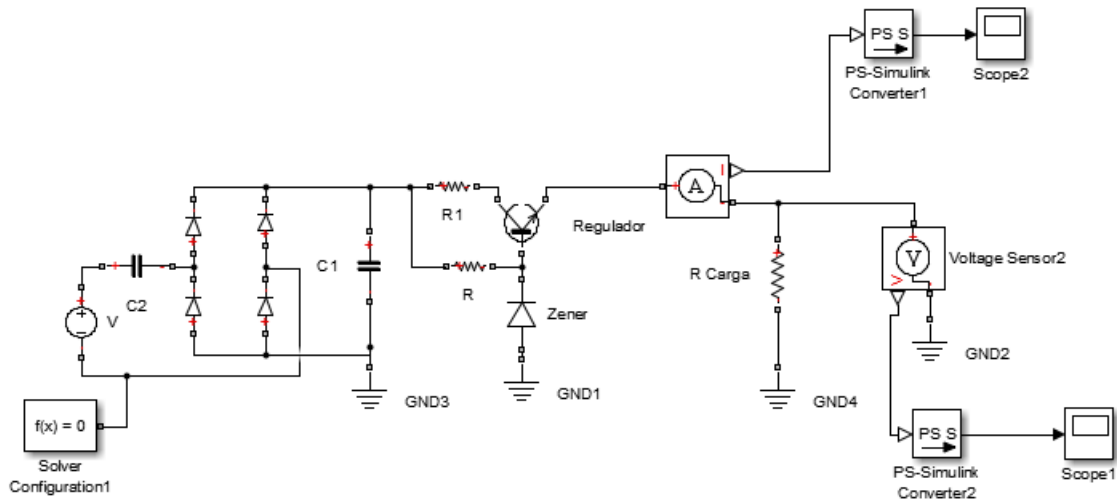


Figura 19: Modelo de circuito simple en Simulink

En la figura 19 se modela el circuito de adecuación de la energía obtenida por un piezoeléctrico y alimentando una carga.

Dentro de las ventajas de este programa se encuentra principalmente su gran versatilidad y posibilidad de combinar sistemas. Además al ser un software muy extendido cuenta con una gran experiencia de usuarios, lo que ayuda a encontrar información en la red. Además la página web del fabricante [31] hay una gran cantidad de ejemplos de circuitos, y soporte para resolución de problemas.

En los aspectos negativos, se trata de un programa de mayor complejidad que Multisim, aunque este permita trabajar relacionando diferentes sistemas nos obliga a transformar las señales, no existe la posibilidad de conectar directamente un osciloscopio al circuito, y dentro de la gran librería es difícil encontrar componentes complejos. Además, no dispone de una gran librería de circuitos integrados, con lo que es necesario en la mayoría de los casos modelar la totalidad del sistema, llevando por tanto más tiempo de modelación y haciendo que el modelo sea de mayor complejidad.

- Multisim NI:

Este programa de National Instruments, es otra potencial alternativa para trabajar con circuitos de todo tipo. A continuación se muestra un sistema equivalente al de la figura 19 pero modelado en Multisim.

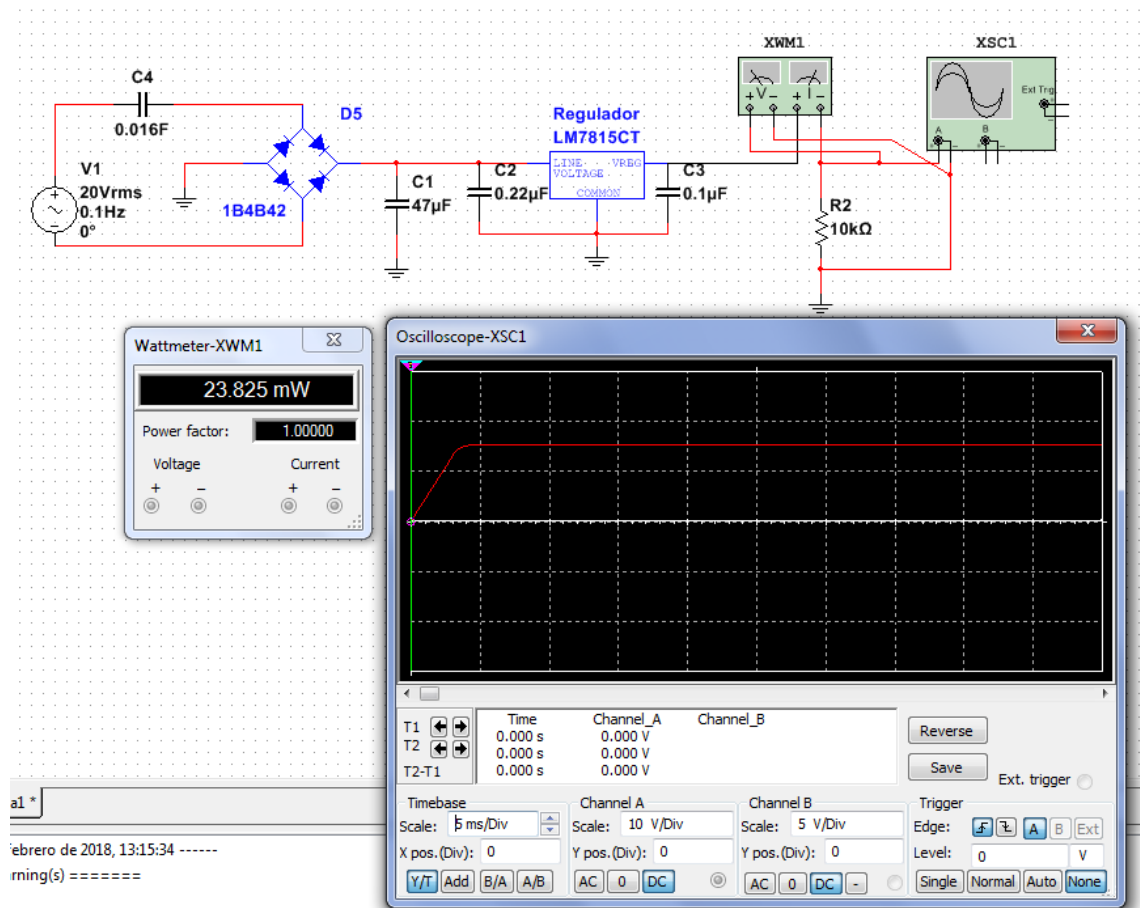


Figura 20: Modelo de circuito simple en Multisim

El circuito modelado en Multisim simula el mismo que el de Simulink, con la diferencia de que en este segundo programa, el regulador se ha escogido en el catalogo de circuitos integrados en lugar de haberse modelado un regulador simple a base de componentes básicos. Además, se le ha conectado un osciloscopio y un vatímetro.

Dentro de las ventajas de este sistema, es que es de más fácil manejo que Simulink, y que además tiene un funcionamiento más rápido. Otra de las ventajas que se pueden encontrar es que al ser un programa especializado, y por tanto diseñado para el cálculo de circuitos, el catálogo es bastante más amplio, permitiendo la instalación de circuitos integrados y simplificando de esta manera nuestros circuitos y componentes específicos.

Además, permite el uso de instrumentos de medida como osciloscopios, vatímetros, etc. directamente acoplados al circuito, lo que simplifica en gran medida la

extracción de datos para su posterior cálculo, acelerando así los tiempos utilizados para la simulación.

Por otro lado, dentro de las desventajas, se encuentra que es más difícil conseguir soporte en la web para la resolución de dudas. También, al ser un programa diseñado para el cálculo de circuitos dificulta en gran medida modelar los sistemas externos que afectan al comportamiento final.

Teniendo en cuenta todas las características de cada uno de los programas de simulación testados, se tomó la decisión de utilizar Simulink. Esto se debe a que será necesario calcular múltiples escenarios para un circuito equivalente, pero cambiando las propiedades externas, o realizando pequeños cambios dentro del mismo, y aunque este programa presente mayor complejidad, también permite el uso de más herramientas para el modelado de la señal.

3.2. Caracterización del PZT NCE51

Como ya se revisó en el capítulo 2, los piezoeléctricos más utilizados en la actualidad son los conocidos como PZT, conformados de forma sintética en lugar de los materiales monocristalinos como el cuarzo, que se encuentra en la naturaleza. Por ello, el primer paso para la caracterización del piezoeléctrico, es la elección del mismo.

Tras revisar la bibliografía, se decidió utilizar un piezoeléctrico del fabricante Noliac, concretamente el NCE51. En la siguiente tabla se muestran las propiedades más relevantes para nuestro estudio de la misma, obtenidas en el catálogo de Noliac.[9]

TABLA 4: PROPIEDADES DEL PZT NCE51

NCE51

| Dieléctricas | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|---|
| Constante dieléctrica relativa | $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$ | 1850 |
| Electromecánicas | | |
| Constante de carga piezoeléctrica | d_{33} | $460 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ |
| Constante de tensión piezoeléctrica | g_{33} | $27 \cdot 10^{-3} \text{ Vm}/\text{N}$ |
| Físicas | | |
| Densidad | ρ | $7,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$ |
| Conformidad elástica | S_{33}^T | $19 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ |
| Diámetro | d | 0,03 m |
| Espesor | t | 0,001 m |
| Temperatura de Curie | T_c | 340 °C |

Con el PZT ya seleccionado y sus propiedades conocidas, ya es posible realizar los cálculos teóricos basados en el capítulo 2 para poder caracterizar el comportamiento del transductor y crear un modelo que se pueda utilizar en el sistema propuesto. El voltaje pico, o la amplitud de la señal generada por el piezoeléctrico viene determinada por la ecuación 3.1:

$$V = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{t}{d^2} \cdot g_{33} \cdot F \quad (3.1)$$

Donde t es el espesor del PZT, d su diámetro, g_{33} la constante de voltaje piezoeléctrica y F la fuerza aplicada.

Sustituyendo por los valores del PZT NCE51 y dejando V en función de la fuerza aplicada obtenemos:

$$V_{PZT} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0.001}{0.03^2} \cdot 27 \cdot 10^{-3} \cdot F \approx 0.038 \cdot F \quad (3.2)$$

Donde V_{PZT} es la tensión entregada por un piezoeléctrico y se expresa en voltios y F en newtons.

Como es posible observar, muestra que la amplitud de la señal tiene una relación lineal con la fuerza aplicada sobre el PZT, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 5: VOLTAJE PICO FRENTE SEGÚN LA FUERZA APLICADA PARA PIEZOELÉCTRICO NCE51 (DATOS TEÓRICOS)

| Fuerza aplicada [N] | Amplitud [V] |
|---------------------|--------------|
| 10 | 0,38 |
| 50 | 1,9 |
| 100 | 3,8 |
| 500 | 19 |
| 1000 | 38 |
| 1500 | 57 |

Que a su vez se puede describir como la siguiente recta:

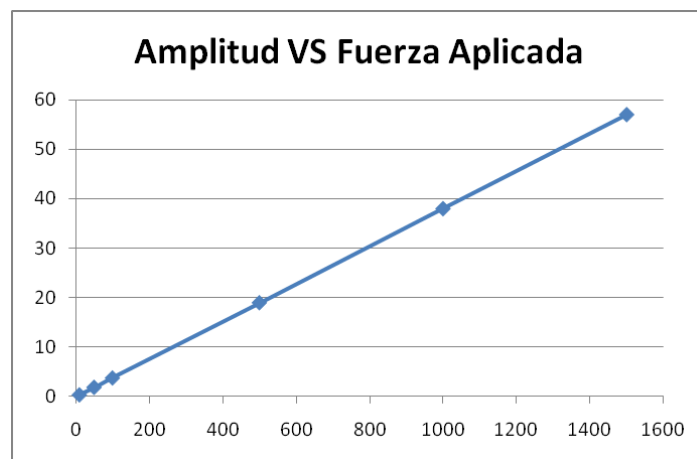


Figura 21: Voltaje pico frente a la tensión aplicada para un PZT NCE51

El voltaje máximo entregado por el PZT en circuito abierto es independiente de la frecuencia a la que se trabaje, pero lo cierto es que con el voltaje pico no es suficiente para definir cómo será la señal, si no que es necesario modelar un circuito equivalente. Basándonos en el capítulo 2.2.3, y asumiendo que en todos los casos de estudio se va a trabajar en frecuencias bajas, el circuito equivalente que se utilizará para la propuesta de modelo será el siguiente:

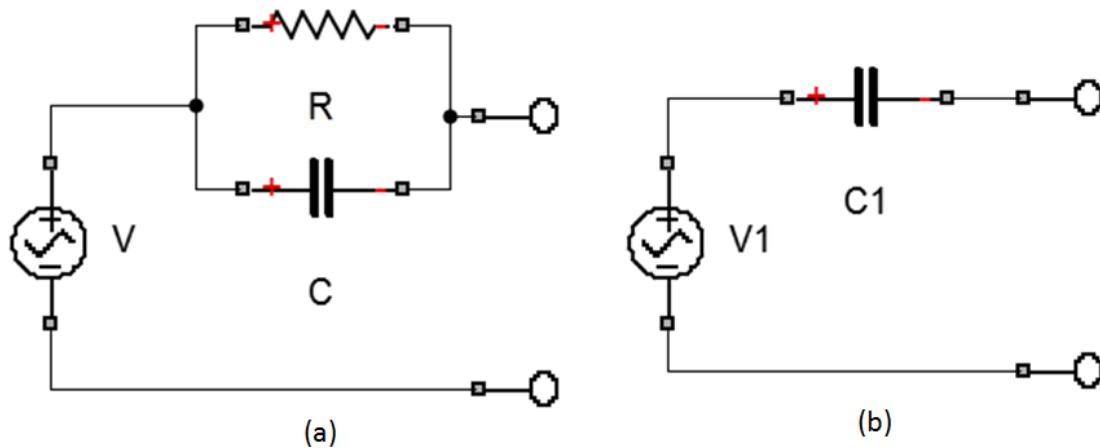


Figura 22: Circuito equivalente simplificado

Como se puede observar el circuito equivalente queda muy simplificado para bajas frecuencias. En (a) se muestra el circuito con una resistencia y un condensador en paralelo entre sí, pero debido al escaso valor de R, se puede simplificar todavía más a un circuito como el mostrado en (b).

Finalmente dada la naturaleza a estudiar, que es la generación de energía a través del “*Energy Harvesting*”, y teniendo en cuenta que las frecuencias en las que se trabajará serán por lo general bajas, (en ningún caso superior a 20 Hz) el circuito equivalente utilizado en las simulaciones será el más reducido, (figura 9 b).

Para ello también será necesario calcular el valor del condensador equivalente, que también dependerá de la frecuencia, pero para que nuevamente para frecuencias bajas tendrá un valor según la fórmula 2.21 expuesta en el capítulo anterior. Sustituyendo sus valores se obtiene:

$$C_{PZT} = \frac{4}{\pi} \cdot K_3^T \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{d^2}{t} = \frac{4}{\pi} \cdot 1850 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{0.03^2}{0.001} = 18,8 \text{ nF} \quad (3.3)$$

Finalmente se puede simular la forma de la onda generada por el PZT, usando el circuito equivalente propuesto. Para ello se propone como ejemplo una onda que simula la fuerza de una persona ejerciendo 70 kilos de forma periódica con intervalos de 0,5 segundos (podría asemejarse con caminar).

Para ello se debe calcular cual sería la fuerza ejercida, que según la segunda ley de newton, y sustituyendo con la aceleración de la gravedad y la masa de la persona:

$$F = m \cdot a = 70 \text{ Kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 686,7 \text{ N} \quad (3.4)$$

Luego:

$$V \approx 0,038 \cdot F = 26,1V \quad (3.5)$$

Sustituyendo estos valores, la forma de onda sería la siguiente (grafico obtenido con el circuito equivalente en Simulink):

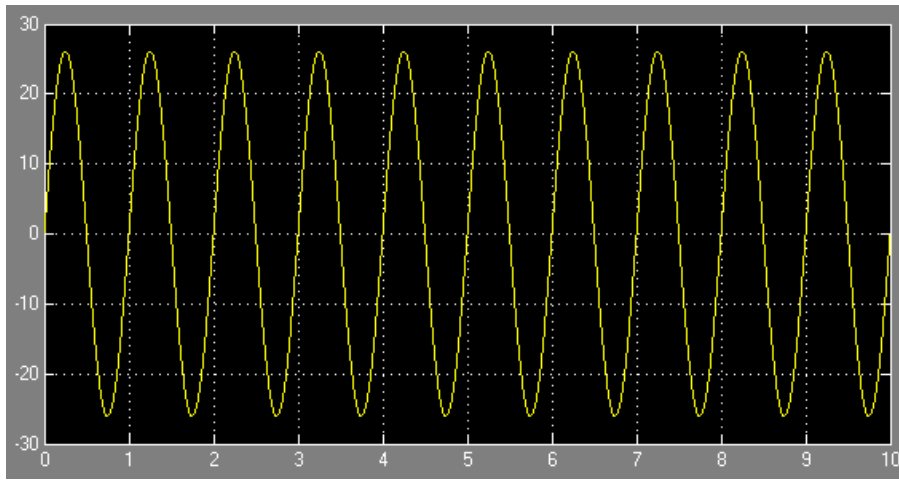


Figura 23: Onda generada por NCE51 al aplicar una fuerza de 686,7 N con una frecuencia de 1 Hz

En el caso de que la fuerza aplicada no sea constante, si no que se colocase un piezoeléctrico en el suelo, que fueran pisando personas de distintos pesos aleatoriamente en el tiempo, la onda generada podría tener una forma como la siguiente:

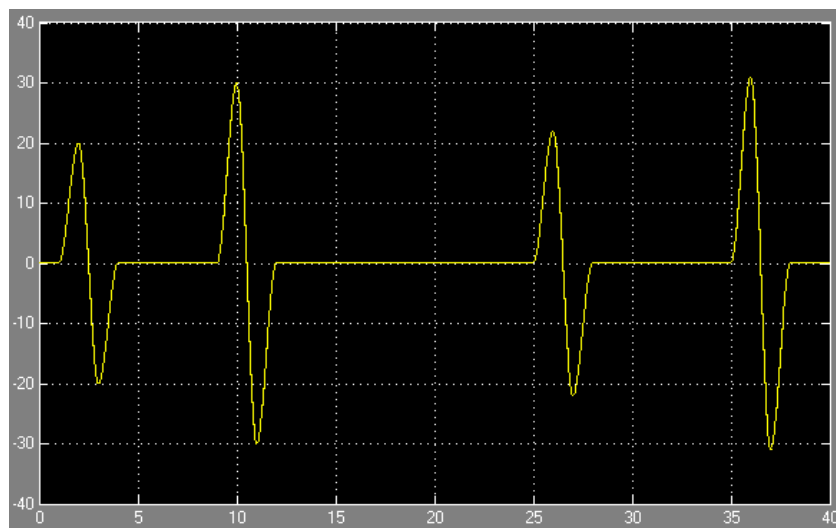


Figura 24: Onda generada por NCE51 al aplicar fuerzas variables separadas en el tiempo

Como se ha podido observar, la forma de la onda va a depender de las circunstancias externas al PZT, principalmente son dos, la fuerza aplicada y la frecuencia, ya que los demás valores dependen directamente de las características físicas del piezoeléctrico y son constantes.

3.3 Configuración de conexiones del PZT

Debido a lo expuesto en la sección 3.1. y dada la naturaleza de los sistemas de “*Energy Harvesting*”, aparece la necesidad de poder modelar la onda obtenida por el PZT para poder utilizar la energía de la forma deseada. Dado que no es posible cambiar la amplitud y frecuencia entregadas por el piezoeléctrico más que, o bien utilizando otro modelo de piezoeléctrico, o cambiando dos parámetros, fuerza y frecuencia, será necesario crear los mecanismos pertinentes para reutilizar esta energía.

La potencia generada por los PZTs es generalmente del orden de μW , y por tanto se utilizará para alimentar pequeñas cargas. Esto siempre teniendo en cuenta las aplicaciones para “*Energy Harvesting*”, ya que como se expuso en el capítulo anterior, estos transductores se utilizan también tanto como sensores como actuadores en numerosas aplicaciones.

Para poder alimentar estas cargas, lo primero que se debe hacer es adecuar la energía obtenida por el transductor a la forma que sea conveniente. Para ello, se utilizarán los conceptos expuestos en el capítulo 2.3. para adecuar la señal a una corriente continua que se pueda tanto almacenar como utilizar en las cargas que se conecten a estos generadores.

Para poder adecuar el voltaje al requerido, es necesario tener en cuenta dos factores, el primero será la presión que será ejercida sobre los materiales piezoeléctricos, (y que está determinada por el sistema externo), esta determinará la tensión unitaria de cada transductor en cada uno de sus pulsos. Si esta tensión es menor a la que se requiere para poder alimentar una carga a la salida, para poder adecuar la señal para su uso será necesario conectar algunos de ellos en serie.

A continuación se muestran dos casos, en los que con los mismos transductores y en función de las condiciones del sistema se conectan de en serie o en paralelo para poder cumplir con los requerimientos del sistema.

En las figuras 25 y 26 que se mostraran a continuación, se ha utilizado para mejorar la visualización el elemento denominado en la librería de Simulink como “Crystal”, que simula el efecto de un piezoeléctrico. No obstante este elemento en el simulador no está modelado como generador eléctrico, luego para la generación del modelo equivalente no se utilizará este elemento si no el circuito equivalente mostrado en la sección anterior.

- Caso 1: Alimentación de una carga cuyo voltaje deba ser mayor al generado unitariamente por el piezoeléctrico en las condiciones del sistema. Un ejemplo podría ser una batería de 12V a alimentar por la malla piezoeléctrica, que debido a la presión aplicada genera de 3V en cada uno de los transductores.

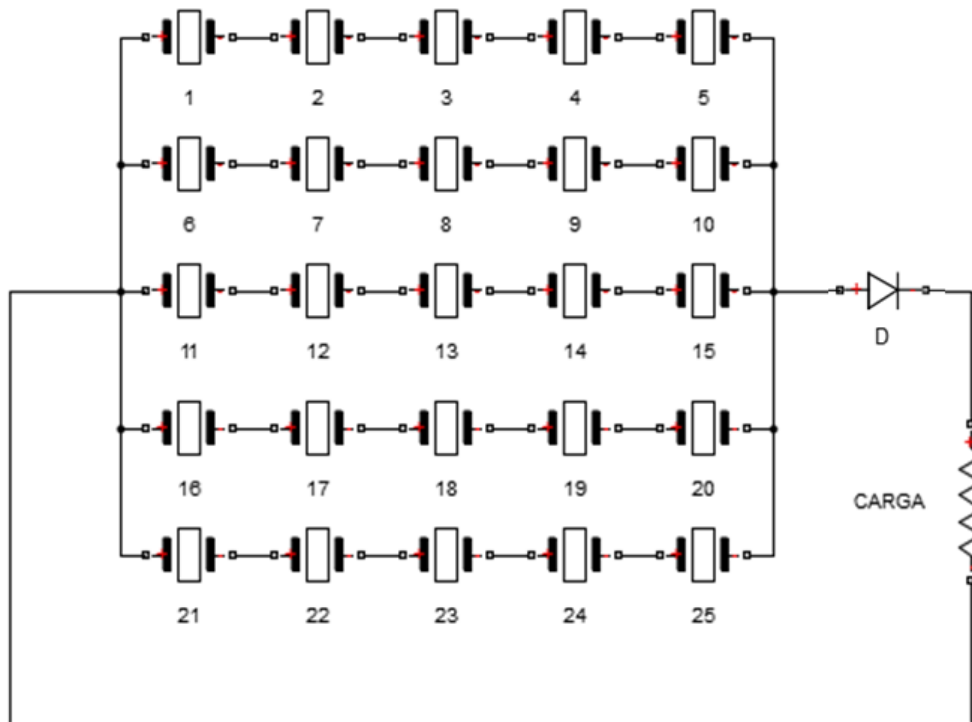


Figura 25: 25 Piezoeléctricos colocados en 5 series de 5

- Caso 2: Partiendo de la misma batería que en el caso 1, de 12V a ser cargada por el mismo número de piezoeléctricos pero con una mayor excitación del exterior, (como ejemplo una tensión aplicada 5 veces mayor que en el caso 1). De esa manera no sería necesario subir la tensión entregada por los mismos, ya que en este caso cada piezoeléctrico estaría entregando una tensión de 15V. Por ello estos se podrían conectar en paralelo y obtener la suficiente tención como para poder alimentar la batería.

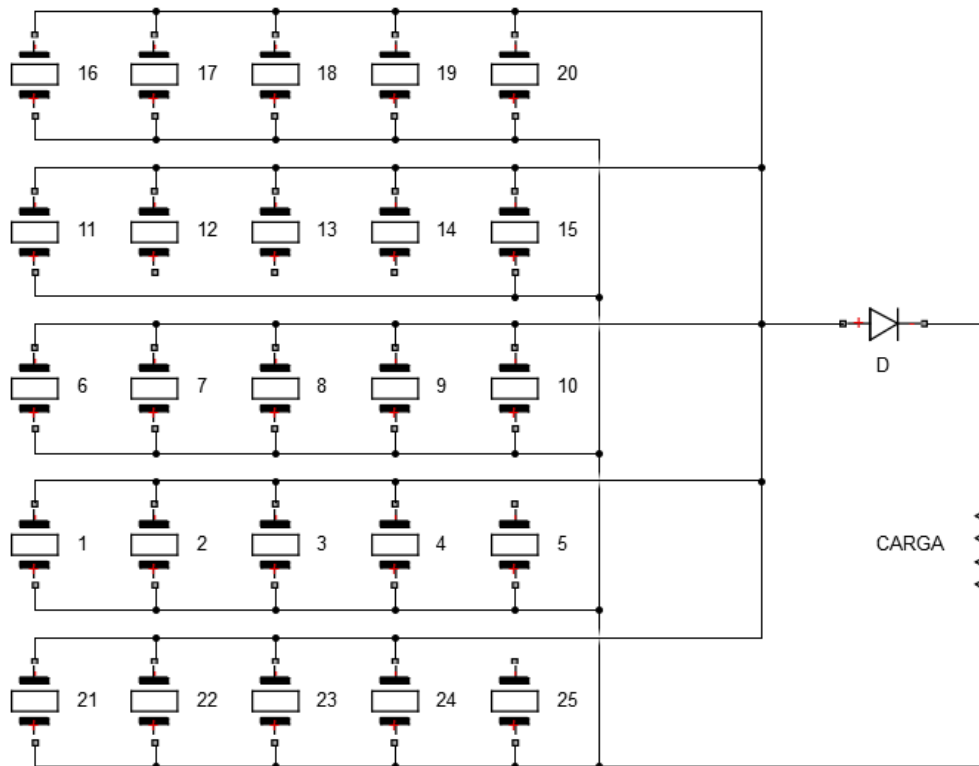


Figura 26: 25 Piezoeléctricos conectados en 5 series de 5

Es importante observar que en los circuitos de las figuras 11 y 12, solamente aparecen los piezoeléctricos conectados directamente a una carga a través de un diodo. Lo cierto, es que se han representado de esta forma para observar la conexión de los piezoeléctricos entre sí, pero es importante que se hagan dos observaciones.

La primera de ellas es que partiendo de la base de que todos los piezoeléctricos vayan a trabajar al mismo tiempo, al tener únicamente un diodo, se estaría utilizando solamente la mitad de la potencia eléctrica generada, desaprovechando la parte negativa de la onda. Para poder utilizar el impulso completo, es decir tanto la parte en la que el material se comprime y genera una diferencia de potencial en una dirección como cuando vuelve a su forma original se invierte esa diferencia, sería necesario colocar un puente rectificador.

Además, se ha partido de la base de que todos los piezoeléctricos están trabajando en el mismo instante, y esa hipótesis puede o no ser cierta, vendrá determinada por condiciones externas al circuito. Será importante tener en cuenta que si solo están trabajando algunos de los piezoeléctricos, los que no lo estén haciendo pudiera ser que inviertan la energía producida por los demás en forma de vibraciones o deformaciones mecánicas.

En los casos a estudiar en este trabajo, se considerará siempre que la carga a alimentar será de baja potencia, por lo que normalmente se conectarán los piezoeléctricos en paralelo. Además, en las aplicaciones viales, así como en el paso de peatones, la fuerza aplicada sobre el piezoeléctrico será lo suficientemente elevada como para no tener que conectar los PZTs en serie y así aumentar la tensión.

Para la modelación realizada en el programa de cálculo y debido al gran número de piezoeléctricos con los que se tendrá que trabajar para llegar a obtener potencias razonables para su uso energético, se simplificarán los circuitos con sus equivalentes según el tipo de conexión. A continuación se muestran los equivalentes para las conexiones en serie y en paralelo:

- Conexión en paralelo:

En el caso de conectar dos o más transductores en paralelo y considerando la misma fuerza aplicada en todos, la tensión generada será la misma en cada uno de ellos. Por ello y teniendo en cuenta que el circuito equivalente para dos o más condensadores en paralelo es la siguiente:

$$C_{eqp} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (3.6)$$

Luego en el circuito del simulador se representará como se muestra en la siguiente figura:

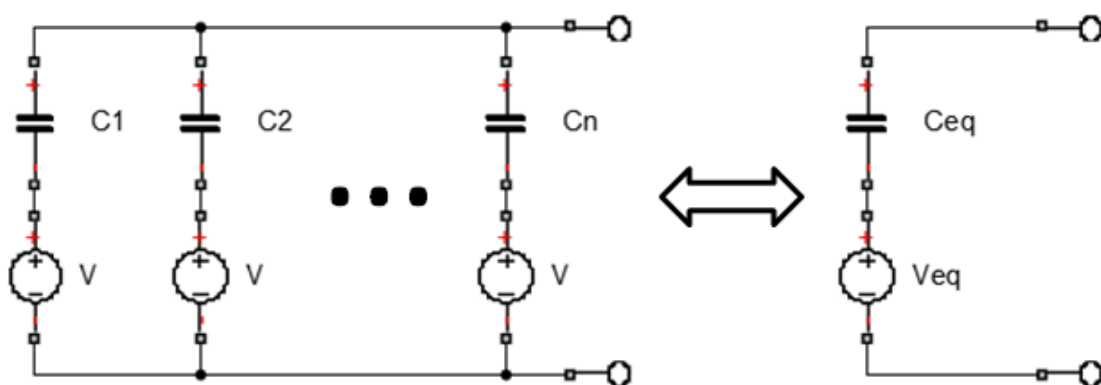


Figura 27: Circuito equivalente de n PZTs conectados en paralelo

Donde

$V_{eqp} = V$, y está determinada por la presión aplicada sobre los transductores

C_{eqp} tiene un valor según la expresión (3.6)

Que para el caso específico del transductor NCE51:

$$V = 0,038 \cdot F$$

$$C_{eqp} = n \cdot C_{PZT} = n \cdot 18,8 \text{ nF}$$

- Conexión en serie:

En caso de conectar dos o más piezoeléctricos en serie, y considerando nuevamente que la presión aplicada sobre ellos sea la misma, la tensión de salida de cada uno de ellos será igual. Por otro lado, teniendo en este caso en cuenta el circuito equivalente para dos o más condensadores conectados en serie:

$$\frac{1}{C_{eqs}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (3.7)$$

Y su circuito equivalente:

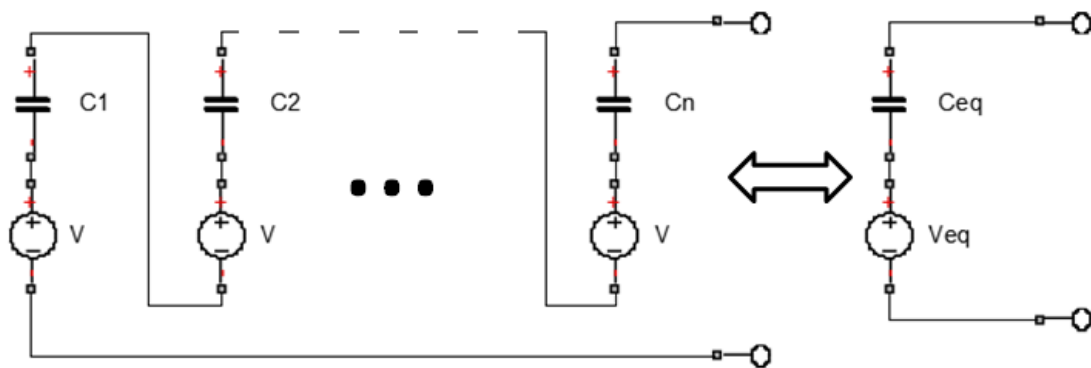


Figura 28: Circuito equivalente de n PZTs conectados en serie

Donde:

$$V_{eqs} = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

C_{eqs} tiene un valor según la expresión (3.7)

Que en el caso del PZT del estudio también se puede sustituir por:

$$V_{eqs} = 0,038 \cdot n \cdot F$$

Y dado que el valor de C_{PZT} es el mismo para todos los transductores.

$C_{eqs} = C_{PZT} / n = 18,8 / n \text{ nF}$, siendo n el número de transductores

3.4. Modelado del circuito de carga

El último paso es adecuar la energía que se obtiene a través de los materiales piezoeléctricos en forma de pulsos o corriente alterna muy variable, con cambios en la amplitud e incluso en la frecuencia, es transformarla en una corriente continua apta para su uso.

Se inicia este paso con la señal a la salida del piezoeléctrico, ya sea este uno solo o varios conectados según lo expuesto en 3.2., y cuyo circuito equivalente coincide con el explicado en la sección 3.1.. La forma de onda, dependerá de las propiedades del sistema externo, dependiendo tanto de la fuerza de aplicación, como de la frecuencia. También influirán las propiedades del PZT. A continuación se muestran dos ejemplos de ondas diferentes, ambas con el mismo piezoeléctrico, pero con distintos sistemas de excitación.

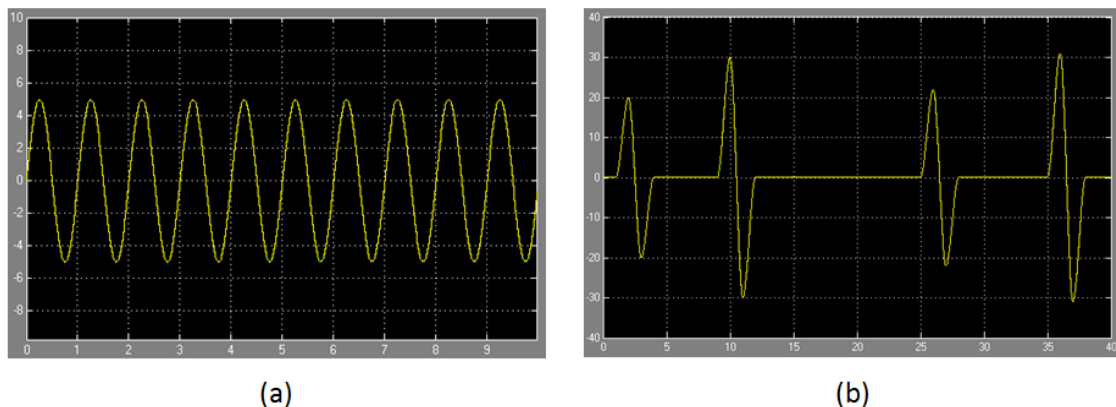


Figura 29: Señales producidas por los PZTs, (a) Señal continua, (b) Señal de pulsos

Como se puede observar en la figura (a), se trata de una señal constante, podría ser debida a una vibración, o el efecto producido por una persona al caminar a ritmo constante, lo cierto es que lo más probable es que aunque en la figura no se aprecien grandes diferencias, la amplitud de la señal no sea siempre completamente constante. En (b), tenemos un sistema discreto, en el que la señal está determinada por impulsos, cambiando tanto de amplitud como de frecuencia. Esta segunda sería parecida a la forma que se tendría si se colocase un piezoeléctrico en una carretera y pasaran distintos vehículos sobre el mismo.

Para analizar elementos eléctricos que se le añadirán al circuito eléctrico, se partirá de una onda equivalente a coches circulando cada dos segundos sobre el mismo piezoeléctrico. A continuación se muestra la onda producida por el PZT.

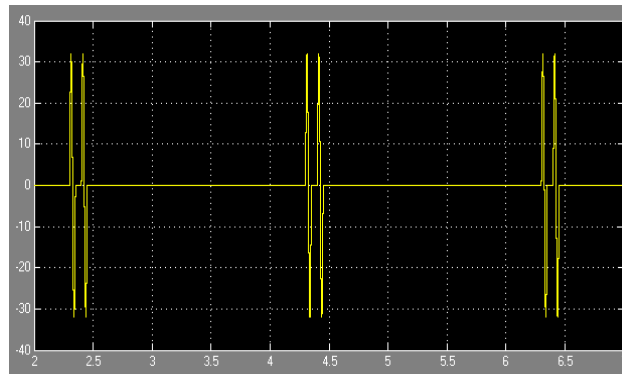


Figura 30: Onda generada por un piezoeléctrico al paso de vehículos a 90 km/h cada 2 segundos

Aunque en los modelos de aplicación se detallaran las propiedades del sistema a medir, se parte de este modelo como ejemplo para el estudio del circuito eléctrico de “*Energy Harvesting*” propuesto.

Como se ha comentado anteriormente y se puede observar en la forma de onda, la corriente que sale del piezoeléctrico es de onda completa, luego para poder reutilizar la energía, el primer paso una vez producido el efecto piezoeléctrico, será rectificar dicha onda con un puente de diodos.

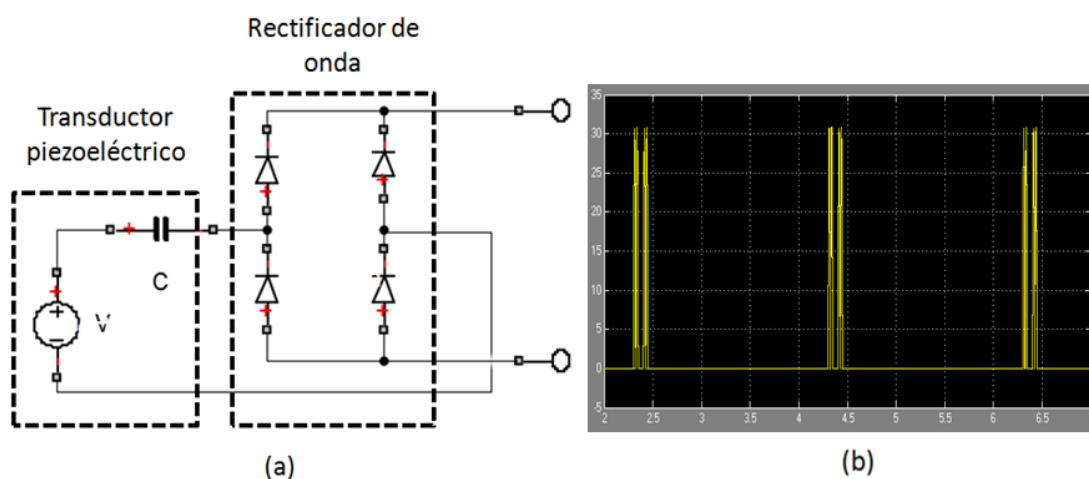


Figura 31: Modelo con onda rectificada

En la figura 31 (a) el circuito equivalente con el piezoeléctrico y el rectificador de onda. En (b) aparece la onda rectificada, es importante observar que se produce una ligera caída de potencial en los diodos del puente rectificador. También es importante observar que la fuente de alimentación, podría ser tanto un único transductor, como varios colocados ya sea en serie o en paralelo.

Aunque estos PZTs se conecten en series de 5, cada una de estas series llevará un puente rectificador para evitar que se puedan dar pérdidas debido a que algunos de los piezoeléctricos estén trabajando como sensores y otros como actuadores al mismo tiempo.

El siguiente paso teniendo ya la onda rectificada, será el filtrado mediante un condensador como se muestra en la siguiente figura.

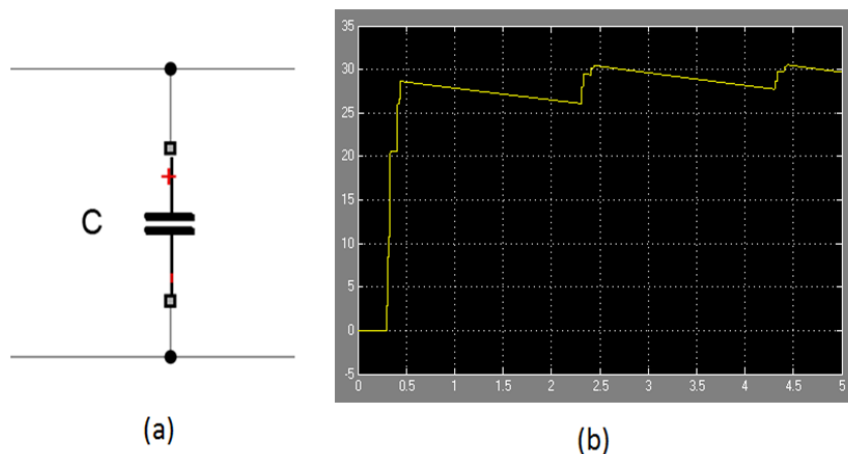


Figura 32: Condensador de filtrado: Condensador (a), Señal filtrada (b)

Como se puede ver en (b), la señal filtrada, es la resultante que queda cuando se carga el condensador conectado en paralelo con los impulsos generados en el PZT. En el caso de poner un condensador de mayor capacidad, este tardará más impulsos en cargar, pero tendrá menor rizado. Por el contrario si la capacidad es menor, este cargará más rápido, pero tendrá también un mayor rizado.

El último paso antes de tener la corriente constante que se pretende conseguir con este circuito de carga, no es necesario en todos los casos pero según la aplicación que se le vaya a dar puede tanto mejorar la calidad de la señal como evitar posibles sobretensiones en la carga. Para ello se podría añadir al circuito un limitador de tensión, que asegure que no se sobrecargue.

Aunque este paso en algunas ocasiones no es necesario, si se considera de importancia en este trabajo, ya que debido a la naturaleza de los sistemas de “Energy Harvesting” colocados en las carreteras se pueden dar casos muy variables. Por la misma carretera circulan desde motocicletas o coches ligeros, hasta vehículos pesados como autobuses o camiones. Debido a que la señal generada por los piezoeléctricos es directamente proporcional a la fuerza aplicada, es muy probable que haya una gran variabilidad en la tensión.

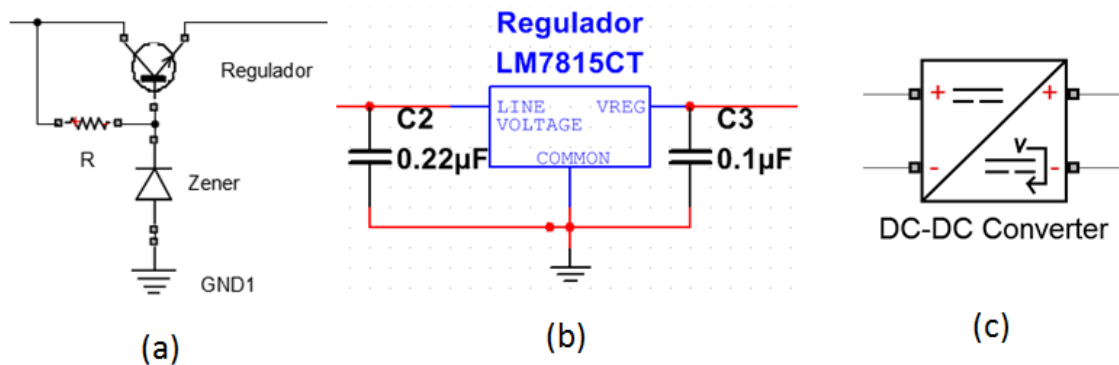


Figura 33: Regulador de tensión

En la figura 17 se muestran tres ejemplos de regulador de tensión; (a) es un regulador simple con diodo Zener, modelado en Simulink, (b) Modelo del regulador LMT7815CT en Multisim y (c) Modelo genérico de regulador de Simulink.

Finalmente el circuito completo quedaría así:

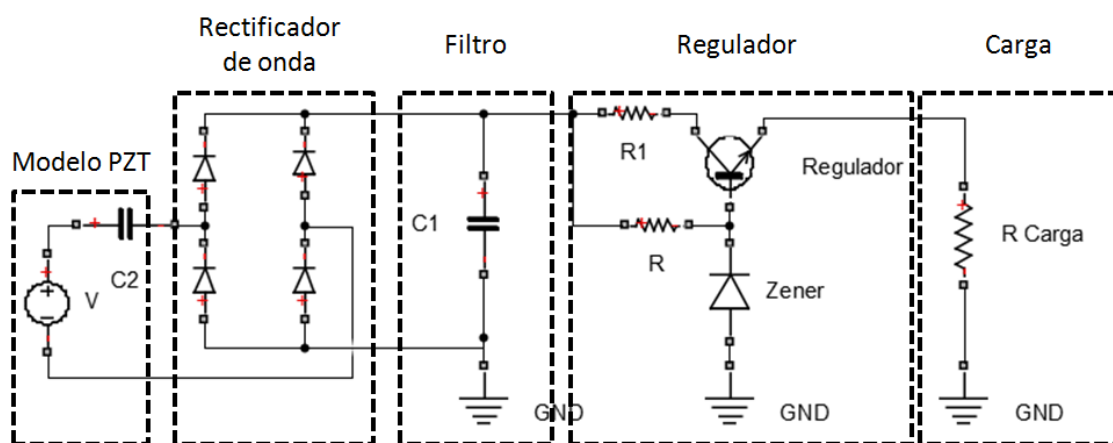


Figura 34: Circuito de carga simple completo

Cuya forma de onda evoluciona según el bloque como se muestra en la figura 35:

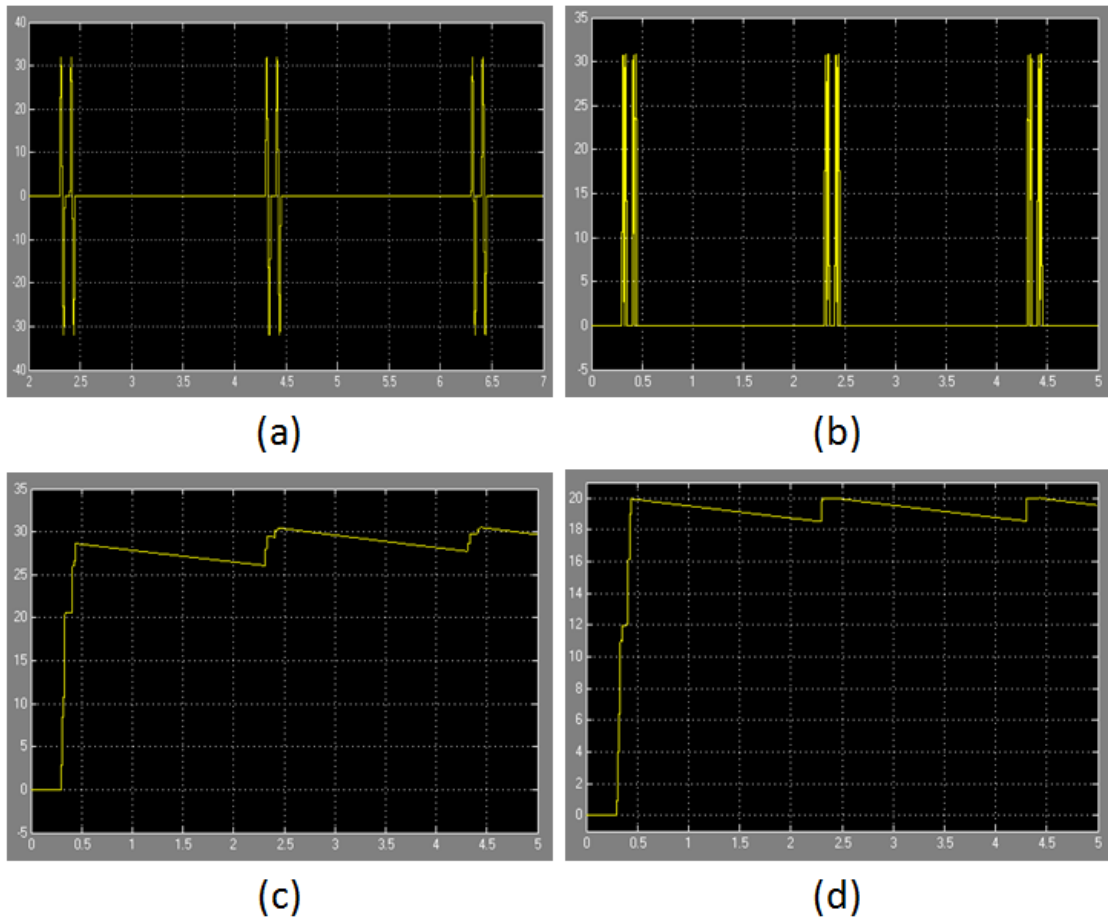


Figura 35: Evolución de la forma de onda de impulsos según bloques del circuito

De la figura, (a) señal producida por el PZT con frecuencia y fuerza constantes, (b) señal rectificada, (c) señal filtrada por condensador, (d) señal rectificada.

En el circuito equivalente simple, se ha colocado un único piezoeléctrico, ya que aunque se cambie esa fuente, el resto de elementos quedarán constantes. En el caso de colocar varios piezoeléctricos en serie, o incluso en varias series, el circuito sería más parecido al que se presenta en la figura 36:

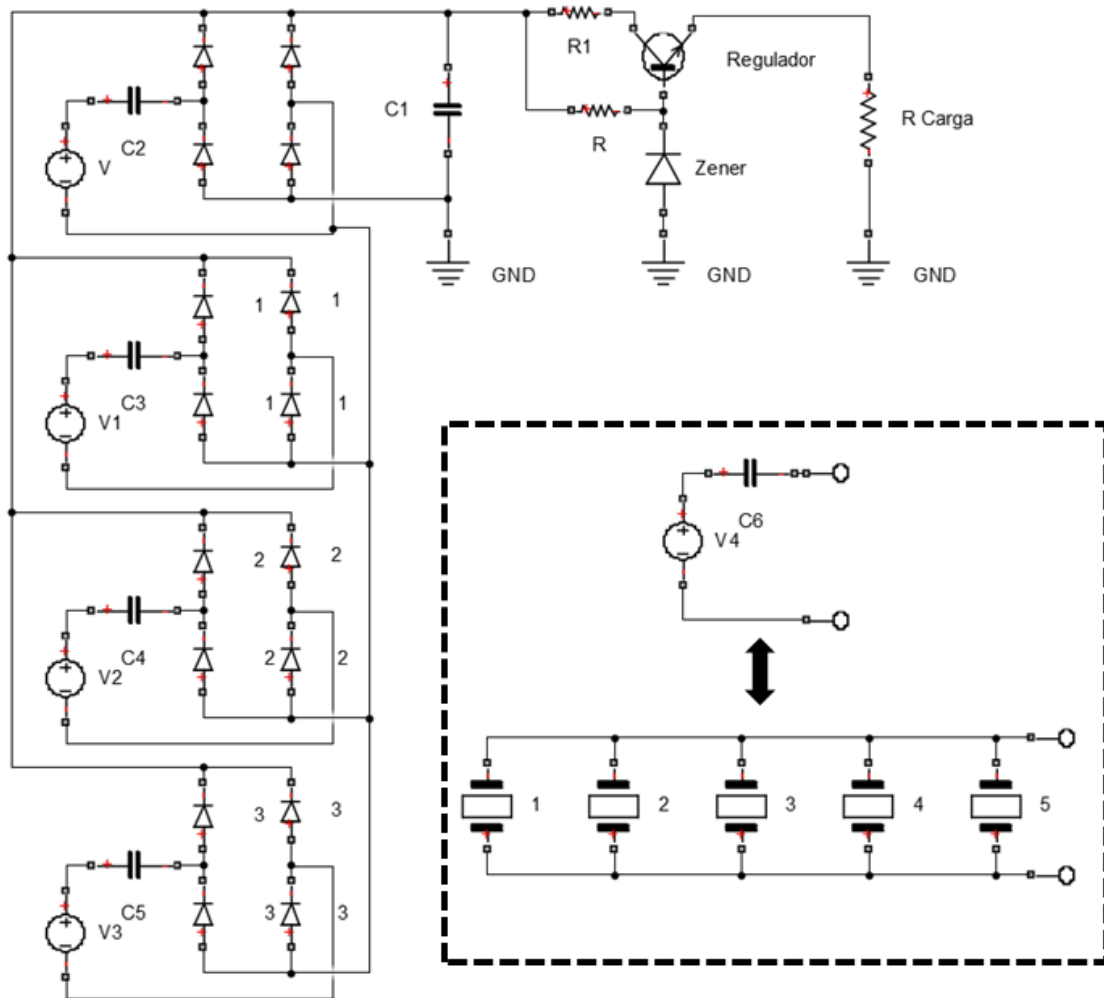


Figura 36: Circuito con 4 PZTs conectados en paralelo

Donde cada fuente podía a su vez representar a varios piezoeléctricos conectados en paralelo tal y como se muestra en la figura.

Lo cierto es que estos son los modelos genéricos que describen el circuito de carga que se planteará en cada uno de los casos a estudio. Pero el número de piezoeléctricos necesarios, su disposición final y la potencia que estos entreguen será determinada por la naturaleza de cada uno de los casos.

4. CASO DE ESTUDIO: VEHÍCULOS

En este capítulo se propone un diseño de generador piezoeléctrico que permita la reutilización de la energía producida en el firme de la carretera por el paso de los vehículos. Para ello se definen las condiciones de operación, se propone un modelo al que se le calcula la potencia que puede generar, y finalmente se proponen algunos casos de aplicación.

4.1. Definición del entorno

Para el posterior estudio de cada uno de los casos escenarios planteados, será necesario plantear algunas características básicas antes de poder modelar correctamente. Para ello se calculan las características estructurales medias de los vehículos, como peso y distancia entre ejes como velocidades medias.

Estos datos se utilizarán en las simulaciones como datos de de partida, ya que la onda generada por los PZTs estará determinada por las condiciones exteriores que aportan los vehículos. Para ello se ha consultado fichas técnicas de algunos de los vehículos más utilizados en España así como los datos correspondientes al tráfico medio de la Comunidad de Madrid. [32]

4.1.1. Datos de tráfico

Para poder definir el sistema es necesario conocer los datos del tráfico, que a su vez afectarán a las trenes de pulso generados por los por los vehículos que se estudian en los puntos 4.1.3. y 4.1.4. en función tanto de la velocidad como del número de impulsos por unidad de tiempo.

Para hacer el análisis se tomaran como base los datos del IMDm (Intensidad Media Diaria media) de la Comunidad de Madrid del año 2016. Este informe recoge la información del tráfico que circula por las carreteras de la Comunidad, así como los tramos más transitados, porcentaje de vehículos pesados y velocidad media.[32]

Una vez conocido el tráfico medio diario y la velocidad se llevaran esos datos junto a las características de los vehículos que circulan por las vías para con las propiedades del sistema completo poder hacer las simulaciones de los modelos a estudio.

Debido a su alto tránsito, el tramo de carretera elegido para el estudio es el relativo a la M45 que se encuentra entre los enlaces de Leganés y Getafe/Villaverde, y cuyos datos se recogen en la siguiente tabla:

TABLA 6: DATOS IMD DEL TRAMO A ENTRE LEGANÉS Y GETAFE/VILLAVERDE. M-45

M-45 PK 6,52 (Entre Leganés y Getafe/Villaverde)

| Datos 2016 | |
|--------------------------|---------|
| IMD (Vehículos/día) | 107.524 |
| % Vehículos pesados 2016 | 9,46% |
| Velocidad media | 96 Km/h |
| IMD ligeros | 97.352 |
| IMD pesados | 10.172 |

Para poder tratar estos datos, lo inicial será conocer como es el tramo para poder modelarlo. Para ello se saca una foto satélite para observar la naturaleza del mismo, véase la siguiente figura:



Figura 37: Foto satélite del tramo de carretera a estudio para el modelo.

Como se puede observar, se trata de una autopista iluminada de tres carriles en cada sentido. (Durante la totalidad del tramo tiene las mismas características). Conocidas estas características, se calcula el número de vehículos que circulan diariamente por cada carril.

$$\frac{107.524 \text{ veh\u00edculos/d\u00eda}}{2 \text{ sentidos}} = 53.762 \frac{\text{veh\u00edculos}}{\text{sentido} \cdot \text{d\u00eda}} \quad (4.1)$$

$$\frac{53.762 \frac{\text{veh\u00edculos}}{\text{sentido} \cdot \text{d\u00eda}}}{3 \frac{\text{carriles}}{\text{sentido}}} = 17.920 \frac{\text{veh\u00edculos}}{\text{carril} \cdot \text{d\u00eda}} \quad (4.2)$$

Dado que lo se necesita calcular para el modelo es la frecuencia de los veh\u00edculos que circulan por la v\u00eda, se calcula el n\u00famero de veh\u00edculos por minuto.

$$17.920 \frac{\text{veh\u00edculos}}{\text{carril y d\u00eda}} / 1.440 \frac{\text{d\u00eda}}{\text{min}} = 12,5 \frac{\text{veh\u00edculos}}{\text{min}} \quad (4.3)$$

Con el dato de 12,5 veh\u00edculos por minuto y carril quiere decir que pasa un veh\u00edculo cada 4,8 segundos por cada uno de los carriles. Dado que no se dispone del dato de cuantos veh\u00edculos circulan por cada carril, se tomar\u00e1 como dato que los veh\u00edculos ligeros circulan por los carriles indistintamente.

Por el contrario en el caso de los veh\u00edculos pesados, se considerar\u00e1 que el 70% de los mismos circulan por el carril de la derecha, que es en el que se colocar\u00edan los transductores de PZT.

Adem\u00e1s, los datos del \u00edndice medio diario de los que se parte, incluyen en sus medias tanto las noches como los fines de semana o d\u00edas festivos. Debido a esto el periodo no ser\u00e1 constante en la realidad, si no que depender\u00e1 del d\u00eda y la hora. No obstante, debido a que lo que se pretende es calcular la energ\u00eda total obtenida, se partir\u00e1 de la base de que el trafico fluct\u00faa de forma constante sin tener en cuenta diferencias de densidad.

4.1.2. Modelado del veh\u00edculo ligero

El primer modelado a realizar ser\u00e1 el de los veh\u00edculos ligeros, estos componen en torno al 90% del tr\u00e1fico dependiendo de la carretera en la Comunidad de Madrid.[32] Aunque sus pesos en carga var\u00edan entre los 800 y hasta los 3000 Kg, tras revisar las caracter\u00edsticas de los principales modelos, se estima el peso medio de un veh\u00edculo ligero en 1400 Kg en carga.

Pero tener el peso no es lo suficiente para saber la fuerza que ejercer\u00e1 el veh\u00edculo sobre el material piezoel\u00e9ctrico, para ello es necesario calcular cual es la presi\u00f3n que produce cada una de las ruedas sobre el firme.

Para ello se realizan los siguientes cálculos, primero la fuerza total ejercida por el vehículo:

$$F_{total} = m \cdot a = 1400 \text{ Kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 13,734 \text{ kN} \quad (4.4)$$

Pero teniendo en cuenta que esta fuerza se reparte entre las cuatro ruedas, cada una de ellas ejercerá una fuerza proporcional:

$$F_{rueda} = 13,734/4 = 3,43 \text{ kN} \quad (4.5)$$

Se estima que una rueda tiene una superficie de contacto de 20cm×10cm, lo que equivale a 200cm² o 0,02m², aunque la superficie de contacto de la rueda sea en realidad más parecida a un elipsoide. [33], [34]

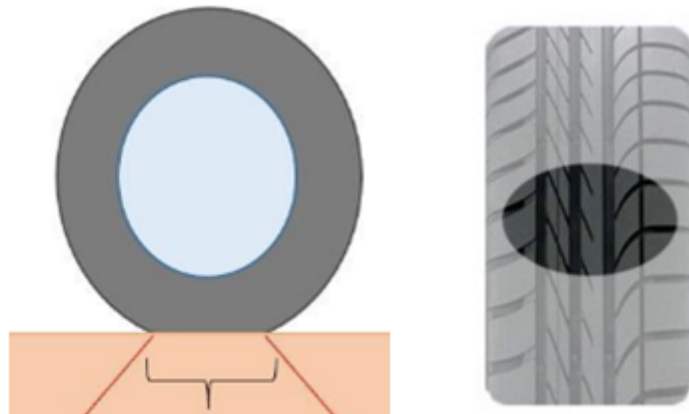


Figura 38: Superficie de contacto entre el neumático y la carretera[33]

Teniendo en cuenta entonces la superficie total de contacto que se repartirá la fuerza:

$$Presión = 3,43 \text{ kN}/0,02 \text{ m}^2 = 0,17 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

Comparando con los valores de la bibliografía, que están en torno a los 0,2 MPa, [30], [34], se puede determinar que el orden de magnitud estimado es correcto.

Otra característica que será importante a la hora de modelar un sistema de “*Energy Harvesting*”, será la distancia entre ejes, ya que según la velocidad a la que circule el coche y la misma, se puede obtener el tiempo entre los dos pulsos que generará el mismo coche al paso por un piezoeléctrico. Esa longitud se ha estimado en 2,6 m.

Aunque es evidente que no todos los vehículos ligeros tienen las mismas características, se tomarán estos datos como los medios para los modelos de cálculo.

Con los datos de velocidad media de velocidad media del tramo sometido a estudio, se calcula el tren de pulsos generados por los ejes del vehículo al pasar sobre un transductor. De tal manera:

$$v_{mediaVL} = 96 \text{ Km/h} = 26,7 \text{ m/s} \quad (4.7)$$

Con la distancia entre ejes se podrá por tanto calcular el tiempo entre los pulsos:

$$t_1 = 2,6 \text{ m} / 26,7 \text{ m/s} \approx 0,1 \text{ s} \quad (4.8)$$

Para modelar el paso de un coche por los PZTs, el circuito a utilizar es con el generador modelado en el capítulo 3, pero con unos generadores de impulsos que simulen los pasos de los ejes, cerrando el circuito y mandando de esa manera los impulsos. A continuación se muestra cómo será el circuito:

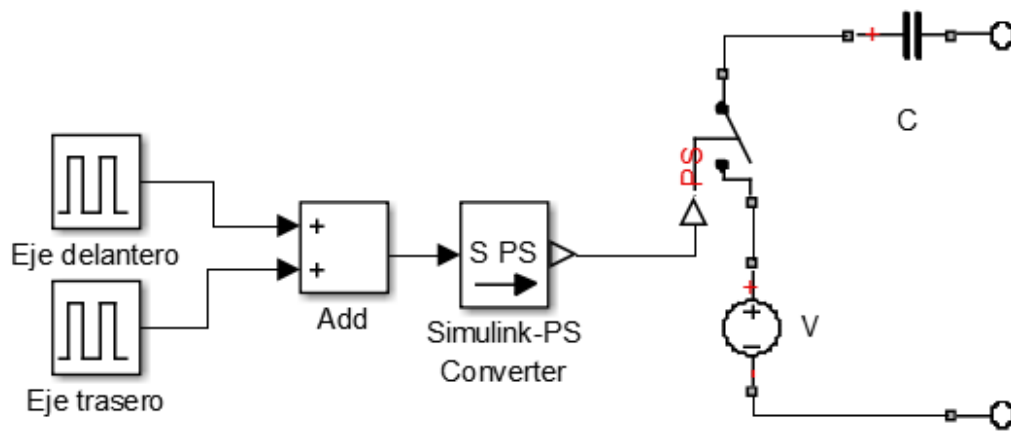


Figura 39: Circuito equivalente para vehículo ligero

La onda generada por este circuito tendrá la forma que se puede observar en la figura 40.

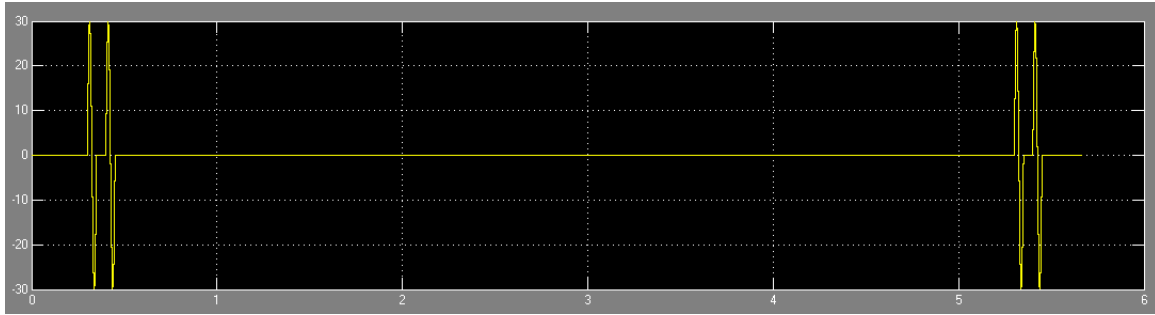


Figura 40: Onda equivalente 2 vehículos ligeros circulando a 96Km/h, con una separación de 5 segundos entre su paso

En la onda se puede observar una simulación del paso de dos vehículos, cada uno de ellos generaría dos impulsos, uno por cada eje. La distancia entre las ondas vendrá definida por la velocidad de los vehículos en el caso de los ejes y por la densidad de tráfico. Para la velocidad media del tramo a estudio este tiempo es de 0,1s.

Basados en los datos de la bibliografía se hacen dos suposiciones en esta simulación; la primera de ellas es que los dos ejes del coche tienen la misma masa. La segunda suposición, es que la duración del pulso, para altas velocidades de las cargas aplicadas tiene una duración constante. Según los datos revisados en la bibliografía esta duración es de 50ms, que equivaldrían a una frecuencia intermitente de 20Hz.

4.1.3. Modelado del vehículo pesado

El mismo estudio que se ha realizado para los vehículos ligeros es necesario realizarlo para los pesados, ya que aunque estos solo correspondan al 10% del tráfico sus características distan considerablemente de los ligeros, y no deben modelarse de la misma forma.

La primera complicación que surge al hacer el modelado de este tipo de vehículos es que estos tienen morfologías y pesos muy variados, en el caso de los ligeros también ocurre en cierta medida, pero para los pesados la peso en vacío o cargado tiene un cambio muy considerable, el número de ejes no es siempre el mismo, etc.

Por ello se partirá de algunas suposiciones basadas en la bibliografía, considerando que el vehículo pesado medio tiene 3 ejes, y que ejerce una presión de 0,9MPa en cada rueda. Además se considerará la distancia entre ejes de 4m entre el primero y el segundo y 1,4m entre el segundo y el tercero. Estas suposiciones están basadas en los tamaños medios de los camiones considerados más comunes.

Para calcular el tren de pulsos se hace lo mismo que en el caso de los vehículos ligeros, con la ligera diferencia de que se va a considerar la velocidad media de estos vehículos de 90 Km/h y teniendo en cuenta que son tres ejes. Luego:

$$v_{mediaVP} = 90 \text{ Km/h} = 25 \text{ m/s} \quad (4.9)$$

Se calculan t_1 y t_2 :

$$t_1 = 4 \text{ m} / 25 \text{ m/s} \approx 0,16 \text{ s} \quad (4.10)$$

$$t_2 = 1,4 \text{ m} / 25 \text{ m/s} \approx 0,056 \text{ s} \quad (4.11)$$

El circuito equivalente en este caso sería el siguiente:

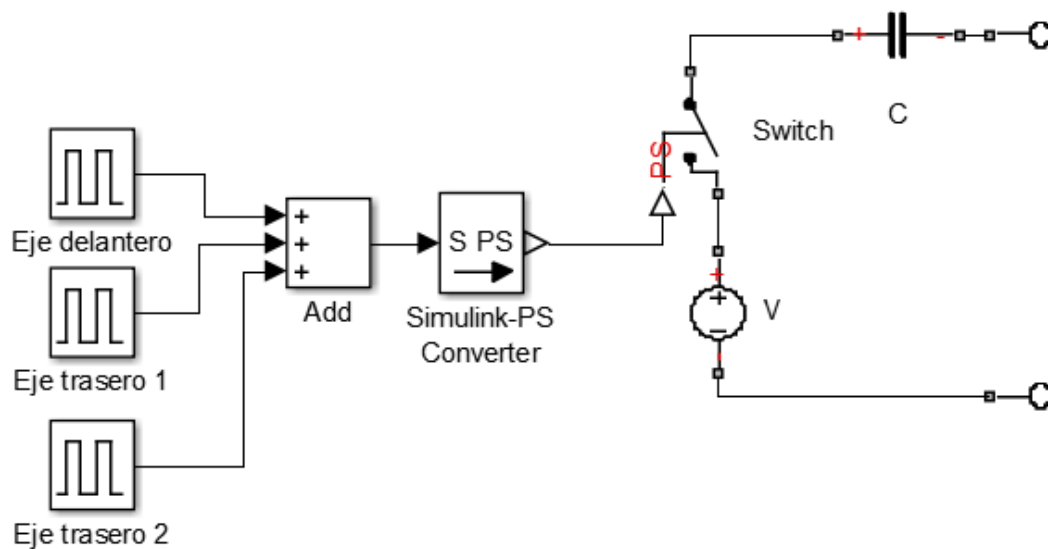


Figura 41: Circuito equivalente para vehículo pesado

Donde la onda generada sería la mostrada en la figura 42:

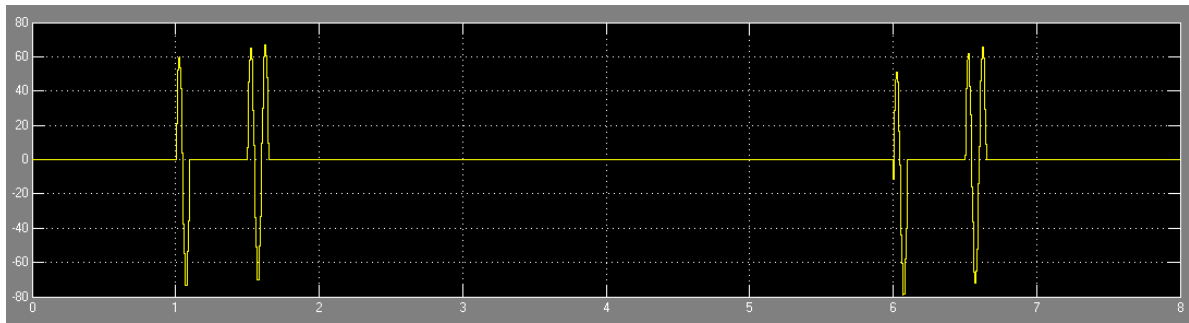


Figura 42: Onda equivalente vehículos pesados

El tren de pulsos se verá comprimido o estirado en función de la velocidad, y aquí también se harán las mismas suposiciones que en el caso de los vehículos ligeros, los pulsos tienen una duración constante de 50ms.

Además, debido a que la presión aplicada por los vehículos pesados es considerablemente mayor, la fuente que V , tendrá el valor relativo a la mayor presión aplicada sobre los PZT.

4.2. Colocación de los PZTs

Debido a la naturaleza del estudio, será necesario hacer algunas suposiciones del soporte en el que se encontrarán montados los PZTs. Para ello se hace un breve diseño de unos paneles tipo “sándwich”, que se puedan montar fácilmente y que lleven los transductores en su interior. Con las dimensiones del piezoeléctrico a estudio, que tiene un diámetro de 3cm, en esta sección se proponen distintas opciones para optimizar el rendimiento de los transductores.

4.2.1. Conexión serie paralelo de 16 PZTs

Con el objetivo de maximizar el ancho, y por tanto reutilizar la mayor parte de energía posible generada por los vehículos al pasar sobre la vía, se propone un diseño de placa de 50 cm de ancho con 16 transductores conectados en serie-paralelo como se muestra la figura 43:

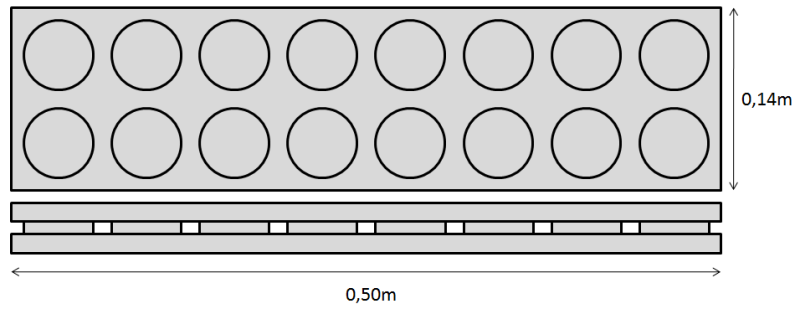


Figura 43: Panel tipo "Sándwich" para montaje de 16 transductores

Los piezoeléctricos de la estructura de la figura, se conectarán en serie-paralelo, tal y como se muestra en la siguiente figura. No obstante, es necesario observar que cada par de piezoeléctricos deberá llevar un puente de diodos para evitar que en el caso de que solo estén trabajando algunos de ellos el resto puedan actuar como consumidores de energía. Esto se plantea como medida preventiva, ya que la suposición es que trabajan todos al tiempo al pasar la rueda por encima

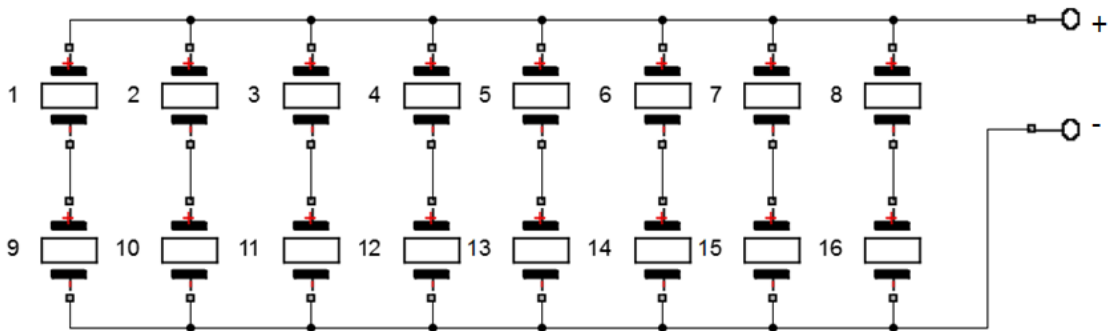


Figura 44: Conexión de los PZTs en serie-paralelo

Dado que en estas simulaciones, la unidad mínima de medida será cada una de estas baldosas, y a partir del circuito equivalente del PZT expuesto en el capítulo 3, se modela el circuito equivalente a los 16 transductores en serie-paralelo, como se muestra en la figura 45.

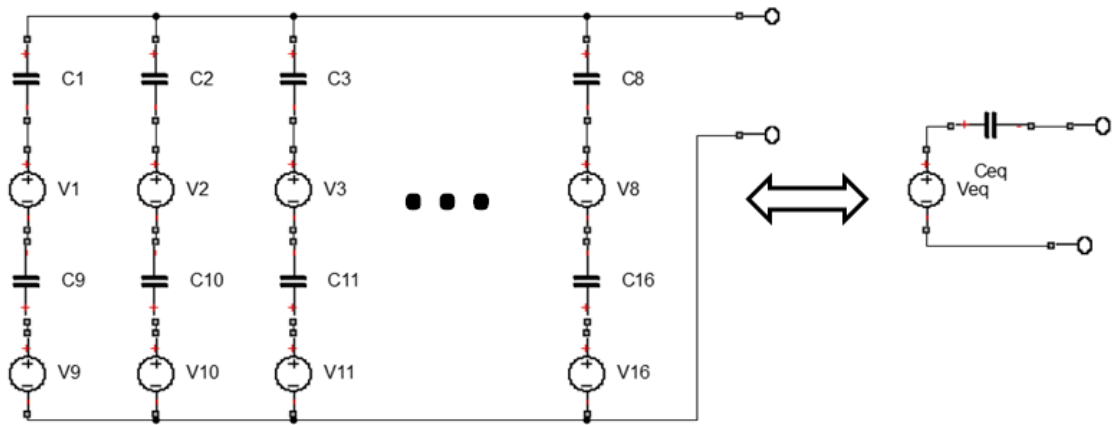


Figura 45: Circuito equivalente baldosa serie-paralelo

Donde los valores de V_{eq1} y C_{eq1} son según sus equivalentes:

$$V_{eq1} = V_1 + V_9 = V_2 + V_{10} = \dots = 2V_n \quad (4.12)$$

Y para los condensadores, conocido el valor del condensador del circuito equivalente calculado en el capítulo anterior, ($C_{PZT} = 18,8 \text{ nF}$)

$$\frac{1}{C_{1+9}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_9} = \frac{2}{18,8 \cdot 10^{-9}} \approx 0,1064 \cdot 10^{-9} \quad (4.13)$$

Luego:

$$C_{1+2} = \frac{1}{0,1064 \cdot 10^{-9}} = 9,4 \text{ nF} \quad (4.14)$$

Finalmente con las 8 ramas conectadas en paralelo la equivalente de todo el sistema:

$$C_{eq1} = 8 \cdot C_{1+2} = 75,2 \text{ nF} \quad (4.15)$$

Debido a que los vehículos de la vía tienen distintos anchos de eje, y además no todos circulan por el centro del carril, se estima una colocación de estas baldosas como se muestra en la figura 46.

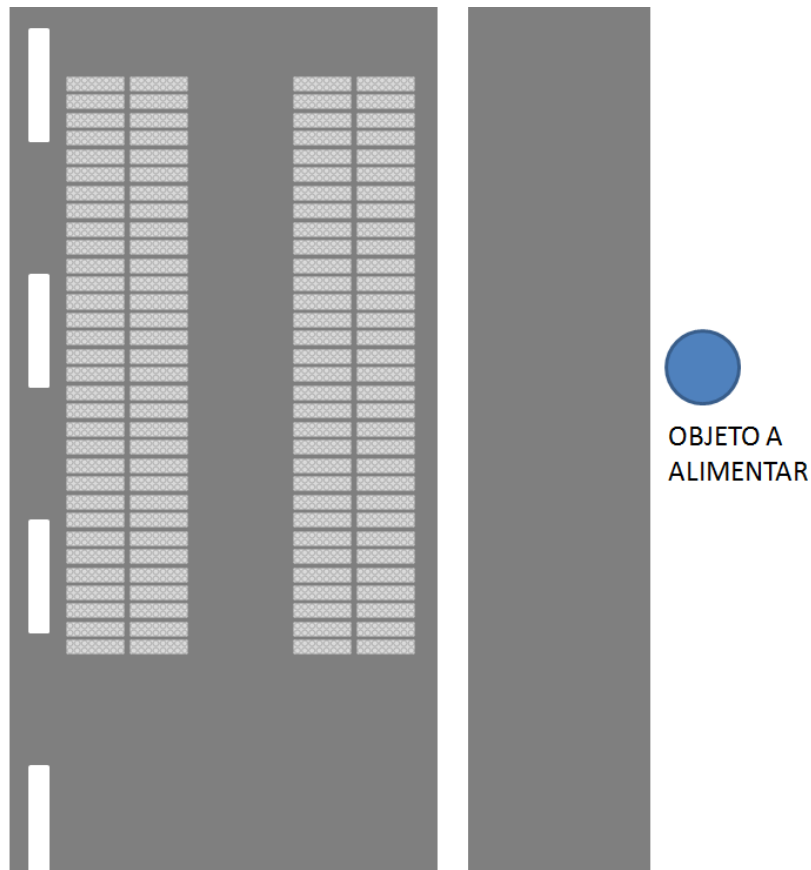


Figura 46: Montaje de los PZTs para alimentar una carga, (farola, poste de socorro, señalización, etc.)

Aunque en la figura el objeto a alimentar aparece junto a las placas instaladas, es necesario tener en cuenta que no en todos los casos será así, ya que en algunas de las aplicaciones el objetivo podría ser que la carga estuviera alimentada antes de llegar el vehículo a la misma. Por otro lado, se han procurado distribuir los paneles en las zonas de las bandas de rodadura para captar la energía producida por cada uno de los vehículos que circulan por el carril.

Finalmente para tener el dato de cuanta energía es capaz de producir cada baldosa se simulan los datos en un modelo de vehículos ligeros circulando según los datos obtenidos en el apartado anterior. Con ello se calculará la potencia máxima que puede entregar cada uno de los modelos que se proponen.

En la figura 47 se muestra el modelo a utilizar:

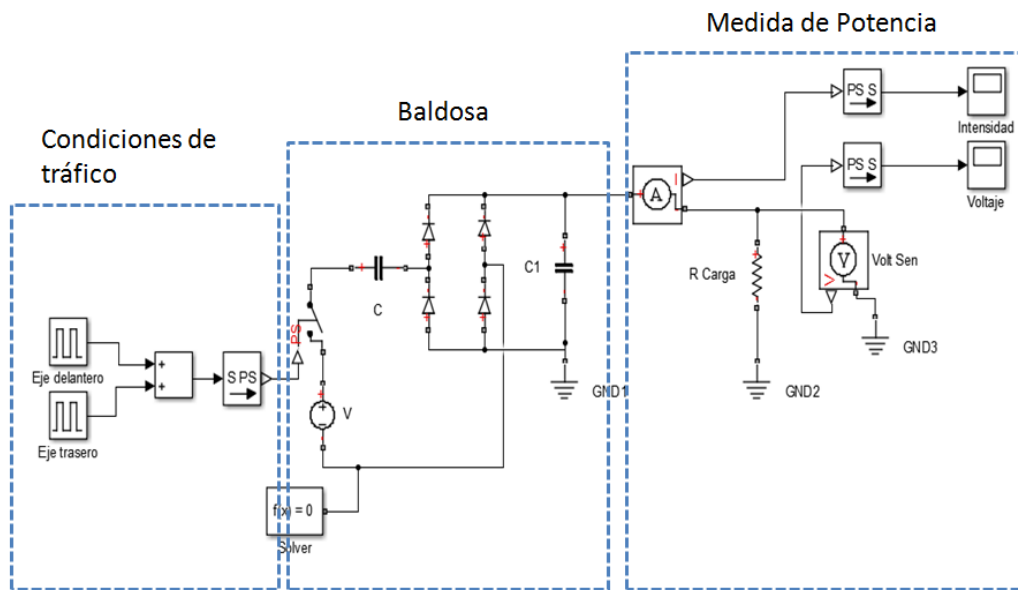


Figura 47: Modelo para cálculo de potencia entregada por la baldosa

Con la frecuencia de paso de los ejes, se cierra el circuito del generador, que deja pasar un impulso por cada paso de eje. Los piezoeléctricos están conectados a un rectificador de onda, que llevan al condensador que filtra la señal, cuya capacidad es de $20\mu\text{F}$. La fuente de tensión oscila a una frecuencia de 20Hz , y para calcular el valor de la amplitud se realizan los siguientes cálculos.

Al pasar el vehículo sobre las placas, cada neumático genera una tensión equivalente a la cuarta parte del peso del vehículo sobre cada placa, luego los $3,43\text{ kN}$ calculados en la fórmula 4.7 se aplican sobre 16 transductores quedando resultante la siguiente fuerza por cada uno de ellos:

$$F_{PZT} = 3,43\text{ kN} / 16 = 214\text{ N} \quad (4.16)$$

Que sustituyendo en la ecuación (3.2) daría el siguiente valor para el voltaje de cada PZT:

$$V_{PZT} = 0.038 \cdot F = 8,13\text{ V} \quad (4.17)$$

Pero teniendo en cuenta el circuito equivalente planteado, y sustituyendo en la ecuación:

$$V_{eq1} = 2 \cdot 8,13\text{ V} = 16,26\text{ V} \quad (4.18)$$

Por otro lado dado que el valor del condensador del circuito equivalente no depende del peso del vehículo, este tiene el valor de C_{eq1} está calculado y tiene un valor de 75,2 nF. Se asumirá como hipótesis inicial, que todos los vehículos que circulan por el carril son vehículos ligeros, pasando uno cada 5 segundos.

A continuación se muestra la tabla

TABLA 7: VALORES OBTENIDOS EN MODELO SERIE-PARALELO CON DISTINTAS CARGAS, (CONDICIONES EXTERIORES DE UN VEHÍCULO LIGERO CADA 5 SEGUNDOS)

| Resistencia Carga [kΩ] | Corriente [μA] | Tensión [V] | Potencia [μW] |
|---------------------------|-------------------|----------------|------------------|
| 50 | 0,08 | 0,00 | 0,00 |
| 100 | 0,40 | 0,04 | 0,02 |
| 500 | 1,28 | 0,64 | 0,82 |
| 1000 | 1,36 | 1,36 | 1,85 |
| 2500 | 1,24 | 3,10 | 3,84 |
| 5000 | 1,02 | 5,09 | 5,18 |
| 6000 | 0,95 | 5,68 | 5,38 |
| 7000 | 0,88 | 6,18 | 5,46 |
| 7500 | 0,85 | 6,41 | 5,48 |
| 8000 | 0,83 | 6,62 | 5,48 |
| 9000 | 0,78 | 7,01 | 5,46 |
| 10000 | 0,74 | 7,35 | 5,40 |
| 12000 | 0,66 | 7,92 | 5,23 |
| 15000 | 0,57 | 8,58 | 4,91 |
| 20000 | 0,47 | 9,36 | 4,38 |
| 30000 | 0,34 | 10,26 | 3,51 |
| 50000 | 0,22 | 11,11 | 2,47 |

Cuya grafica resultante de potencia entregada frente a resistencia en la carga queda:

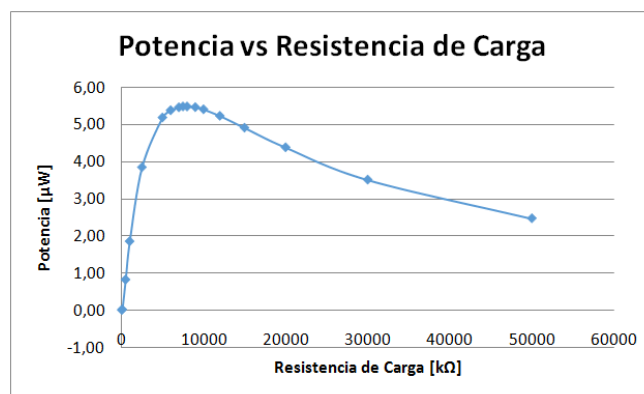


Figura 48: Gráfica de potencia entregada para modelo de 16 PZTs en serie-paralelo

Luego la máxima potencia que puede entregar este diseño por cada placa es de $5,48\mu W$ por cada vehículo ligero y baldosa.

4.2.2. Conexión paralelo de 8 PZTs

Con la finalidad de evitar tener que colocar los piezoeléctricos en serie, se propone un diseño muy similar en el que en una placa del mismo tamaño se colocan 8 piezoeléctricos conectados en paralelo. El diseño físico es como se muestra a continuación:

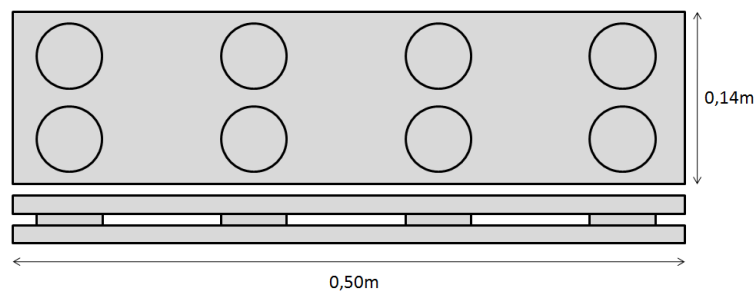


Figura 49: Panel tipo "Sándwich" para montaje de 8 PZTs

El circuito eléctrico equivalente en este caso será como se muestra en la siguiente figura:

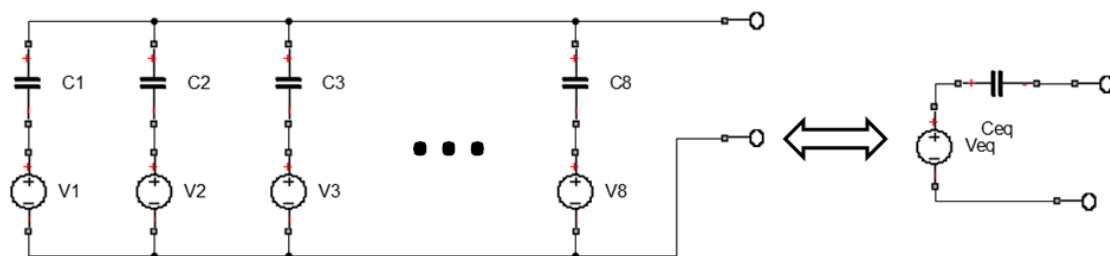


Figura 50: Circuito equivalente baldosa de 8 PZTs en paralelo

Donde los valores de V_{eq2} y C_{eq2} son según sus equivalentes:

$$V_{eq2} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots \quad (4.19)$$

Para calcular el voltaje producido por cada PZT se siguen los mismos pasos que en el caso de la anterior baldosa, pero teniendo en cuenta que ahora la baldosa de iguales características está apoyada sobre únicamente 8 piezoeléctricos, luego:

$$F_{PZT} = 3,43 \text{ kN} / 8 = 429N \quad (4.20)$$

Que sustituyendo en la ecuación (3.2) da el siguiente valor para el voltaje de cada PZT:

$$V_{PZT} = V_{eq2} = 0.038 \cdot F = 16.26 V \quad (4.21)$$

Y para los condensadores, al estar conectados en paralelo:

$$C_{eq2} = C_1 + C_2 + \dots + C_3 = 150.4 nF \quad (4.22)$$

Se vuelve a modelar el circuito equivalente, cuyo diseño es igual que el del caso 4.2.1. pero dándole nuevos valores a la fuente equivalente, en el caso de la amplitud no cambia, y en el caso de la C_{eq} se le da el valor recién calculado.

Con los resultados de las simulaciones volvemos a construir la tabla de potencias y la respectiva gráfica:

TABLA 8: VALORES OBTENIDOS EN MODELO PARALELO CON DISTINTAS CARGAS, (CONDICIONES EXTERIORES DE UN VEHÍCULO LIGERO CADA 5 SEGUNDOS)

| Resistencia [kΩ] | Carga | Corriente [μA] | Tensión [V] | Potencia [μW] |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 50 | | 0,20 | 0,01 | 0,00 |
| 100 | | 0,90 | 0,09 | 0,08 |
| 500 | | 2,93 | 1,46 | 4,29 |
| 1000 | | 2,47 | 2,47 | 6,10 |
| 1500 | | 2,33 | 3,49 | 8,12 |
| 2000 | | 2,17 | 4,34 | 9,43 |
| 3000 | | 1,89 | 5,68 | 10,75 |
| 4000 | | 1,67 | 6,68 | 11,16 |
| 5000 | | 1,49 | 7,46 | 11,12 |
| 6000 | | 1,35 | 8,08 | 10,88 |
| 7000 | | 1,23 | 8,59 | 10,54 |
| 8000 | | 1,13 | 9,01 | 10,15 |
| 9000 | | 1,04 | 9,37 | 9,75 |
| 10000 | | 0,97 | 9,675 | 9,36 |
| 11000 | | 0,89 | 9,741 | 8,63 |
| 15000 | | 0,71 | 10,72 | 7,66 |

Y su curva de potencia:

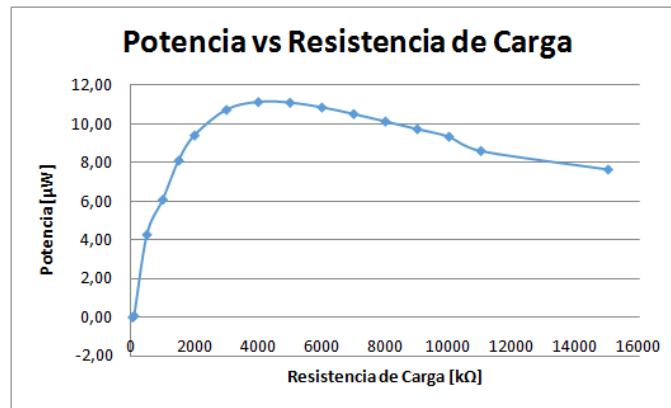


Figura 51: Gráfica de potencia entregada para modelo de 8 PZTs en paralelo

El máximo valor para la potencia es en este caso de 11,26 µW, casi el doble que en el caso anterior.

4.2.3. Conexión en paralelo de 4 PZTs

En esta tercera propuesta, se pretende concentrar la energía producida todavía más que en el caso anterior, para ello se proponen paneles de menor tamaño que solo contengan cuatro piezoeléctricos por cada "Sándwich". Además, se optimiza el diseño para poder colocar mayor densidad de piezoeléctricos lineales en la carretera. El diseño de este caso es como se muestra a continuación:

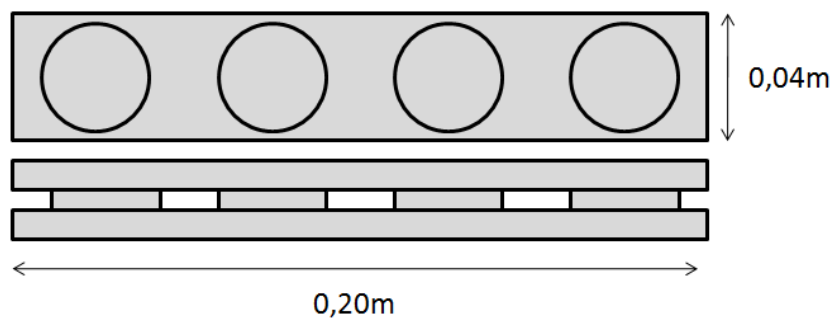


Figura 52: Panel tipo "Sándwich" para montaje de 4 PZTs

Se diseña lo suficientemente ancho como para poder albergar el ancho de una rueda, teniendo en cuenta que habrá que colocar mas número de paneles, pero igual número de piezoeléctricos que en el caso anterior para cubrir las zonas de rodadura más probables.

El cálculo del circuito equivalente se realiza igual que en el del caso de 8 piezoeléctricos:

$$C_{eq3} = 4C_{PZT} = 75.2 \text{ nF} \quad (4.23)$$

Y para calcular la amplitud de los pulsos se vuelve a dividir el peso de la rueda, luego la fuerza en cada PZT y por tanto su voltaje serán:

$$F_{PZT} = 3,43 \text{ kN} / 4 = 858 \text{ N} \quad (4.24)$$

$$V_{PZT} = V_{eq3} = 0.038 \cdot F = 32.58 \text{ V} \quad (4.25)$$

Se simula para obtener nuevamente los valores de la potencia frente a la resistencia de carga.

TABLA 9: VALORES OBTENIDOS EN MODELO DE 4 PZTS EN PARALELO CON DISTINTAS CARGAS, (CONDICIONES EXTERIORES DE UN VEHÍCULO LIGERO CADA 5 SEGUNDOS)

| Resistencia Carga [kΩ] | Corriente [μA] | Tensión [V] | Potencia [μW] |
|---------------------------|-------------------|----------------|------------------|
| 50 | 0,20 | 0,01 | 0,00 |
| 100 | 7,00 | 0,70 | 4,90 |
| 500 | 3,60 | 1,80 | 6,48 |
| 1000 | 2,85 | 2,85 | 8,12 |
| 2500 | 2,47 | 6,18 | 15,28 |
| 5000 | 2,16 | 10,80 | 23,33 |
| 6000 | 2,00 | 12,00 | 24,00 |
| 7000 | 1,86 | 13,01 | 24,18 |
| 8000 | 1,75 | 14,00 | 24,50 |
| 8500 | 1,71 | 14,50 | 24,74 |
| 9000 | 1,64 | 14,80 | 24,34 |
| 10000 | 1,55 | 15,50 | 24,03 |
| 12000 | 1,39 | 16,70 | 23,24 |
| 15000 | 1,20 | 18,00 | 21,60 |
| 20000 | 0,98 | 19,60 | 19,21 |
| 30000 | 0,72 | 21,70 | 15,70 |
| 50000 | 0,47 | 23,60 | 11,14 |

Cuya curva de potencia se muestra en la siguiente figura:

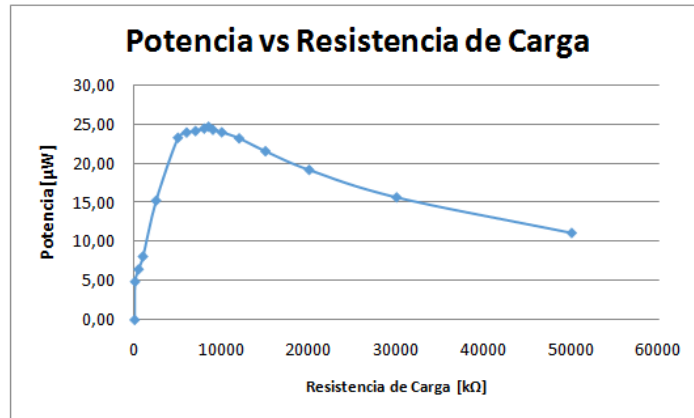


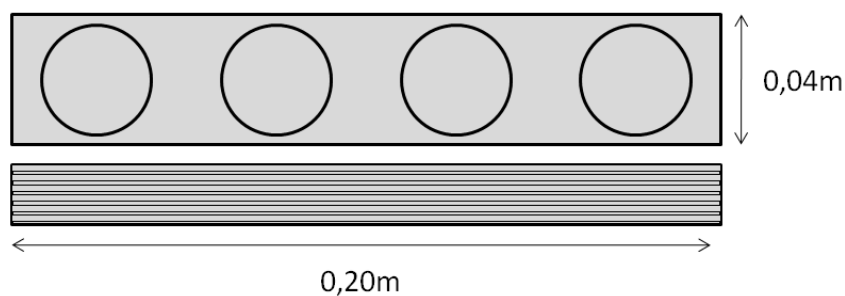
Figura 53: Gráfica de potencia entregada para modelo de 4 PZTs en paralelo

En este caso entrega una potencia máxima de $24,74 \mu\text{W}$ maximizando la potencia frente a los casos anteriores, no obstante, con los niveles de potencia que entrega cada una de las baldosas, las longitudes que se deberían cubrir en la carretera serían demasiado elevadas, ya que para obtener un solo vatio de potencia sería necesario usar 800 metros de carril. Esto haría la solución inviable, y es por ello que basada en la solución propuesta por el “Proyecto REC”[30] se propone aumentar de forma considerable la densidad de piezoeléctricos bajo las bandas de rodadura.

4.2.4. Diseño de alta densidad de PZTs

En este último modelo de montaje, basada en la solución propuesta en el “Proyecto REC”[30], se propone por tanto, colocar mas capas de piezoeléctricos bajo las bandas de rodadura, para poder de esta forma reducir de forma considerable la longitud mínima para aumentar una carga, y poder de esta forma diseñar un modelo viable.

Para ello se propone generar 30 capas sobre la estructura de igual planta que en el caso anterior, en el que todos los piezoeléctricos estén conectados en paralelo, siendo la resultante el siguiente modelo:



Cuyas 30 capas son capaces de albergar 120 PZTs, se calcula el circuito equivalente de la placa:

$$C_{eq4} = 120C_{PZT} = 2,256 \mu F \quad (4.26)$$

Dado que la superficie de contacto, sigue siendo la misma que en el caso anterior, se mantiene el dato ya calculado:

$$V_{PZT} = V_{eq4} = 32.58 V \quad (4.27)$$

Con estos datos se construye el circuito equivalente de la baldosa en Simulink y se realizan las simulaciones para obtener la máxima potencia entregada por la baldosa, teniendo en cuenta las mismas condiciones de los casos anteriores.

TABLA 10: VALORES OBTENIDOS EN MODELO DE 120 PZTS EN PARALELO CON DISTINTAS CARGAS, (CONDICIONES EXTERIORES DE UN VEHÍCULO LIGERO CADA 5 SEGUNDOS)

| Resistencia Carga [kΩ] | Corriente [μA] | Tensión [V] | Potencia [mW] |
|---|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 50 | 91,00 | 4,55 | 0,41 |
| 100 | 79,00 | 7,90 | 0,62 |
| 200 | 62,25 | 12,45 | 0,78 |
| 300 | 51,50 | 15,45 | 0,80 |
| 350 | 47,43 | 16,60 | 0,79 |
| 400 | 43,75 | 17,50 | 0,76 |
| 500 | 38,20 | 19,10 | 0,73 |
| 600 | 33,33 | 20,00 | 0,67 |
| 1000 | 23,24 | 23,24 | 0,54 |
| 2500 | 10,68 | 26,70 | 0,29 |

Cuya gráfica de potencia resultante queda de la siguiente forma:

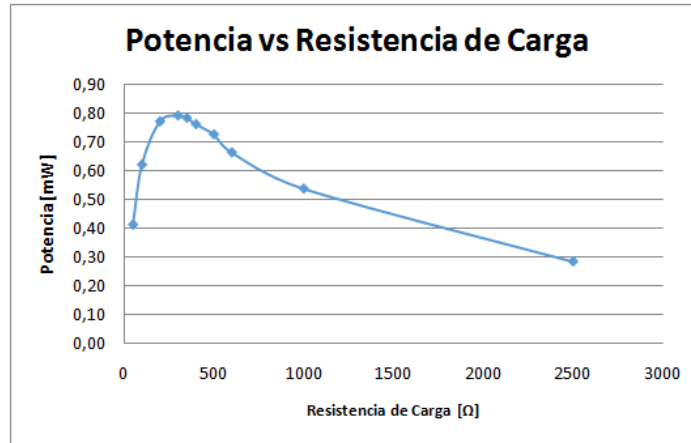


Figura 54: Gráfica de potencia entregada para modelo de 120 PZTs en paralelo

Como se puede observar en este caso cada baldosa podría llegar a entregar una potencia máxima de 0,8 mW.

Debido al reducido tamaño y la baja potencia que entrega una sola baldosa, no tiene sentido que estas se monten por separado, por ello se plantea como modulo mínimo una conexión de 25 m, constituida por dos raíles de 625 baldosas cada una de ellas.

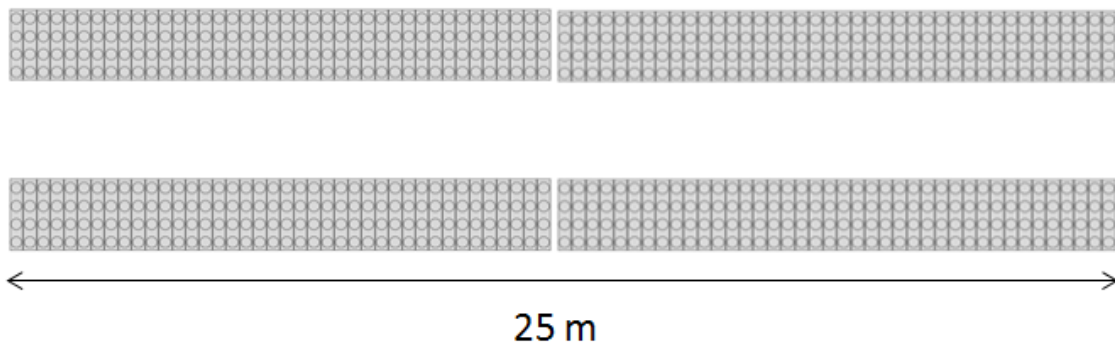


Figura 55: Colocación de piezoeléctricos en filas de 625 baldosas bajo las bandas de rodadura.

Para el cálculo del circuito equivalente, en este caso es importante tener en cuenta que no todos los PZTs trabajan al tiempo, pero trabajan consecutivamente hasta que el vehículo abandona la fila generadora. El valor de C_{eq} (a la que se llamará C_{mod}), será por tanto el que viene dado por las cuatro baldosas que trabajarán al tiempo cada una de ellas con su respectiva rueda. Por ello corresponde al paralelo de cuatro baldosas:

$$C_{mod} = 4C_{eq4} = 9,024 \mu F \quad (4.5)$$

Por otro lado, el valor de la amplitud de señal será determinado por el peso del vehículo que presione sobre las baldosas, este valor se calculará para cada caso.

Finalmente el circuito se modelará con el equivalente de la baldosa, y alargando el tiempo de generación de pulsos tanto como dure la carga sobre el módulo. Es decir, el tiempo que pase sobre la fila de transductores, considerando que solamente cuatro baldosas trabajaran al tiempo, una por cada rueda.

4.3. Estudio de aplicación

4.3.1. Modelado de circuito equivalente

Partiendo de los datos del apartado 4.1. se crea el sistema equivalente del entorno. En primer lugar, se determina que el dispositivo generador estará colocado en el carril de la derecha, debido a su mayor tránsito, especialmente de los vehículos pesados, y se calculan las condiciones del entorno.

Según los datos de tráfico de la Comunidad de Madrid de 2016, en el tramo a estudio circulan una media diaria de 97.352 vehículos ligeros, los que se deducen igual que en el apartado 4.1.1. que circulan indistintamente por los tres carriles de cada uno de los sentidos, lo que lleva a un total de 16.225 en cada uno de ellos.

Por tanto pasan 11,5 cada minuto lo que se traduce a un vehículo cada 5 segundos aproximadamente. Dada que la velocidad media de los vehículos ligeros en este tramo es de 26 m/s, tardará 1 segundo en pasar un módulo de 25 m, luego el pulso generado por la rueda durará ese tiempo.

Por otro lado el número de vehículos pesados que circulan por este tramo es de 10.172 que suponen 5.086 en cada sentido y considerando que el 70% de ellos lo hacen por el carril de la derecha esto se torna en 3.560 vehículos pesados cada día. A la hora suponen casi 150, lo que se traduce en una cadencia de paso de 24 segundos, al circular a la velocidad de 25 m/s, este será el tiempo que cada rueda estará generando.

La tensión que genera un vehículo ligero al pasar sobre la placa se calculó en el apartado anterior, y su valor es de 32,58 V, y dada la linealidad, se puede calcular que la tensión generada por un vehículo pesado a partir de la presión ejercida, y por tanto:

$$V_{VP} = V_{VL} \cdot \frac{P_{VP}}{P_{VL}} = 32.58 \text{ V} \cdot \frac{0.9}{0.2} = 146.25 \text{ V} \quad (4.28)$$

Combinando el paso de los vehículos ligeros y pesados de forma combinada se diseña el siguiente modelo:

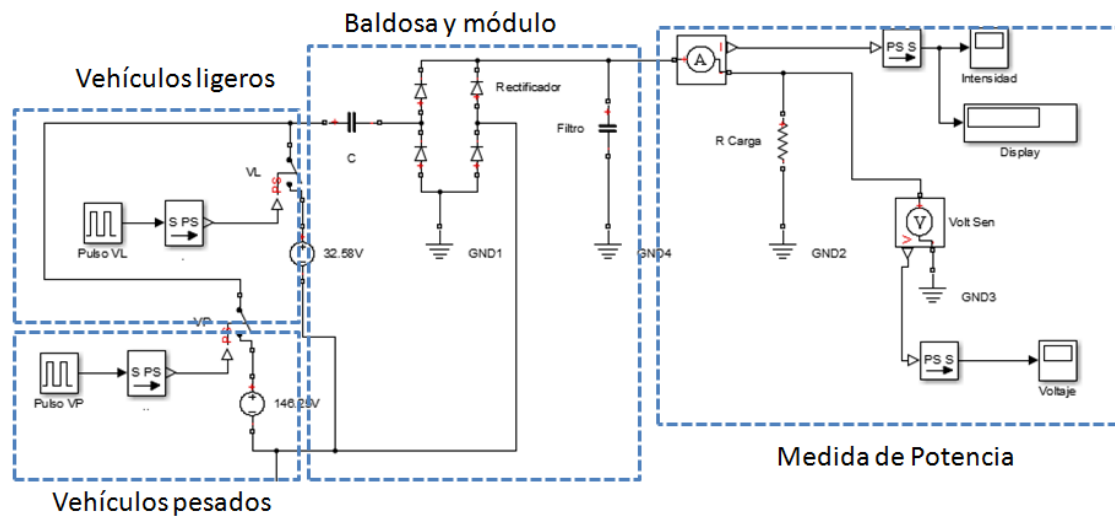


Figura 56: Circuito equivalente en condiciones de tráfico normales

Donde C tiene el valor calculado para cuatro baldosas trabajando al tiempo. El pulso VL viene determinado por el tiempo de paso de los vehículos ligeros por el módulo, VP es equivalente a VL pero con vehículos pesados, y el valor de V depende del tipo de vehículo que pase por los PZTs.

Simulando con los parámetros seleccionados y una resistencia de carga muy grande, se puede ver como al paso de los vehículos pesados, se tiene un gran pico de tensión, lo que puede resultar un riesgo para alguna de las cargas.

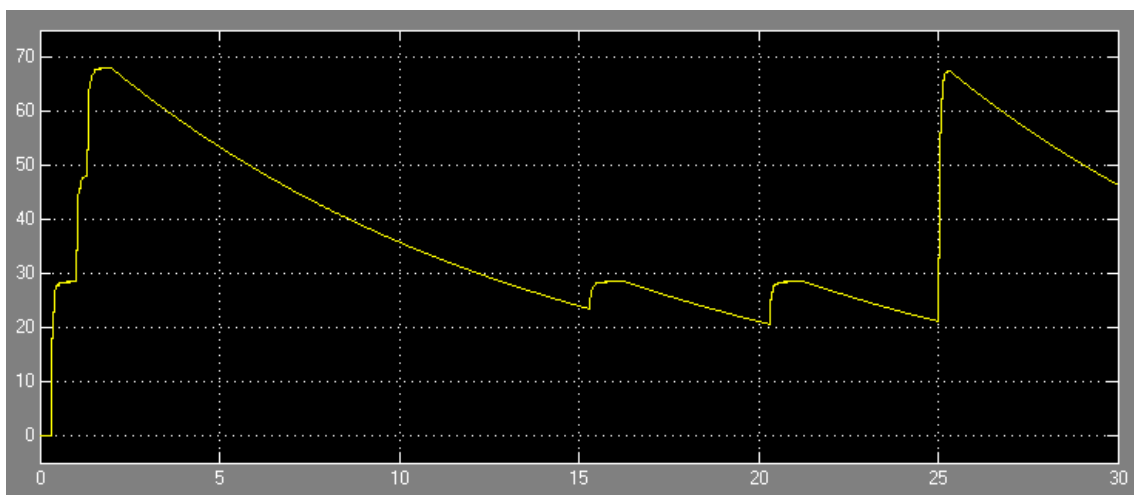


Figura 57: Tensión en la carga para un módulo en condiciones normales para $1M\Omega$

Para evitar este riesgo, se puede colocar un regulador de tensión como el que se muestra en la siguiente figura:

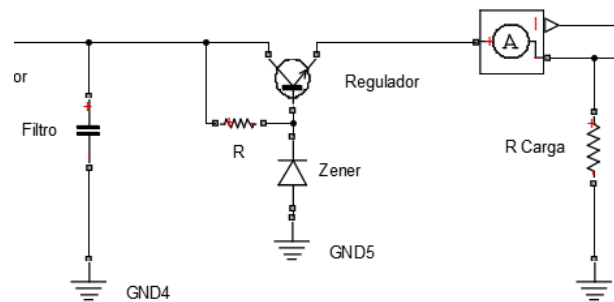


Figura 58: Regulador de corriente colocado como protección entre el módulo y la carga.

Además del regulador de tensión, se cambia el filtro por un condensador de mayor capacidad para conseguir un menor rizado de la señal.

4.3.2. Cálculo de potencia por módulo de PZTs

Diseñado el circuito equivalente, ya es posible calcular la potencia. Esta dependerá siempre del número de vehículos que circulen por la vía así como las características de los mismos, en este apartado se calculará la potencia obtenida en las condiciones de tráfico medias del sistema a estudio. De igual manera que para los modelos de las baldosas, se genera la tabla de potencias entregadas frente a la resistencia de carga:

TABLA 11: VALORES OBTENIDOS EN MÓDULO DE 2 5METROS Y UN CARRIL DE 4 PZTS EN PARALELO CON DISTINTAS CARGAS, (CONDICIONES EXTERIORES DE UN VEHÍCULO LIGERO CADA 5 SEGUNDOS)

| Resistencia Carga [Ω] | Corriente [A] | Tensión [V] | Potencia [W] |
|--------------------------|------------------|----------------|-----------------|
| 1 | 1,60 | 1,6 | 2,56 |
| 5 | 1,36 | 6,8 | 9,25 |
| 10 | 1,10 | 11 | 12,10 |
| 15 | 0,93 | 14 | 13,07 |
| 16 | 0,91 | 14,5 | 13,14 |
| 17 | 0,88 | 15 | 13,24 |
| 18 | 0,86 | 15,5 | 13,35 |
| 19 | 0,84 | 16 | 13,47 |
| 20 | 0,83 | 16,5 | 13,61 |
| 21 | 0,80 | 16,7 | 13,28 |
| 25 | 0,72 | 18 | 12,96 |
| 30 | 0,65 | 19,4 | 12,55 |
| 50 | 0,49 | 24,50 | 12,01 |

Cuya curva se muestra a continuación:

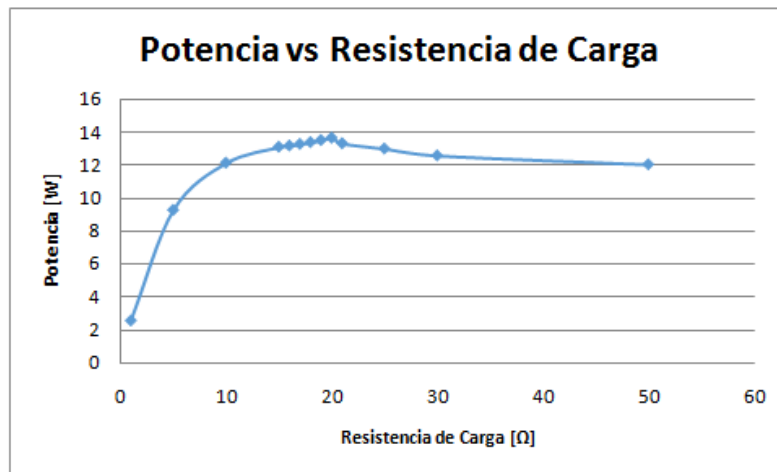


Figura 59: Curva de potencia para un módulo de PZTs en condiciones de tráfico normales

Como se puede apreciar en la curva, en condiciones de tráfico normales, en una carretera altamente transitada, con el diseño propuesto se podría llegar a generar hasta cerca de 14 W por módulo.

Es importante observar que esta potencia instantánea está calculada a partir de la media, es decir, que no tienen en cuenta el efecto estacional, los días festivos ni la hora. Por ello se supone que la generación de energía diaria por módulo asciende a los 336Wh independientemente del momento en que se genere.

4.4. Posibles aplicaciones viales

4.4.1. Alimentación de panel de mensaje variable (PMV)

Los PMV o paneles de mensaje variable, son los que se encuentran colocados generalmente en autopistas y autovías para informar sobre las condiciones del tráfico, posibles peligros e información relevante para los conductores. El consumo energético de estos paneles varía en función de su tamaño y tecnología, por ello se realizó una selección entre los encontrados en el mercado para el cálculo de esta sección.



Figura 60: Ejemplos de PMV utilizados en las carreteras españolas [35]

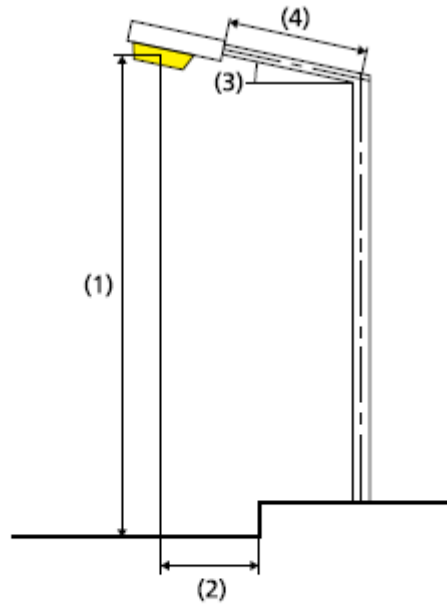
Por tanto basándose en los datos del fabricante Postigo [36], se considera que para un PMV de 2 zonas gráficas y tres líneas de doce caracteres, es decir las características generales de un panel medio, este consumirá 250W, pudiendo llegar a picos mayores en caso de un mayor encendido de LEDs. Considerando que este se encuentre en funcionamiento entre las 6 de la mañana y las 11 de la noche, su consumo energético diario sería de aproximadamente 4kWh.

Dada la energía producida por los módulos de PZTs, 336Wh, se estima la necesidad de colocar 12 módulos para abastecer la energía del PMV, lo que supone un total de 300 metros de carretera. Lo que también se podría ver reducido en caso de que se colocasen los módulos en todos los carriles, en cuyo caso serían necesarios 100 metros con el modelo estimado.

4.4.2. Iluminación

Otro caso de estudio de posible aplicación es realizar la alimentación de la iluminación de la misma carretera con la energía generada en los módulos de PZTs. El primer paso para este punto es analizar por tanto el consumo que esto supone, y para ello son necesarios los datos de para poder comenzar con los cálculos a seguir.

Para ello se elige como luminaria el modelo la propuesta por la empresa DIALux [36], tras consulta sobre las mas indicadas para iluminar una calzada de las características del tramo elegido para el estudio. El modelo de luminaria propuesto es el GULI ILUMINACIÓN EFL0230080304 LUMINARIA VIAL, cuyas características se muestran en la siguiente figura:



| | |
|-----------------------------|-------------|
| Lámpara: | 1xLED |
| Flujo luminoso (luminaria): | 10291.64 lm |
| Flujo luminoso (lámpara): | 10300.00 lm |
| Potencia de las luminarias: | 80.0 W |

Figura 61: Luminaria propuesta por DIALux para iluminación de carretera de 3 carriles

Suponiendo una farola por cada 25 m, supondría que un solo módulo tendría que entregar la suficiente potencia como para alimentar cada una de ellas, ya que coincide la longitud del módulo con la separación de las luminarias. Dados los datos de potencia máxima obtenida en el apartado anterior, se sabe que con un módulo se puede obtener una potencia instantánea media de 14 W, lo que supone al día 336Wh. Por lo tanto aún almacenando la energía durante todo el día, con el tráfico normal solo habría suficiente energía para iluminar la carretera durante 4 horas y cuarto.

Para hacer esta solución viable habría que ampliar los carriles con módulos instalados al total de la carretera, para ello se simula con el modelo ya diseñado anteriormente la potencia que se recibiría en los otros dos carriles. Para ello es importante tener en cuenta que solo el 30% de los vehículos pesados circulan por ellos, lo que supone un 15% en cada carril. En el caso de los vehículos ligeros no es necesario hacer ningún cambio pues ya se supuso desde el principio que un tercio circularía por cada uno de los carriles.

El número de vehículos pesados que circulan de media por un sentido es de 5.086, y el 15% de los ellos suponen por ello 763. Esto se traduce a 31 cada hora, lo que a su vez

supone una cadencia de paso de un camión cada 2 minutos. La potencia resultante queda según la siguiente gráfica:

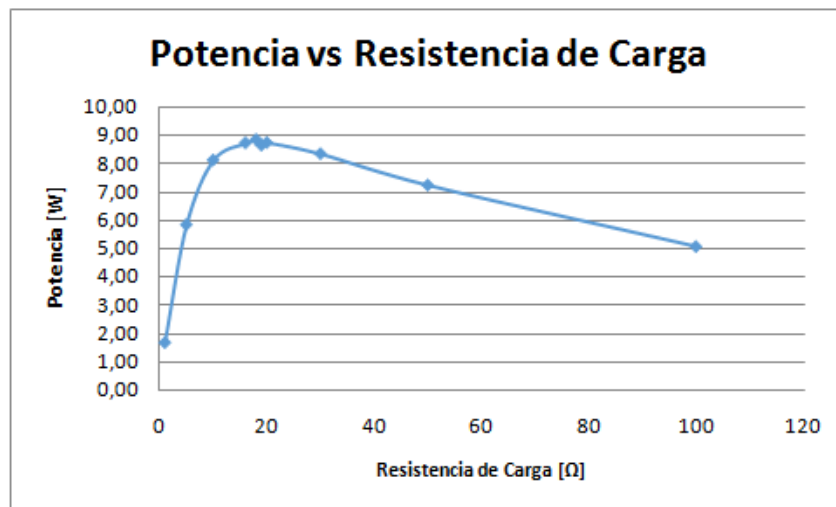


Figura 62: Potencia en carriles central e izquierdo en condiciones de tráfico normales.

Como se puede observar en la gráfica, la potencia total de cada uno de los carriles sería de 9 W, lo que sumado al carril derecho suma un total de 32 W, lo que a su vez se traduce a 768 Wh al día. Esto con las condiciones de tráfico medias, podría suponer 9 horas y media de iluminación, lo que no bastaría para mantener la iluminación encendida durante toda la noche en los meses más oscuros del año. Por ello se propone un sistema de iluminación inteligente, que solo encienda las farolas en caso de que exista tráfico.

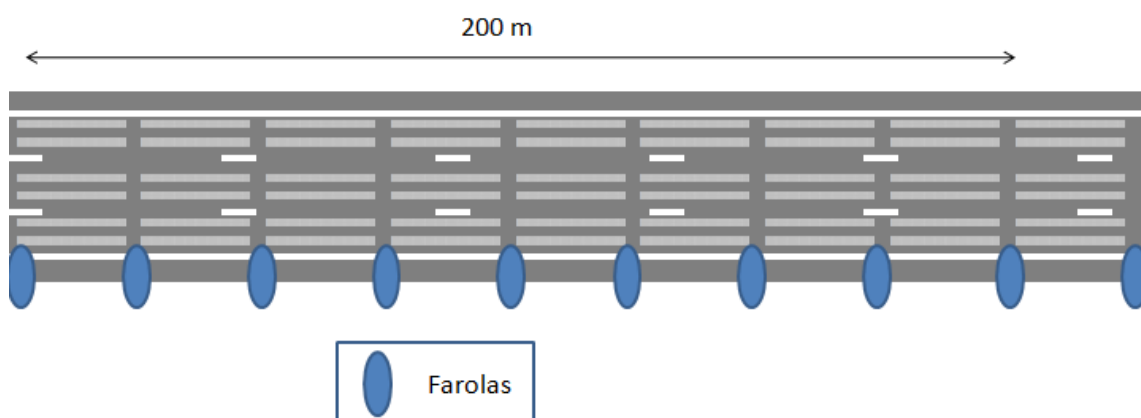


Figura 63: Esquema de montaje general de módulos de PZTs y luminarias

Cada tramo de vía de 25 metros, debe producir energía que se almacena durante el día para cada una de las farolas. A su vez, estas farolas solo se deberían encender en caso de

detectar tráfico. Por lo tanto, con un sentido de tráfico de izquierda a derecha respecto a la figura y considerando una distancia de 200 metros de antelación.

Considerando que el periodo de oscuridad dura entre las 7 de la tarde y las 8 de la mañana en los meses de mayor oscuridad, esto equivale a 1,04 kWh en el consumo de las luminarias en caso de estar encendidas durante todo el periodo. No obstante, si se considera que durante las 11 de la noche y las 5 de la mañana el tráfico es intermitente, la energía podría quedar distribuida como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 12: DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE LUMINARIAS EN LAS CARRETERAS EN FUNCIÓN DE LA HORA

| Hora | Horas encendido entre horas totales [%] | Tiempo encendido [h] | Consumo de energía [Wh] |
|--------------|---|----------------------|-------------------------|
| 7 pm – 11 pm | 100 | 4 | 320 |
| 11 pm – 5 am | 25 | 1,5 | 120 |
| 5 am -8 am | 100 | 3 | 240 |

Esto suma un consumo total del 680 Wh por luminaria, lo que sí podría ser abastecido por los módulos de piezoeléctricos.

No obstante, debido al gran número de piezoeléctricos necesarios para generar la energía suficiente para la iluminación hace que este tipo de montaje no sea especialmente atractivo, ya que supondría un elevado coste de implementación. Aún así, si se propone la utilización de sensores piezoeléctricos colocados en forma de una banda bajo el ancho de la carretera que permitan detectar el paso de vehículos para establecer un sistema de iluminación inteligente.

Otras posibilidades para mejorar las condiciones son la utilización de focos de menor potencia, ya que según muchos fabricantes se puede conseguir una buena iluminación en las carreteras con luminarias de 50W, lo que correspondería a un ahorro energético de casi el 40% frente al modelo planteado.

4.4.3. Alimentación de señal de advertencia

En muchos de los llamados “puntos negros”, se trata de colocar advertencias luminosas que advierten del peligro a los conductores. Normalmente este tipo de advertencias se

modelan con carteles que se iluminan ya sea al paso del vehículo debido a un sensor, o de forma permanente.

Muchos de estos puntos críticos de las carreteras se encuentran en puntos alejados de las redes principales, donde no existe un tendido eléctrico, e iluminar dichas señales para aumentar su alerta no es posible conectándose a la red. En la actualidad, se instalan en algunos de ellos dispositivos fotovoltaicos que permiten que estos trabajen desconectados de la red, no obstante en algunas ocasiones no es posible disponer de este tipo de energía, como pudiera ser el caso de un túnel o zona de sombra.

Por ello se propone un diseño que directamente acoplado al módulo de PZTs, ilumine la señal de advertencia. Normalmente estas se iluminan con LEDs rojos de alto brillo, estos tienen un consumo de potencia medio de 0,09W (3V por 30mA).

Como para esta aplicación se pretende iluminar la señalización al paso del vehículo, se calcula la potencia media entregada por un vehículo durante el paso sobre el módulo generador. Para ello se simula un único paso de vehículo ligero, resultando la potencia instantánea máxima:

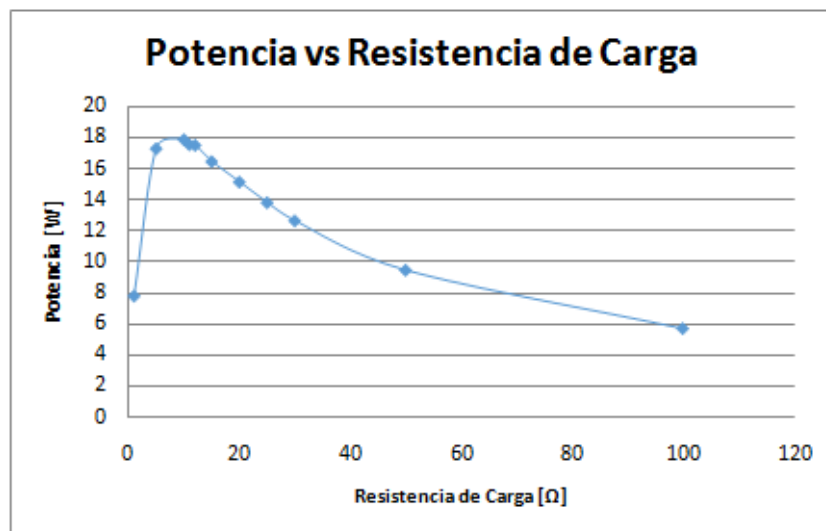


Figura 64: Gráfica de potencia frente a resistencia equivalente para la potencia instantánea producida por un vehículo

Como se puede observar en la gráfica, la potencia máxima que puede entregar un módulo al paso de un vehículo ligero es de 18W. Por tanto se puede iluminar un cartel con 200 LEDs de alta luminosidad.

El circuito sería por lo tanto de la siguiente forma, y solo estaría activo durante el tiempo que el vehículo transitara por el módulo.

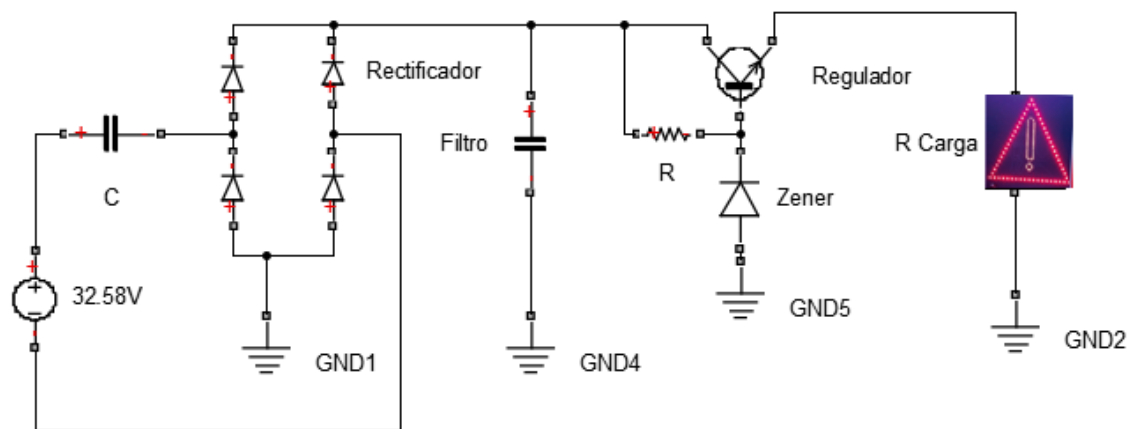


Figura 65: Circuito equivalente de señal de peligro activada con PZTs

El montaje del dispositivo, estaría colocado como se muestra en la siguiente figura, advirtiéndolo por tanto al conductor antes de llegar a la zona de peligro.



Figura 66: Montaje de módulo de PZTs para iluminar una señal de advertencia

4.4.4. Alimentación de dispositivos de baja potencia

Además de los casos anteriormente descritos, se presenta la posibilidad de alimentar cargas de baja frecuencia que en ocasiones tienen un coste demasiado elevado si lo que se quiere es conectarlas a red, y cuyo consumo es muy pequeño. Por ello se considera que es una excelente solución colocar dispositivos de carga por piezoeléctricos para alguno de los siguientes casos:

- Paneles luminosos en zonas alejadas de núcleos urbanos:

En algunos puntos de la vía donde la visibilidad es reducida, se colocan señales luminosas para mejorar la visibilidad frente a las convencionales, estas pueden estar colocadas en túneles sin iluminación u otras zonas de baja visibilidad. Un panel luminoso simple, consume aproximadamente 15W de potencia, con lo que según las

condiciones de tráfico podrían sustentarse con un solo módulo, encendiéndose solo en caso de tráfico y evitando así el consumo innecesario de energía o las obras de infraestructura para llevar la red a esos lugares.

- Postes de socorro:

Aunque lo cierto es que cada vez existen menos postes de socorro en las vías españolas, debido al gran crecimiento de la telefonía móvil, lo cierto es que en los túneles o en lugares donde la telefonía móvil no tiene una cobertura suficiente siguen siendo necesarios. Nuevamente son los túneles los lugares más propensos a necesitar este tipo de postes. Debido a su bajo uso, se pueden mantener con una batería que se cargue con un módulo de PZTs.

- Cámaras de tráfico

Las cámaras que comunican con las centrales de control de la DGT, estas se utilizan para monitorizar el tráfico y seguridad entre otras aplicaciones. Nuevamente la alimentación de estas cámaras, así como los dispositivos encargados de establecer la conexión de datos, son cargas de baja potencia donde la generación por PZTs puede ser una buena solución, pues pueden tener un consumo similar o algo mayor al de un teléfono móvil.

Estos son algunos de los ejemplos de aplicación, pero en general la generación mediante módulos con PZTs supone una buena solución para alimentación de cualquier tipo de pequeña carga que se encuentre lejos de las redes principales, pudiendo de esta forma producir un gran ahorro en costes de infraestructura y permitiendo la mejora en monitorización de la red de carreteras.

5. CASO DE ESTUDIO: OTRAS APLICACIONES

Además de las aplicaciones viales, se identifica que en otros entornos, es posible hacer uso del efecto piezoeléctrico para la generación de electricidad. Por ello en este capítulo se detallan brevemente aplicaciones de modelos de “*Energy Harvesting*” en otros entornos diferentes a los viales.

5.1. Recuperación de energía mecánica producida por peatones

El primer caso de estudio de este capítulo trata de calcular la recuperación de energía que se puede lograr con la colocación de dispositivos piezoeléctricos en zonas de alto tránsito de peatones, tales como estaciones o calles peatonales de alto tránsito. Para ello se modela una baldosa tipo sándwich que en su interior alberga los transductores PZT y el circuito para la captación de energía.

Se propone como estructura un panel tipo sándwich de 50x50cm que contiene 4 piezoeléctricos que se reparten la carga de la pisada, todos ellos colocados en paralelo como se muestra en la siguiente figura:

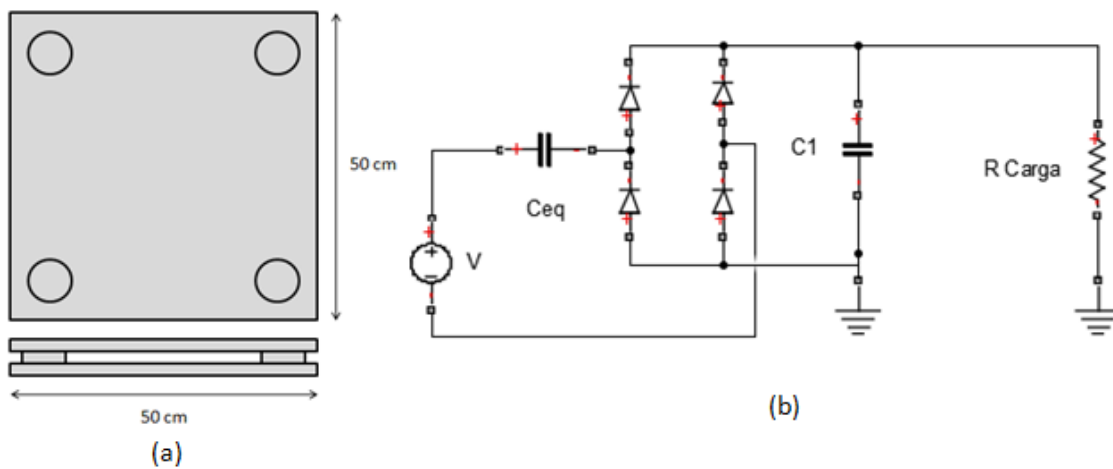


Figura 67: Baldosa con montaje piezoeléctrico, (a) Disposición física de los PZTs, (b) Circuito equivalente

Donde el valor de V viene determinado por el cálculo realizado en el capítulo 3, y C_{eq} tiene el valor resultante de la conexión de los cuatro piezoeléctricos en paralelo:

$$V = 0,038 \cdot F \quad (5.1)$$

$$C_{eq} = 4 \cdot C_{PZT} = 75,2 \text{ nF} \quad (5.2)$$

El valor de la amplitud de la señal producida dependerá de la fuerza aplicada sobre la baldosa y por lo tanto del peso del peatón que la active. Considerando el peso medio de una persona como de 75kg y considerando que mientras camina aplica todo su peso sobre un pie se calcula el valor de F y finalmente la amplitud de la señal generada.

$$F_{baldosa} = m \cdot a = 75 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 735 \text{ N} \quad (5.3)$$

$$F_{PZT} = F_{baldosa}/4 = 184 \text{ N} \quad (5.4)$$

Luego sustituyendo para obtener la tensión:

$$V = 0,038 \cdot F_{PZT} = 7 \text{ V} \quad (5.5)$$

Por otro lado se considera que en un segundo se dan en promedio dos pasos, con lo que la frecuencia del piezoeléctrico será en este caso 2 Hz. Se realizan simulaciones con distintas resistencias de carga para obtener la potencia máxima en estas condiciones:

TABLA 13: VALORES DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA DE CARGA, CASO DE BALDOSA PEATONAL PZT

| Resistencia Carga [kΩ] | Corriente [μA] | Tensión [V] | Potencia [μW] |
|---------------------------|-------------------|----------------|------------------|
| 50 | 3,20 | 0,16 | 0,51 |
| 100 | 3,30 | 0,33 | 1,09 |
| 500 | 2,68 | 1,34 | 3,59 |
| 1000 | 2,15 | 2,15 | 4,62 |
| 1250 | 1,95 | 2,44 | 4,76 |
| 1500 | 1,80 | 2,70 | 4,86 |
| 1600 | 1,75 | 2,80 | 4,90 |
| 1700 | 1,71 | 2,90 | 4,95 |
| 1800 | 1,65 | 2,97 | 4,90 |
| 2000 | 1,56 | 3,11 | 4,84 |
| 2500 | 1,37 | 3,42 | 4,68 |
| 5000 | 0,86 | 4,28 | 3,66 |
| 6000 | 0,74 | 4,46 | 3,32 |
| 10000 | 0,49 | 4,88 | 2,38 |

Lo que se traduce en la siguiente gráfica:

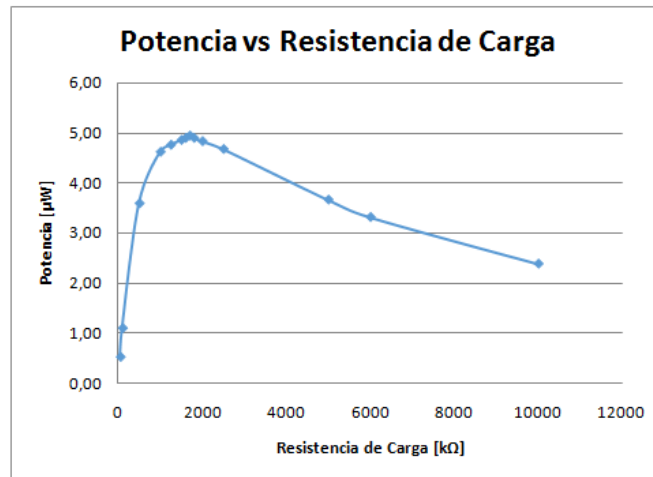


Figura 68: Potencia frente a resistencia de carga en el caso de peatones caminando sobre baldosa piezoeléctrica

Por lo tanto, una baldosa trabajando en estado continuo, produciría una potencia instantánea de aproximadamente $5\mu\text{W}$. La energía producida será por tanto ese valor multiplicado por el tiempo de operación, pero para tener una medida más adecuada para poder se calculará la energía generada por cada pisada.

Para ello sabemos que en plena operación, durante una hora, una baldosa generaría $5\mu\text{Wh}$, habiendo considerado una pisada cada medio segundo, esto supone 7200 pasos a la hora, que serían los que habrían generado esa energía, luego:

$$Energía_{pisada} = 5 \mu\text{Wh} / 7200 \text{ pasos/h} = 0,7 \text{ nWh/pisada} \quad (5.6)$$

Aun suponiendo que por una estación de alto tránsito de viajeros, pasan 55.000 viajeros al día [37], la energía producida en un caso como este no será suficiente para alimentar una carga de iluminación de bajo consumo. Con los datos obtenidos, para llegar a producir energía suficiente para alimentar un sistema de iluminación, o alguna otra carga de bajo consumo, sería necesario pensar en otras soluciones.

No obstante si podría ser una buena solución para alimentar sensores de monitorización autoalimentados.

5.2. Calzado con transductores piezoeléctricos

El segundo caso a estudio de este capítulo, también tiene su origen en el reaprovechamiento energético de la energía producida por la pisada humana. En este caso, en lugar de contemplar el tránsito de peatones, es estudio se basa en el individuo.

Por ello se propone la colocación de transductores piezoeléctricos en las zapatillas o zapatos capaces de generar esta energía eléctrica a partir de la fuerza producida en las pisadas.

Para ello se considera de la colocación de un PZT en cada zapatilla y se asume que este será capaz de recoger toda la energía de la pisada. Y por lo tanto, asumiendo los mismos parámetros que en el apartado 5.1. y un piezoeléctrico por zapatilla, los valores equivalentes quedarán de la siguiente manera:

$$F_{PZT} = 75 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 735 \text{ N} \quad (5.7)$$

Luego la tensión y la capacitancia equivalente:

$$V_{eq} = 0,038 \cdot 735 = 28 \text{ V} \quad (5.8)$$

$$C_{eq} = C_{PZT} = 18,8 \text{ nF} \quad (5.9)$$

Considerando cada zapatilla un circuito independiente, será necesario modelar la señal producida por el PZT, ya que aun suponiendo el mismo ritmo de paso, cada una de ellas estará trabajando la mitad del tiempo. Por lo tanto se considera que la onda resultante será como se muestra en la siguiente figura:

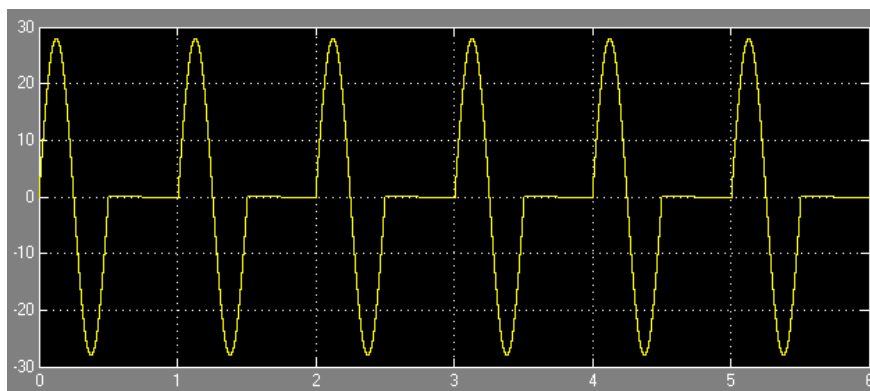


Figura 69: Forma de onda generada por un PZT en una zapatilla, considerando un ritmo de 2 pasos por segundo

Utilizando por tanto el circuito de carga propuesto para los sistemas de “*Energy Harvesting*”, el circuito equivalente en el simulador sería por tanto como se muestra a continuación:

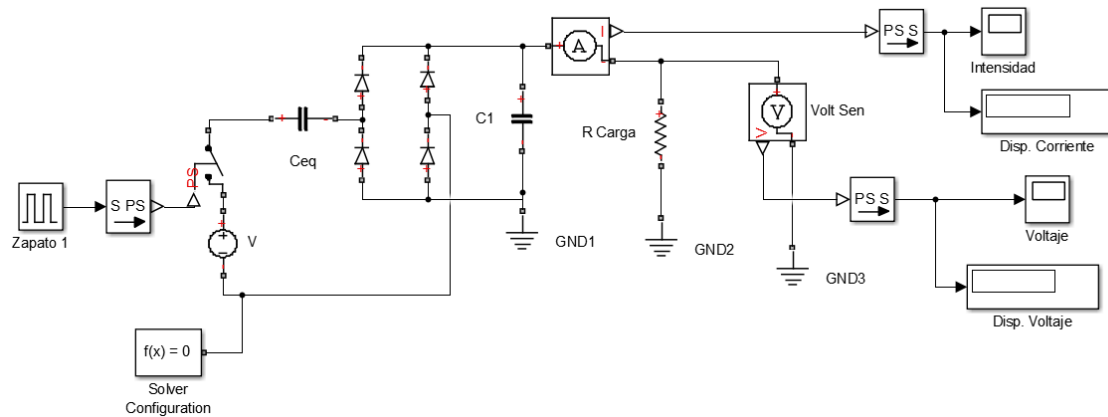


Figura 70: Circuito equivalente de PZT colocado en zapatilla

Asumiendo los valores de V y C_{eq} como los indicados en las ecuaciones (5.8) y (5.9) se simula para obtener la máxima potencia en función de R_{carga} .

TABLA 14: VALORES DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA DE CARGA, CASO PZT EN CALZADO

| Resistencia Carga [kΩ] | Corriente [μA] | Tensión [V] | Potencia [μW] |
|---------------------------|-------------------|----------------|------------------|
| 100 | 1,90 | 0,19 | 0,36 |
| 500 | 1,90 | 0,95 | 1,81 |
| 1000 | 1,80 | 1,80 | 3,24 |
| 2000 | 1,70 | 3,40 | 5,78 |
| 3000 | 1,55 | 4,65 | 7,21 |
| 5000 | 1,38 | 6,90 | 9,52 |
| 6000 | 1,32 | 7,90 | 10,40 |
| 8000 | 1,18 | 9,40 | 11,05 |
| 9000 | 1,12 | 10,10 | 11,33 |
| 10000 | 1,07 | 10,65 | 11,34 |
| 11000 | 1,02 | 11,25 | 11,51 |
| 12000 | 0,98 | 11,75 | 11,51 |
| 14000 | 0,90 | 12,65 | 11,43 |
| 15000 | 0,86 | 12,95 | 11,18 |
| 16000 | 0,83 | 13,35 | 11,14 |
| 18000 | 0,78 | 14,00 | 10,89 |
| 20000 | 0,73 | 14,60 | 10,66 |
| 30000 | 0,56 | 16,70 | 9,30 |
| 40000 | 0,45 | 18,00 | 8,10 |
| 50000 | 0,38 | 18,90 | 7,14 |

Cuyo diagrama de potencia se muestra a continuación:

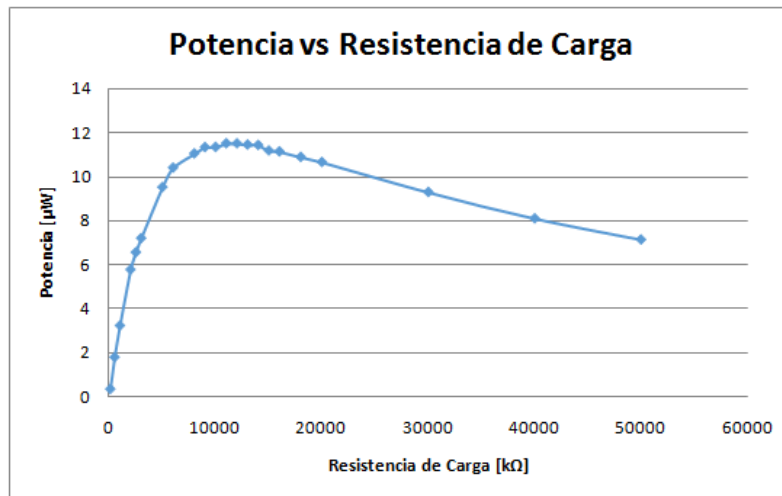


Figura 71: Potencia frente a resistencia de carga en el caso de piezoeléctrico colocado en una zapatilla, considerando un ritmo constante de 2 pasos por segundo

Estos 11,5 µW es la potencia instantánea generada en una zapatilla con un PZT al considerar un paso constante de de 2 pasos por segundo, y por tanto, un paso por zapatilla y segundo. Para obtener por tanto la energía producida en cada pisada se considera la producción de una hora de 11,5 µWh a dividir por el número total de pisadas en una hora a ritmo constante (3600 pisadas/h).

$$Energía_{pisada} = 11,5 \mu Wh / 3600 pisadas/h = 3,2 nWh/paso \quad (5.10)$$

Es importante tener en cuenta que en todo momento se ha planteado como sistema una sola zapatilla, ya que estas tendrían que trabajar independientemente. En el caso de utilizar dicha energía para sensores de tipo podómetros o cuenta pasos, sería posible utilizar una sola zapatilla para contar los pasos, y tras ello extrapolar a dos zapatillas los resultado del sensor. No obstante esto sería una elección correspondiente al diseño de dicho dispositivo.

5.3. Vías ferroviarias

Dentro del sistema ferroviario, el aprovechamiento de la energía que se hace en la actualidad lo cierto es que es bastante alto, los trenes que circulan frenando, en algunos sistemas actúan como generadores, vertiendo la energía a la catenaria que a su vez estará alimentando otros trenes que se encuentran en un momento de consumo energético.

Aún así se considera la posibilidad de mejorar aún más el rendimiento energético de los sistemas ferroviarios mediante la colocación de dispositivos piezoeléctricos que sean capaces de generar una potencia eléctrica gracias a la presión ejercida por los vagones al pasar sobre la vía. No se realizará un estudio exhaustivo sobre el comportamiento de los piezoeléctricos en las aplicaciones ferroviarias si no un primer cálculo basado en el modelo generado para estimar órdenes de magnitud de la energía que se puede generar.

Basados en los datos de la bibliografía, se considera el peso de un tren sobre la vía el equivalente a 10 toneladas por eje. [38] Por otro lado, como primera aproximación al tema, se considera la colocación de los piezoeléctricos bajo los rieles y sobre los apoyos de las traviesas. Considerando que no toda la fuerza producida por el tren pasará directamente a los apoyos, si no que se distribuirá sobre el resto del riel, por ello se considerará que solo el 50% del peso será transmitido directamente al apoyo de forma vertical.

En la siguiente imagen se muestra un esquema de la vía del tren con la colocación de los PZTs entre las traviesas y los rieles, justo en el apoyo. Además se muestra una rueda y la dirección de la marcha.

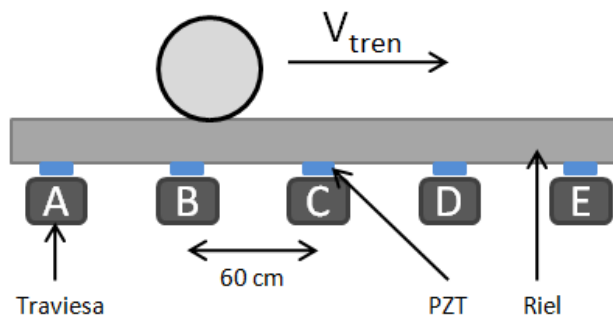


Figura 72: Esquema de piezoeléctricos colocados en las vías ferroviarias

Se considera el sistema simplificado en el que la fuerza aplicada sobre el piezoeléctrico respecto a la posición de la rueda corresponde con la siguiente figura, donde se muestra el valor de la fuerza vertical aplicada sobre C, en función de la posición de la rueda. En la figura 73 se muestra un esquema de dicha fuerza en función de la posición de la rueda.

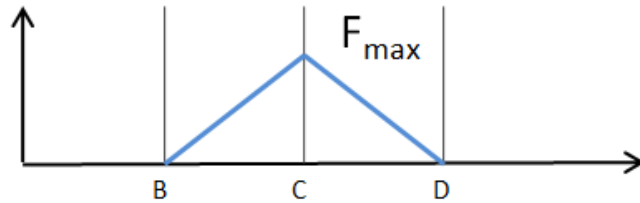


Figura 73: Valor de la fuerza aplicada sobre el piezoelectrico C, en función de la posición de la rueda

Se considera por tanto que este sistema sería extrapolable a todos los piezoelectricos colocados sobre las demás traviesas. A nivel de onda producida por el piezoelectrico, esto se transforma en una onda sinusoidal de ciclo completo. Su comienzo tendrá por tanto lugar al llegar la rueda a la traviesa anterior, y acaba cuando esta misma abandona el siguiente. Además es importante tener en cuenta que se está asumiendo que el PZT es capaz de soportar en todo momento la carga máxima.

El periodo de la onda sinusoidal dependerá por lo tanto de la velocidad a la que circule el tren, por lo tanto, considerando la distancia entre traviesas de 60 cm, el periodo de la onda será según se muestra en la siguiente:

$$T = \frac{1,2 \text{ m}}{V_{tren} \text{ (m/s)}} \quad (5.11)$$

Considerando una zona próxima a una estación, se estima la velocidad de 50 km/h, lo que equivale a 12 m/s. Sustituyendo, en 5.11:

$$T = \frac{1,2 \text{ m}}{12 \text{ m/s}} = 0,1 \text{ s} \quad (5.12)$$

Luego la frecuencia de la onda sería:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ Hz} \quad (5.13)$$

Siguiendo el mismo modelo de cálculo que en los apartados anteriores, se considera el sistema trabajando de forma constante, y después se dividen con el periodo, o número de ejes para obtener la energía producida por eje.

Se considera que bajo los rieles, en cada una de las traviesas caben cuatro piezoeléctricos conectados en paralelo. Con todos estos datos, se calculan los valores para el circuito equivalente:

$$F_{PZT} = \frac{10.000 \text{ kg} \cdot 0,5}{8} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 6 \text{ kN} \quad (5.14)$$

Por lo tanto el valor de la tensión producida por los PZTs será:

$$V_{eq} = 0,038 \cdot 6000 = 228 \text{ V} \quad (5.15)$$

Y el condensador equivalente del circuito don 8 piezoeléctricos en paralelo:

$$C_{eq} = 8 \cdot C_{PZT} = 150,4 \text{ nF} \quad (5.16)$$

Se construye el circuito equivalente:

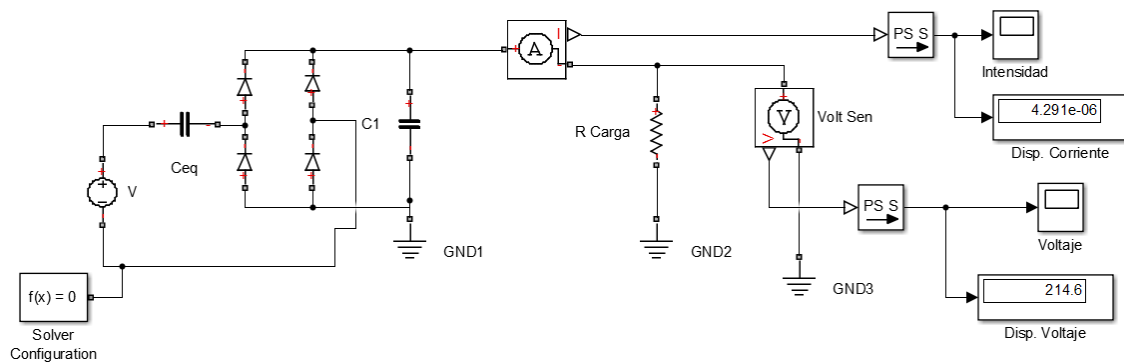


Figura 74: Circuito equivalente a eje de un tren pasando de forma constante a una velocidad de 50 km/h

Donde los valores de V y C_{eq} , así como la frecuencia de la señal vienen definidos por los valores calculados anteriormente. Se varía el valor de R_{carga} para calcular la potencia máxima que puede entregar el sistema, obteniendo los siguientes valores:

TABLA 15: VALORES DE POTENCIA PARA UNA TRAVIESA, EN CONDICIONES DE PASO DE EJES CONSTANTES

| Resistencia Carga [kΩ] | Corriente [μA] | Tensión [V] | Potencia [mW] |
|---------------------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25 | 1124,00 | 28,1 | 31,58 |
| 50 | 992,00 | 49,60 | 49,20 |
| 75 | 888,00 | 66,60 | 59,14 |
| 100 | 804,00 | 80,40 | 64,64 |
| 150 | 676,00 | 101,40 | 68,55 |
| 175 | 626,86 | 109,70 | 68,77 |
| 200 | 584,50 | 116,90 | 68,33 |
| 250 | 514,80 | 128,70 | 66,25 |
| 300 | 460,00 | 138,00 | 63,48 |
| 400 | 379,00 | 151,60 | 57,46 |
| 500 | 322,20 | 161,10 | 51,91 |
| 1000 | 184,30 | 184,30 | 33,97 |
| 2500 | 80,68 | 201,70 | 16,27 |
| 5000 | 41,66 | 208,30 | 8,68 |

Cuya gráfica de potencia es como sigue:

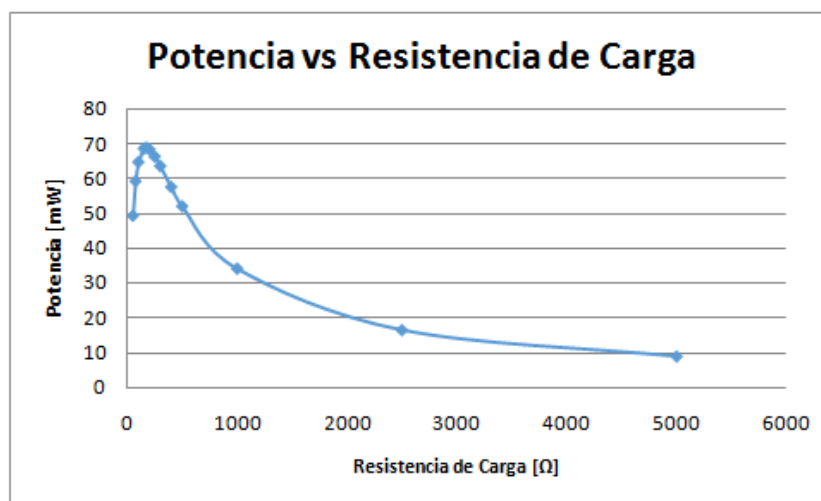


Figura 75: Potencia frente a resistencia de carga en el caso de 8 piezoeléctricos colocado en una traviesa trabajando a frecuencia de paso continua

Dado que la potencia instantánea producida de 70 mW, corresponde a la generada en una traviesa considerando un paso constante de ejes cada 0,1 s, se calculará la energía generada por cada paso de eje en dicha traviesa. Por ello, considerando que en una hora trabajando a frecuencia constante se producen 70 mWh, será necesario dividir dicha por el número de ejes que la componen para sacar el equivalente por eje.

Por tanto, considerando que pasara un eje cada 0,1 s, correspondería a 36000 ejes/h, luego:

$$Energía_{eje} = 70 \text{ mWh} / 36000 \text{ ejes/h} = 2 \text{ mWh/eje} \quad (5.17)$$

En este caso es importante puntualizar que se ha considerado la energía producida en una sola traviesa y por un solo eje. Según la aplicación que se le quiera dar a esta energía, sería conveniente trabajar en unidades más grandes.

Por lo tanto, considerando un tramo de un kilometro de vía y una separación por traviesas de 60 cm, la potencia generada podría ser de 1,7 Wh/eje.

5.4. Otras aplicaciones

Además de tanto las aplicaciones viales expuestas en el capítulo cuatro, como las aplicaciones expuestas en las secciones 5.1., 5.2., y 5.3., se consideran aplicaciones susceptibles del uso de materiales piezoeléctricos la tanto la alimentación de dispositivos de baja potencia como el uso como sensor. A continuación se muestran algunas de las posibles aplicaciones para esta tecnología:

- “*Internet of things*” o internet de las cosas

El avance tecnológico en el mundo de las comunicaciones lleva a que cada vez haya una mayor necesidad de alimentar dispositivos de muy baja potencia que envían señales de datos cada determinado tiempo. Por ello estos dispositivos son candidatos a proporcionar la energía necesaria para llevar a cabo estas conexiones de datos.

- Sistemas de “*Energy Harvesting*” en energías renovables

El transductor piezoeléctrico es el dispositivo que a partir de presiones o vibraciones puede generar corrientes eléctricas. Aunque en los apartados anteriores se hayan propuesto sistemas de recuperación de energías residuales, estos también se pueden utilizar como generadores eléctricos en los sistemas de generación tales como energía eólica o energía marina.

- Sensor para alarmas y otras aplicaciones

Como hemos podido ver en el apartado 5.1. con el simple peso de una persona se puede generar una pequeña diferencia de tensión. Esta diferencia de tensión se puede utilizar

como sensor de una alarma, que avise de la presencia de intrusos. Incluso se podría calibrar dicho sistema para que solamente detectara a partir de cierto peso, para evitar falsos positivos.

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

El trabajo desarrollado se ha centrado en el estudio del aprovechamiento de las posibles fuentes de energía mecánica, su conversión, aprovechamiento y/o almacenamiento como energía eléctrica.

En concreto, se ha presentado el diseño de un sistema teórico capaz de recuperar la energía mecánica producida por los vehículos a su paso por una carretera gracias al efecto piezoeléctrico.

Si bien se realizaron estimaciones para distintas aplicaciones, es importante tener en cuenta que en todos los casos se han tomado como referencia los valores teóricos, con lo que estas simulaciones serían en cualquiera de los casos la primera fase de aproximación a los órdenes de magnitud de producción energética. Por ello sería de vital importancia realizar los respectivos ensayos a los materiales que se decidieran utilizar para cada una de las aplicaciones.

Se ha hecho un estudio del efecto piezoeléctrico, de sus principales características y modelos matemáticos que lo representan.

Así mismo, se han realizado los cálculos para la conversión de la energía mecánica en eléctrica de las diferentes fuentes de energía, su dinámica y se ha propuesto una forma de onda o fuente característica para facilitar la simulación y escalado de los resultados.

Para el caso del uso de los piezoeléctricos como cosechadores de energía en carretera, han propuesto diferentes opciones de instalación, se ha modelado el efecto a gran escala y se ha propuesto la carga o característica eléctrica de la aplicación óptima para la recuperación de la energía.

Al comienzo del trabajo, y en base a la documentación de estudios anteriores respecto al efecto piezoeléctrico se esperaba conseguir la producción de una mayor energía a la finalmente simulada. Con lo que algunas de las aplicaciones consideradas inicialmente no son de interés desde el punto de vista de generación eléctrica, pero si se considera que hay un gran campo de estudio para aplicaciones de bajas potencias.

Se han analizado las principales necesidades energéticas en la carretera y se ha demostrado que con las configuraciones propuestas, la iluminación viaria no es posible, incluso en condiciones de alta circulación de vehículos.

Esto se debe a que debido al alto número de piezoeléctricos necesarios para alimentar el alumbrado, no obstante si se considera una buena solución para la implementación de sensores que permitan activar el alumbrado solo cuando existe tráfico.

Por otro lado, aplicaciones como la de alimentar dispositivos de baja potencia así como señales de alerta o sensores, especialmente en lugares como túneles, o zonas de poca iluminación donde otras energías como la solar no son una alternativa se consideran un gran campo de interés.

En aplicaciones ferroviarias, la energía obtenida por piezoeléctrico, suponiendo que este pueda soportar toda la fuerza producida por el paso de los vagones podría ser suficiente para pensar en soluciones de iluminación de bajo consumo en vías de alto tránsito. No obstante es importante remarcar que debido a las grandes presiones a las que se sometería a los materiales piezoeléctricos sería necesario hacer ensayos al respecto, y determinar que es posible.

Por último, uno de los mayores campos de interés para el desarrollo de sistemas de “*Energy Harvesting*” a partir de los materiales piezoeléctricos son los sistemas electrónicos de muy bajas potencias. En la actualidad debido al gran desarrollo en el mundo de las comunicaciones y del “*internet of things*” crece exponencialmente la demanda de dispositivos autoconectados a red, que con muy poca potencia son capaces de mandar señales de comunicación por radio.

Estos dispositivos en muchas ocasiones llevan una pequeña pila, que puede durar años. Dados los resultados de este trabajo se considera que en gran parte de estos dispositivos sería posible la autoalimentación de los mismos a partir del efecto piezoeléctrico.

En resumen, las principales aportaciones del realizado son:

- Se ha realizado un estudio bibliográfico del efecto piezoeléctrico, incluyendo el comportamiento físico, los materiales que lo componen, el proceso de fabricación, sus aplicaciones, así como la caracterización de su comportamiento eléctrico-mecánico mediante modelos matemáticos.

- Se ha propuesto y analizado diferentes opciones de aplicación de recuperación de energía:
 - Recuperación de energía en carretera
 - Recuperación de la energía en aceras
 - Recuperación de energía en rieles.

- Para cada caso anteriormente citado se han propuesto diferentes tipos de arreglos y conexionado, así como las simulaciones necesarias para la cuantificación de la energía generada y el análisis para la determinación de la carga óptima.

6.2. Recomendaciones para futuros trabajos

Debido a los resultados de este trabajo, se han podido identificar algunos campos de interés para futuros trabajos en los entornos del efecto piezoeléctrico como generador de energía. A continuación, se detallan algunos de ellos:

- Ensayos en laboratorio para la evaluación eléctrica de posibles configuraciones de instalación de piezoeléctricos.

- Piezoeléctricos como generadores de energía para cargas de baja potencia en túneles alejados de los núcleos urbanos. Debido al gran coste que supone a nivel de infraestructura, se considera que la tecnología piezoeléctrica puede ser una buena solución para estos casos.

- Sensores de baja potencia autocomunicados por radio. Debido al gran crecimiento en el conocido como “*Internet of things*”, crece exponencialmente el número de sensores que envían pequeños paquetes de datos con una energía muy reducida. Por ello se propone la utilización del mismo piezoeléctrico, tanto para tomar la información como para generar la energía suficiente para enviar la información.

- Se propone la utilización del modelo desarrollado durante este trabajo para las primeras fases de estudio, cambiando los parámetros externos, así como las

propiedades del piezoeléctrico seleccionado. Este paso previo al prototipado de nuevas aplicaciones sirve para tener las primeras estimaciones y guiar hacia las posibles soluciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Red Eléctrica de España | ¿Qué son las Smartgrid?” [Online]. Available: <http://www.ree.es/es/red21/redes-inteligentes/que-son-las-smartgrid>. [Accessed: 29-Jan-2018].
- [2] P.S. Pena, “Diseño y Sostenibilidad | Discotecas Sostenibles.” [Online]. Available: <http://diseñosostenibilidad.com/2012/03/discotecas-sostenibles/>. [Accessed: 29-Jan-2018].
- [3] A. Preumont, “Mechatronics Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems,” 2006.
- [4] “Chapter 4: Piezoelectricity.” [Online]. Available: <http://archive.is/4mypl>. [Accessed: 14-Feb-2018].
- [5] Q.-H. Qin, “Advanced Mechanics of Piezoelectricity,” 2013.
- [6] R. S. Dahiya and M. Valle, *Robotic Tactile Sensing*. 2013.
- [7] P. Solis Rosas, “Materiales Piezoelectricos.” [Online]. Available: <https://prezi.com/-ugowaw-ugt2/materiales-piezoelectricos/>. [Accessed: 01-Feb-2018].
- [8] M. Cúpich Rodríguez and F. J. Elizondo Garza, “Actuadores piezoeléctricos,” vol. III, no. 6, pp. 22–28, 2000.
- [9] Noliac Group, “Noliac Group develops and PIEZO CERAMICS.”
- [10] G. Holton, H. Chang, and E. Jurkowitz, “How a Scientific Discovery Is Made: A Case History,” *American Scientist*, vol. 84. Sigma Xi, The Scientific Research Society, pp. 364–375.
- [11] G. H. Haertling, “Ferroelectric Ceramics: History and Technology,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 82, no. 4, pp. 797–818, Apr. 1999.
- [12] M. Renaud, *Piezoelectric energy harvesters for wireless sensors networks*. 2009.
- [13] T. R. Shrout and S. J. Zhang, “Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT?,” *J. Electroceramics*, vol. 19, no. 1, pp. 111–124, 2007.

- [14] H. J. Lee and S. Zhang, “Perovskite Lead-Free Piezoelectric Ceramics,” in *Lead-Free Piezoelectrics*, New York, NY: Springer New York, 2012, pp. 291–309.
- [15] “Real Academia Española.” [Online]. Available: <http://www.rae.es/>. [Accessed: 01-Feb-2018].
- [16] I. Rodríguez, “Extracción de energía del agua mediante mediante generadores piezoeléctricos,” p. 157, 2014.
- [17] “Oceantec | Marine energy.” [Online]. Available: <http://www.oceantecenergy.com/>. [Accessed: 01-Feb-2018].
- [18] “Vortex.” [Online]. Available: <http://www.vortexbladeless.com/>. [Accessed: 01-Feb-2018].
- [19] L. Edery-Azulay, “Innowattech : Harvesting Energy and Data A stand alone technology,” 2010.
- [20] E. Pérez Pineda and S. Velázquez Alfaro, “Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia,” 2016.
- [21] E. Suaste Gomez, *Piezoelectric Ceramics*. 2010.
- [22] J. Kim, B. L. Grisso, J. K. Kim, D. S. Ha, and D. J. Inman, “Electrical modeling of Piezoelectric ceramics for analysis and evaluation of sensory systems,” *2008 IEEE Sensors Appl. Symp.*, pp. 122–127, 2008.
- [23] A. Khaligh, P. Zeng, and C. Zheng, “Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies #x2014;State of the Art,” *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 57, no. 3, pp. 850–860, 2010.
- [24] E. L. Horsley, M. P. Foster, D. a Stone, and M. Street, “State-of-the-art Piezoelectric Transformer Technology Keywords Piezoelectric transformer designs,” *Epe*, pp. 1–10, 2007.
- [25] A. Ramos and C. Ferreira, “System for micro generation and energy storage , state of the art – example of the piezoelectric effect,” 2016.

- [26] F. J. Jiménez Martínez, J. de Frutos, D. Alonso, and M. Vázquez, “Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting.” .
- [27] S. R. P. S. R. Platt, S. F. S. Farritor, and H. H. H. Haider, “On low-frequency electric power generation with PZT ceramics,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 10, no. 2, pp. 240–252, 2005.
- [28] C. Sun, G. Shang, X. Zhu, Y. Tao, and Z. Li, “Modeling for piezoelectric stacks in series and parallel,” *Proc. 2013 3rd Int. Conf. Intell. Syst. Des. Eng. Appl. ISDEA 2013*, vol. 0, pp. 954–957, 2013.
- [29] Channel Industries INC, “Piezoelectric Ceramics,” pp. 1–16, 2012.
- [30] A. Pérez Lepe, S. Hernández Rueda, J. F. Fernández Lozano, M. P. Ochoa Pérez, A. Moure Arroyo, and D. Urquiza Cuadros, “PROYECTO ‘ ROADS AS ENERGETIC CROPS ’ CARRETERAS ENERGÉTICAS MEDIANTE CAPTACIÓN PIEZOELÉCTRICA,” 2014.
- [31] “Simulink - Simulación y diseño basado en modelos.” [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>. [Accessed: 06-Feb-2018].
- [32] Dirección General de Carreteras e Infraestructuras, “Informe Trafico 2016 Comunidad de Madrid,” 2017.
- [33] MOTORGIGA, “SUPERFICIE DE LA HUELLA - Definición - Significado.” [Online]. Available: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/superficie-de-la-huella-definicion-significado/gmx-niv15-con195657.htm>. [Accessed: 07-Feb-2018].
- [34] José Antonio Agudelo Zapata, “Cómo estimar la huella de un neumático para nuestros cálculos estructurales - Estructurando.” [Online]. Available: <http://estructurando.net/2016/09/20/como-estimar-la-huella-de-un-neumatico-para-nuestros-calculos-estructurales/>. [Accessed: 07-Feb-2018].
- [35] “Paneles de mensaje variable para tráfico - LPT-TRAFIC.”
- [36] “Programa de cálculo de iluminación Dialux - Airfal.” [Online]. Available: <http://www.airfal.com/programa-calculo-iluminacion-dialux/>. [Accessed: 10-Feb-2018].

- [37] “Metro incrementó en un 2,65 por ciento el número de viajeros en 2016 | Metro de Madrid.” [Online]. Available: <https://www.metromadrid.es/es/comunicacion/prensa/2017/Enero/noticia14.html>. [Accessed: 11-Feb-2018].
- [38] “Nuestros Trenes.” [Online]. Available: http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/md592_ficha.html. [Accessed: 13-Feb-2018].