

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Desarrollo de un prototipo de baldosa generadora de energía eléctrica a partir de la piezoelectricidad y almacenamiento de la energía producida

MEMORIA

Autores: Adriana Menéndez Melé y Ainhoa Arribalzaga Jové

Director: José Luis Eguía Gómez

Convocatoria: Juny 2022



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

Hoy en día es muy necesario hacer frente al cambio climático y a la falta de energía. Existen un gran números de fuentes renovables y no renovables pero aún así no son capaces de abastecer las necesidades de toda la población. Es importante fomentar la búsqueda de soluciones sostenibles para hacer frente a este problema. Por ese motivo, este trabajo se va a centrar en el análisis de una nueva fuente de energía renovable y limpia haciendo uso de los materiales piezoeléctricos. El proyecto se basa en el desarrollo de un prototipo de una baldosa generadora de energía a partir del fenómeno de la piezoelectricidad y del análisis de su viabilidad económica y energética.

Para llevar a cabo el proyecto se han seguido unos pasos. Primero de todo, se ha hecho una investigación sobre qué es la piezoelectricidad y cómo aprovecharla, que prototipos de baldosas existen y cuáles se encuentran en el mercado, qué circuito es necesario para obtener energía y qué tipo de materiales deben tener los componentes del circuito. Una vez recopilada toda la información necesaria se ha diseñado el primer prototipo y se ha hecho un análisis de los resultados obtenidos a partir de él.

Partiendo de las conclusiones obtenidas, se ha propuesto una mejora sustancial del prototipo inicial para aumentar la energía generada, y se ha ideado un plan para poder abastecer el consumo de diez farolas en una de las calles más concurridas de Barcelona. Para poder comprobar la viabilidad energética y económica de la solución propuesta se ha hecho un estudio del presupuesto del proyecto. Además, se ha verificado la rentabilidad del modelo final y otros ya existentes en el mercado actual.

Finalmente, hemos visto que las baldosas piezoeléctricas que hemos diseñado no son rentables porque generan muy poca electricidad. También hemos podido constatar que las baldosas que existen ya en el mercado y que producen mucha más energía no son tampoco rentables económicamente ahorro, ya que el coste de la inversión es mucho más grande que el ahorro que suponen.

Índice

ÍNDICE	4
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	10
1. PREFACIO	13
1.1. Origen del proyecto	13
1.2. Motivación	14
1.3. Requerimientos previos.....	14
2. INTRODUCCIÓN	16
2.1. Objetivos del proyecto	17
2.2. Alcances y limitaciones del proyecto	18
2.2.1. Alcances del proyecto	18
2.2.2. Limitaciones del proyecto	18
3. INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS DE ‘ENERGY HARVESTING Y DE PIEZOELECTRICIDAD’	20
3.1. Concepto de ‘Energy Harvesting’	20
3.2. Historia de la piezoelectricidad	22
3.2.1. Descubrimiento del fenómeno de piezoelectricidad	22
3.2.2. Primeras aplicaciones del material piezoeléctrico	23
3.3. Materiales piezoeléctricos	24
3.3.1. Materiales piezoeléctricos naturales	26
3.3.2. Materiales piezoeléctricos artificiales	26
• Cerámicas	27
• Polímeros	27
• Monocristales	28
• Película delgada.....	28
3.4. Aplicaciones generales de los materiales piezoeléctricos	29
3.4.1. Aplicaciones ya existentes de tecnología piezoeléctrica	29
3.4.1.1. Pavegen	31
3.4.1.2. Energy Floors	33
3.4.2. Posibles aplicaciones de la energía generada por baldosas piezoeléctricas...	35
3.5. Ventajas e inconvenientes	37

4. ESTUDIO DEL EFECTO PIEZOELECTRICO	39
4.1. Fenómeno físico de la piezoelectricidad	39
4.2. Parámetros piezoeléctricos.....	43
4.2.1. Sistema axial	43
4.2.2. Constantes piezoeléctricas	44
• Constante de carga piezoeléctrica (d)	44
• Constante de tensión piezoeléctrica.....	45
• Permitividad (ϵ).....	45
• Constante dieléctrica (K)	46
• Coeficiente de acoplamiento electromecánico.....	46
• Factor de calidad mecánico Q	47
• Factor de disipación dieléctrica.....	47
• Temperatura de Curie (T_c)	48
4.3. Ecuaciones constitutivas de un material piezoeléctrico	48
4.4. Modelo equivalente del elemento piezoeléctrico	49
4.4.1. Circuito mecánico	49
4.4.2. Circuito eléctrico	50
4.5. Recuperación, acondicionamiento y almacenamiento de la energía generada	51
4.5.1. Modelo del sistema 'Energy Harvesting'	51
4.5.2. Captación energía mecánica y transformación a energía eléctrica	52
4.5.3. Circuito eléctrico	52
4.5.3.1. Etapa de rectificación	53
4.5.3.2. Etapa acondicionamiento.....	55
4.5.3.3. Etapa almacenamiento	56
4.5.3.4. Aplicación final.....	57
5. DISEÑO DEL PRIMER PROTOTIPO DE BALDOSA	58
5.1. Elección de los componentes del prototipo.....	58
5.1.1. Componentes piezoeléctricos.....	58
5.1.2. Componentes etapa de rectificación	61
5.1.3. Componentes etapa de acondicionamiento.....	62
5.1.4. Componentes etapa de almacenamiento de la energía.....	63
5.2. Construcción prototipo de la baldosa	64

5.3.	Resultados teóricos	65
5.4.	Resultados experimentales	67
5.4.1.	Primeros ensayos sobre un elemento piezoeléctrico	67
5.4.2.	Ensayos sobre el ensamblaje de baldosa generadora de energía.....	70
5.4.2.1.	Medición de tensiones	70
5.4.3.	Ensayos sobre el circuito rectificador y acondicionador	76
5.4.3.1.	Medición de tensiones en el puente rectificador	76
5.4.3.2.	Medición carga del condensador	78
5.4.4.	Carga de la batería	79
6.	CASO DE ESTUDIO	81
6.1.	Diseño final de la baldosa	81
6.1.1.	Forma y geometría de la baldosa.....	81
6.1.2.	Material.....	83
6.1.3.	Unión baldosas.....	84
6.2.	Consumo energético farola	85
6.3.	Determinación de la batería necesaria para la iluminación de la farola LED	86
6.3.1.	Determinación del número de baterías	88
6.4.	Estimación datos emplazamiento	89
6.4.1.	Dimensión emplazamiento	89
6.4.2.	Determinación número de baldosas.....	90
6.5.	Distribución de las baldosas en el emplazamiento	90
6.6.	Resultados generación de energía por la instalación.....	92
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	93
7.1.	Presupuesto	93
7.1.1.	Presupuesto prototipo inicial.....	93
7.1.2.	Presupuesto prototipo final	94
7.1.3.	Presupuesto instalación pavimento generador de electricidad	96
7.1.4.	Presupuesto desarrollo proyecto e investigación	97
7.2.	Viabilidad energética y económica	98
7.3.	Impacto medioambiental y social del proyecto	99
7.3.1.	Análisis impacto medioambiental del desarrollo del proyecto	99
7.3.2.	Análisis impacto social del desarrollo del proyecto.....	101
	CONCLUSIONES	102
	AGRADECIMIENTOS	104

BIBLIOGRAFÍA	105
Referencias bibliográficas	105

Índice de figuras

Figura 3.1 Esquema funcionamiento 'Energy Harvesting'	20
Figura 3.2 Generación energía gracias a la pisada humana y posteriores aplicaciones	21
Figura 3.3 Principal funcionamiento del sonar	23
Figura 3.4 Clasificación de materiales dentro del grupo de dieléctricos.....	25
Figura 3.5 Principales materiales piezoeléctricos naturales	26
Figura 3.6 Último modelo de la baldosa triangular de Pavegen	31
Figura 3.7 Módulo de baldosas Pavegen.....	32
Figura 3.8 Vistas baldosa SDF de Energy Floors	33
Figura 3.9 Posibles aplicaciones de la energía generada por baldosas piezoeléctricas	36
Figura 4.1 Estructura cristalina cúbica.....	39
Figura 4.2 Fenómeno piezoeléctrico sobre los átomos del cuarzo	40
Figura 4.3 Fenómeno de efecto piezoeléctrico directo e indirecto	41
Figura 4.4 Estructura de los dominios antes y después del proceso de polarización	42
Figura 4.5 Direcciones y ejes de orientación para un material piezoeléctrico.....	43
Figura 4.6 Sistema masa-resorte-amortiguador.....	49
Figura 4.7 Circuito eléctrico equivalente un piezoeléctrico	51
Figura 4.8 Proceso de recolección de energía mecánica y conversión a energía eléctrica	52
Figura 4.9 Componentes de un circuito acondicionador de corriente alterna	53
Figura 4.10 Flujo de corriente en el puente rectificador durante el semiciclo positivo	54
<i>Figura 4.11 Onda sinusoidal de una corriente alterna</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.12 Onda sinusoidal después de pasar por el puente rectificador</i>	<i>54</i>
Figura 4.13 Onda sinusoidal suavizada tras el paso por el condensador	55

Figura 4.14 Rizado en la parte superior de la onda.....	55
Figura 4.15 Arduino modelo UNO.....	57
Figura 5.1 Disco piezoeléctrico	59
Figura 5.2 Cotas disco piezoeléctrico	59
Figura 5.3 Primer diseño compuesto por 9 piezoeléctricos.....	60
Figura 5.4 Segundo diseño compuesto por 20 piezoeléctricos.....	61
Figura 5.5 Condensador electrolítico	62
Figura 5.6 Batería de litio	63
Figura 5.7 Comparación de los voltajes generados por un disco en función de la masa.....	69
Figura 5.8 Primer diseño compuesto por 9 piezoeléctricos.....	71
Figura 5.9 Fotografía del primer diseño de baldosa con pulsador blando	72
Figura 5.10 Fotografía del primer diseño de baldosa con pulsador duro.....	72
Figura 5.11 Comparación del voltaje generado en función del pulsador	73
Figura 5.12 Segundo diseño compuesto por 20 piezoeléctricos.....	74
Figura 5.13 Fotografía del segundo diseño de baldosa con pulsador duro	74
Figura 5.14 Comparación del voltaje generado en función del número de piezoeléctricos	75
Figura 5.15 Comparación del voltaje generado en función del puente rectificador	77
Figura 6.1 Diseño final compuesto por 80 piezoeléctricos	81
Figura 6.2 Vista isométrica baldosa final	82
Figura 6.3 Recomendación para la soldadura de distintos materiales	85
Figura 6.4 Fotografía de la Avenida Portal del Ángel en Barcelona	89
Figura 6.5 Vista superior de la instalación de baldosas piezoeléctricas	91
Figura 6.6 Resumen de los resultados obtenidos para la instalación del pavimento piezoeléctrico	92

Índice de tablas

Tabla 3.1 Datos para 1 baldosa de Pavegen y de Energy Floors.....	35
Tabla 5.1 Propiedades eléctricas elemento piezoeléctrico	59
Tabla 5.2 Propiedades eléctricas puentes rectificadores	61
Tabla 5.3 Parámetros condensadores electrolíticos radiales.....	62
Tabla 5.4 Propiedades eléctricas de la batería de litio	63
Tabla 5.5 Valores teóricos obtenidos para una masa de 50kg	66
Tabla 5.6 Valores teóricos obtenidos para masas de 50, 60, 70 y 80 kg	66
Tabla 5.7 Medidas de los voltajes generados por 4 discos piezoeléctricos	68
Tabla 5.8 Errores relativos para cada disco en la medida del voltaje	68
Tabla 5.9 Medidas de los voltajes generados por un disco al variar la masa	69
Tabla 5.10 Errores relativos en la medida del voltaje en función de la masa.....	70
Tabla 5.11 Medidas del voltaje generado por el primer diseño con pulsador blando	72
Tabla 5.12 Medidas del voltaje generado por el primer diseño con pulsador duro	73
Tabla 5.13 Medidas del voltaje generado por el segundo diseño con pulsador duro	75
Tabla 5.14 Medidas del voltaje generado a la salida del puente rectificador KBPC606	76
Tabla 5.15 Medidas del voltaje generado a la salida del puente rectificador B250R	76
Tabla 5.16 Medidas de la carga del condensador ELR33216 a cada pisada	78
Tabla 5.17 Medidas de la carga del condensador ELR47216 a cada pisada	78
Tabla 5.18 Medidas de la carga del condensador ELR68225 a cada pisada	78
Tabla 6.2 Resumen de las energía generadas por pisada para cada prototipo	83

Tabla 6.3 Requerimientos diarios de energía.....	92
Tabla 7.1 Presupuesto del segundo diseño compuesto por 20 piezoeléctricos	93
Tabla 7.2 Presupuesto para la fabricación de la baldosa final y su precio de mercado	95
Tabla 7.3 Presupuesto para la adquisición de una batería.....	95
Tabla 7.4 Presupuesto adquisición de baldosas y baterías necesarias en la intervención....	95
Tabla 7.5 Presupuesto total de los costes de material y de mano de obra para la instalación del pavimento.....	96
Tabla 7.6 Resumen de los datos obtenidos para las baldosas de Pavegen, Energy Floors y la nuestra propia	98

1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

Hoy en día el mundo entero se está enfrentando a grandes problemas. Entre ellos podemos destacar el impacto que está teniendo la producción de energía eléctrica a gran escala sobre el medio ambiente. La energía eléctrica es una necesidad básica para la humanidad y para su desarrollo. Su demanda ha ido en aumento en los últimos años debido al crecimiento de la población y de los avances tecnológicos que requieren una gran cantidad de energía. Su producción depende principalmente de fuentes de energía no renovables, los combustibles fósiles entre los cuales podemos destacar el petróleo, el gas natural y el carbón. El uso masivo de estos combustibles empezó con la Revolución Industrial cuando se empezó a utilizar el carbón para alimentar las máquinas de vapor. A partir de entonces surgieron también el gas y el petróleo como fuentes energéticas para alimentar todos los nuevos inventos que iban siendo creados. En 2020, estos combustibles representaban un 80% de la producción de energía nacional.

Al quemar los combustibles fósiles una gran cantidad de dióxido de carbono es emitida, al mismo tiempo que óxido de azufre, óxido de nitrógeno, benzopireno y monóxido de carbono. Estos gases son liberados en la atmósfera y como consecuencia tienen un impacto negativo sobre el efecto invernadero provocando un exceso de temperatura y un calentamiento global. Esta situación nos ha conducido a un impacto muy negativo sobre el medio ambiente y la biodiversidad, provocando el cambio climático y una insostenibilidad energética.

Ante esta situación, desde los años 70 se empezó a impulsar el uso de unas nuevas energías renovables a gran escala para reducir el uso de combustibles fósiles y reducir de este modo la contaminación atmosférica. Hoy en día, las principales fuentes de energía renovable son la energía solar, la eólica y la hidráulica. Estas energías son mucho más seguras para nuestra salud y cuentan con la ventaja de ser ilimitadas por lo que se puede recurrir permanentemente a ellas. En escalas más inferiores, se puede observar pequeñas cantidades de energía desperdiciada o descuidada que podría ser útil si se capturara. Utilizando esa pequeña porción de energía presente en el entorno y que de otro modo se desperdiciaría, se puede obtener un impacto positivo tanto a nivel económico como medioambiental.

1.2. Motivación

Ante esta situación de insuficiencia energética, nuestra mayor motivación ha sido encontrar una manera de producir energía eléctrica renovable más eficiente, que no contamine y que sea segura. Hemos querido investigar más sobre las nuevas energías renovables y centrarnos en una de ellas que no fuese aún tan conocida ni estuviese muy explotada. Ha sido entonces cuando hemos descubierto el concepto de 'Energy Harvesting', el cual consiste en capturar pequeñas cantidades de energía de nuestro entorno y transformarla en energía eléctrica. Esta energía puede ser almacenada para su posterior uso en aplicaciones y dispositivos de bajo consumo. El 'Energy Harvesting' aprovecha unas cantidades muy pequeñas de energía ambiental que pasado un tiempo se disipan y se desperdician. Nuestro entorno está lleno de fuentes potenciales de esta energía y hemos decidido centrarnos en generar energía eléctrica a partir de la que puede generar el cuerpo humano a través de acciones como caminar y correr. Ha sido entonces cuando hemos descubierto los materiales piezoeléctricos, capaces de convertir la energía mecánica recibida por cada pisada humana en energía eléctrica.

Otra de nuestras motivaciones principales era conocer más sobre las Smart Cities. Estas ciudades inteligentes apuestan principalmente por la sostenibilidad y la innovación. Uno de los objetivos de estas ciudades es adoptar un modelo de gestión más eficiente y sostenible para mejorar la salud de sus habitantes. Por este motivo, hemos pensado en centrarnos en la ciudad de Barcelona, nuestra ciudad de residencia, y encontrar alguna manera de generar más energía eléctrica de manera sostenible y que aún no estuviese implementada en la ciudad. Nuestra idea ha sido implantar, en una calle muy concurrida de Barcelona, un pavimento generador de energía eléctrica gracias a las pisadas de los peatones. Esta fuente de energía no requiere una gran infraestructura y su producción se puede destinar a iluminar la propia calle o a otras aplicaciones de baja energía.

1.3. Requerimientos previos

Para realizar este trabajo han sido necesarios unos conocimientos y unas nociones básicas de diferentes aspectos, entre ellos:

- Entender al completo el concepto de piezoelectricidad y Energy Harvesting.

- Conocer y entender los conceptos básicos de la electrónica, ya que el trabajo se basa en idear un circuito electrónico para poder almacenar la energía generada a través de una pisada. También es necesario tener las nociones básicas para montar circuitos y conocer el funcionamiento de los componentes del prototipo para poder elaborarlo correctamente.
- Tener conocimientos básicos de SolidWorks para poder diseñar nuestro modelo a escala 3D y poder obtener unos planos.
- Tener conocimientos básicos de Arduino para diseñar posibles implementaciones del diseño final.

2. Introducció

Este proyecto está compuesto principalmente de 7 capítulos, siendo los dos primeros: el prefacio, en el que se habla del origen, motivaciones del proyecto y los requerimientos previos; y la introducción, en la que se presentan los objetivos principales y alcance del proyecto.

El siguiente capítulo se dedica a la presentación y a un estudio previo del concepto del 'Energy Harvesting', del efecto piezoeléctrico y de sus características. Se explica tanto su funcionamiento, como los materiales capaces de generar tal efecto, y hasta sus distintas ventajas y desventajas. Además, en este capítulo se repasan las principales aplicaciones de estos materiales. Nos centraremos más en detalle en dos empresas que ya han lanzado al mercado distintos productos de baldosas generadoras de energía. Veremos sus características y propiedades que nos servirán como punto de partida para nuestro prototipo de baldosa generadora de electricidad.

En el cuarto capítulo, estudiamos más a fondo el funcionamiento del fenómeno de la piezoelectricidad, sus características y principales propiedades físicas. A continuación, se verán el modelo mecánico y el circuito equivalentes del dispositivo piezoeléctrico para entender cómo es capaz de convertir la energía mecánica en eléctrica. A partir de ahí, se verá teóricamente el circuito completo que nos va a permitir recuperar, acondicionar y almacenar la energía eléctrica que es capaz de generar el piezoeléctrico.

En el quinto capítulo, a partir de toda la información recogida hasta el momento, procedemos a fabricar nuestro primer prototipo de baldosa generadora de energía eléctrica, además del circuito que nos permite almacenar la energía para su uso posterior. Se analizarán distintos prototipos para conseguir el más eficiente y rentable. Se introducirá además la herramienta del Arduino para probar distintas funcionalidades que se podrían implementar en el prototipo.

En el sexto capítulo, a partir de los datos obtenidos del prototipo, se extrapolan para diseñar un modelo final de la baldosa. También se estudiará la posibilidad de implantar un pavimento piezoeléctrico en una calle de Barcelona a partir de la estimación del flujo peatonal y la cantidad de pisadas totales diarias.

En el último capítulo se hará un estudio del presupuesto tanto del prototipo como del modelo final y del proyecto. Además, a partir de los resultados de los datos obtenidos de nuestro prototipo a escala reducida y de otras fuentes, se realizará un análisis de la

viabilidad económica y energética del proyecto. Se estudiará la posibilidad de usar parte de la energía generada y almacenada para la iluminación de la calle.

Finalmente, se procederá a las conclusiones de todo el trabajo.

Al final de todo, se podrán encontrar todas las referencias bibliográficas a los documentos que hemos utilizado para realizar el trabajo

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo general de este trabajo será el desarrollo de un prototipo de baldosa generadora de energía eléctrica gracias al fenómeno de piezoelectricidad y de las pisadas humanas para su posterior uso en aplicaciones de bajo consumo.

A continuación describimos otros objetivos más específicos del proyecto:

- Realizar un estudio sobre el efecto piezoeléctrico para conocer en qué consiste el fenómeno, sus características principales, los materiales existentes y sus aplicaciones.
- Diseñar todo un circuito acondicionador capaz de recolectar la energía y convertirla en energía eléctrica.
- Ensayar los distintos prototipos y escoger el más adecuado
- Conseguir almacenar la energía generada en una batería para poder usarla posteriormente
- Proponer un diseño final en base a los resultados obtenidos del prototipo
- Proponer posibles aplicaciones del prototipo final

A partir del prototipo, nuestro objetivo final será diseñar un pavimento totalmente constituido por estas baldosas e instalarlo en una calle de Barcelona. Se seleccionará un material piezoeléctrico y se procederá al diseño de la geometría de la baldosa. Una vez hecho todo el diseño y calculado todos los datos necesarios, se realizará un presupuesto de todo el proyecto. También se harán varios análisis para ver la viabilidad económica y energética comparando el modelo final propuesto con dos modelos de baldosas que ya están presentes en el mercado que son Pavegen y Energy Floors. A partir de todo este análisis sacaremos las conclusiones correspondientes.

2.2. Alcances y limitaciones del proyecto

2.2.1. Alcances del proyecto

Los alcances de nuestro proyecto son los siguientes:

- Se ensayarán distintos dispositivos disponibles en el mercado para construir el circuito más adecuado para nuestro prototipo
- El diseño de nuestro prototipo y de nuestro circuito se va a dividir en distintas etapas: la etapa de captación, la etapa de transducción en que la energía mecánica se transformará a eléctrica, la etapa de rectificación, la etapa de acondicionamiento de la señal, la etapa de almacenaje y otras posibles aplicaciones.
- Nuestro dispositivo generador de energía eléctrica a partir de la energía residual consistirá en una baldosa con varios sensores piezoeléctricos incorporados.
- Posibles aplicaciones, algunas a través del Arduino.

2.2.2. Limitaciones del proyecto

La mayor limitación frente a la que nos encontramos en este trabajo es que no se podrá construir el prototipo a escala real, los datos que se obtengan son el resultado de una extrapolación a partir de nuestro prototipo a escala real.

Cabe destacar que una gran limitación a la que nos hemos hecho frente es nuestro desconocimiento sobre el arduino y todo este gran tema de las energías renovables. Gracias a la asignatura de Electrónica cursada en la escuela hemos podido llegar a entender e interpretar los circuitos electrónicos. Por este motivo creemos conveniente mencionarlo.

Además de esta limitación, las demás limitaciones a las que haremos frente son las siguientes:

- Solo se contemplarán métodos de carga y almacenaje para el aprovechamiento de energía residual presente en nuestro día a día
- Nuestra fuente de energía eléctrica se basará simplemente en la recolección de energía a partir de vibraciones mecánicas provenientes de las pisadas humanas
- El presupuesto del que se dispone es muy limitado, se realizará un prototipo básico

- Los ensayos sobre el prototipo deberán realizarse en parte en la Universidad Politécnica de Cataluña a partir del material que disponemos nosotras y el que se encuentre en el laboratorio
- El informe final sobre la eficiencia energética se basará en nuestro prototipo a escala reducida.

3. Introducció a los conceptos de 'Energy Harvesting y de piezoelectricidad'

3.1. Concepto de 'Energy Harvesting'

El concepto de 'Energy Harvesting' como se conoce hoy en día apareció a finales de los años 90. Este se refiere a un método de captación o recolección de energía viable para que los dispositivos electrónicos extraigan la energía de su entorno como por ejemplo de la energía solar, energía térmica, energía eólica o energía cinética también conocida como energía ambiental. Una vez recogida esta energía, el proceso consiste en convertirla en energía eléctrica para después almacenarla. La recolección de energía capta por lo tanto pequeñas cantidades de energía que, de otro modo, se perderían en el entorno. Esta energía puede utilizarse para mejorar la eficiencia de las tecnologías ya existentes y servir como fuente de alimentación alternativa a pequeñas baterías. En la figura 3.1 se puede observar representado el esquema de todo el proceso del 'Energy Harvesting', desde la recolección de la energía residual hasta su aplicación en dispositivos de bajo consumo:

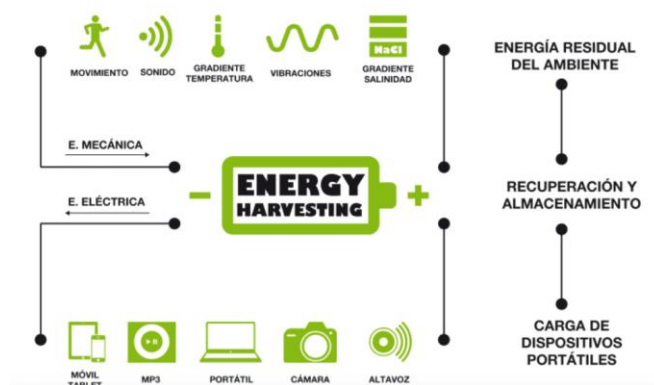


Figura 3.1 Esquema funcionamiento 'Energy Harvesting'

Fuente: eBoard

Para recoger energía con el método de 'Energy Harvesting' se utilizan hoy en día distintos métodos y materiales ya establecidos como la fotovoltaica y la termoelectrónica, así como nuevas tecnologías emergentes que permiten convertir la energía mecánica, la energía

magnética y el calor residual en electricidad. Es muy necesaria la aplicación de materiales innovadores en el desarrollo de estos sistemas y tecnologías de captación de energía. En la actualidad ya se están desarrollando varias tecnologías y materiales prometedores para la captación de energía a escala micro y nano como los materiales termoeléctricos, los piezoeléctricos, los piroeléctricos y los magnéticos. Aún así, nos encontramos en una fase muy temprana de su desarrollo y queda un largo camino por recorrer antes de alcanzar todo el potencial que puede llegar a tener. El objetivo final es el de crear unos sistemas capaces de ser autosuficientes o de mejorar su eficiencia. Para ello una buena idea es lograr recuperar la energía que un mismo sistema pierde en su funcionamiento, y de este modo autoalimentarse a sí mismo mediante un método circular.

Uno de los métodos que más se están desarrollando hoy en día como ya hemos mencionado, pero que aún es poco conocido, es el del uso de materiales piezoeléctricos para captar energía cinética. Estos materiales se pueden situar en las calzadas y permiten recolectar la energía procedente de las pisadas humanas, una fuente de energía muy pequeña que de otro modo se desperdiciaría. A partir de las tensiones mecánicas producidas al aplicar un peso sobre cada baldosa, se puede generar energía eléctrica para almacenarla o usarla directamente. La energía obtenida se puede usar como fuente de alimentación en sistemas de bajo consumo desde redes de sensores inalámbricos hasta el alumbrado de la calle. En la figura 3.2 vemos representado un esquema muy básico de la generación de energía gracias a la pisada humana y la posibilidad de alimentar una carga o iluminar directamente una bombilla.

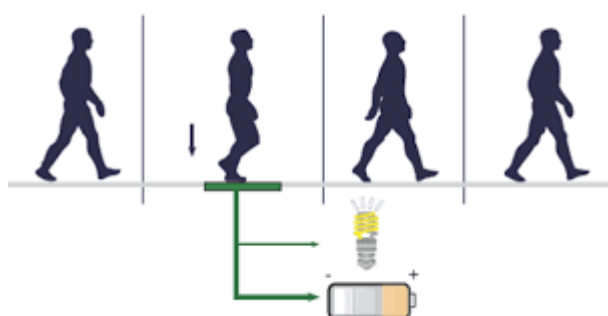


Figura 3.2 Generación energía gracias a la pisada humana y posteriores aplicaciones

Fuente: Journal of Material Sciences & Engineering

Nuestra intención es entonces ver la viabilidad de alimentar el alumbrado público de una calle de Barcelona con una instalación de baldosa basada en el 'Energy Harvesting'. Para ello, debemos diseñar y adaptar un sistema que nos permita generar y recuperar una mayor energía para entregar la máxima potencia posible. La arquitectura de todo el sistema mecánico va a depender de la forma y tipo de piezoeléctrico escogido para ello.

3.2. Historia de la piezoelectricidad

3.2.1. Descubrimiento del fenómeno de piezoelectricidad

El fenómeno de la piezoelectricidad fue observado por primera vez hacia el 1880. El término "piezo", derivado del griego, significa ejercer una presión o apretar. El concepto de "piezoelectricidad" hace referencia a la electricidad que se genera cuando se aplica una presión o un esfuerzo mecánico sobre un material.

El llamado *efecto piezoeléctrico* fue un fenómeno descubierto por Jacques y Pierre Curie en 1880 mientras estudiaban la compresión del mineral de un monocristal de cuarzo, recubierto de placas de aluminio. Fueron los primeros en demostrar el efecto piezoeléctrico. Lo que observaron fue que al someter el material a una compresión, las cargas de la materia se separaban conduciendo a una polarización de la carga y provocando entonces que saltaran chispas. Este fenómeno se denominó como el efecto piezoeléctrico directo, al aplicar una tensión mecánica sobre un determinado material, este se polariza eléctricamente y aparece entonces una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Lo que no llegaron a determinar los hermanos fue el hecho de que el fenómeno también puede ocurrir inversamente.

Efectivamente al año siguiente (1881), gracias a los principios termodinámicos fundamentales, Gabriel Lippmann (físico francés y luxemburgués) comprobó que también existía el llamado efecto piezoeléctrico inverso. En este caso se demostró que cuando los cristales están expuestos a un campo eléctrico, estos se deforman bajo la acción de fuerzas internas. Es decir, al aplicar un campo eléctrico sobre el cristal, se genera una tensión mecánica y una deformación del mismo material. Los hermanos Curie no tardaron en comprobar también entonces este efecto inverso y darlo por válido. A partir de entonces, se empezó a investigar y explorar estos materiales y sus propiedades mucho más a fondo.

3.2.2. Primeras aplicaciones del material piezoeléctrico

La primera aplicación de un material piezoeléctrico fue durante la Primera Guerra Mundial. Se utilizó el cuarzo en la fabricación del SONAR, una técnica de navegación que utiliza las ondas sonoras para detectar la presencia de otros cuerpos como por ejemplo submarinos. Este detector submarino ultrasónico fue desarrollado en Francia por Paul Langevin. El plato detector estaba formado por un transductor (cuya función era transformar un tipo de energía a otro) y un hidrófono para detectar el eco devuelto. El transductor estaba hecho de finos cristales de cuarzo pegados entre dos placas de acero. Como se observa en la figura 3.3, el principal funcionamiento del sonar era emitir una onda de alta frecuencia desde el transductor. Los cristales de cuarzo del transductor se deformaban al entrar en contacto con un campo eléctrico, los científicos descubrieron que gracias a este efecto se podrían generar las ondas ultrasónicas. Cuando las ondas sonoras eran emitidas, se medía el tiempo que tardaban en chocar contra un objeto y rebotar. Al escuchar el eco de esas ondas se podía calcular a qué distancia se encontraban los barcos o submarinos enemigos.

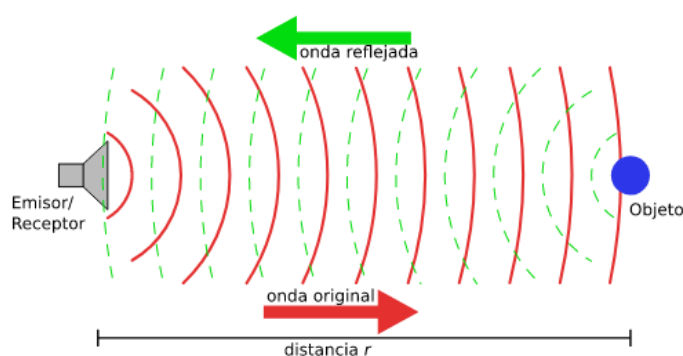


Figura 3.3 Principal funcionamiento del sonar

Fuente: Wikipedia

Este primer proyecto tuvo tanto éxito que durante los años siguientes los materiales piezoeléctricos empezaron a ganar más y más popularidad. Sin embargo, los primeros materiales piezoeléctricos tenían muchas limitaciones. Por este motivo, se fueron desarrollando nuevos materiales piezoeléctricos y aplicaciones para estos, contribuyendo al mismo tiempo en grandes avances en la investigación.

Los primeros materiales piezoeléctricos sintéticos empezaron a ser fabricados durante la Segunda Guerra Mundial por científicos estadounidenses, rusos y japoneses. Estos

materiales fueron los ferroeléctricos, los que poseían propiedades piezoeléctricas mucho más elevadas que los naturales. A partir de entonces se incrementó intensamente la investigación de estos materiales y el desarrollo de dispositivos y nuevos materiales piezoeléctricos.

Los Estados Unidos sufrieron un poco en el desarrollo y crecimiento de su industria piezoeléctrica a pesar de todos los avances tecnológicos. Los japoneses en cambio destacaron por un muy buen rendimiento en los procesos de fabricación de nuevos materiales y aplicaciones. Diseñaron materiales piezocerámicos muy competitivos a nivel mundial, además de transductores de audio, zumbadores y encendedores electrónicos.

3.3. Materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos forman parte de la familia de los materiales inteligentes. Estos, también denominados como “smart materials” son aquellos materiales capaces de reaccionar y responder a distintos estímulos externos como por ejemplo una tensión mecánica, un campo eléctrico o la temperatura. Sus propiedades pueden ser modificadas por estos estímulos de manera reversible.

Los materiales piezoeléctricos se caracterizan por tener una estructura atómica única. Sus átomos están dispuestos de manera única, siguiendo siempre el mismo patrón y orientados siempre hacia la misma dirección en cada una de las 3 dimensiones. Son sólidos cristalinos y pueden ser tanto monocristalinos como policristalinos. Están unidos por iones positivos y negativos que se encuentran en pares en las llamadas celdas unitarias. Estas celdas unitarias pueden tener diversas formas y tamaños en función de los átomos que las constituyan, siempre intentado que sean de la menor dimensión posible. Estos materiales carecen de centro de simetría lo que les permite polarizarse y además no poseen cargas eléctricas libres. Al no disponer de una simetría entre iones positivos y negativos, puede aparecer un momento dipolar espontáneo y por tanto una polarización. En función de su grado de simetría podemos clasificar estos sólidos en material cúbico, trigonal, tetragonal, hexagonal, ortorrómbico, monoclínico y triclínico siendo este último el menos simétrico de todos.

En total existen 32 clases cristalinas de entre las cuales 21 no tienen centro de simetría y 20 de ellas pueden presentar propiedades piezoeléctricas. Estas 20 clases de

piezoeléctricos pueden ser divididas en los cristales piroeléctricos, en los que la polarización espontánea aparece con la variación de la temperatura y los no piroeléctricos, los cuales no son sensibles a cambios de temperatura como por ejemplo el cuarzo. El término de piroelectricidad deriva también del griego, donde piro significa fuego. Cuando el material piroeléctrico se calienta o se enfría, los átomos en su interior se desplazan y la polarización varía provocando la aparición de un voltaje en el material. Cuando la temperatura supera la Temperatura de Curie (1070°F), el efecto piroeléctrico ya no aparece y los átomos del material vuelven a su posición de equilibrio. Por lo tanto, la magnitud de polarización en un cristal piroeléctrico puede ser modificada térmicamente por el cambio de temperatura. En comparación, en un cristal piezoeléctrico, los estímulos mecánicos son los encargados de provocar el cambio de polarización y no la temperatura como en los piroeléctricos.

Entre los piroeléctricos encontramos los materiales ferroeléctricos como el titanato de bario (BaTiO_3) y el titanato de plomo (PbTiO_3) y los no ferroeléctricos como la Turmalina. Los materiales ferroeléctricos, se caracterizan por polarizarse fácilmente y ser capaces de invertir la polarización eléctrica al aplicar un campo eléctrico en la dirección contraria. Los piezoeléctricos, los piroeléctricos y los ferroeléctricos forman todos ellos parte de los materiales dieléctricos, unos materiales aislados eléctricamente que se polarizan al aplicarles un campo eléctrico. Todos los materiales ferroeléctricos son piroeléctricos, y todos los piroeléctricos son piezoeléctricos; sin embargo, no todos los materiales piezoeléctricos son piroeléctricos y no todos los piroeléctricos son ferroeléctricos. En la figura 3.4 se observa un esquema representativo de todos estos materiales pertenecientes al grupo de los dieléctricos:

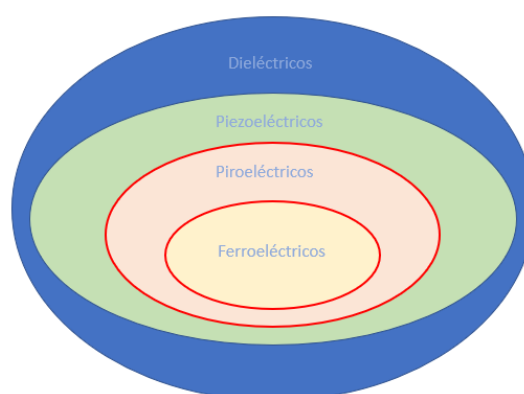


Figura 3.4 Clasificación de materiales dentro del grupo de dieléctricos

Fuente: Li, Jing-Feng

Todos los materiales piezoeléctricos se pueden dividir en dos grupos, por un lado los piezoeléctricos de origen natural y por otro lado los de origen artificial.

3.3.1. Materiales piezoeléctricos naturales

Los principales materiales piezoeléctricos naturales que podemos apreciar en la figura 3.5 son el Cuarzo, la Turmalina, la Sal de Rochelle [1]. Estos materiales presentes en la naturaleza bajo la forma de minerales y cristales tienen una gran ventaja, y es que conservan muy bien sus propiedades con el paso del tiempo. La desventaja es que la carga eléctrica producida no es muy elevada e insuficiente para un sistema de 'Energy Harvesting', por lo que descartamos estos materiales en este proyecto.

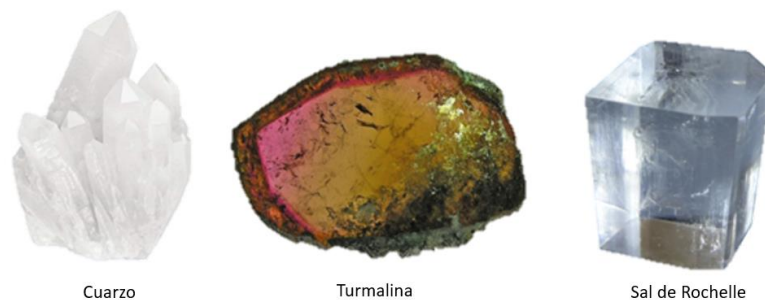


Figura 3.5 Principales materiales piezoeléctricos naturales

El cuarzo ha sido el material más popular para aplicaciones de medición de presiones debido a su alta resistencia mecánica de 2-3 GPa, buena sensibilidad a la alta tensión y resistencia térmica de hasta 400°C. La Sal de Rochelle también se utiliza para fabricar varios tipos de dispositivos electrónicos debido a su alta piezoelectricidad. Sin embargo, sus aplicaciones suelen ser limitadas debido a su vulnerabilidad frente a los líquidos y a las altas temperaturas. El fenómeno de ferroelectricidad fue observado por primera vez en este material en 1920.

3.3.2. Materiales piezoeléctricos artificiales

Hoy en día existe un gran número de materiales piezoeléctricos artificiales, nosotros nos centraremos en los que pueden ser utilizados en un sistema de 'Energy Harvesting'. Estos serían las cerámicas, los polímeros, los monocristales y las películas delgadas diseñadas para aplicaciones específicas.

- **Cerámicas**

Las cerámicas piezoeléctricas empezaron a aparecer en los años 1940 – 1950, después de la Primera Guerra Mundial tras la necesidad de encontrar un material que presentase mejores propiedades que el piezoeléctrico de origen natural como el cuarzo. Fue entonces cuando se empezaron a desarrollar las cerámicas piezoeléctricas como por ejemplo el Titanato de Bario (BaTiO_3) en Japón y la URSS, el Titanato Zirconato de Plomo (PZT's) en los Estados Unidos [2]. Este hecho fue muy revolucionario en la época ya que presentaban muchas mejores propiedades que los naturales al polarizarse, unas geometrías y una capacidad de deformarse más buenas. Hoy en día son los materiales piezoeléctricos más utilizados y fabricados en el mundo entero. Son de carácter ferroeléctrico lo que significa que se tienen que polarizar externamente. Se pueden separar principalmente en dos familias en función de sus propiedades: las piezocerámicas duras y las blandas. Las cerámicas blandas son las que presentan un mejor rendimiento y serán utilizadas en aplicaciones que requieran grandes deformaciones o altos coeficientes de acoplamiento. Las cerámicas duras no presentan tan buen rendimiento pero resisten a altas temperaturas y elevadas potencias.

Las cerámicas piezoeléctricas son una buena opción en cuanto a bajo coste de adquisición, buenas propiedades piezoeléctricas y fácil integración con los distintos dispositivos del sistema de 'Energy Harvesting'. Presentan mejores propiedades piezoeléctricas que los cristales, además de geometrías y dimensiones más flexibles. Es una opción barata y eficiente para bajas frecuencias. Las PZT-cerámicas si se quieren utilizar a bajas frecuencias requieren, o un elemento de PZT más grande o una mayor excitación externa.

- **Polímeros**

Los polímeros piezoeléctricos son materiales a base de carbono formados por una larga cadena de monómeros. Son los que presentan mejores propiedades mecánicas y mayor flexibilidad. El polímero más común y utilizado es el fluoruro de polivinilideno también conocido como PVDF y posee una estructura semicristalina. Este material no presenta directamente el efecto de piezoelectricidad, hay que aplicarle un campo eléctrico por encima de su temperatura vítrea (T_g) y a continuación enfriar el material hasta que aparezca el efecto piezoeléctrico. Es muy resistente también ante químicos que podrían producir abrasiones.

Los coeficientes piezoeléctricos y los acoplamientos electromecánicos de estos materiales suelen ser bajos y también exhiben altas pérdidas dieléctricas. Los polímeros piezoeléctricos son adecuados para aplicaciones de bajas frecuencias de entrada ($<10\text{Hz}$). Los polímeros presentan diversas características que los pueden convertir en ideales para ciertas aplicaciones, presentan baja permitividad dieléctrica, conductividad térmica y poca impedancia acústica. Su mayor ventaja es que presentan una gran flexibilidad y por lo tanto su capacidad de soportar grandes tensiones. Lamentablemente, este tipo de material es el que suele producir la menor corriente eléctrica a la salida del sistema, del orden de micro watts o nano watts, debido a su pequeño coeficiente de acoplamiento.

También existen unos nuevos materiales compuestos que son fabricados al combinar distintos materiales. Uno de los ejemplos es el PZT/composite que se caracteriza por la combinación de polímeros y cerámicas para la fabricación de materiales piezoeléctricos. Estos materiales compuestos logran una mayor constante piezoeléctrica gracias al material cerámico y además una gran flexibilidad otorgada por parte del polímero. La incorporación de polímeros en la estructura permite por lo tanto que los compuestos de PZT y polímeros alcancen una mayor tensión mecánica sin romperse. Sin embargo, la potencia a la salida es similar a la de la cerámica PZT aunque con una frecuencia ligeramente inferior.

- **Monocristales**

El uso de piezoeléctricos monocristales es poco frecuente debido a su elevado coste y a su menor resistencia mecánica. Estos materiales tienen muy buenos coeficientes de acoplamiento electromecánico y de carga piezoeléctrica. Aunque han demostrado producir una mayor densidad de potencia comparados a otros materiales piezoeléctricos, los dispositivos captadores de energía fabricados con ellos solo han proporcionado potencias de hasta unos pocos mili vatios.

- **Película delgada**

Las películas delgadas han aparecido tras la necesidad de reducir la masa de los elementos piezoeléctricos. Cuando se necesitan unas frecuencias de vibración elevadas, la masa debe disminuir a escalas micrométricas. Toda aplicación que requiera el uso de resonadores y filtros de muy alta frecuencia $> 3\text{GHz}$, implica necesariamente la utilización de películas delgadas. Con otras tecnologías se ha visto que solo se llega a los $2,5\text{GHz}$.

Los materiales más comunes que se fabrican en película delgada son el Titanato Zirconato de Plomo (PZT), el Óxido de Zinc (ZnO) y el Nitruro de Aluminio (AlN)

3.4. Aplicaciones generales de los materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos se caracterizan principalmente por su capacidad de producir energía eléctrica a partir de una deformación mecánica. Por este motivo el rango de aplicaciones de estos materiales es muy amplio y variado.

Unas de sus aplicaciones más comunes han sido desde el principio la de sensores y actuadores, ambos siendo transductores. En función del tipo de aplicación se usa uno u otro. Se consideran buenas herramientas para la medición de diferentes procesos o variables como la presión o la fuerza, movimientos, vibraciones, aceleraciones y para la cosecha de energía. Además, los sensores piezoeléctricos son capaces de detectar hasta las perturbaciones más pequeñas, lo que los convierte en dispositivos ideales para ensayos industriales y dispositivos médicos.

Las primeras aplicaciones más concretas de materiales piezoeléctricos en sistemas de Energy Harvesting empezaron a aparecer a finales de la década de los 90. Entre ellas podemos destacar el proyecto de unos investigadores del MIT Media Lab, quienes presentaron un trabajo sobre la captación de energía bajo la forma de plantillas de PVDF y PZT para zapatos y un rotor magnético en miniatura. Analizaron también la posibilidad de alimentar un ordenador utilizando sólo la energía del cuerpo humano como el calor, la respiración o los movimientos.

3.4.1. Aplicaciones ya existentes de tecnología piezoeléctrica

Una de las mayores ventajas de los materiales piezoeléctricos es que pueden ser de muy pequeño tamaño y por lo tanto estar presentes en muchos elementos de nuestro día a día. Son ya muchas las empresas que trabajan en desarrollar nuevas ideas y productos implementando esta tecnología.

En 2021 se lanzó al mercado una nueva aspiradora de la marca Dyson modelo V15 Detect que, a través del sensor piezoeléctrico, permite saber que cantidad de polvo aspiraba para poder regular la potencia a la cual aspira. El polvo al entrar en la aspiradora golpea el

sensor y este transmite unas señales eléctricas de esta manera la aspiradora puede identificar qué cantidad de polvo hay y regular la potencia de succión.

También se ha visto implementado el uso de sensores piezoeléctricos para aumentar la seguridad vial. Desde hace años existen los radares que usan sensores piezoeléctricos para detectar la velocidad de los vehículos a través de dos *placas* en el suelo separadas a cierta distancia que miden a qué velocidad circula un vehículo. Uno de los nuevos avances en este ámbito ha sido el desarrollo de un sistema de sensores piezoeléctricos incorporado en el asiento del conductor de un vehículo que permite detectar si el conductor está dormido si tiene una emergencia de salud o ebrio dependiendo de cómo esté sentado. El objetivo de este nuevo desarrollo es que el una vez el sistema detectara alguna anomalía pudiera dirigir el vehículo a un lugar seguro y detenerse. Este sistema aún está en fase de desarrollo.

Como vemos el uso de piezoeléctricos se está desarrollando mucho para ser utilizados en múltiples aplicaciones. En varios países ya se está utilizando esta tecnología para la construcción de pavimentos inteligentes generadores de electricidad. Es el caso de una compañía de metro japonesa que ha instalado ya los primeros pavimentos compuestos de cristales piezoeléctricos en el paso de tornos y en las puertas de entrada del metro que permiten almacenar la energía de las pisadas de las personas. La electricidad se produce cuando los pasajeros cruzan y pasan por las compuertas. Se ha registrado que el pavimento de 25 m² consigue generar hasta 1400 kW por día [3]. La electricidad generada es suficiente para iluminar los carteles electrónicos de la estación.

En Israel la empresa Innowatech ha colocado un pavimento generador de energía limpia bajo el asfalto de la carretera. La instalación permite recuperar energía generada por las vibraciones de camiones y automóviles y almacenarla en unas baterías. Los resultados que han obtenido son realmente muy buenos ya que por cada tramo han conseguido recuperar 2000 Wh [3] lo que les permite iluminar la carretera.

En Róterdam se ha realizado un proyecto muy original ya que podemos encontrar la primera discoteca sostenible del mundo. En el “Club Watt” se puede encontrar el ‘Sustainable Dance Floor’ que permite proporcionar parte de la energía necesaria para alimentar a los focos de la sala a partir de las pisadas de la gente de manera interactiva ya que la placa se ilumina con luces LED al ser pisada.

Hemos decidido estudiar más en detalle 2 empresas que ya han lanzado al mercado baldosas capaces de generar electricidad a partir del efecto piezoeléctrico. Observaremos sus características y las compararemos para así poder sacar conclusiones que nos ayuden a diseñar y modelar nuestro prototipo.

3.4.1.1. Pavegen

Pavegen es una empresa con espíritu emprendedor enfocado a ayudar con el cambio climático y la producción de energía limpia a través de un sencillo paso. Esta empresa fue fundada por Laurence Kemball-Cook estudiante de diseño industrial y tecnología en 2009. Lo que pretende esta empresa es concienciar a la sociedad de convertir el mundo en un lugar más sostenible y generar iniciativa a un cambio. Por ese motivo, ha diseñado unas baldosas pensadas para ser colocadas en zonas muy concurrentes como por ejemplo en centros comerciales, colegios, aeropuertos o estaciones de tren, metro y autobús con el objetivo de captar audiencia, hacerse conocer y así generar compromiso al cambio [4].

El último modelo de baldosas Pavegen que podemos observar en la figura 3.6 tiene la forma de un triángulo equilátero de 50 cm y lleva incorporados tres generadores electromagnéticos colocados uno en cada vértice, están fabricados con materiales reciclados, son reciclables aproximadamente en un 80% y son resistentes al agua. Los generadores están fabricados a base de componentes piezoeléctricos y se revisten con materiales reciclados.



Figura 3.6 Último modelo de la baldosa triangular de Pavegen¹

Fuente: Pavegen

¹ Ver anexo 1 para ver la ficha técnica de la baldosa Pavegen

Las baldosas son capaces de convertir la energía que absorben a través de las pisadas en electricidad; el 5% de esta producción lo destinan a la iluminación de un led de la propia baldosa mientras que el 95% restante es utilizado en el mismo momento para alguna aplicación o es almacenado para su posterior uso. La empresa ha conseguido que con cada paso dado sobre la baldosa se generen hasta 7 Watts de electricidad.

Estas baldosas no se instalan por separado, se suelen juntar varias baldosas como las de la figura 3.6 para formar lo que llaman un módulo y de esta manera poder absorber más energía que al hacerlo individualmente. Los módulos pueden ser de grandes dimensiones en función del tamaño del emplazamiento de la instalación y de los requerimientos. Podemos observar como se forma uno de estos módulos en la figura 3.7.

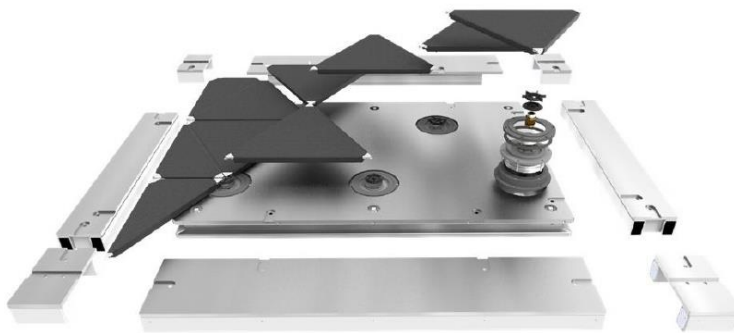


Figura 3.7 Módulo de baldosas Pavegen

Fuente: Pavegen

Ya se han empezado a implantar estas baldosas en vías peatonales con gran éxito y se pueden encontrar en 30 ciudades entre ellas Londres, Dubai, Hong Kong, Barcelona, Abu Dhabi, Milán y muchos otros sitios. La empresa tiene como objetivo reducir el coste de las baldosas a 50 euros por unidad para que puedan ser más accesibles. Las instalaciones que se han implementado han sido para dar servicio a diferentes sectores: educación, transporte, tecnologías relacionadas a ventas al por menor y a la propaganda de marcas.

Uno de sus últimos proyectos a dos años vista es la implementación de más baldosas y crear más concienciación con la población. Por ese motivo quieren mejorar la aplicación que está conectada con todas las instalaciones y sea personalizada para cada usuario. Esta aplicación detecta las pisadas que genera cada usuario y ofrece recompensas cuanto más se use y cuantas más pisadas se generen.

3.4.1.2. Energy Floors

La segunda empresa que ha llamado nuestra atención es Energy Floors, fundada en Holanda en 2008. Su misión principal es la de acelerar la transición energética y al mismo tiempo concienciar sobre las energías renovables de una forma más dinámica. Esta empresa diseña y construye suelos inteligentes e interactivos, capaces de generar electricidad sostenible.

Su primer producto fue “The Dancer”, un suelo alimentado por energía cinética o también conocido como “Sustainable Dance Floor” (SDF). Su proyecto empezó con la apertura del primer club de baile sostenible del mundo. Hoy en día, este suelo es su principal producto, alrededor del mundo cuenta ya con 60 proyectos en los que se ha instalado este tipo de baldosas. El principal objetivo es el de crear energía sostenible a partir de los movimientos y el baile de las personas. Cada uno de sus módulos tiene unas dimensiones de 75x75x20 cm como vemos en la figura 3.8 y puede llegar a producir hasta 35 Watios con una media de entre 5 y 20 Vatios por persona. Tiene una forma cuadrada y lleva incorporados 4 generadores, uno en cada esquina.

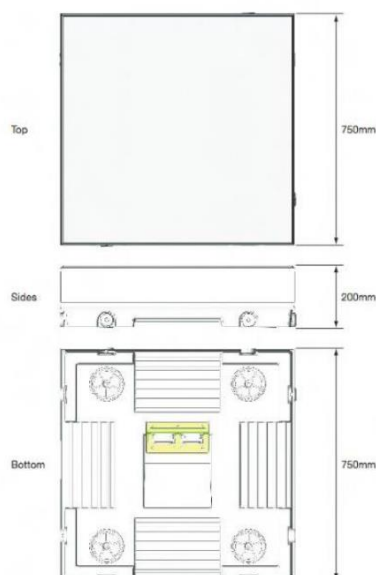


Figura 3.8 Vistas baldosa SDF de Energy Floors²

Fuente: Energy Floors

² Ver anexo 1 para ver la ficha técnica de la baldosa de Energy Floors

Desde 2018 cuentan también con 2 tipos más de suelos inteligentes que pueden ser instalados en pavimentos y en grandes áreas peatonales como en ciudades, colegios, aeropuertos y centros comerciales entre otros. Estos dos productos son “The Gamer” pensado para escuelas y “The Walker” para zonas peatonales públicas. Estos dos tipos de baldosas se diferencian de las de “The Dancer”, que simplemente aprovechaban la energía cinética, ya que estas llevan incorporados láminas solares por las que se puede pasar. Las baldosas son interactivas, al pasar sobre ellas se pueden iluminar y las de “The Gamer” incorporan juegos para que los más pequeños puedan jugar en ellas y de esta manera aumentar el número de pisadas.

Estos suelos inteligentes son capaces también de recoger datos en tiempo real sobre la cantidad de gente que pasa y cuales son sus movimientos. Por ejemplo, con "The Walker" una ciudad puede conseguir información sobre el número de personas que han pasado por sus suelos energéticos, y en qué dirección iban: una herramienta útil para la gestión de la ciudad.

Uno de sus últimos proyectos ha sido el “Sustainable Energy Floor” (SEF) [5] que utiliza principios muy parecidos que en el “Sustainable Dance Floor” pero es más rentable y eficiente. Este suelo totalmente reciclable está destinado principalmente para ser instalado en zonas peatonales muy concurridas permitiendo generar electricidad para alimentar los sistemas locales de alrededor como el alumbrado público y sistemas de señalización. Una pisada en una de estas baldosas es capaz de producir entre 2 y 20 Joules, 11 J de media, que dependerá del peso de la persona, del tipo de movimiento que esté realizando y de la deflexión máxima de la estructura. La baldosa tiene unas dimensiones de 50x50x10 cm, el centro del módulo de 45x45 cm puede construirse a partir de materiales duraderos y reciclables como por ejemplo cerámicas, caucho, materiales sintéticos, cristal o bambú reciclados. La carcasa está hecha de un acero inoxidable muy resistente. Este tipo de baldosas es apta para ser instalada tanto en interiores como en exteriores. La superficie en la que se instala debe ser suficientemente rígida. La energía eléctrica se almacena primero y se utiliza después para iluminar los módulos de una forma específica o para alimentar una aplicación de baja potencia.

A continuación observamos los distintos datos y especificaciones de 1 baldosa de cada uno de los fabricantes:

Fabricante	Pavegen	Energy Floors (SEF)
Forma	Triángulo equilátero	Cuadrada
Dimensiones	50 cm/lado x 8,95 cm/altura	50x50x10 cm
Nº generadores	3	4
Potencia generada por pisada (W)	7	4-40
Energía generada por pisada (J)	3,5	2-20
Precio (€)	350	2000

Tabla 3.1 Datos para 1 baldosa de Pavegen y de Energy Floors

Fuente: elaboración propia

3.4.2. Posibles aplicaciones de la energía generada por baldosas piezoeléctricas

Aunque la utilización de materiales piezoeléctricos no produce grandes cantidades de energía y se encuentra muy lejos de poder autoalimentar a una ciudad entera, sigue teniendo un gran valor. Su desarrollo permite no tener que depender de una sola fuente de energía para alimentar una ciudad y puede llegar a alimentar una infinidad de aplicaciones de bajo consumo como por ejemplo las de la figura 3.9. Además de generar energía eléctrica, esta nueva tecnología puede implementarse en distintos sectores permitiendo el desarrollo urbano sostenible.

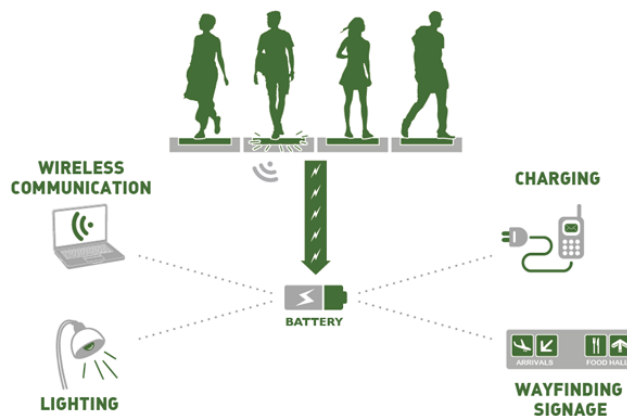


Figura 3.9 Possibles aplicacions de la energia generada por baldosas piezoelèctricas

Fuente: Pavegen

La energia recuperada gracias a las baldosas inteligentes nos permite almacenar progresivamente pequeñas cantidades de energia y de esta manera alimentar baterías, bombillas, redes inalámbricas o dispositivos electrónicos por ejemplo.

Los materiales piezoelèctricos y las baldosas piezoelèctricas en cuestión pueden contribuir enormemente en el desarrollo de las Smart Cities. Estas ciudades inteligentes disponen de grandes plataformas tecnológicas y de redes inalámbricas conectadas entre sí (IoT) que recuperan información suministrada por sus habitantes. Los sensores presentes en las baldosas son capaces de recopilar información y datos sobre la ciudad y por ejemplo sobre sus peatones y su tráfico para poder optimizar los recursos y servicios disponibles. Además, la energia generada por las baldosas podría contribuir en parte a alimentar estas plataformas y hacer posible la tecnología del IoT (Internet of Things) [6].

Estas baldosas pueden ser interactivas lo que permite convertir esta fuente de energia en una experiencia más dinámica para los que pasen sobre ellas. Además, el uso de baldosas interactivas hace más visible esta nueva forma de energia renovable incentivando el compromiso de los ciudadanos con el medio ambiente. Puede ser utilizada tanto como una forma de entretenimiento para los usuarios como una herramienta educativa para tanto niños como adultos.

En conclusión esta nueva tecnología nos puede permitir optimizar los recursos para disminuir el consumo energético y aumentar el bienestar de los ciudadanos.

3.5. Ventajas e inconvenientes

El uso de materiales piezoeléctricos como fuente de energía renovable y especialmente para generar energía eléctrica presenta muchas ventajas pero también ciertos inconvenientes.

Lo bueno de estos materiales es que suelen ser pequeños y ligeros lo que facilita mucho su instalación, adaptabilidad a otros mecanismos y uso posterior. Pueden funcionar bajo condiciones ambientales muy distintas, a diferentes temperaturas, presiones, etc. Tienen una baja huella de carbono, lo que los convierte en una muy buena alternativa a los combustibles fósiles. También son conocidos por tener una larga vida útil. Los dispositivos piezoeléctricos no suelen requerir ser instalados en complejas estructuras y mecanismos que se puedan ir degradando con el tiempo, por lo que son capaces de seguir funcionando durante mucho tiempo siempre a un alto rendimiento. Los dispositivos piezoeléctricos son fáciles de producir a la vez que económicos, y no necesitan un gran consumo de energía para su fabricación. Además, la utilización de esta tecnología no está limitada por el espacio como si que lo estarían otras alternativas como la solar o la eólica. Efectivamente, se puede instalar en cualquier lugar y se puede producir energía continuamente sin depender de las condiciones climáticas.

Estos materiales se usan en muchos dispositivos como sensores o actuadores ya que permiten tener una respuesta muy rápida, de una fracción de segundo al estímulo mecánico o eléctrico sin generar ninguna interferencia electromagnética significativa. Sin embargo, estos tipos de materiales a pesar de tener numerosas ventajas también tienen sus inconvenientes. Hemos decidido hacer un repaso de los 3 mayores problemas a los que hay que hacer frente al utilizar la piezoelectricidad como fuente de energía renovable.

El mayor inconveniente es la baja cantidad de electricidad producida, así que a menos que grandes instalaciones sean puestas en marcha, simplemente no habría la suficiente energía para alimentar los dispositivos. Otro inconveniente es que mientras no se aplique ninguna tensión mecánica ninguna carga eléctrica será producida. En nuestro caso, hay muchos momentos del día en que el flujo de peatones, en la calle donde instalamos el pavimento piezoeléctrico, será muy pequeño y por lo tanto no será del todo eficiente. Sería muy interesante encontrar alguna manera de producir energía eléctrica en continuo. Otro

inconveniente que aparece es el hecho de que muchas de las materias primas utilizadas para fabricar ciertos materiales piezoeléctricos son tóxicas o difíciles de trabajar con ellas.

Finalmente, otra desventaja que se observa y se puede destacar es la falta de datos e investigación para entender bien todas sus propiedades y funcionamiento. Estos materiales son difíciles de desarrollar aunque una vez ya están creados son fáciles de seguir reproduciendo. Lo que convierte estos materiales en una fuente de energía renovable muy interesante pero aún muy poco explotada y desarrollada.

4. Estudio del efecto piezoeléctrico

4.1. Fenómeno físico de la piezoelectricidad

La piezoelectricidad es el fenómeno de aparición de una diferencia de potencial que ocurre en algunos materiales al ser sometidos a una deformación mecánica. Muchos cristales se definen con una estructura cristalina organizada, con unas series repetitivas de átomos que se mantienen unidos por enlaces en lo que se denomina celda unitaria. La mayoría de los cristales como el hierro, poseen una celda unitaria simétrica lo que los hace inútiles si se quieren utilizar para fines piezoeléctricos. En la figura 4.1 se observa la estructura cristalina cúbica, entre todas las estructuras es la que mayor grado de simetría presenta. Los sólidos con este tipo de estructura no pueden presentar las propiedades piezoeléctricas.

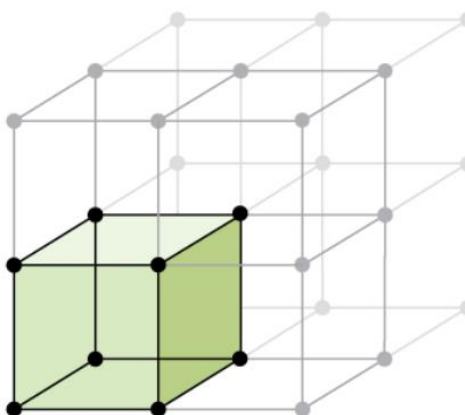


Figura 4.1 Estructura cristalina cúbica

Fuente: University of California

Para que los materiales presenten el fenómeno de piezoelectricidad no deben poseer una estructura simétrica aunque sí que deben encontrarse en equilibrio eléctricamente neutro. Es decir, los átomos de su interior pueden no estar dispuestos simétricamente pero aún así sus cargas eléctricas deben estar perfectamente equilibradas. Una carga positiva situada cerca de una negativa la anula.

Es necesario que no presenten simetría ya que su estructura debe ser capaz de deformarse al aplicar sobre ellos una presión mecánica. Cuando la estructura es deformada, los átomos se desplazan alterando el equilibrio entre positivos y negativos lo que genera la aparición de cargas eléctricas. Todo este efecto se extiende por toda la estructura provocando la aparición de un lado cargado positivamente y otro negativamente. Este es el denominado efecto piezoeléctrico directo.

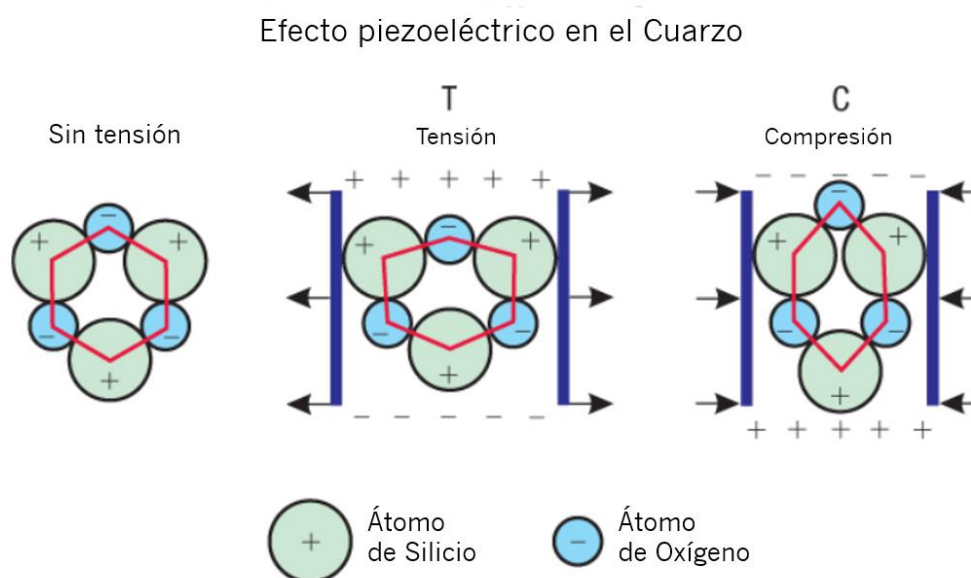


Figura 4.2 Fenómeno piezoeléctrico sobre los átomos del cuarzo

Fuente: University of California

En la figura 4.2 podemos observar el ejemplo del fenómeno del efecto piezoeléctrico en el cuarzo. Este es un material natural compuesto por dióxido de silicio que contiene básicamente átomos de silicio y de oxígeno. En la figura de más a la izquierda se observa la estructura en equilibrio neutro de los átomos del cuarzo antes del proceso de polarización. En las dos otras figuras vemos que al comprimir o traccionar el cristal de cuarzo su geometría cambia y los momento dipolares en su interior ya no se cancelan por lo que ya no tenemos un cristal eléctricamente neutro. Al deformar el cristal se ha cambiado la posición de los átomos hasta el punto en que un lado aparece cargado positivamente y el otro negativamente. En este instante una corriente eléctrica se genera y circula del polo positivo al negativo.

También existe el efecto piezoeléctrico inverso que se produce a la inversa del directo. En este caso se le aplica una presión eléctrica al cristal piezoeléctrico. Los átomos de su interior se desplazan para reequilibrarse y esto provoca una deformación del material cambiando ligeramente de forma.

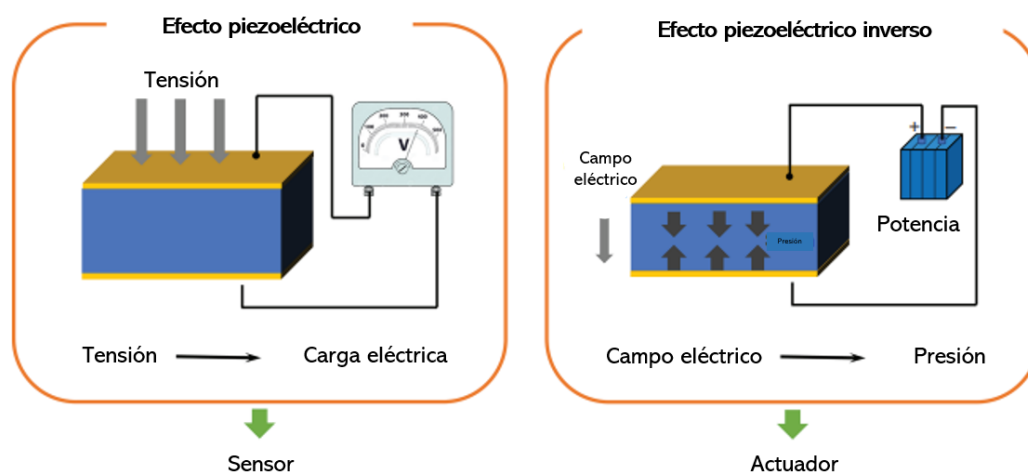


Figura 4.3 Fenómeno de efecto piezoeléctrico directo e indirecto

Fuente: Li, Jing-Feng

El efecto piezoeléctrico es un proceso reversible, por lo que los materiales que presentan el efecto piezoeléctrico directo también presentan el efecto piezoeléctrico inverso. Por ello, la piezoelectricidad se refiere tanto a los efectos directos como a los inversos, aunque la palabra "piezoelectricidad" nos lleva a menudo al significado del efecto piezoeléctrico directo de la generación interna de cargas eléctricas resultantes de una fuerza mecánica aplicada.

Los materiales sintéticos deben ser sometidos a un campo eléctrico externo para poder presentar el efecto piezoeléctrico. En el caso de las cerámicas ferroeléctricas, su estructura cristalina está inicialmente compuesta por minúsculos cristales orientados al azar. Cada uno de estos cristales se divide a su vez en dominios o regiones muy pequeñas con disposiciones dipolares similares. Estos dominios polares están orientados al azar inicialmente y no se observa ningún comportamiento piezoeléctrico en ellos. Sin embargo,

cuando estos materiales son sometidos a un campo eléctrico estos pueden mostrar una polarización macroscópica en cualquier dirección como podemos observar en la figura 4.4. Una vez polarizado, el material permanece en este estado hasta su despolarización por un campo opuesto o por una temperatura elevada. La dirección de los dipolos eléctricos en los materiales piezoeléctricos y piroeléctricos no puede cambiarse, siempre permanece igual. Sólo puede invertirse mediante un campo eléctrico en el caso de los materiales ferroeléctricos. Por lo tanto, la característica distintiva de los ferroeléctricos es que la polarización espontánea que puede aparecer puede ser también invertida por un campo eléctrico aplicado en la dirección opuesta [7].

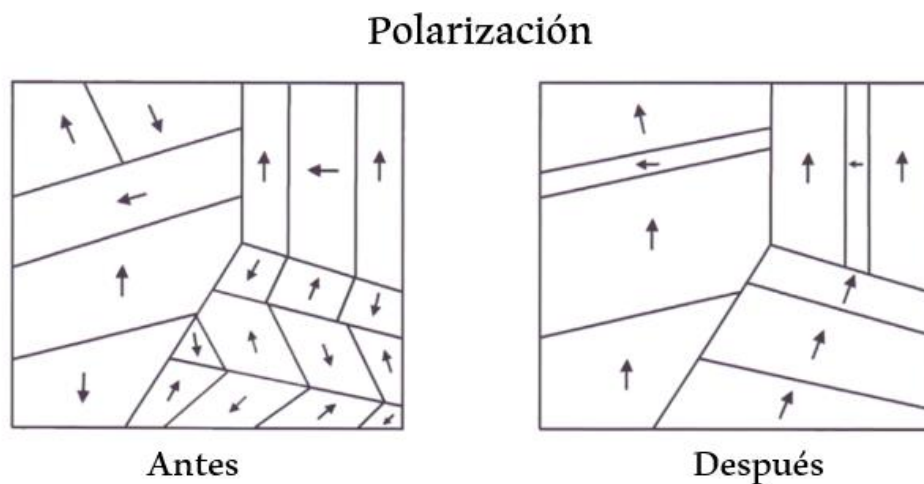


Figura 4.4 Estructura de los dominios antes y después del proceso de polarización

Fuente: Li, Jing-Feng

4.2. Parámetros piezoeléctricos

4.2.1. Sistema axial

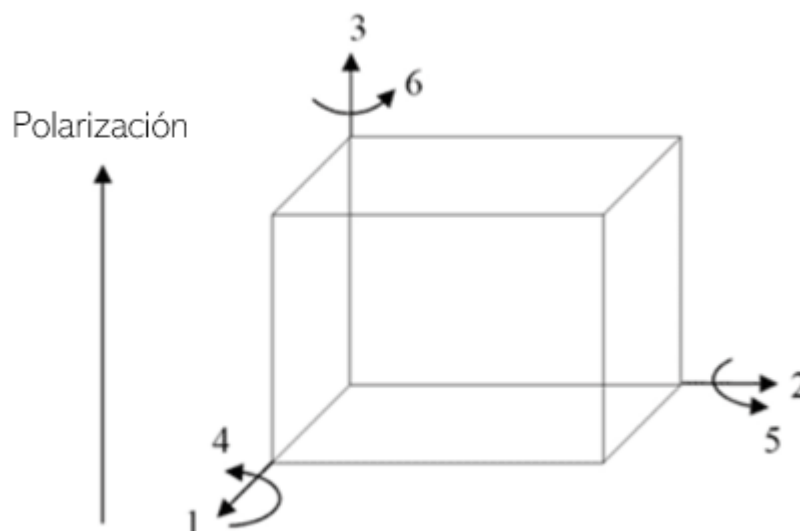


Figura 4.5 Direcciones y ejes de orientación para un material piezoeléctrico

Fuente: APC International

El sistema axial usado para describir las propiedades de un piezoeléctrico está formado por 3 direcciones designadas a partir de los ejes $x(1)$, $y(2)$ y $z(3)$ como los de la figura 4.5, los mismos que los usados en el sistema de coordenadas cartesianas. Los ejes de rotación corresponden al cizallamiento y se representan con $U(4)$, $V(5)$ y $W(6)$. La dirección de polarización se designa generalmente como el tercer eje, el eje z vertical de un sistema cristalino ortogonal. Se establece durante el proceso de polarización al someter el material a un fuerte campo eléctrico. Es en esta dirección en la que el piezoeléctrico puede alcanzar su mayor desplazamiento.

Un material piezoeléctrico es anisótropo, es decir, sus propiedades dependen de la dirección. Por lo tanto, sus propiedades mecánicas dependen de su orientación y se describen gracias a tensores.

4.2.2. Constantes piezoelétricas

El efecto piezoelétrico implica la interacción entre el comportamiento eléctrico y mecánico de un material. Las constantes indicadas a continuación sirven para describir esa interacción. Las propiedades del material dependen de la dirección de aplicación del campo eléctrico, del desplazamiento y de la tensión. Para indicar cual es la dirección a la que se hace referencia en las constantes piezoelétricas, se utilizan unos subíndices (i,j) y superíndices. El primer subíndice i indica la dirección del campo eléctrico asociado a la tensión aplicada o a la carga producida. También nos indica al mismo tiempo la dirección que es perpendicular a los electrodos. El segundo subíndice j indica la dirección de la tensión mecánica o de la deformación. Los superíndices permiten indicar una condición de contorno mecánica o eléctrica constante.

- **Constante de carga piezoelétrica (d)**

La constante de carga piezoelétrica relaciona la carga eléctrica generada por unidad de fuerza mecánica aplicada y se expresa en unidades de Coulomb/Newton [7]. También puede representar la variación dimensional entre el campo eléctrico aplicado y medido en m/V. Esta constante se utiliza normalmente para evaluar cuánto de bueno es un material piezoelétrico, permite además conocer el valor del campo eléctrico que hay que aplicar para llegar a una cierta deformación. Cuanto mayor sea d, mayor será el desplazamiento mecánico.

$$d = \frac{\text{variación dimensional}}{\text{campo aplicado}} = \frac{\text{carga eléctrica generada (polarización inducida)}}{\text{fuerza aplicada}}$$

$$d = \frac{S}{E} = \frac{\sigma}{T}$$

La constante d [5] se puede calcular a partir de la ecuación:

$$d = k\sqrt{\varepsilon_0 K^T S^E} \left[\frac{C}{N} \right]$$

donde:

k = coeficiente de acoplamiento electromecánico

K^T = constante dieléctrica relativa

S^E = compilancia elástica

- **Constante de tensión piezoeléctrica**

El coeficiente de tensión piezoeléctrica o constante de voltaje piezoeléctrica se define como la relación entre el campo eléctrico producido y la tensión mecánica aplicada y se expresa en unidades de Voltaje-metro/Newton [7]. También representa la deformación que se genera entre la densidad de carga aplicada, en unidades de V/m. Esta constante es muy útil cuando se desea medir y detectar las más pequeñas variaciones de presión.

$$g = \frac{\text{tensión generada}}{\text{densidad de carga aplicada}} = \frac{\text{campo eléctrico generado}}{\text{tensión mecánica aplicada}}$$

$$g = \frac{E}{T} = \frac{S}{\sigma}$$

Esta constante se puede relacionar con la constante de carga piezoeléctrica y la permitividad relativa mediante la siguiente ecuación:

$$g = \frac{d}{\epsilon} \left[\frac{V \cdot m}{N} \right]$$

Cuanto mayor sea la constante piezoeléctrica g mayor es el voltaje generado por el piezoeléctrico por lo que deseamos una constante elevada.

- **Permitividad (ϵ)**

La permitividad ϵ es definida por la capacidad de un material a ser polarizado o por el desplazamiento eléctrico producido al ser sometido a un campo eléctrico. Esta constante viene acompañada de un superíndice, este puede representar una permitividad con una

tensión constante gracias al superíndice T o una permitividad con un desplazamiento constante gracias al superíndice S.

- T: Permitividad a tensión constante
- S: Permitividad a desplazamiento constante
- **Constante dieléctrica (K)**

Esta constante representa básicamente la relación entre la permitividad eléctrica del material y la permitividad en el vacío. Esta constante es por lo tanto también conocida como la permitividad relativa de un material. Permite definir cuánto es polarizado un material al ser sometido a un campo eléctrico. Se desea por lo tanto una alta constante dieléctrica.

$$K^T = \frac{\varepsilon^T}{\varepsilon_0}$$

$$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \left[\frac{C^2}{N \cdot m^2} \right]$$

- **Coefficiente de acoplamiento electromecánico**

El coeficiente de acoplamiento electromecánico, k, es un factor que nos permite conocer la fracción de energía eléctrica convertida a energía mecánica y viceversa. En concreto, el cuadrado del coeficiente de acoplamiento es igual a la relación entre la salida de energía mecánica (energía convertida) y la entrada de energía eléctrica (energía suministrada).

$$k^2 = \frac{\text{Energía convertida}}{\text{Energía suministrada}}$$

Este coeficiente se define también con subíndices, el primero indica la dirección en la que están colocados los electrodos y el segundo la dirección en la que se aplica o se desarrolla la energía mecánica. Idealmente, se desea disponer de un material con un alto coeficiente de acoplamiento electromecánico ya que esto significa que se logra una conversión más

eficiente de la energía. Sin embargo, este factor no tiene en cuenta las pérdidas dieléctricas ni mecánicas, ni tampoco la recuperación de energía no convertida.

Este factor nos permite conocer la eficiencia en la conversión de energía y se calcula mediante la relación entre la energía convertida y utilizable entregada por el elemento piezoeléctrico y la energía total que llega a absorber el elemento. Según esta medida, la tecnología piezoeléctrica en sistemas bien diseñados puede presentar eficiencias superiores al 90%.

- **Factor de calidad mecánico Q**

Este factor es proporcional a la eficiencia de vibración de nuestro dispositivo. Nos permite conocer cuanto de bueno es nuestro material amortiguando las oscilaciones mecánicas producidas. En aplicaciones de energía cuanto mayor es el factor, mejor es el dispositivo. El factor de calidad mecánico indica aproximadamente la relación entre energía almacenada y energía disipada durante un período de tiempo.

Una de las ecuaciones que permite definir este factor es la siguiente:

$$Q_m = \frac{f_n^2}{2\pi \cdot f_m \cdot Z_m(f_n^2 - f_m^2)}$$

- **Factor de disipación dieléctrica**

El factor de disipación dieléctrica es una importante propiedad del material piezoeléctrico y permite conocer las pérdidas dieléctricas de nuestro material. En una aplicación que requiera un buen aislamiento sería mejor utilizar un material con bajo factor de disipación dieléctrica. Se puede definir como la relación entre la resistencia resistiva en serie equivalente (ESR) y la magnitud de la reactancia de la capacitancia (X_c). El factor de disipación también se conoce como tangente de pérdidas o $\tan(\delta)$ donde el ángulo delta es la desviación desde 90° entre la tensión y la corriente para un condensador ideal.

$$DF = \tan(\delta) = \frac{ESR}{|X_c|}$$

- **Temperatura de Curie (T_c)**

La Temperatura de Curie es la temperatura crítica en la que los materiales ferroeléctricos y piezoeléctricos cambian de estructura cristalina, dejan de exhibir propiedades piezoeléctricas y pierden entonces su capacidad de polarización. Por encima de esta temperatura la relación entre polarización y campo eléctrico externo se representa mediante una función lineal. Ya no se produce el ciclo de histéresis en los procesos de polarización y despolarización [8]. Por lo tanto se podrá utilizar estos cristales siempre y cuando no nos acerquemos a esta temperatura.

4.3. Ecuaciones constitutivas de un material piezoeléctrico

Todos los dispositivos que contienen un material piezoeléctrico, muestran un funcionamiento que se ajusta a las ecuaciones constitutivas. La primera ecuación relaciona para los materiales piezoeléctricos sus propiedades mecánicas, las tensiones aplicadas con las deformaciones a través de las constantes elásticas además de la interacción con el campo eléctrico a través del tensor piezoeléctrico. Este tensor viene dado por el producto de la constante elástica correspondiente con la constante piezoeléctrica. La otra ecuación relaciona el vector desplazamiento eléctrico con el campo eléctrico a través de la constante dieléctrica y con la deformación a través también del tensor piezoeléctrico [9].

Las ecuaciones constitutivas son las siguientes:

$$T_i = c_{ij}^E S_j - e_{ij} E_j$$

$$D_i = e_{ij} S_j + \varepsilon_{ij}^S E_j$$

$$e_{ij} = c_{ii}^E d_{ij}$$

Donde:

- T estrés mecánico
- S es la deformación
- E es el campo eléctrico
- D es el vector desplazamiento eléctrico

- C es el tensor de constantes elásticas
- ε es la permitividad dieléctrica
- e es el tensor piezoeléctrico
- d es la constante piezoeléctrica

4.4. Modelo equivalente del elemento piezoeléctrico

4.4.1. Circuito mecánico

Para generar una mayor cantidad de energía eléctrica, los materiales piezoeléctricos necesitan estar sometidos a constantes deformaciones o vibraciones. Un disco piezoeléctrico produce una señal que puede estar relacionada con el comportamiento mecánico de una fuerza en un sistema masa-resorte-amortiguador como el de la figura 4.6. Estos sistemas permiten describir la vibración lineal de los recolectores de energía. A continuación observamos representado un esquema muy simple del funcionamiento del sistema:

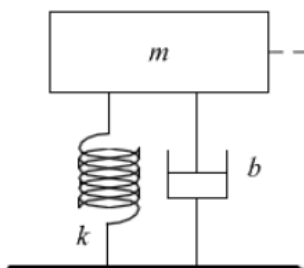


Figura 4.6 Sistema masa-resorte-amortiguador

Fuente: Mathworks

Este sistema recibe una fuerza externa vertical y está compuesto por m la masa del elemento piezoeléctrico, b el amortiguador que se puede separar en el amortiguamiento tanto eléctrico como mecánico y k que es la constante elástica o módulo de Young. Efectivamente, estos sistemas cuentan con una masa inercial que al ser sometida a una aceleración, esta comienza a oscilar a una frecuencia determinada impuesta por la tensión

mecánica aplicada. La ecuación que permite definir el comportamiento mecánico del piezoeléctrico es la siguiente:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F(t)$$

Donde $F(t)$ y $x(t)$ representan las señales de entrada y salida del modelo. La energía eléctrica producida por el desplazamiento o deformación que aparece se extrae del sistema mediante el uso de transductores.

4.4.2. Circuito eléctrico

Cada elemento del esquema mecánico puede compararse con uno del circuito eléctrico equivalente de un piezoeléctrico. La entrada $F(t)$ representa la aplicación de una tensión mecánica y puede ser representada mediante una fuente de tensión o corriente. El muelle de constante elástica k provoca una fuerza mediante energía potencial elástica y puede definirse también como la energía potencial que produce un condensador. La masa m es la encargada de producir energía cinética de movimiento como en el caso de una inductancia que es capaz de producir también energía cinética como un campo magnético. Finalmente el amortiguador de constante b permite disminuir las oscilaciones, y se puede comparar con una resistencia que permita disipar, en forma de calor, la energía eléctrica. Por lo tanto, la ecuación del movimiento del piezoeléctrico es análoga a la de un circuito RLC en serie:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{dV(t)}{dt}$$

El circuito equivalente se compondrá entonces de una resistencia, un condensador y una inductancia en serie que representarán las vibraciones mecánicas del cristal (RLC en serie) además de otro condensador que representará las conexiones eléctricas al cristal para poder medir la capacitancia externa [10].

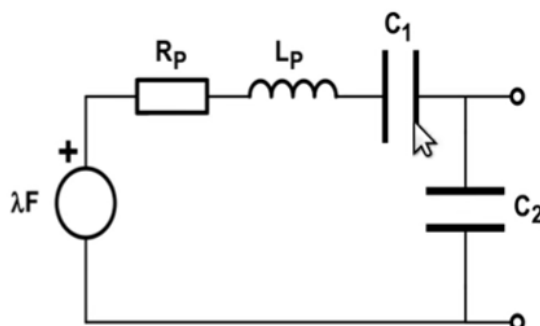


Figura 4.7 Circuito eléctrico equivalente un piezoeléctrico

Fuente: Arturo Martín Malmcrona

Existen muchas posibilidades para describir el comportamiento piezoeléctrico pero este es el que más se puede asemejar a nuestro proyecto.

4.5. Recuperación, acondicionamiento y almacenamiento de la energía generada

A continuación, estudiamos más en detalle el funcionamiento de todo el sistema que va a recuperar, acondicionar y almacenar la energía eléctrica generada.

4.5.1. Modelo del sistema 'Energy Harvesting'

En este proyecto nos centramos en un sistema de recuperación de energía de 'Energy Harvesting' que se basa en la recolección de vibraciones mecánicas a partir de una estructura mecánica que recibe una tensión. La finalidad del proyecto es poder alimentar cargas de baja potencia a partir de lo que generamos. Como solo se genera energía en momentos instantáneos, es necesario ir almacenando esa energía en una batería o condensador para su uso posterior. La baldosa piezoeléctrica genera una corriente alterna que debe ser acondicionada para obtener una corriente continua de salida y cargar de esta manera la batería. Todo el proceso de captación y transformación de la energía viene representado en la figura 4.8.

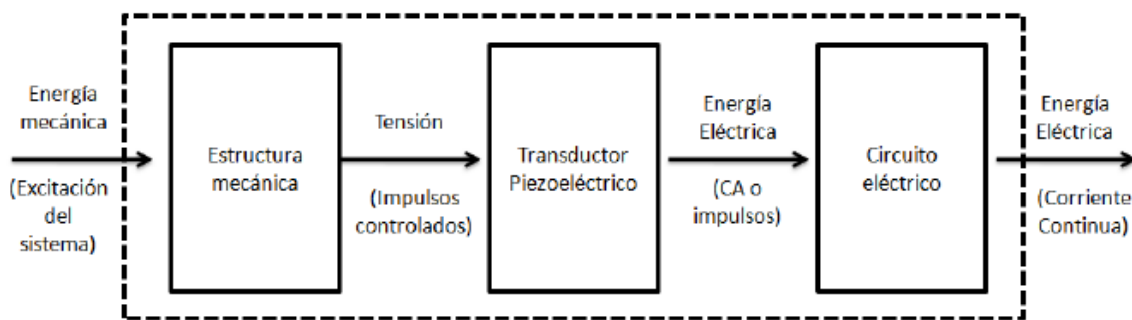


Figura 4.8 Proceso de recolección de energía mecánica y conversión a energía eléctrica

Fuente: Gómez Molina

4.5.2. Captación energía mecánica y transformación a energía eléctrica

La primera etapa consiste en captar la energía mecánica a partir de una estructura que lleva incorporados una serie de piezoeléctricos. Esta estructura debe ser diseñada con el fin de poder captar la mayor energía mecánica proveniente de la fuente externa y de poder transmitirla al elemento piezoeléctrico con las mínimas pérdidas posibles. Cada pisada humana sobre la estructura mecánica genera una tensión capaz de deformar lo suficiente el piezoeléctrico para que aparezca una corriente eléctrica. Los piezoeléctricos incorporados en esta estructura son los encargados de transformar la energía mecánica proveniente de las vibraciones del entorno en electricidad.

El comportamiento eléctrico de un sensor piezoeléctrico puede definirse como el fenómeno que sucede cuando este material ve alterada su forma y conduce a la aparición de una tensión entre las cargas opuestas. Efectivamente, se puede expresar en términos físicos como una fuerza aplicada a un cuerpo que lo deforma, y que este tiende a recuperar su forma inicial. El piezoeléctrico situado en la estructura debe ser capaz después de la pisada de volver a su forma inicial para poder volver a ser deformado con la siguiente pisada y de esta manera seguir generando electricidad.

4.5.3. Circuito eléctrico

Debemos disponer de un circuito electrónico para el acondicionamiento de la señal generada por el piezoeléctrico. El circuito consta de distintos elementos que permiten llevar

a cabo todo el proceso de acondicionamiento de la energía eléctrica. Efectivamente, la corriente eléctrica obtenida a la salida del piezoeléctrico es de tipo alterna, de forma sinusoidal, no está regulada y por lo tanto no puede ser utilizada directamente para cargar una batería.

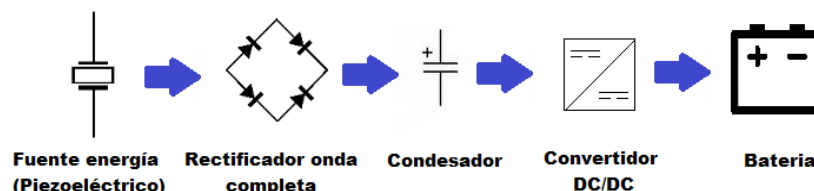


Figura 4.9 Componentes de un circuito acondicionador de corriente alterna

Fuente: Gómez Molina

4.5.3.1. Etapa de rectificación

En primer lugar, la señal alterna a la salida del piezoeléctrico debe ser rectificada y convertida a continua para permitir la carga posterior de la batería o para ser utilizada en aquellas aplicaciones de bajo consumo que necesitan un suministro de corriente continua. Se utiliza un puente rectificador de onda completa cuya función principal es la de convertir la corriente alterna en corriente continua. Un puente está compuesto por un conjunto de cuatro diodos encapsulados en un componente, conectados en un bucle cerrado que permiten la circulación de la corriente en un sentido. Esta señal tiene un semiciclo positivo y otro negativo, sólo dos diodos pueden conducir la electricidad en cada semiciclo. En cada uno de los semiciclos dos de los diodos se polarizan directamente y los otros dos se polarizan inversamente. En la figura de debajo se observa el funcionamiento y la circulación de la corriente en el semiciclo positivo.

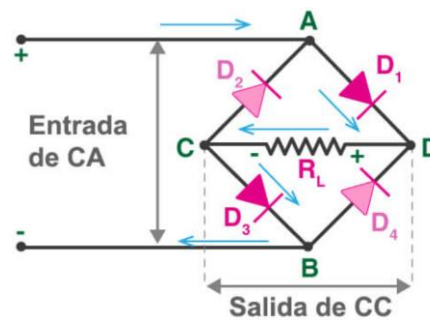


Figura 4.10 Flujo de corriente en el puente rectificador durante el semiciclo positivo

Fuente: Electrónica online

En ambos semiciclos la tensión obtenida a la salida es la misma pero invertida en el caso del semiciclo negativo. Después del rectificado las tensiones ya no se encuentran invertidas, todos los semiciclos se encuentran en la parte positiva (parte superior). En la figura 4.11 se observa la forma de onda sinusoidal típica de la corriente alterna. En la figura 4.12 vemos como la corriente, después de pasar por el puente rectificador, tiene todas las tensiones de un mismo lado.

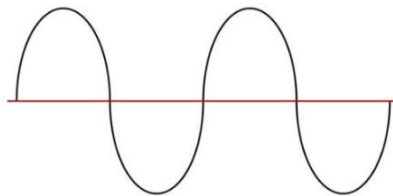


Figura 4.11 Onda sinusoidal de una corriente alterna

Fuente: elaboración propia

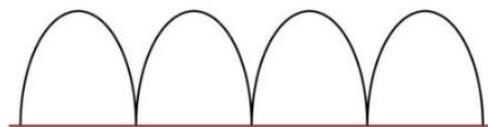


Figura 4.12 Onda sinusoidal después de pasar por el puente rectificador

Fuente: elaboración propia

El objetivo es obtener una señal continua por lo tanto debe ser lo más plana posible y la obtenida no lo es del todo ya que tiene un efecto llamado rizado. Este rizado puede ser suavizado a partir de un filtro basado en un condensador.

4.5.3.2. Etapa acondicionamiento

En segundo lugar, en la etapa de acondicionamiento se utiliza un condensador para filtrar la señal que sale del rectificador y que permite en gran parte eliminar el efecto de rizado y por lo tanto conseguir una señal aún más plana. Además, el condensador nos permite proteger la batería colocada en paralelo de los picos de voltaje elevados que producimos a cada pisada. A la salida del condensador la forma de onda es parecida a la de la figura 4.13, gracias al condensador se suaviza mucho la caída de la onda y se asemeja más a una onda continua.

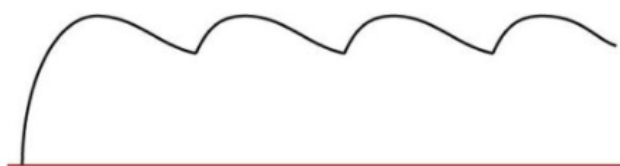


Figura 4.13 Onda sinusoidal suavizada tras el paso por el condensador

Fuente: elaboración propia

Aún así, se observa aún un poco de rizado en la parte superior de la onda, como en la figura 4.14, que hay que reducir si queremos conseguir una señal aún más horizontal. Aumentando la capacidad del condensador por ejemplo se consigue suavizar este rizado.

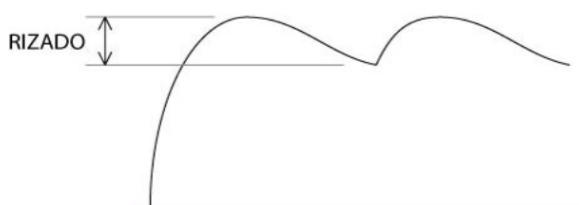


Figura 4.14 Rizado en la parte superior de la onda

Fuente: elaboración propia

En tercer lugar, añadiremos un diodo para evitar que la corriente circule en ambos sentidos, Mientras el condensador no está suficientemente cargado es la batería la que carga el condensador. Poniendo un diodo entre condensador y batería impedimos que esto suceda.

4.5.3.3. Etapa almacenamiento

Finalmente, la etapa final es la de la carga de la batería que permite almacenar la energía obtenida hasta el momento para su posterior uso. Existen distintos tipos de dispositivos para el almacenaje de la energía como los condensadores, los supercondensadores y las baterías. En primer lugar, el condensador almacena electricidad en forma de campo eléctrico estático entre dos placas de carga. En segundo lugar, los supercondensadores son muy parecidos a los condensadores con la simple diferencia de poder almacenar un campo eléctrico mucho más elevado. Estos, además de utilizar la electrostática para el almacenaje también tienen un electrolito que les permite mantener la carga eléctrica. En tercer lugar, las baterías son parecidas a los anteriores elementos en cuanto a su función ya que también permiten almacenar la energía eléctrica y liberarla en el momento deseado. En cambio, no usan la electrostática para almacenar la electricidad, usan la electroquímica. Es decir, dentro de la batería se encuentran dos terminales con un electrolito entre ellos que contiene iones. En el electrolito hay un separador que solo deja pasar los iones cargados de un lado al otro en el momento de carga de la batería. Aunque los supercondensadores duran mucho más tiempo que las baterías, estas permiten descargar la energía mucho más lentamente que ellos lo que les permite permanecer más tiempo sin recargarse. Por este último motivo, se ha decidido escoger la batería como dispositivo de carga de nuestro sistema ya que permitirá permanecer un tiempo sin la necesidad de recargar.

El objetivo por cumplir es poder almacenar la energía en un dispositivo para después poder reutilizarla. Para poder llevar esto a cabo necesitaremos un dispositivo capaz de cumplir esa función. La batería más adecuada para el prototipo y sus funcionalidades son las baterías de ion-litio ya que permiten almacenar energía en menos espacio que cualquier otra y tienen un bajo mantenimiento. Las baterías de ion-litio se componen por un electrodo negativo o ánodo de donde salen los electrones y un electrodo positivo o cátodo que los recibe a través de un electrolito. La batería se carga cuando los iones de litio se mueven de ánodo al cátodo produciendo una diferencia de potencial que hace que se produzca la corriente. Una vez cargada la batería los iones de litio regresan de ánodo al cátodo. Existen

dos tipos de baterías en función del tipo de celdas que contienen: las celdas cilíndricas utilizadas principalmente en vehículos eléctricos y las celdas planas que suelen estar implementadas en dispositivos electrónicos como pueden ser ordenadores, teléfonos móviles, cámaras, drones, etc.

4.5.3.4. Aplicación final

Una vez hemos rectificado, acondicionado y almacenado la corriente eléctrica, esta puede ser utilizada en una aplicación de bajo consumo, en nuestro caso el objetivo es el de iluminar unas farolas LED.

Además, hemos utilizado un placa de Arduino modelo UNO que nos permite estudiar nuestro circuito y sus propiedades. Este es una plataforma de hardware y software libre con microcontroladores que nos permiten grabar instrucciones que permitirán hacer funcionar el circuito a partir del código enviado. Este tipo de placas permiten programar una enorme cantidad de funciones a distintos dispositivos, son fáciles de utilizar y muy flexibles. Con el Arduino vamos a poder realizar unas pruebas básicas y conocer un poco más como se comportan los piezoeléctricos³.

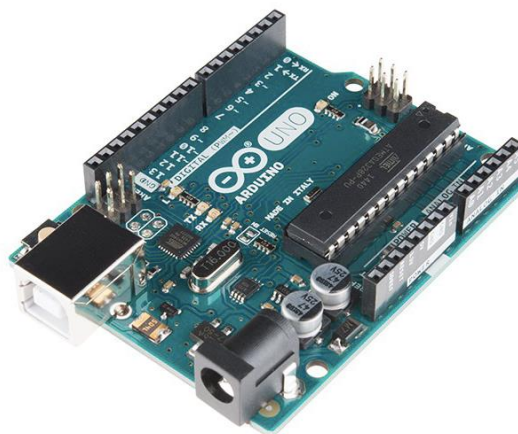


Figura 4.15 Arduino modelo UNO

Fuente: Arduino

³ Las pruebas realizadas con el Arduino están recopiladas en el anexo 2

5. Diseño del primer prototipo de baldosa

Este capítulo tiene como finalidad estudiar distintas opciones para la construcción del primer prototipo de baldosa. Para el diseño experimental del primer prototipo se tiene en cuenta el bajo presupuesto del que se dispone. Los sensores piezoeléctricos, condensadores y cargas industriales pueden tener unos precios elevados en el mercado, por lo que se utilizarán dispositivos más sencillos cuyas propiedades tienen que ser tenidas en cuenta en los resultados. Se estudiará además la forma geométrica de la baldosa, el número de piezoeléctricos, su colocación y su conexión entre ellos.

5.1. Elección de los componentes del prototipo

Para el diseño de nuestro primer prototipo hemos decidido estudiar, para cada etapa del circuito, varios elementos con distintas características y tamaños para hacer comparativas entre ellos. Todos los dispositivos electrónicos de los que disponemos para la realización del prototipo los hemos adquirido en DIOTRONIC, una tienda especializada en electrónica en Barcelona excepto los piezoeléctricos que los hemos adquirido a través de Amazon. Además, analizaremos varias disposiciones de piezoeléctricos para ver cual nos permite generar más corriente eléctrica siempre teniendo en cuenta el presupuesto del que disponemos. Gracias a las comparaciones escogeremos los dispositivos que nos permitan generar más energía.

5.1.1. Componentes piezoeléctricos

Para poder obtener la energía necesaria para alimentar nuestro circuito se utilizarán sensores piezoeléctricos. Se ha decidido optar por piezoeléctricos de cobre y de sección circular ya que son fáciles de obtener en el mercado y aseguran que el esfuerzo aplicado sea el mismo en toda la superficie.

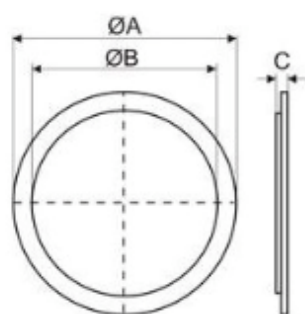
Las dimensiones y las propiedades características de los PZT utilizados son las siguientes



:

Figura 5.1 Disco piezoeléctrico

Fuente: Diotronic



Donde:

$$A = 27 \text{ mm}$$

$$B = 20 \text{ mm}$$

$$C = 0,18 \text{ mm}$$

Figura 5.2 Cotas disco piezoeléctrico

Fuente: elaboración propia

Propiedad	Valor
Frecuencia de resonancia	[4 - 0,5] kHz
Impedancia	300 ohmios (máx)
Capacidad	[20 - 30] % (1 kHz)

Tabla 5.1 Propiedades eléctricas elemento piezoeléctrico

Fuente: elaboración propia

Para decidir la distribución final de nuestro prototipo probaremos con dos tipos de distribuciones para verificar cual de ellas se adapta más a las características que buscamos: mayor rendimiento y mayor absorción de energía a través de los piezoeléctricos.

Hemos decidido distribuir los piezoeléctricos por toda la baldosa siguiendo un patrón rectangular de filas y columnas. Hemos situado piezoeléctricos por la totalidad de la baldosa ya que consideramos que de esta manera es más fácil captar energía proveniente de una pisada en un punto cualquiera de la baldosa. El primer factor que queremos analizar es cómo puede afectar el número de piezoeléctricos colocados en la baldosa. Otro de los conceptos que hemos tenido que tener en cuenta en el diseño de la distribución de los piezoeléctricos es si las conexiones entre ellos se hacen en serie o en paralelo. Si los conectamos todos en serie el voltaje será mayor, en cambio si los conectamos en paralelo, su capacidad e intensidad serán mayores. Para nuestro prototipo hemos decidido hacer una combinación de serie y paralelo, conectando los piezoeléctricos situados en las columnas en paralelo y conectando entonces las columnas independientes en serie entre ellas. Hemos decidido hacerlo de esta manera ya que, por un lado, al contener tantos discos piezoeléctricos las conexiones en paralelo nos permiten detectar más fácilmente que disco o columna puede estar fallando y cambiarlo por uno nuevo. Con las conexiones en serie conseguimos al mismo tiempo aumentar la intensidad de corriente.

Las dos distribuciones que probaremos serán las siguientes:

- Nuestro primer diseño consta de 9 piezoeléctricos distribuidos en 3 filas iguales de 3 piezoeléctricos.

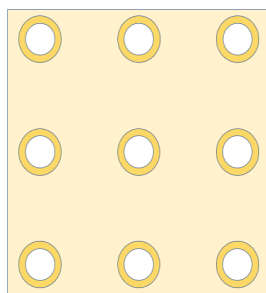


Figura 5.3 Primer diseño compuesto por 9 piezoeléctricos

Fuente: elaboración propia

Con la finalidad de observar qué pasa al aumentar el número de piezoeléctricos en una misma baldosa de mismas dimensiones, realizaremos un segundo prototipo.

- El segundo diseño está compuesto de 20 piezoeléctricos distribuidos en 5 filas de 4 piezoeléctricos cada una.

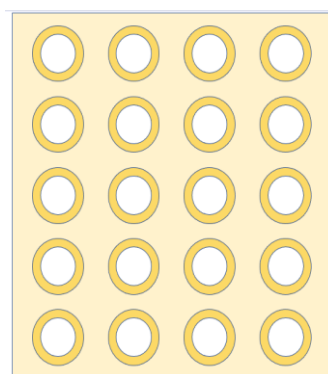


Figura 5.4 Segundo diseño compuesto por 20 piezoeléctricos

Fuente: elaboración propia

5.1.2. Componentes etapa de rectificación

Para la etapa de rectificación en la que se convierte la corriente alterna proveniente de la etapa de transducción en corriente continua se utiliza un puente de diodos. Para nuestro prototipo hemos decidido probar dos puentes rectificadores distintos y escoger el más adecuado para su desarrollo. Las propiedades de estos dos son las siguientes:



Puente Rectificador		Voltaje (V)	Intensidad (A)
KBPC606		600 V	6 A
B250R		250 V	2 A

Tabla 5.2 Propiedades eléctricas puentes rectificadores

Fuente: elaboración propia

5.1.3. Componentes etapa de acondicionamiento

La etapa de acondicionamiento, como ya hemos explicado en el capítulo 5, se utiliza un condensador para filtrar la señal y un diodo para evitar que la intensidad circule en sentido contrario.

En la etapa de acondicionamiento se ha decidido probar con tres condensadores electrolíticos radiales de distintas capacidades. Los condensadores electrolíticos se utilizan en circuitos con una alimentación directa continua. Este tipo de condensador permite filtrar bajas corrientes en un circuito con una relativa alta frecuencia. Si se quieren filtrar frecuencias más elevadas es mejor emplear un condensador cerámico. Sus principales ventajas son sus altos valores de capacidad, su pequeño tamaño y su relativo bajo coste de adquisición.



Figura 5.5 Condensador electrolítico

Fuente: Diotronic

Los 3 condensadores que disponemos para las pruebas son los siguientes:

Condensador Electrolítico Radial	Capacidad (μF)	Voltaje (V)
ELR68225	6800 μF	25 V
ELR47216	4700 μF	16 V
ELR33216	3300 μF	16 V

Tabla 5.3 Parámetros condensadores electrolíticos radiales

Fuente: elaboración propia

5.1.4. Componentes etapa de almacenamiento de la energía

Para almacenar la energía generada utilizaremos una batería de Litio con referencia L502248.

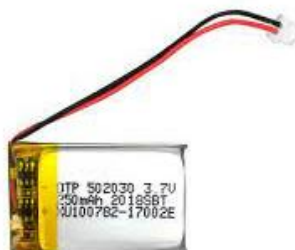


Figura 5.6 Batería de litio

Fuente: Diotronic

Las propiedades de la batería utilizada son las siguientes:

Característica	Valor
Tipo de batería	Li-Po
Tensión de trabajo	3,7 V
Capacidad	250 mAh
Salida	Cables
Medidas interiores	5x22x48 mm
Propiedades de baterías	protección PCB

Tabla 5.4 Propiedades eléctricas de la batería de litio

Fuente: elaboración propia

5.2. Construcción prototipo de la baldosa

Cada baldosa estará formada por 3 niveles distintos que son los siguientes:

- **Nivel superior:**

Pavimento en contacto directo con las pisadas. Debe ser de un material lo suficientemente resistente para soportar cargas e intercambiable en caso de desperfecto. Se utiliza una lámina de madera de 4 mm de espesor y de una dimensión de 25 x 15 cm. Esta lámina incorporará en la parte inferior unos tacos de apoyo que permiten el contacto directo y realizar más presión sobre los piezoeléctricos. Estudiaremos el comportamiento de dos pulsadores distintos, uno de un material más blando y otro más duro.

- **Nivel intermedio:**

Zona en la que se colocan los piezoeléctricos. Debemos determinar el número de piezoeléctricos que se colocará en cada baldosa y determinar el tipo de cableado entre ellos, es decir si los conectaremos en serie, paralelo o serie-paralelo. Además, irán adheridos a la base de la baldosa con una lámina de plástico para proteger los piezoeléctricos del contacto directo con la baldosa inferior y para aumentar el esfuerzo sobre ellos.

- **Nivel inferior:**

Consiste en la base de nuestra baldosa para la cual se utiliza una lámina de madera como la utilizada para el nivel superior.

5.3. Resultados teóricos

Antes de todo, realizaremos unos cálculos preliminares para conocer distintos datos necesarios para el desarrollo de nuestro prototipo. Estos valores teóricos obtenidos se comparan con los resultados obtenidos en una etapa posterior experimental.

$$V = -(g_{33} \cdot h \cdot \frac{F}{A})$$

Donde:

g_{33} = coeficiente de tensión piezoeléctrica en la dirección 3 de polarización (Vm/N)

h = grosor del disco piezoeléctrico (m)

F = fuerza aplicada sobre el elemento piezoeléctrico (N)

A = área efectiva del disco piezoeléctrico (m^2)

El coeficiente de tensión piezoeléctrica es un dato propio del piezoeléctrico en sí, en nuestro caso vale $14,8 \times 10^{-3} Vm/N$. Su grosor h es de $0,18 \times 10^{-3} m$.

Para calcular la fuerza que actúa sobre el piezoeléctrico usaremos la segunda ley de Newton como observamos en la siguiente ecuación:

$$F = m \cdot g$$

Donde:

m = es la masa del objeto que genera la carga, en nuestro caso de estudio se toma en consideración una masa de $50 (kg)$

g = es la constante de gravedad (m/s^2)

Utilizando una masa de $50 kg$ y con un valor de g de $9,81 m/s^2$ se obtiene:

$$F = 50 kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 490,5 N$$

El siguiente paso es determinar el área del piezoeléctrico involucrada en la generación de la

energía eléctrica:

$$A = \frac{\pi \cdot (D)^2}{4} = \frac{\pi \cdot (20 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Una vez obtenidos todos estos valores podemos determinar el valor teórico del voltaje piezoeléctrico generado por cada piezoeléctrico:

$$V = 14,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Vm}}{\text{N}} \cdot 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \frac{490,5 \text{ N}}{3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 4,16 \text{ V}$$

Por lo tanto, para un masa de 50 kg el valor teórico del voltaje que deberíamos obtener para nuestros piezoeléctricos es el siguiente:

g33 (Vm/N)	Grosor (m)	Área (m ²)	Masa (kg)	Carga aplicada F (N)	Voltaje (V)
14,8 x 10 ⁻³	0,18 x 10 ⁻³	3,14 x 10 ⁻⁴	50	490,5	4,16

Tabla 5.5 Valores teóricos obtenidos para una masa de 50kg

Fuente: elaboración propia

Los valores teóricos para distintas cargas son los siguientes:

Masa (kg)	Carga aplicada F (N)	Voltaje (V)
50	490,5	4,16
60	588,6	4,99
70	686,7	5,83
80	784,8	6,66

Tabla 5.6 Valores teóricos obtenidos para masas de 50, 60, 70 y 80 kg

Fuente: elaboración propia

Como podemos observar los voltajes generados por un piezoeléctrico son bastante elevados y aumentan en función de la carga aplicada. Sin embargo, la potencia generada a cada pisada y que podemos almacenar es mucho inferior. Esto es debido a los valores de intensidad de corriente bajos. Efectivamente, la potencia la podemos calcular como el producto del voltaje por la intensidad de corriente:

$$W = V \cdot I$$

Donde:

W : potencia generada a cada pisada (W)

V : voltaje a la salida del generador piezoeléctrico (V)

I : intensidad de corriente que circula por el circuito (A)

Como el sensor piezoeléctrico tiene una impedancia muy elevada (300 ohm), esto significa que nuestro circuito presenta más oposición a la corriente cuando aplicamos una tensión. Cuando la impedancia cae, el sistema puede suministrar más corriente y por lo tanto más potencia.

5.4. Resultados experimentales

La construcción y el análisis de distintos prototipos de baldosas y de circuitos es fundamental para el desarrollo más óptimo posible de nuestra baldosa final. Se utilizará para el análisis de dichos prototipos un multímetro digital VC830L para medir voltajes y el Arduino UNO para graficar la corriente generada. El objetivo es el de medir la potencia a la salida de nuestro sistema para poder comparar directamente la eficiencia de todos los prototipos.

5.4.1. Primeros ensayos sobre un elemento piezoeléctrico

En primer lugar, hemos decidido realizar dos ensayos eléctricos para conocer aproximadamente qué tensión y corriente es capaz de generar el sensor piezoeléctrico.

En el primer ensayo hemos realizado cinco tomas aplicando siempre un mismo peso (50 kg) en distintos discos para comparar los valores de tensión capaces de generar. Los valores obtenidos en cada toma para cada uno de los discos piezoeléctricos seleccionados se pueden observar en la tabla 6.6:

Peso 50 kg	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	Media (V)
Disco 1	3,51	2,23	4,23	4,76	2,96	3,538
Disco 2	2,87	3,25	3,62	2,44	4,23	3,282
Disco 3	3,74	4,35	2,81	3,89	3,66	3,69
Disco 4	12,79	11,45	8,68	11,13	8,20	10,45

Tabla 5.7 Medidas de los voltajes generados por 4 discos piezoeléctricos

Fuente: elaboración propia

Como podemos observar, cada disco piezoeléctrico genera un voltaje distinto a cada pisada y además se puede observar una gran diferencia de tensiones generadas entre algunos de los piezoeléctricos. Los 3 primeros discos que hemos escogido para los ensayos producen tensiones bastante parecidas del orden de los 3 - 4 V. En cambio, el cuarto piezoeléctrico escogido genera unas tensiones mucho más elevadas (10,45 V). El valor teórico del voltaje generado por nuestro piezoeléctrico calculado en el apartado 6.3 era de 4,16 V para una carga de 50 kg. Si calculamos el error (%) para cada disco:

Disco	Voltaje medio (V)	Error (%)
Disco 1	3,54	14,90
Disco 2	3,28	21,15
Disco 3	3,69	11,30
Disco 4	10,45	151,2

Tabla 5.8 Errores relativos para cada disco en la medida del voltaje

Fuente: elaboración propia

Podemos observar como claramente el disco 4 proporciona un voltaje muy elevado, con un error de más del 150% con respecto al valor teórico por lo que debe ser descartado. Como podemos observar no todos los piezoelectricos van a generar el mismo voltaje aunque se le aplique un mismo peso, deberemos tener en cuenta la existencia de errores en la toma de medidas y posibles defectos de fábrica.

A continuación, hemos decidido ver el comportamiento de un mismo disco piezoelectrico al ser sometido a distintos pesos obteniendo los resultados de la tabla 5.9.

Disco 1	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	Media (V)
50 kg	3,51	2,23	4,23	4,76	2,96	3,538
60 kg	4,56	4,13	3,60	2,91	3,93	3,826
70 kg	5,36	6,04	3,10	7,04	5,41	5,39
80 kg	5,99	5,36	7,56	8,01	4,33	6,25

Tabla 5.9 Medidas de los voltajes generados por un disco al variar la masa

Fuente: elaboración propia

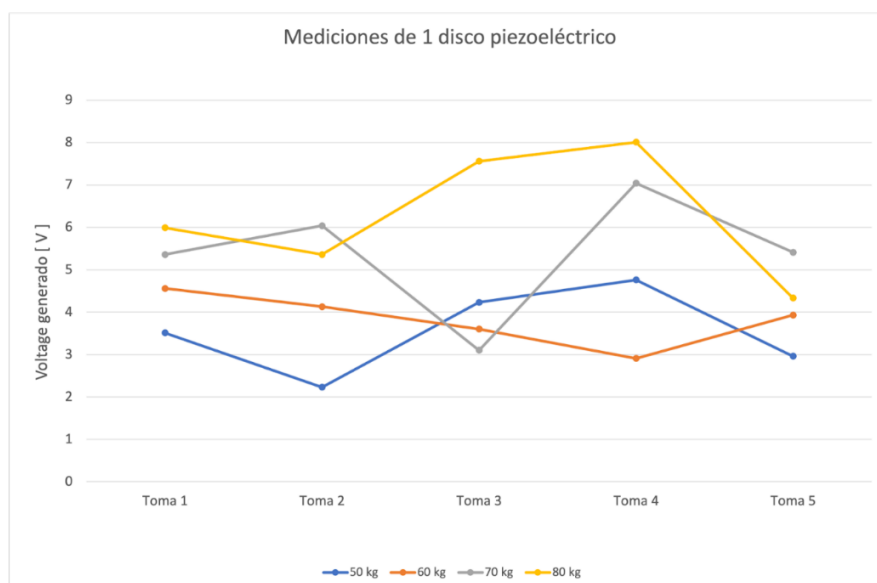


Figura 5.7 Comparación de los voltajes generados por un disco en función de la masa

Fuente: elaboración propia

En conclusión, a medida que aumentamos el peso aplicado en el disco el voltaje generado también aumenta. El aumento del voltaje generado va acorde con el aumento de peso, partiendo de un voltaje medio de 3,538 V con el peso más pequeño hasta 6,25 V hasta el peso más grande.

Si comparamos los valores obtenidos con los teóricos obtenemos la tabla siguiente:

Disco 1	Voltaje medio (V)	Voltaje teórico (V)	Error (%)
50 kg	3,54	4,16	14,90
60 kg	3,83	4,99	23,25
70 kg	5,39	5,83	7,48
80 kg	6,25	6,66	6,16

Tabla 5.10 Errores relativos en la medida del voltaje en función de la masa

Fuente: elaboración propia

Observamos que se produce un mayor error para los pesos más pequeños pero aún así podemos dar como buenos los resultados y atribuir esa diferencia a errores de medición y de fabricación del componente.

5.4.2. Ensayos sobre el ensamblaje de baldosa generadora de energía

5.4.2.1. Medición de tensiones

Para obtener los primeros resultados experimentales del ensamblaje de nuestro generador se realizarán a cada medida 10 pisadas sobre el prototipo y se calculará el valor medio de cada tensión. La tensión la medimos a la salida del conjunto de piezoeléctricos de cada diseño.

Realizaremos diferentes pruebas para comprobar que diseño es el más adecuado para nuestro prototipo final. En primer lugar, compararemos dos tipos de pulsador que colocaremos encima de cada disco piezoeléctrico para ver con cual generamos más voltaje. En segundo lugar compararemos cómo varían los valores de voltaje generados en función del número de piezoeléctricos que tenga el diseño.

Las distintas tensiones que mediremos son las siguientes:

- Tensión 1: tensión generada a la salida del conjunto de piezoeléctricos correspondiente a la tensión eléctrica producida por los transductores
 - Tensión 2: tensión obtenida a la salida del puente rectificador de diodos
 - Tensión 3: tensión que se acumula en el condensador
-
- **Primer diseño (9 piezoeléctricos)**

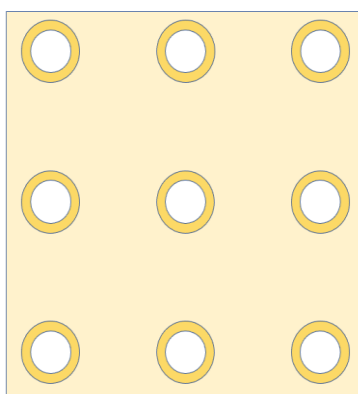


Figura 5.8 Primer diseño compuesto por 9 piezoeléctricos

Fuente: elaboración propia

El primer diseño construido ha sido el de la baldosa de 9 piezoeléctricos distribuidos en 3 filas con 3 piezoeléctricos cada una. En el mismo diseño hemos probado con un pulsador blando y un pulsador duro para averiguar cuál de los dos nos ayuda a generar más energía.

- **Pulsador blando**

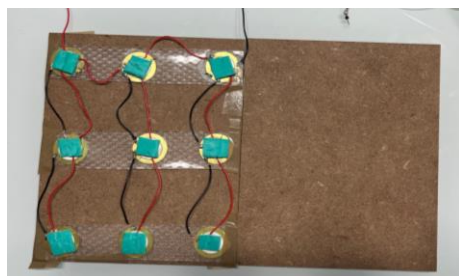


Figura 5.9 Fotografia del primer disseny de baldosa con pulsador blando

Fuente: elaboración propia

- Tensiones generadas por la pisada de una persona de 50 kg:

Nº de pisadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media (V)
Volts (V)	3,14	4,12	1,69	4,81	1,86	2,58	2,62	3,52	2,56	3,63	3,053

Tabla 5.11 Medidas del voltaje generado por el primer disseny con pulsador blando

Fuente: elaboración propia

- **Pulsador duro (PVC)**

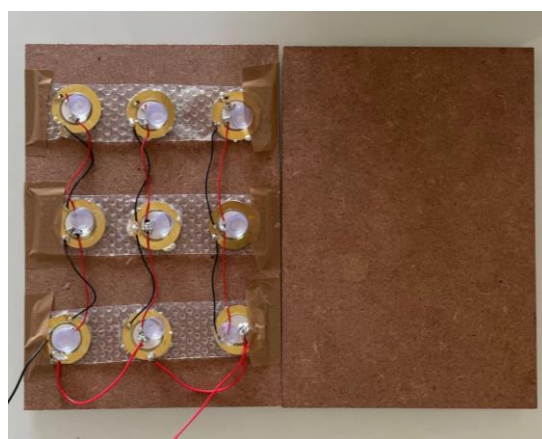


Figura 5.10 Fotografia del primer disseny de baldosa con pulsador duro

Fuente: elaboración propia

- Tensiones generadas por la pisada de una persona de 50 kg:

Nº de pisadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media (V)
Volts (V)	13,7	15,4	12,3	7,6	8,6	11,1	9,8	11,3	9,3	9,6	11,1

Tabla 5.12 Medidas del voltaje generado por el primer diseño con pulsador duro

Fuente: elaboración propia

Comparativa pulsadores:

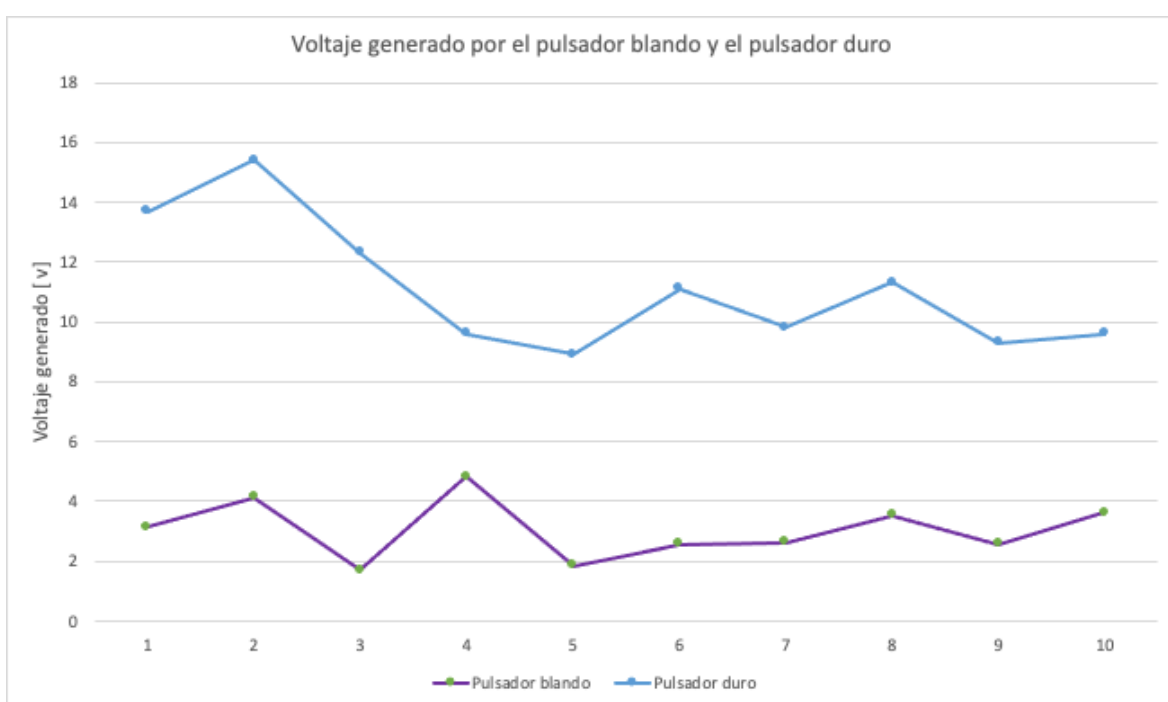


Figura 5.11 Comparación del voltaje generado en función del pulsador

Fuente: elaboración propia

Si comparamos los resultados obtenidos, el pulsador duro da unos valores más grandes al pulsador blando. Si utilizamos el pulsador blando da un voltaje de media de unos 3 V y el pulsador duro da un voltaje de media de unos 11 V. De acuerdo con los resultados utilizaremos el pulsador duro para nuestro prototipo final ya que da unos valores más elevados que si se utiliza el pulsador blando.

- **Segundo diseño (20 piezoeléctricos)**

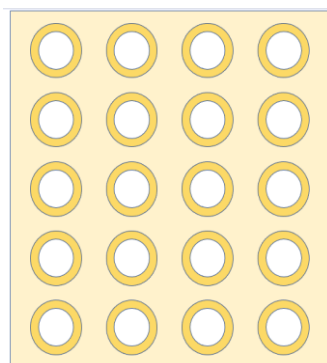


Figura 5.12 Segundo diseño compuesto por 20 piezoeléctricos

Fuente: elaboración propia

El segundo diseño construido ha sido el de la baldosa de 20 piezoeléctricos distribuidos en 5 filas con 4 piezoeléctricos cada una. Para la construcción de esta baldosa se ha optado ya directamente por los pulsadores duros después de comprobar que eran estos los que generaban mayores tensiones.



Figura 5.13 Fotografía del segundo diseño de baldosa con pulsador duro

Fuente: elaboración propia

- Tensiones generadas por la pisada de una persona de 50 kg:

Nº de pisadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media (V)
Volts (V)	22	18,4	20	19,4	17,6	20,5	18,6	22,6	18,5	19	19,66

Tabla 5.13 Medidas del voltaje generado por el segundo diseño con pulsador duro

Fuente: elaboración propia

Comparativa de los dos diseños:

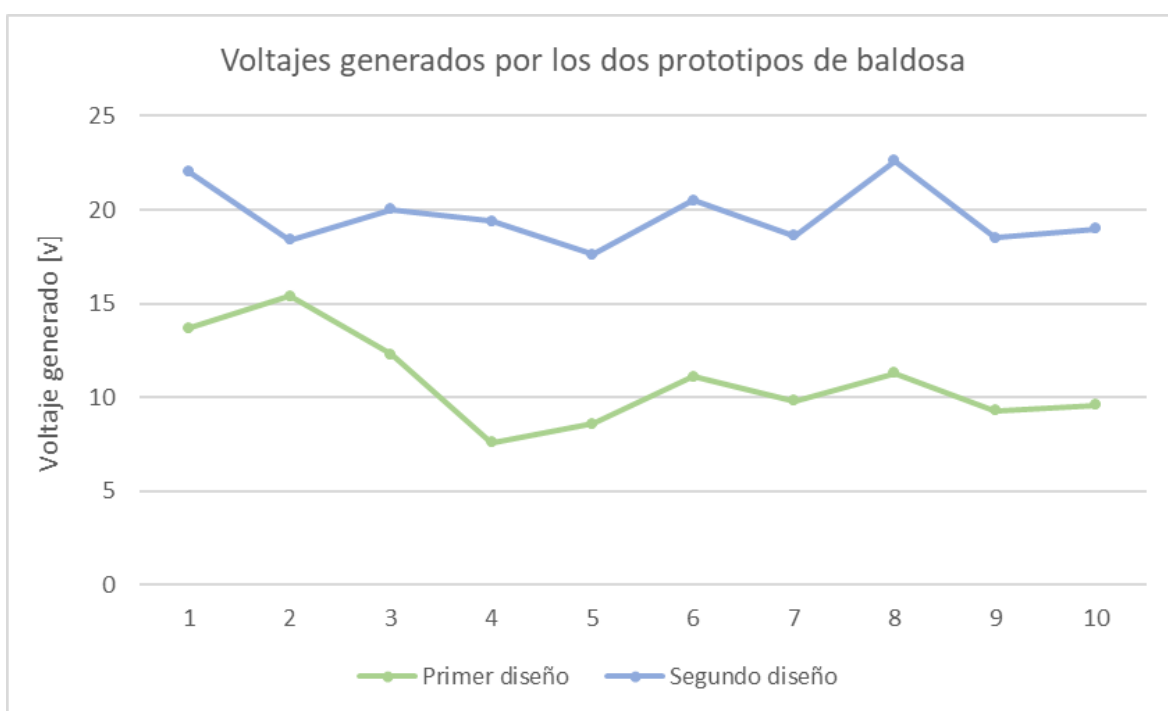


Figura 5.14 Comparación del voltaje generado en función del número de piezoeléctricos

Fuente: elaboración propia

Una vez obtenidos los valores de las tensiones obtenidas por el segundo prototipo hemos observado que al aumentar el número de piezoeléctricos en una misma baldosa, el voltaje generado también aumenta. El voltaje medio generado por el primer diseño era de 11,1 V

y para el segundo diseño es de 19,66V. Por lo tanto, hemos decidido quedarnos con el segundo diseño para el prototipo de baldosa generadora de energía ya que es el que nos permite producir más energía por pisada.

5.4.3. Ensayos sobre el circuito rectificador y acondicionador

Una vez hemos obtenido el diseño de prototipo de baldosa con el que realizaremos las demás pruebas hemos procedido al análisis de la comparativa de distintos dispositivos electrónicos para nuestro circuito rectificador y acondicionador de la señal alterna.

5.4.3.1. Medición de tensiones en el puente rectificador

- **Puente rectificador KBPC606**

Nº de pisadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	σ
Volts (V)	24,2	18,5	17,5	22,9	18	22,1	20,2	30,3	19,8	15,9	20,94	4,18

Tabla 5.14 Medidas del voltaje generado a la salida del puente rectificador KBPC606

Fuente: elaboración propia

- **Puente rectificador B250R**

Nº de pisadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	σ
Volts (V)	18,3	26,9	11,9	13,7	20,8	18,2	21	18,5	20,1	15,6	18,5	4,22

Tabla 5.15 Medidas del voltaje generado a la salida del puente rectificador B250R

Fuente: elaboración propia

Comparativa de los dos puentes rectificadores:

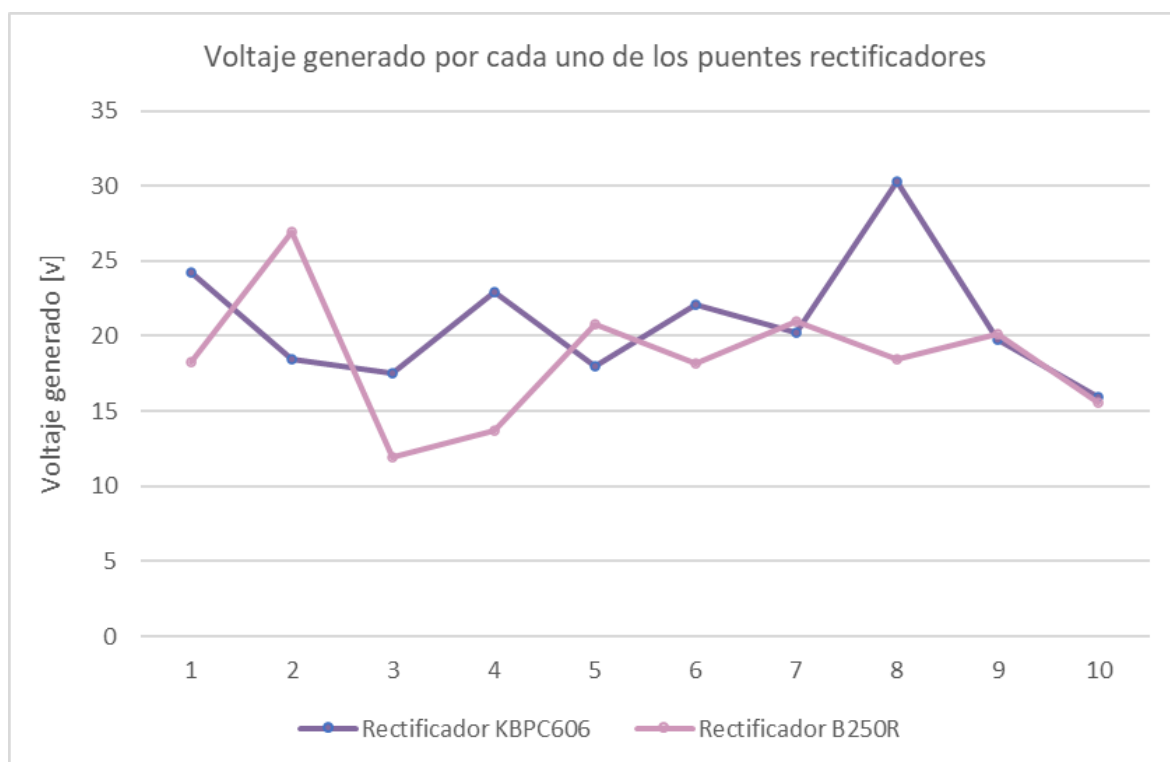


Figura 5.15 Comparación del voltaje generado en función del puente rectificador

Fuente: elaboración propia

Como podemos observar los dos puentes rectificadores dan valores de tensiones muy parecidos. Las desviaciones típicas de los dos son muy parecidas por lo que para los dos puentes los datos obtenidos están igual de dispersos. Aún así, con el puente rectificador KBPC606 obtenemos de media un voltaje de 20,9 V, más elevado que el del puente rectificador B250R de 18,5 V. Por lo tanto, el puente rectificador que formará parte de nuestro circuito eléctrico será el KBPC606.

5.4.3.2. Medición carga del condensador

- Condensador Electrolítico Radial ELR33216 (3300 μ F, 16 V)

Nº de pisadas	Inicio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
Carga (mV)	25	29	31	34	38	41	44	47	50	53	55	-
Incremento (mV)	-	4	2	3	4	3	3	3	3	3	2	3

Tabla 5.16 Medidas de la carga del condensador ELR33216 a cada pisada

Fuente: elaboración propia

- Condensador Electrolítico Radial ELR47216 (4700 μ F, 16 V)

Nº de pisadas	Inicio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
Carga (mV)	13	16	18	21	24	26	28	31	33	35	37	-
Incremento (mV)	-	3	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2,4

Tabla 5.17 Medidas de la carga del condensador ELR47216 a cada pisada

Fuente: elaboración propia

- Condensador Electrolítico Radial ELR68225 (6800 μ F, 25 V)

Nº de pisadas	Inicio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
Carga (mV)	8	9	11	12	14	15	17	18	20	21	23	-
Incremento (mV)	-	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1,5

Tabla 5.18 Medidas de la carga del condensador ELR68225 a cada pisada

Fuente: elaboración propia

A partir del circuito obtenido hasta el momento hemos procedido a analizar la carga de 3 condensadores distintos. Hemos observado que en función de su capacitancia un condensador tardará más o menos en cargarse. Cada condensador aumenta un valor muy parecido a cada pisada. El condensador de menos capacidad es el que aumenta más a cada pisada, de media unos 3 mV a cada paso. El condensador de más capacidad es el que aumenta menos a cada pisada, de media 1,5 mV por paso.

Finalmente, hemos decidido utilizar el condensador con menor capacidad, ya que trabajamos con valores muy pequeños de energía. A medida que aumentamos la capacidad del condensador se disminuye la intensidad y como con cada pisada se transmite muy poca intensidad, no nos interesa que se disminuya incluso más. Aun usando el condensador más pequeño ya tardará bastante tiempo en cargarse y por ese motivo no tiene sentido poner un condensador con mucha capacidad.

5.4.4. Carga de la batería

Por un lado, podemos determinar el tiempo que de carga de una batería a partir de la capacidad de carga de la batería (Ah) y del índice de carga (A):

$$\text{tiempo de carga (h)} = \frac{\text{capacidad de carga de la batería (Ah)}}{\text{índice de carga (A)}}$$

La batería que utilizamos para las pruebas con nuestro prototipo es de 3,7 V y tiene una capacidad de carga de 250 mAh. Gracias al voltímetro hemos visto que la intensidad que llega a la batería es muy pequeña, del orden de los 30 microamperios y por lo tanto la batería se carga muy lentamente.

$$\text{tiempo de carga (h)} = \frac{250 \cdot 10^{-3} \text{ Ah}}{30 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 8333,33 \text{ h} = 30 \cdot 10^6 \text{ s}$$

Como podemos observar, el tiempo de carga de la batería es realmente muy elevado. Hace

falta 8334 horas para cargar nuestra batería de litio.

Por otro lado, podemos conocer la energía que puede acumular nuestra batería de litio a partir de su capacidad de carga y del voltaje que proporciona la misma batería:

$$E_{alm} = \text{Cap. de carga} \cdot \text{Voltaje proporcionado} = 250 \cdot 10^{-3} \text{ Ah} \cdot 3,7 \text{ V} = 0,925 \text{ Wh}$$
$$E_{alm} = 0,925 \text{ Wh} \cdot 3600 \text{ s/h} = 3330 \text{ J}$$

Considerando que una pisada tiene una duración de unos 0,5s [13] calculamos la energía que puede generar una pisada en nuestro prototipo:

$$E_{pisada} = 19,66 \text{ V} \cdot 30 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 0,5 \text{ s} = 0,0002949 \text{ J}$$

Necesitamos realizar 11291964 pisadas sobre nuestro prototipo para cargar la batería de la que disponemos a 3330 J. Podemos observar por lo tanto que la energía generada por nuestro prototipo de 20 piezoeléctricos a cada pisada es realmente muy pequeña. Si queremos alimentar la batería con menos pisadas debemos ampliar nuestra baldosa.

6. Caso de estudio

El caso de estudio consiste ver la viabilidad de instalar un pavimento en una de las calles más concurridas de Barcelona capaz de generar electricidad gracias a la tecnología piezoeléctrica y las pisadas de la gente. A partir de un prototipo final de nuestra baldosa estudiaremos el tamaño de la instalación que nos permita iluminar 10 farolas LED de la misma calle.

6.1. Diseño final de la baldosa

6.1.1. Forma y geometría de la baldosa

Dado que nuestro prototipo genera muy poca electricidad hemos decidido aumentar el tamaño de la baldosa final y construirla a partir de 4 unidades del prototipo. De esta manera, la baldosa final estará compuesta por 80 piezoeléctricos con unas dimensiones de 30 x 50 cm. Esta nos permite generar más energía que con el prototipo a cada pisada.

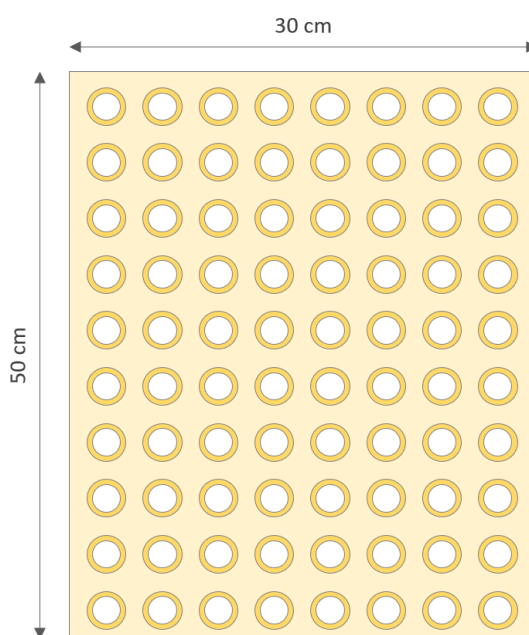


Figura 6.1 Diseño final compuesto por 80 piezoeléctricos

Fuente: elaboración propia

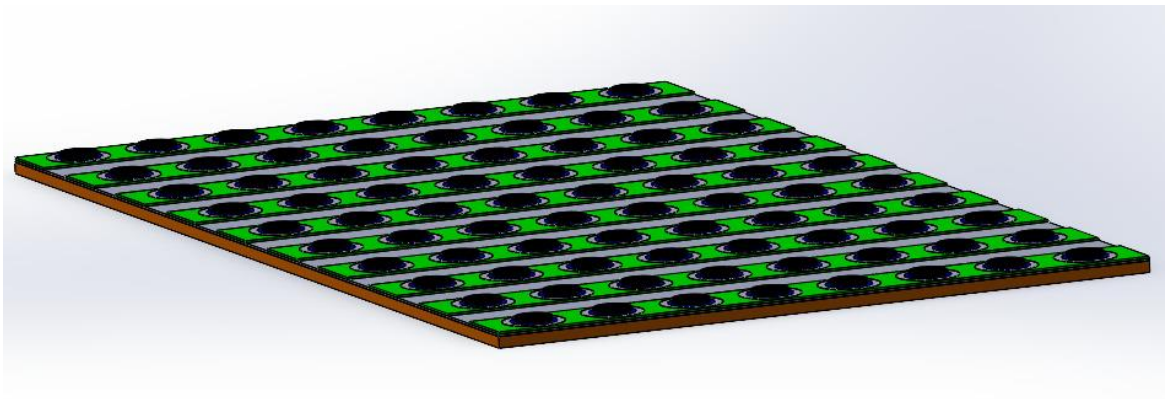


Figura 6.2 Vista isométrica baldosa final⁴

Fuente: elaboración propia

Cada baldosa tiene su propio circuito de acondicionamiento de la señal. Suponemos que al conectar los cuatro circuitos la potencia generada se multiplica por 4 y que por lo tanto a cada pisada sobre nuestra baldosa podemos llegar a generar 0,0011796 J. Aún así, la energía generada sigue siendo muy pequeña. Como es imposible que lleguemos a alimentar una batería con tan poca generación hemos pensado en la manera de mejorar nuestro prototipo y partiremos de los datos hipotéticos que obtendríamos para esa baldosa para el análisis de todo el capítulo.

Posibles mejoras para el aumento de la intensidad de corriente generada por los piezoeléctricos:

- Utilizar mejores sensores piezoeléctricos que generen más intensidad de corriente (con menos impedancia). Comprar piezoeléctricos con los que la intensidad de corriente sea del orden de 1 mA [14].
- Apilar varias capas de materiales piezoeléctricos para poder colocar más piezoeléctricos y aumentar la intensidad, también conocidos como “stacks” [10]. Si

⁴ Ver anexo 3 para ver las demás vistas de la baldosa

apilamos 10 capas de piezoeléctricos idénticas conectadas en paralelo conseguimos multiplicar por 10 la corriente y obtener un valor de I del orden de los 0,01 A

A partir de este nuevo valor de corriente procedemos a obtener los datos siguientes:

Parámetros	Prototipo 20 piezoeléctricos	Prototipo 80 piezoeléctricos	Baldosa final 1era mejora	Baldosa final 2a mejora
I (A)	0,00003	0,00012	0,004	0,04
E_{pisada} (J)	0,0002949	0,0011796	0,03932	0,3932
E_{pisada} (Wh)	$8,1917 \times 10^{-8}$	$3,2767 \times 10^{-7}$	$1,0922 \times 10^{-5}$	0,00010922

Tabla 6.1 Resumen de las energía generadas por pisada para cada prototipo

Fuente: elaboración propia

6.1.2. Material

Para el diseño final de la baldosa se debe tener en cuenta distintos factores como: la ubicación de ellas para determinar si se debe utilizar una baldosa apta para interiores o exteriores, las condiciones climáticas y ambientales del lugar de emplazamiento para evitar la corrosión y la oxidación, la afluencia de peatones para determinar la resistencia necesarias, las características del emplazamiento que van a permitir definir su tamaño y su geometría. La baldosa debe ser diseñada con unos ciertos requerimientos para conseguir su durabilidad en el tiempo y asegurar la seguridad de todos los peatones.

Nuestras prioridades son las de conseguir una baldosa :

- Rígida: debe permitir transmitir la energía del peatón al piezoeléctrico sin que se pierda

- Resistente a la abrasión: debe ser capaz de resistir al desgaste continuo generado por todas las pisadas
- Resistente a factores climáticos: debe poder hacer frente a condiciones climáticas extremos y muchos cambios sin sufrir graves deterioros o pérdidas de propiedades
- Fácil mantenimiento: debe contar con una facilidad para poder asegurar su mantenimiento y su cambio en el caso que fuese necesario
- Bajo peso: facilita el transporte de las baldosas y su cambio
- Bajo coste: nos interesa adquirir un material que no sea excesivamente caro

Después de haber estudiado las características principales de los materiales se ha decidido utilizar baldosas de Acrilonitrilo butadieno estireno que es también conocido como ABS. Este material está compuesto por tres monómeros y cada uno aporta características distintas. El acrilonitrilo aporta rigidez, es decir resistencia a los químicos, dureza y estabilidad a altas temperaturas. El butadieno, tenacidad a bajas temperatura y resistencia al impacto. Esta característica es ideal para la construcción de pavimentos por los que transita un gran flujo de peatones. El estireno aporta resistencia mecánica, rigidez, brillo y dureza. Por lo tanto el material tiene una capacidad de carga elevada y es un material que permite tener baldosas duraderas. La combinación de las propiedades de estos compuestos hace que el material sea de gran uso en equipos pesados y aparatos electrónicos. Además no suponen un alto costo de adquisición, son de un material reciclable y son fáciles de instalar. Como cumple todas las necesidades y especificaciones que necesitamos para construir nuestro modelo final, hemos decidido utilizar este material.

6.1.3. Unión baldosas

Para poder hacer la instalación de las baldosas hemos analizado qué materiales son los más adecuados para poder soldar las baldosas entre sí. Siguiendo la recomendación Servei Estació de la figura 6.3, podemos observar que recomiendan soldar las placas de ABS entre sí con MS (polímero MS, Silano Modificado) o cola epóxica.

PEGA / MONTA / SELLA

	MADERA	ABS	METACRILATO	CARTÓN	PAPEL	TEJIDO	POREX	ESPUMA	METAL	CORCHO	CRISTAL	GOMA	PVC
PVC	6/8	5/7	7/6	6	6	6	9	8	5	8	5	4/8	6
LÁTEX/ GOMA	8	4	8	8	6	6	9	8	8/4	8	7	4/8	4/8
CRISTAL	5/7	5/7	5/7	6	6	6	9	8	5	8	5/4	4	7
CORCHO	8	6/7	6/7	6/3	6/3	6	9	8	8/7	8	5/7	8	6
METAL	5/7	7	7	6	6	6	9	8	5	8	5/7	8/4	7
ESPUMA	8	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	8	8
POREX	9	9	9	9/3	9/3	9/3	9/3	9	9/7	9	7	9	9
TEJIDO	6	6	6	6/3	6	6/3	9/3	8	6	8	6	6	6
PAPEL	6	6	6	6/3	6/3	6/3	9/3	6	6	6	6	6	6
CARTÓN	6	6	6	6/3	6/3	6/3	9/3	8	8	8/3	6	8	6
METACRILATO	7	5/7	2/6	6	6	6	9	8	5/7	8	5/7	8	2/6
ABS	7	7/5	7/5	6	6	6	9	8	8	8	5/7	8	5/7
MADERA	3/7	7	7/5	3	6	6	9	8	7/5	8	5/7	8	7

1- ADHESIVO ABS (CEMENTO)

2- ACRYFIX

3- COLA BLANCA

4- CIANOCRILATO (SUPERGLUE)

5- COLA EPÓXICA

6- UNIVERSAL

7- MS (POLÍMERO MS, SILANO MODIFICADO)

8- COLA CONTACTO

9- CONTACTO POREX

Figura 6.3 Recomendación para la soldadura de distintos materiales

Fuente: Servei Estació

6.2. Consumo energético farola

Para poder determinar el número de baldosas necesarias para iluminar el tramo de la avenida debemos conocer el consumo energético para alimentar las farolas. Para poder determinar el consumo energético de cada farola debemos conocer la potencia en vatios de su bombilla que va especificada en su ficha técnica y el tiempo que necesita estar en funcionamiento. El tiempo de funcionamiento de las farolas es de media unas 4200 horas al año, es decir, unas 11,5 horas diarias.

$$\text{Consumo energético (Wh)} = \text{Potencia bombilla LED (W)} \cdot \text{tiempo de iluminación (h)}$$

Paralelamente al plan de incorporación de la tecnología LED en la iluminación de la ciudad de Barcelona, hemos decidido enfocarnos en la iluminación de diez farolas LEDs. Esta

nueva tecnología permite reducir el consumo eléctrico de las farolas un 75% en comparación con las antiguas. La tecnología LED tiene muchas ventajas entre las cuales podemos destacar una mejora de la calidad de la iluminación, una mejora de la visibilidad, un menor consumo energético, una mayor vida útil y por lo tanto un menor impacto ambiental.

En nuestro proyecto, se desea iluminar 10 farolas LED separadas cada una por 20 metros y con un consumo de potencia de 30W. El consumo escogido puede variar significativamente, depende de las necesidades que se tengan de disponer de más o menos iluminación en la vía. El consumo energético diario de cada una de estas farolas será de:

$$\text{Consumo energético diario (Wh)} = 30 \text{ W} \cdot 11.5 \text{ h} = 345 \text{ Wh}$$

El consumo energético de las 10 farolas es por lo tanto:

$$\text{Consumo energético diario total (kWh)} = 345 \text{ Wh} \cdot 10 \text{ farolas} = 3,45 \text{ kWh}$$

Y, para conocer el consumo energético anual multiplicamos por 365 días al año:

$$\text{Consumo energético anual (kWh)} = \frac{345}{1000} \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \cdot 365 \text{ días} = 126 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo energético anual total (kWh)} = 3,45 \text{ kWh} \cdot 365 \text{ días} = 1260 \text{ kWh}$$

6.3. Determinación de la batería necesaria para la iluminación de la farola LED

El funcionamiento de nuestro sistema consiste en recoger energía a partir de las pisadas humanas sobre unas baldosas capaces de generar energía eléctrica y poder cargar un paquete de baterías. Estas baterías son las encargadas por la noche de alimentar la fuente

de luz LED que ilumina la calle. Los elementos que debemos tener en cuenta a la hora de elegir nuestra batería de litio son los siguientes:

- **Capacidad (kWh):** cantidad de electricidad que puede almacenar
- **Potencia (kW):** cantidad de electricidad que puede ofrecer en un momento dado
- **Profundidad de descarga:** cantidad máxima de electricidad descargable sin riesgo
- **Horas de autonomía (h):** tiempo en el que debe ser capaz de suministrar energía eléctrica

Cada una de las 10 farolas se alimentará a partir de una batería con la capacidad suficiente para alimentarla de media unas 11,5 horas seguidas por día. La profundidad de descarga de una batería de litio suele oscilar entre el 80% y el 100%.

Para determinar la capacidad de la batería se utiliza la fórmula siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad de la batería (Wh)} \\ = \text{Consumo energético diario (Wh)} \cdot \frac{1}{\text{Profundidad de descarga}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad de la batería (Ah)} \\ = \frac{\text{Consumo energético diario (Wh)}}{\text{Voltaje de la batería (V)}} \cdot \frac{1}{\text{Profundidad de descarga}} \end{aligned}$$

El voltaje de la batería tiene que adecuarse al voltaje de funcionamiento de lo que queremos alimentar. Si consideramos una batería de litio de 6V que debe iluminar un LED de 30W con un consumo diario de 345 Wh, la capacidad diaria es de:

$$\text{Capacidad de la batería (Wh)} = 345 \text{ Wh} \cdot \frac{1}{0,8} = 431,25 \text{ Wh}$$

$$\text{Capacidad de la batería (Ah)} = \frac{345 \text{ Wh}}{6 \text{ V}} \cdot \frac{1}{0,8} = 72 \text{ Ah}$$

La capacidad total de la batería que necesitamos para alimentar a diario cada una de las farolas LED es de aproximadamente 72 Ah. Por lo tanto, necesitamos una batería de 72 Ah o un conjunto de baterías de menos capacidad conectadas en paralelo para aumentar la capacidad total de Amperios-hora y poder llegar a los 72 Ah. La conexión en paralelo de las baterías permite por lo tanto aumentar el tiempo de alimentación de un dispositivo sin tener que recurrir a baterías muy grandes.

Dado que nuestro generador no produce grandes cargas hemos decidido instalar varias baterías para alimentar 1 farola. Hemos decidido utilizar baterías de 6V y 3200 mAh para alimentar las farolas y para que puedan ser cargadas por nuestro generador. La energía que puede llegar a almacenar cada una de ellas es la siguiente:

$$E_{alm}(Wh) = Cap. de carga \cdot Voltaje proporcionado = 3200 \cdot 10^{-3} Ah \cdot 6 V = 19,2 Wh$$

$$E_{alm}(J) = 19,2 Wh \cdot 3600 s/h = 69120 J$$

Finalmente, determinamos la capacidad de la batería necesaria para toda la instalación en un año:

$$Capacidad de la batería (kWh) = 431,25 \cdot 10^{-3} kWh \cdot 10 farolas \cdot 365 días$$

$$= 1574,06 kWh$$

6.3.1. Determinación del número de baterías

Si cada farola necesita ser alimentada por una batería con capacidad de carga de 431,25 Wh para poder iluminar durante 11,5 horas consecutivas y disponemos de baterías con una capacidad de 19,2 Wh, necesitaremos 23 baterías:

$$n^{\circ} baterías necesarias = \frac{431,25 Wh}{19,2 Wh} = 22,46 \simeq 23 baterías$$

Por lo tanto necesitaremos 23 baterías por farola y 230 baterías para la instalación completa.

6.4. Estimación datos emplazamiento

6.4.1. Dimensión emplazamiento

Deben estudiarse las dimensiones del emplazamiento de nuestro dispositivo para poder conocer el número necesario de baldosas a colocar y su tamaño. La finalidad de nuestro proyecto es poder generar electricidad en un emplazamiento concreto y poder ser utilizada inmediatamente en ese espacio sin tener que ser transportada. Portal del Ángel es una avenida en una de las zonas más concurridas de la ciudad de Barcelona, la podemos observar en la figura 6.4. Para la colocación nos centraremos en el tramo superior de la avenida empezando en Plaza Cataluña con una longitud de 50 metros y un ancho de calzada de 20 metros. Las farolas están separadas por 10 metros y de cada lado de la calzada hay colocada una farola. Por lo tanto, si nos centramos en un tramo de 50 metros de largo, nuestro objetivo es el de iluminar 10 farolas situadas ahí. El área total del emplazamiento estudiada es de 1000 m² y el área correspondiente a cada farola es entonces de 100 m².



Figura 6.4 Fotografía de la Avenida Portal del Ángel en Barcelona

Fuente: Metropoli Abierta

Si una baldosa tiene unas dimensiones de 50 x 30 cm y un área de 0,15 m², el número máximo de baldosas que podemos instalar en el área total es de 6667 baldosas.

6.4.2. Determinación número de baldosas

Tenemos que el área disponible por farola es de 100 m² y que por cada farola hay 23 baterías instaladas. El área disponible por batería es por lo tanto de 4,35 m². Si el área de una baldosa es de 0,15 m², el máximo de baldosas que podemos instalar por cada batería es de 29 baldosas.

Calculamos la energía que podemos generar con 29 baldosas teniendo en cuenta que se genera energía durante 14 horas y que cada hora cada baldosa recibe alrededor de 720 pisadas:

$$E_{alm\ 29\ bat} = 0,00010922 \cdot 29 \cdot 720 \cdot 14 = 31,93\ Wh$$

La energía que generamos diariamente con 29 baldosas nos permite cargar perfectamente 1 de las baterías. Vamos a calcular entonces el número mínimo de baldosas que hacen falta para alimentar una de las baterías:

$$n^{\circ}\text{ baldosas mínimas} = \frac{19,2\ Wh}{0,00010922\ Wh \cdot 720\ pisadas \cdot 14\ h} = 17,43 \approx 18\ baldosas$$

Por lo tanto, necesitaremos 18 baldosas por batería, 414 baldosas por farola y 4140 baldosas para la instalación completa.

6.5. Distribución de las baldosas en el emplazamiento

Para la distribución de las baldosas hemos decidido centrarnos en tres zonas principales. Las dos primeras son los dos laterales de la calzada ya que estos dan a las entradas de las tiendas y por lo tanto habrá un mayor flujo peatonal. Además, cada persona que entre en una de las tiendas deberá pasar dos veces por las baldosas, al entrar y al salir por lo que se doblaría el número de pisadas sobre estas baldosas. La tercera zona en la que colocaremos también baldosas piezoeléctricas será en el tramo central de la avenida, donde intercalamos módulos de baldosas piezoeléctricas con módulos de baldosas clásicas. No colocaremos baldosas piezoeléctricas alrededor de las farolas ya que suponen un obstáculo para el peatón y se esquivan. En el esquema siguiente se puede observar las dimensiones de la instalación:

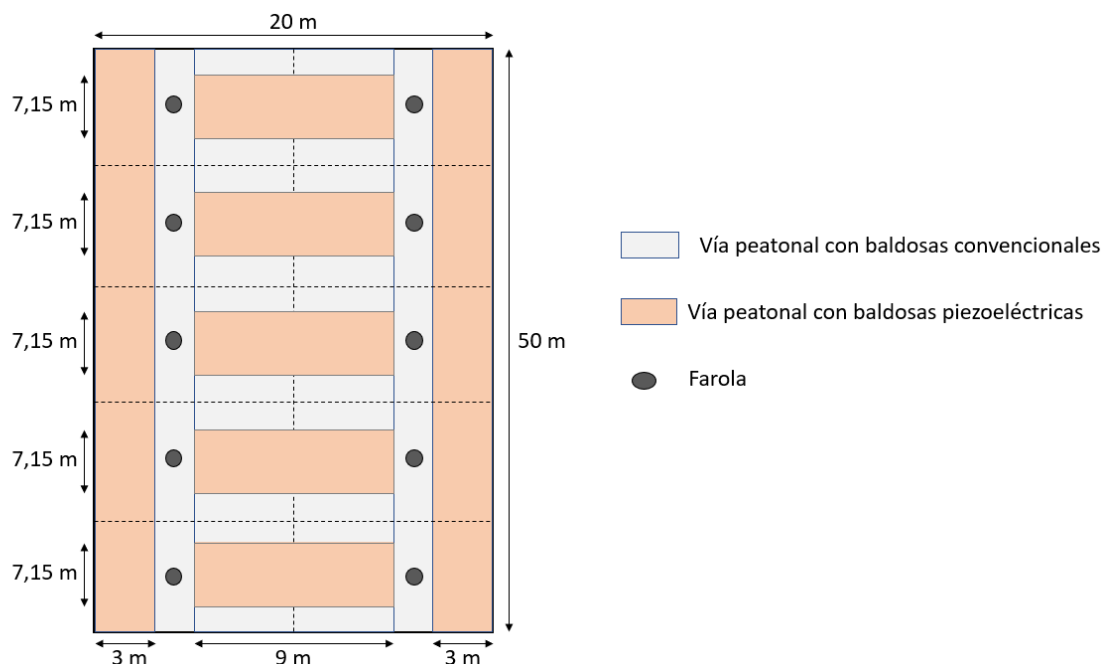


Figura 6.5 Vista superior de la instalación de baldosas piezoeléctricas en un tramo de la avenida Portal del Ángel

Fuente: elaboración propia

En cada tramo lateral (150 m^2) se colocará un módulo compuesto por 1000 baldosas. Por lo tanto, si sumamos los dos módulos laterales tendremos un total de 2000 baldosas. En el tramo central, se colocarán 5 módulos ($64,35 \text{ m}^2/\text{módulo}$) compuesto cada uno de ellos por 428 baldosas. Si sumamos los 5 módulos tenemos un total de 2140 baldosas en el tramo central. Finalmente, si sumamos todos los módulos de la intervención se colocarán un total de 4140 baldosas en 621 m^2 de los 1000 m^2 que habían disponibles. De esta manera, para cada farola se le destina alrededor de $62,1 \text{ m}^2$ de baldosas, lo que vienen a ser 414 baldosas por farola.

$$\text{Dimensión tramo lateral} = 3 \text{ m} \cdot 50 \text{ m} = 150 \text{ m}^2$$

$$\text{Dimensión 1 módulo} = 9 \text{ m} \cdot 7,15 \text{ m} = 64,3 \text{ m}^2$$

$$\text{Dimensión intervención 1 farola} = 3 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} + 4,5 \text{ m} \cdot 7,15 \text{ m} = 62,1 \text{ m}^2$$

$$\text{Dimensión intervención total} = 62,1 \text{ m} \cdot 10 \text{ farolas} = 621 \text{ m}^2$$

6.6. Resultados generación de energía por la instalación

Los requerimientos de energía diarios de la instalación son los siguientes:

	E_{alm} (Wh)	E_{alm} (J)
Área total	4312,5	15525000
Área 1 farola	431,25	1552500
Área 1 batería	19,2	69120

Tabla 6.2 Requerimientos diarios de energía

Fuente: elaboración propia

Efectivamente, podemos observar cómo con esta propuesta se podría llegar a generar la suficiente energía como para alimentar las 10 farolas durante 11,5 h:

Área	Área (m ²)	Nº baterías	Nº baldosas	E_{alm} (Wh)	E_{alm} (J)
Total	621	230	4140	4557,9	16408708
1 farola	62,1	23	414	455,8	1640870,8
1 batería	4,35	1	18	19,82	71342,21

Figura 6.6 Resumen de los resultados obtenidos para la instalación del pavimento piezoeléctrico

Fuente: elaboración propia

Finalmente, haciendo un balance de la energía generada anualmente por toda la instalación obtenemos unos valores de 1663,6 kWh/año.

7. Resultados y análisis

7.1. Presupuesto

En este capítulo se hará un estudio del costo del prototipo inicial y del modelo final. También se evaluará si implementar estas baldosas sale rentable a lo largo de los años de vida del prototipo y la rentabilidad de las baldosas.

7.1.1. Presupuesto prototipo inicial

El prototipo parte de unos productos con menor capacidad de los que se necesitan en el modelo final para poder evaluar el funcionamiento del circuito electrónico con componentes que necesiten menos energía ya que es más fácil de trabajar y poder obtener más resultados. De esta manera se pueden extrapolar los resultados para diseñar un modelo final. El costo de nuestro prototipo se resume en la tabla siguiente:

Componente	Proveedor	Unidades	Precio	Total (€)
Placa (15x25cm)	Servei Estació	2 ud	1,15 €/ud	2,30
Tacos de apoyo	Leroy Merlin	20 ud	0,13 €/ud	2,6
Lamina de plástico	Servei Estació	5 tiras de 3cmx16cm	0,04 €/ud	0,2
Cable	Diotronic	40 cm	0,27 €/m	0,108
Piezoeléctrico	Amazon	20 ud	0,30 €/ud	6
Rectificador de onda completa	Diotronic	1 ud	0,42 €/ud	0,42
Condensador	Diotronic	1 ud	0,35 €/ud	0,35
Batería	Diotronic	1 ud	6,26 € /ud	6,26
Precio total prototipo 20 piezoeléctricos				18,24

Tabla 7.1 Presupuesto del segundo diseño compuesto por 20 piezoeléctricos

Fuente: elaboración propia

7.1.2. Presupuesto prototipo final

Una vez obtenidos los resultados del prototipo inicial, hemos podido obtener unas conclusiones para poder diseñar el modelo final. Para ello hemos cambiado algunos componentes para mejorar el prototipo, entre ellos hemos cambiado el material de la placa para que sea más resistente al impacto y a las temperaturas, hemos cambiado los piezoeléctricos a otros que producen mucha más energía y hemos cambiado de batería por otra con más capacidad para poder suministrar adecuadamente la energía necesaria. Al hacer cambios en el diseño final también se han aumentado las unidades de cada componente, ya que nuestro modelo final estará compuesto de 10 capas con un circuito en cada una. El modelo final sería el equivalente a 4 unidades de nuestro prototipo con 10 circuitos por unidad.

El presupuesto está dividido en dos, por el hecho de que cada baldosa no tendrá una batería, sino que cada 18 baldosas habrá una batería y por esa razón hemos decidido separarlo. Una vez calculado el coste total de la baldosa hemos incrementado el precio y lo hemos nombrado precio de mercado, puesto que si estas baldosas salieran al mercado tendríamos un 60% de margen de beneficio.

- **Baldosa**

Componente	Unidades	Precio	Total (€)
Placa (30 x 50) cm	2 ud	13,95 €/ud	27,9
Tacos de apoyo	800 ud	0,02 €/ud	16
Lámina de plástico	200 tiras de 3cmx15cm	0,04 €/ud	8
Lámina ABS de separación de PZT	8 ud	5,41 €/ud	43,1
Cable	17 m	0,27 €/m	4,59
Piezoeléctrico	800 ud	0,20 €/ud	160

Componente	Unidades	Precio	Total (€)
Rectificador de onda completa	10	0,42 €/ud	4,2
Condensador	10	0,35 €/ud	3,5
Diodo	1	0,7 €/ud	0,7
Precio total baldosa final			268
Precio de mercado baldosa final (+60%)			670

Tabla 7.2 Presupuesto para la fabricación de la baldosa final y su precio de mercado

Fuente: elaboración propia

- **Batería**

Componente	Unidad	Precio	Total (€)
Batería	1	7,98 €/ud	7,98
Precio total 1 batería			7,98

Tabla 7.3 Presupuesto para la adquisición de una batería

Fuente: elaboración propia

Finalmente, el cálculo del presupuesto necesario para la obtención de las baldosas y las baterías necesarias para nuestro proyecto se resume en la siguiente tabla:

Componente	Unidades	Precio unitario (€)	Total (€)
Baldosas	4.140	670	2.773.800
Baterías	230	7,98	1.835,4
Precio total			2.775.635,4

Tabla 7.4 Presupuesto adquisición de baldosas y baterías necesarias en la intervención

Fuente: elaboración propia

7.1.3. Presupuesto instalación pavimento generador de electricidad

En conclusión, el presupuesto total de nuestro proyecto se basa en la implementación de 4.140 baldosas en 50 m de largo de la calle de Portal del Ángel para poder suministrar la energía durante 11,5 h diarias a 10 farolas. Para hacer un cálculo adecuado del presupuesto tendremos que tener en cuenta el material necesario, calculado en el apartado anterior, y el precio de la mano de obra del equipo para montar toda la instalación de baldosas.

Para calcular la mano de obra necesaria para instalar nuestras baldosas hemos hecho un cálculo aproximado del precio de la instalación. Generalmente, la instalación de baldosas en un pavimento de 100 m² puede variar entre 2.000 € hasta 15.000 €. Por lo tanto si en nuestro proyecto se tienen que instalar baldosas en un área total de 621 m², pues el precio podría variar entre 12.420 € hasta 93.150 €. Aun así, la instalación de las baldosas implica retocar la red de alumbrado para poder suministrar la energía producida por nuestras baldosas a las farolas, en consecuencia, el precio de la instalación aumentaría. Por esa razón, hemos decidido coger el valor más alto y el precio de la instalación sería de 22,5 €/baldosa. Cabe destacar que hacer una renovación del pavimento de una vía pública supone otros gastos que no hemos tenido en cuenta, por lo tanto, el presupuesto de llevar a cabo el proyecto en la vida real sería un poco más elevado.

Nuestro presupuesto final solo incluye el precio del material (baldosas y baterías) y de su instalación.

Presupuesto del proyecto	Total (€)
Material	2.775.635
Mano de obra	93.150
Precio total	2.868.785

Tabla 7.5 Presupuesto total de los costes de material y de mano de obra para la instalación del pavimento

Fuente: elaboración propia

7.1.4. Presupuesto desarrollo proyecto e investigación

Finalmente, en el presupuesto total también tenemos que tener en cuenta lo que ha supuesto económicamente el coste del personal dedicado a la investigación del proyecto además del desarrollo del prototipo. Para estimar el coste del proyecto tenemos en cuenta la participación dos recientes graduados en ingeniería y los siguientes aspectos:

- Un recién graduado de ingeniería cobra de media 15 €/hora.
- Cada investigador ha dedicado un total de 5 horas al día durante 84 días (28 semanas, 3 días/semana) por lo tanto un total de 420 horas.

$$\text{Tarifa coste personal} = 2 \cdot 15 \frac{\text{€}}{h} \cdot 420 h = 12\,600 \text{ €}$$

El coste del personal dedicado al desarrollo del proyecto en su integridad supone un valor total de 12 600 €.

A este coste también se le debe sumar el consumo energético de cada uno de los investigadores teniendo en cuenta:

- De las 420 horas dedicadas al proyecto consideramos que el 60% de ellas han estado dedicadas a la investigación y al desarrollo del trabajo escrito y el 40% de las horas restantes a la construcción del prototipo y a la toma de medidas. Por lo tanto, se ha trabajado con el ordenador un total de $420 \cdot 0,6 = 252$ horas por persona.
- Un ordenador consume una potencia de 60 W.
- Precio de 1 kWh se encuentra alrededor de los 0,20 €/kWh

$$\text{Gasto energético ordenadores} = 2 \cdot 60 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \cdot 252 h \cdot 0,20 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 6,05 \text{ €}$$

7.2. Viabilidad energética y económica

Uno de los mayores problemas a los que hacemos frente hoy en día es la falta de energía en el mundo entero. Nuestro proyecto plantea una manera más eficiente y respetuosa del medio ambiente para generar energía. En este punto del trabajo analizaremos la viabilidad económica del proyecto teniendo en cuenta los costes de implementación de la tecnología, su potencial para generar electricidad y el ahorro que permite hacer sobre la factura de energía eléctrica.

Fabricante	Pavengen	Energy Floors (SEF)	Baldosa propia
Forma	Triángulo equilátero	Cuadrada	Rectangular
Dimensiones	50 cm/lado x 8,95 cm	50x50x10 cm	50x30x15 cm
Potencia generada por pisada (W)	7	4-40	0,7864
Energía generada por pisada (J)	3,5	2-20	0,3932
Precio (€)	350	2000	670
Nº baldosas necesarias	470	150	4140
Inversión (€)	166077,44	305625	28666950
Energía anual generada (kWh)	1681,19	1686,3	1663,66
Ahorro anual (€)	336,24	337,26	332,73

Tabla 7.6 Resumen de los datos obtenidos para las baldosas de Pavengen, Energy Floors y la nuestra propia

Fuente: elaboración propia

Como podemos observar en la tabla 7.6 el valor de la energía generada por nuestras baldosas es mucho más pequeño que el que producen las baldosas de Pavegen y Energy Floors. Por esta razón necesitamos muchas más baldosas para producir la misma energía.

Nuestro proyecto supone en instalar un pavimento capaz de abastecer el consumo energético de 10 farolas. A partir de los datos obtenidos hemos visto que la instalación permitiría un ahorro energético anual de alrededor 330 € siendo nuestro coste de inversión del proyecto de casi 3 millones de euros. Sin tener que analizar más en detalle vemos que el proyecto no es rentable porque el coste es muy elevado para la poca energía que se genera, para poder recuperar la inversión y que el proyecto suponga un ahorro y no un gasto, deberían pasar demasiados años. Además, cabe destacar que las baldosas no tienen una vida útil tan larga como para que el proyecto salga rentable.

Por otro lado, las baldosas de Pavegen y Energy Floors suponen una inversión menor y producen mucha más energía. Aun así, estas baldosas no tienen una vida útil suficiente como para que la inversión salga rentable, ya que se estima que puedan dar uso un promedio de 5 años. Pavegen es la que tiene el coste total más bajo, pero aun así su inversión es alrededor de 500 veces el ahorro energético anual de las 10 farolas.

7.3. Impacto medioambiental y social del proyecto

7.3.1. Análisis impacto medioambiental del desarrollo del proyecto

Nuestro proyecto tiene como finalidad desarrollar nuevas vías de producción de energía eléctrica mediante la tecnología piezoeléctrica. Esta tecnología es limpia por lo que permite reducir las emisiones de dióxido de carbono y contribuir de este modo a conservar el medio ambiente. Además, el material utilizado para la construcción de la baldosa es reciclable lo contribuye también favorablemente a la reducción de la huella de carbono.

Para determinar la cantidad de CO₂ que se deja de emitir gracias a la implantación de nuestras baldosas piezoeléctricas debemos conocer el factor de emisión de CO₂ por kWh generado en la red eléctrica. Según la CNMC en 2021, el factor de emisión correspondiente al mix de la red eléctrica española es de 0,25 kg CO₂ por cada kWh que se produce.

Nuestra instalación compuesta por 4140 baldosas permite generar 1663,6 kWh/año de energía limpia. Esto equivale a un ahorro anual en las emisiones de CO₂ de:

$$\text{Ahorro } CO_2 = E_{gen} \cdot 0,25 \text{ kg } CO_2 = 415,9 \text{ kg } CO_2$$

También determinamos el ahorro en las emisiones de CO₂ que nos permite realizar una de nuestras baldosas anualmente. En un día puede llegar a generar 1,101 Wh lo que representa 401,86 Wh al año.

$$\text{Ahorro } CO_2 = E_{gen} \cdot 0,25 \text{ kg } CO_2 = 0,10047 \text{ kg } CO_2$$

Aún así, aunque una de las finalidades de nuestro proyecto es reducir las emisiones de CO₂, también estamos generando una huella de carbono durante el desarrollo del proyecto y de la investigación. Efectivamente, el proyecto se ha llevado a cabo por dos personas y cada una de ellas ha hecho uso de un ordenador portátil, consumiendo electricidad durante los meses de duración del trabajo y generando por lo tanto una huella de carbono. Los ordenadores portátiles consumen 60 W cada uno de ellos, para conocer el consumo total debemos conocer las horas totales en las que han estado en funcionamiento. Hemos considerado una duración del proyecto de 33 semanas y de entre las cuales se ha trabajado de media 28 semanas. Además, hemos tenido en cuenta que cada semana se ha trabajado de media 3 días y en cada uno de ellos de media 5 horas. La suma total de horas dedicadas por persona ha sido entonces de 420 horas. Podemos destacar que las horas requeridas para la realización del TFG son 360 horas por persona, pero la realización de la construcción del prototipo de baldosa ha provocado un aumento de las horas dedicadas. Finalmente, podemos conocer el consumo total de los ordenadores:

$$\text{Consumo ordenadores} = 2 \cdot 448 \text{ h} \cdot 60 \text{ W} = 50,4 \text{ kWh}$$

La huella de carbono que ha supuesto la realización del proyecto es de:

$$50,4 \text{ kWh} \cdot 0,25 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kWh}} = 12,6 \text{ kg } CO_2$$

7.3.2. Análisis impacto social del desarrollo del proyecto

Como ya hemos mencionado en la introducción del trabajo, hoy en día nos encontramos frente a una crisis medioambiental y un problema para generar y almacenar la energía. Uno de los objetivos del proyecto es exponer el problema ante el cual nos enfrentamos, los efectos que puede tener y de alguna manera aumentar la concienciación de la población sobre ello.

Mediante este proyecto de investigación y desarrollo pretendemos dar a conocer una nueva fuente de energía, la tecnología piezoeléctrica, aún muy poco estudiada y utilizada. Somos conscientes de la dificultad que existe hoy en día en producir grandes cantidades de energía y almacenarla sin contaminar. La tecnología estudiada es una interesante fuente de energía alternativa que permite generar energía, en muy pequeñas cantidades, pero suficiente para el sostenimiento de aplicaciones de bajo consumo de una ciudad.

Dando a conocer esta nueva fuente de energía, queremos concienciar a la población sobre la necesidad de encontrar alternativas para la generación de energía y de esta manera cuidar el medio ambiente. Además, este proyecto permite informar de la infinita cantidad de energía presente en nuestro día a día y que estamos desaprovechando. Puede ser el punto de partida para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan localizar esa energía perdida en el día a día y aprovecharla gracias a los recursos de los que disponemos. Este proyecto puede tener por lo tanto un impacto muy positivo sobre la población, fomentando la apuesta por energías renovables y limpias aún poco explotadas.

Conclusiones

En este apartado se presentan las principales conclusiones una vez obtenido el prototipo final de baldosa generadora de energía y haber realizado el caso de estudio de la instalación de un pavimento compuesto por estas baldosas. Además, se detallan las principales aportaciones que puede tener este trabajo en futuros proyectos y finalmente, se listan nuevas líneas de investigación que hemos pensado que podrían ayudar a enriquecer nuestro trabajo.

El objetivo principal del trabajo era el de construir una baldosa capaz de generar energía gracias a la pisada humana y de poder almacenarla en una batería para aprovecharla en otras aplicaciones. Después del desarrollo de un prototipo de baldosa y de las pruebas realizadas con él hemos obtenido las siguientes conclusiones:

- Se ha realizado una investigación sobre el concepto de 'Energy Harvesting' y de la piezoelectricidad que nos han permitido entender el funcionamiento y características principales vitales para el desarrollo de proyecto.
- Ante la crisis energética a la cual nos enfrentamos y la necesidad de producir más energía limpia hemos visto que sí que es posible producir energía a pequeña escala a partir de la tecnología piezoeléctrica.
- Otro de los problemas ante el cual nos enfrentábamos era la dificultad de almacenar la energía de forma práctica, fácil y barata. Hemos visto que gracias a nuestra baldosa, la energía generada es posible almacenarla en baterías muy pequeñas pero con un tiempo de carga muy elevado.
- Tras el desarrollo de varios diseños para la baldosa y su circuito acondicionador hemos llegado a un prototipo válido capaz de generar pequeñas cantidades de energía y de almacenarlas.
- Se ha conseguido partir de un prototipo inicial y, en base al presupuesto del que se disponía, al análisis de las medidas obtenidas y a la comparación de distintos componentes, hemos llegado a un prototipo final mejorado
- Aún así, en base a la investigación previa y al conocimiento de las propiedades de baldosas ya en el mercado, se esperaba que la cantidad de energía producida fuese mayor. Concluimos por lo tanto que podemos dar como válido el prototipo desarrollado pero que este tiene un gran margen de mejora.
- Hemos visto la posibilidad de instalar un pavimento de baldosas generadoras de energía en una de las calles más concurridas de Barcelona y alimentar gracias a él 10 farolas LED durante la noche.

- Aún así, nuestra baldosa presenta un gran problema que es la elevada cantidad de piezoeléctricos necesarios para producir la energía que alimentará las farolas. Efectivamente, nuestra baldosa requiere un conexionado demasiado grande y que puede presentar mucho más fácilmente errores de funcionamiento.
- Aún así, al analizar los costes de inversión de la instalación del pavimento y compararlos con el ahorro energético que supone, vemos que de momento no sale económicamente rentable. La energía producida por la pisada humana y que podemos recuperar no es lo suficientemente elevada.
- Sin embargo, podemos destacar el impacto positivo que tienen estas baldosas socialmente. Además de concienciar a la población sobre el problema energético ante el cual nos enfrentamos, fomentan la apuesta por el desarrollo de nuevas energías renovables y limpias.

Durante la investigación del proyecto hemos visto que de momento se conoce muy poco sobre la tecnología piezoeléctrica, son muy pocas las empresas que se dedican a su desarrollo por lo que los precios de las baldosas suelen ser muy elevados. Después de ver que los piezoeléctricos de los que disponemos generan muy poca energía se pueden seguir estudiando y desarrollando nuevos materiales que presenten mejores propiedades. Este trabajo puede ser el punto de partida para el desarrollo de nuevos proyectos que implementen la tecnología piezoeléctrica y que busquen mejorar la viabilidad económica y el rendimiento energético de estas baldosas.

Finalmente, después de haber realizado el estudio de viabilidad de la implementación de pavimentos generadores de energía hemos visto que lo que genera una simple pisada no es lo suficientemente elevado. Lo que sugerimos es buscar otras maneras para generar más electricidad usando de algún modo la tecnología piezoeléctrica. Una de las propuestas sería estudiar qué lugares son los más indicados para instalar estos pavimentos como por ejemplo lo podrían ser carreteras por donde circularsen muchos vehículos pesados. Otra de las propuestas podría ser el combinar la tecnología piezoeléctrica con otras energías renovables como por ejemplo la energía solar, la térmica o la eólica y alcanzar de este modo un mayor rendimiento energético.

Agradecimientos

Después de un largo proceso de trabajo podemos dar por finalizado este proyecto, pero no sin antes agradecer a todas aquellas personas que nos han acompañado durante todo el proceso.

Principalmente, nos gustaría agradecer a nuestro tutor José Luis Eguía Gómez por su disponibilidad y por guiarnos y ayudarnos a lo largo de todo el proyecto

También nos gustaría agradecer a los profesores que hemos tenido durante la carrera que han hecho que tengamos los conocimientos necesarios para poder hacer un proyecto en este campo y que no han dudado en resolver cualquier duda que surgiese.

Finalmente, nos gustaría agradecer a nuestros amigos y familia que nos han ayudado y dado soporte durante la realización del proyecto.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] VARGAS, J. *Ferroelectricidad y piezoelectricidad*. 2016.
- [2] PRENDES HURTADO, M. *Generación de energía mediante piezoeléctricos en vías ferroviarias*. 2016.
- [3] TWENERGY. *Sensores piezoeléctricos, una nueva forma de energía renovable*. 2019
- [4] JUVENTUD TÉCNICA. *Pavegen Systems : el fin de los pasos perdidos*. Medium, 2021.
- [5] ENERGY FLOORS. *Sustainable Energy Floor Specifications*. Issuu, 2013.
- [6] TORRES, N. *Oportunidades de energía renovable para una ciudad: energía cinética*. 2021.
- [7] LI, JING-FENG. *Lead-free Piezoelectric Materials*. 2021.
- [8] LEVKIN, D. *Piezo element*. 2022.
- [9] ERTURK, A., INMAN, D. *Piezoelectric Energy Harvesting*. Piezoelectric Constitutive Equations. 2011.
- [10] MARTÍN MALMCRONA, A. *Aplicaciones del efecto piezoelectricidad para la generación de energía*. Leganés, 2018.
- [11] GÓMEZ MOLINA, A. *Diseño de un Sistema de Energy Harvesting basado en piezoeléctricos*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Alcalá, 2018.
- [12] PALOMINO VERA, K. A. *Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte*. Lima, 2016.
- [13] MORRAS BARRIO, L. *Pisadas que no dejan huella: ¿Es viable producir energía al andar?*. 2019.
- [14] ZAPATA VALENCIA, D. R., BUSTAMANTE RUEDA, G. *Análisis de viabilidad para desarrollo de prototipo de acera que produce electricidad*. Medellín, 2012.

Bibliografía complementaria

- [15] AGATÓN AGUIRRE, F. J. *Análisis de factibilidad económica y ambiental de utilizar baldosas piezoeléctricas en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG)*.
- [16] ARANGO, A., CORTÉS, S. *Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía*. Revista Ciencias Estratégicas. Vol. 25(38). 2017.
- [17] DÁVILA, A., GÁMEZ E., MELO, G. y PIMIENTA, R. *Desarrollo de un prototipo de losa generadora de energía eléctrica usando sensores piezoeléctricos*. RenovaT 3(2), 81-8. 2019.
- [18] NATIONAL GEOGRAPHIC. *Unas baldosas generan energía con nuestras pisadas*. Medio Ambiente. 2012.
- [19] GUTIÉRREZ, A., BUTANDA, R., RODRÍGUEZ, A., NARANJILLO, J. *Proyecto de baldosa piezoeléctrica*. Universidad Politécnica de Guanajuato, 2016.
- [20] JIMÉNEZ MARTÍNEZ, F. J. *Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting*. 2017.
- [21] NORABUENA ALIAGA, F. V. *Estudio de la viabilidad técnica de un sistema de captación de energía piezoeléctrica con aplicación en plantillas de calzado deportivo*. Lima, 2021.
- [22] CAMBIO ENERGÉTICO. *¿Cómo elegir batería de litio para tu autoconsumo?*.
- [23] FERNÁNDEZ, Y. *Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno*. 2020.